



З'єднання металу з бетоном

Використання пост-встановлених
систем



Довідник, версія 1.0
Січень 2025

Зміст

ПЕРЕДМОВА	8
1. Вступ	9
2. Застосування	10
2.1 Елементи кріплення	11
2.2 Типи з'єднань	12
2.2.1 Основні з'єднання	13
2.2.2 Вторинні з'єднання	13
2.2.3 Тимчасові з'єднання	14
2.2.4 Неконструктивні з'єднання	14
3. Пост-встановлені системи кріплень	16
3.1 Несучі механізми	16
3.2 Класифікація кріплень	17
3.2.1 Механічні анкери	17
3.2.2 Хімічні анкери	18
3.2.3 Комбіновані механічні та хімічні анкери	18
3.3 Типи встановлення	19
3.4 Напрями навантаження	19
3.5 Типи навантажень	20
3.6 Режими руйнування анкерів	22
3.6.1 Режими руйнування при розтягу	22
3.6.2 Режими руйнування при зсуві	24
3.7 Фактори, що впливають на роботу анкерів	25
3.7.1 Основний матеріал	26
3.7.2 Монтаж	27
3.7.3 Умови навколишнього середовища	28
3.7.4 Типи навантаження	28
4. Нормативна база для сертифікації та розрахунку	31
4.1 Огляд європейської нормативної бази	31
4.2 Розрахунок і сертифікація пост-встановлених анкерів	33
4.3 Розрахунок пост-встановлених анкерів	34
4.3.1 Розрахунок і сфери застосування відповідно до EC2-4	34
4.3.2 Розрахунок анкерів за втомного навантаження (EOTA TR 061)	34
4.3.3 Розрахунок хімічних гвинтових анкерів (EOTA TR 075)	35

4.3.4	Розрахунок хімічних анкерів за дії вогню (EOTA TR 082)	35
4.4	Сертифікація пост-встановлених анкерів	35
4.4.1	Сертифікація механічних анкерів згідно з EAD 330232	35
4.4.2	Сертифікація хімічних і розпірних хімічних анкерів згідно з EAD 330499	36
4.4.3	Сертифікація механічних і хімічних анкерів згідно з EAD 330250	37
4.4.4	Сертифікація хімічних гвинтових анкерів згідно з EAD 332795	38
5.	Рішення Hilti	40
5.1	Критерії вибору типу анкера	40
5.1.1	Базовий матеріал — бетон та його властивості	40
5.1.2	Способи встановлення та конфігурації анкерів	41
5.1.3	Тип навантаження	41
5.1.4	Розподіл навантаження в групі анкерів	41
5.1.5	Умови навколишнього середовища	42
5.2	Рішення Hilti	43
5.3	Механічний чи хімічний анкер: коли який застосовувати?	46
5.4	Hilti як постачальник комплексних рішень	46
5.5	Етапи розрахунку та монтажу	47
5.6	Рішення SPEC2SITE	48
6.	Розрахунок анкерів	49
6.1	Принципи розрахунку	49
6.2	Конфігурації анкерів відповідно до EC2-4	49
6.3	Дії на кріплення (жорстка проти гнучкої опорної пластини)	50
6.3.1	Аналіз розтягувальних зусиль	51
6.3.2	Аналіз зсувних зусиль	51
6.4	Альтернативні підходи до розподілу зсувних сил згідно з fib Bulletin 58	53
6.5	Метод SOFA	53
6.5.1	Розподіл зсуву та розташування анкерів за методом SOFA	53
6.5.2	Метод SOFA забезпечує вищий опір для з'єднань з відступом із/без заповнення	54
6.6	Розрахунок анкерів при статичному навантаженні згідно з EC2-4	57
6.6.1	Перевірки анкерів при розтягувальному навантаженні	57
6.6.1.1	Руйнування сталі	59
6.6.1.2	Виколювання бетонного конуса	59
6.6.1.3	Виривання анкера з бетону	61
6.6.1.4	Розколювання бетону	61
6.6.1.5	Комбіноване виривання та виколювання бетонного конуса	63

6.6.1.6	Комбіноване виривання та виколювання бетонного конуса для гібридної системи (хімічний гвинтовий анкер у бетоні) згідно з EOTA TR 075	64
6.6.1.7	Виривання бетону	65
6.6.1.8	Список для підвищення ефективності анкера проти типів руйнування при розтягу	66
6.6.2	Перевірки анкерів при зсувному навантаженні	67
6.6.2.1	Руйнування сталі без плеча важеля	67
6.6.2.2	Руйнування сталі з плечем важеля	68
6.6.2.3	Виривання бетону при зсуві	68
6.6.2.4	Руйнування бетонної кромки	69
6.6.2.5	Список для підвищення ефективності анкера проти типів руйнування при зсуві	71
6.7	Розрахунок із урахуванням додаткового армування згідно з EC2-4	71
6.7.1	Додаткове армування, розраховане на сприйняття розтягу	72
6.7.1.1	Руйнування сталі	72
6.7.1.2	Руйнування анкерного кріплення	73
6.7.2	Додаткове армування, розраховане на сприйняття зсувного навантаження	73
6.7.2.1	Руйнування сталі	73
6.7.2.2	Руйнування анкерного кріплення	74
6.8	Взаємодія між розтягувальним і зсувним навантаженням	74
6.9	Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при статичному навантаженні	75
6.9.1	Розрахунок при статичному навантаженні без додаткового армування	75
6.9.1.1	Приклад розрахунку для механічних розпірних анкерів	75
6.9.1.2	Приклад розрахунку для гвинтового анкера в бетоні	80
6.9.2	Розрахунок при статичному навантаженні з додатковим армуванням	85
6.10	Розрахунок при сейсмічних діях згідно з EC2-4	89
6.10.1	Визначення сейсмічних дій	90
6.10.1.1	Вертикальні сейсмічні дії	90
6.10.1.2	Горизонтальні сейсмічні дії	91
6.10.2	Визначення сейсмічного опору анкерів	92
6.10.2.1	Розрахунок за принципом несучої здатності	93
6.10.2.2	Розрахунок за пружною моделлю	94
6.10.2.3	Розрахунок із урахуванням пластичності анкерів	94
6.10.2.4	Зміщення кріплень під час сейсмічної дії	96
6.10.3	Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при сейсмічному навантаженні	96
6.11	Розрахунок при впливі вогню згідно з EC2-4 та EOTA TR 082	102
6.11.1	Розрахунок при впливі вогню згідно з EC2-4	103
6.11.1.1	Перевірка при розтягувальному навантаженні	104
6.11.1.2	Перевірка при зсувному навантаженні	105

6.11.2	Розрахунок при впливі вогню згідно з EOTA TR 082	106
6.11.2.1	Спрощений метод	107
6.11.2.2	Метод інтеграції опору	108
6.11.3	Приклад розрахунку пост-встановленого анкера при впливі вогню	110
6.11.3.1	Приклад розрахунку для механічних анкерів	110
6.11.3.2	Приклад розрахунку для хімічних анкерів	113
6.12	Розрахунок при втомному навантаженні згідно з EC2-4 та EOTA TR 061	118
6.12.1	Область застосування та перевірка відповідно до EC2-4 та EOTA TR 061	118
6.12.2	Методи розрахунку згідно з EOTA TR 061	121
6.12.2.1	Метод I — повний метод	124
6.12.2.2	Метод II — спрощений метод	125
6.12.3	Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при втомному навантаженні	125
6.12.3.1	Приклад розрахунку для високочастотного втомного навантаження	125
6.12.3.2	Приклад розрахунку для низькочастотного втомного навантаження	130
6.13	Розрахунок пост-встановлених кріплень за EC2-4 (спрощені методи)	132
6.13.1	Розрахунок за методом А	132
6.13.2	Розрахунок за методом В	132
6.13.3	Розрахунок за методом С	132
6.14	Розрахунок надлишкових неконструктивних кріплень з EC2-4 та CEN/TR 17079	133
6.15	Перевірка бетонних елементів на дії від кріплень	133
7.	PROFIS Engineering Suite – проєктування в програмному забезпеченні	135
7.1	Вступ	135
7.2	Чому варто використовувати PROFIS Engineering Suite?	135
7.3	Розрахунок пост-встановлених анкерів для застосувань типу S2C у PROFIS	136
7.3.1	Властивості бетону та умови встановлення	136
7.3.2	Армування бетону та додаткове армування	137
7.3.3	Вибір типу опорної пластини	137
7.3.4	Вибір сталевого профілю	138
7.3.5	Типи розрахунків, доступні в PROFIS: жорстка та гнучка опорна пластина	138
7.3.6	Підбір відповідного анкера для конкретного застосування в PROFIS	140
7.3.7	Типи навантажень у PROFIS	141
7.3.8	Результати розрахунку, звіти та креслення	141
8.	Монтаж і огляд	143
8.1	Вступ	143
8.2	Вимоги Eurocode щодо правильної специфікації	143

8.3	Які етапи монтажу має виконати підрядник?	144
8.3.1	Розміщення опорної пластини / отворів	145
8.3.2	Свердління отворів у бетоні	146
8.3.2.1	Ударно-обертальні дрилі (перфоратори / HD), оснащені стандартними або хрестовими твердосплавними буровими насадками	147
8.3.2.2	Алмазне свердління з використанням технології вологого або сухого буріння (DD)	147
8.3.3	Очищення отворів	148
8.3.4	Встановлення анкера (механічні анкери)	148
8.3.5	Ін'єктування розчину (лише для хімічних анкерів)	149
8.3.6	Покращення практик на об'єкті за допомогою рішень spec2SITE	151
8.3.7	Технологія Hilti TraceFast	153
8.4	Огляд, випробування та контроль якості	154
8.5	Будівельні специфікації	156
8.6	Підтримка інженерних рішень від Hilti	156
9.	Референсні проєкти	158
9.1	Міст 231, Брно, Чеська Республіка	158
9.2	Престижний проєкт Mahalaxmi, Мумбаї, Індія	160
9.3	Проєкт реконструкції UOB, Таїланд	162
9.4	Комплекс робіт MAHSR Track, Гуджарат, Індія	164
9.5	Спортивний парк Kai Tak, Гонконг	166
Автори		168
Подяки		168
Список джерел		169

ПЕРЕДМОВА

Сара Каттанео
Професор, Politecnico di Milano, Італія
Факультет архітектури, будівельного середовища та інженерії будівництва



У динамічному світі будівництва та розвитку інфраструктури вимоги до автоматизації й конструктивної універсальності зумовлюють широке застосування пост-встановлених систем як для підсилення, так і для нових конструкцій. Саме тому в останні десятиліття було докладено значних зусиль для розроблення різних типів надійних кріплень і відповідних методів розрахунку, здатних задовольнити складні конструкційні та неконструкційні вимоги. Проектування з'єднань металу з бетоном потребує ретельного вибору з-поміж численних систем кріплення (механічних, хімічних тощо) з урахуванням різних умов застосування (розмірні обмеження, специфічні навантаження, вплив навколишнього середовища).

Цей довідник створено як всеохопний посібник, що допомагає орієнтуватися у складній сфері проектування та виконання пост-встановлених кріплень у з'єднаннях металу з бетоном. У ньому детально розглядаються аспекти вибору, монтажу та оцінки ефективності кріплень, надаючи значний обсяг знань для інженерів, які лише починають працювати з цими системами або прагнуть поглибити свій досвід. Варто відзначити вагомий внесок компанії Hilti, чия науково-дослідна робота, накопичений досвід і відданість високим стандартам якості сприяли розвитку цієї галузі. Саме завдяки таким зусиллям стало можливим створення цього довідника — орієнтира для спеціалістів, які шукають точність і впевненість у проектуванні з'єднань «метал-бетон». Матеріал подано у логічній послідовності: від опису несучих механізмів і класифікації систем кріплення до аналізу режимів руйнування під різними напрямками навантажень і факторів, що впливають на роботу анкерів.

Один із ключових розділів присвячений нормативній базі для сертифікації та розрахунку, де описано історію розвитку методів оцінки та останні оновлення підходів до проектування. У ньому подано чітке пояснення сфер застосування та меж кожного нормативного документа. Розділ «Hilti Рішення» має практичне значення — він допомагає фахівцям підібрати оптимальне рішення для конкретного проєкту з урахуванням усіх можливих умов. Розрахунковий розділ подає сучасні методи розрахунку: поряд із підходом Eurocode 2 наведено альтернативні методики, підтверджені документами з доведеною науковою достовірністю (fib, EOTA TR). Такі методи, відомі лише фахівцям у цій галузі, дають змогу виконувати розрахунок навіть для з'єднань, не охоплених стандартом EC2-4 (наприклад, зі гнучкими опорними пластинами). Кожен підрозділ містить збалансоване поєднання теоретичних знань і практичних прикладів, підкріплених кейсами та прикладами застосувань.

Хоча користувач може виконувати розрахунки з'єднань металу з бетоном вручну, Hilti також пропонує зручний програмний інструмент — PROFIS Engineering Suite, який допомагає швидко оптимізувати рішення та уникнути помилок ручних обчислень. У кінці довідника наведено короткий посібник із використання програмного забезпечення, а також розділи, присвячені монтажу та інспекції, що формують повну картину процесу створення з'єднань металу з бетоном.

Із розвитком будівельної галузі надзвичайно важливо розуміти технології, що визначають її прогрес. Цей довідник є орієнтиром сучасних практик і новітніх тенденцій. Він стане незамінним помічником для інженерів, адже допомагає обрати систему та параметри для оптимізації з'єднання. Вважаю, що цей посібник стане цінним ресурсом як для тих, хто лише починає знайомство зі світом з'єднань «метал-бетон», так і для досвідчених фахівців, які беруть участь в інноваційних проєктах, що вимагають найвищої технічної компетентності.

1. ВСТУП

Сучасна будівельна галузь є надзвичайно динамічним середовищем через вимоги до продуктивності, змінні потреби замовників, можливі помилки у розташуванні з'єднань, політичні та економічні чинники, а також зміни у місцевих нормах і регламентах. Проективальникам часто доводиться неодноразово вносити зміни до проєктів, адаптуючись до нових умов і забезпечуючи відповідність оновленим стандартам. Загальноприйнятою практикою є приєднання конструкційних і неконструкційних елементів до армованих бетонних елементів, виготовлених раніше, із використанням **пост-встановлених з'єднань**. Протягом понад 40 років розвиток таких рішень зробив їх надійною альтернативою, що дозволяє суттєво скоротити час проєктування кожного елемента конструкції до бетонування, а також забезпечити ефективне з'єднання у вже наявних спорудах. У деяких випадках пост-встановлені з'єднання використовують для ремонту та підсилення існуючих конструкцій, підвищуючи їхню міцність, довговічність і безпеку. Серед численних застосувань для з'єднання нових і існуючих елементів (наприклад, сталевих пластин або профілів з існуючим бетоном, нового бетонного елемента з уже наявним, нового сталевого елемента зі старим бетоном тощо) цей довідник зосереджується на **з'єднаннях металу з бетоном** (див. Розділ 2).

Цей довідник допоможе зрозуміти сучасні механізми сприйняття навантажень (Розділ 3) і нормативну базу для сертифікації та розрахунку пост-встановлених S2C-з'єднань (Розділ 4). Також представлено рішення Hilti, які охоплюють різні типи систем кріплення (Розділ 5), допомагаючи обрати найвідповідніше рішення для конкретного застосування. Окрім того, довідник містить детальні методи розрахунку для різних типів навантажень і впливів середовища — статичних, сейсмічних, пожежних і втомних — згідно з європейськими нормативами (Розділ 6). Особливу увагу приділено функціональним можливостям програмного забезпечення Hilti PROFIS Engineering (Розділ 7), а також аспектам монтажу та інспекції, які є ключовими для забезпечення надійності змонтованих систем (Розділ 8). Наприкінці довідника наведено приклади референсних проєктів, у яких використовувались пост-встановлені анкерні системи Hilti (Розділ 9).

Основна мета цього довідника — надати фахівцям інженерну підтримку під час проєктування з'єднань типу S2C. Крім того, він буде корисним для підрядників, внутрішніх технічних команд та інших спеціалістів, які прямо або опосередковано беруть участь у реалізації таких рішень.



2. ЗАСТОСУВАННЯ

На будівельному майданчику може бути представлено багато різних типів з'єднань метал-бетон (S2C). Такі з'єднання застосовуються як у конструктивних, так і у неконструктивних випадках. Цей тип з'єднань уже добре відомий проектувальникам і використовується у багатьох сферах — будівництві, інфраструктурі, промисловості тощо. До категорії **конструктивних** з'єднань належать елементи, такі як сталеві колони, балки та розпірки, що передають навантаження на бетон.

Неконструктивні з'єднання охоплюють кріплення інженерних мереж, обладнання, фасадних систем та інших елементів, необхідних для функціонування будівлі чи споруди. Якщо закладні елементи, наприклад болти або анкерні профілі, були змонтовані з відхиленням від проєкту, ми маємо справу з **непередбаченими** з'єднаннями. Коли проєкт вимагає гнучкості, пост-встановлені анкери є зручним рішенням для **передбачених з'єднань**.

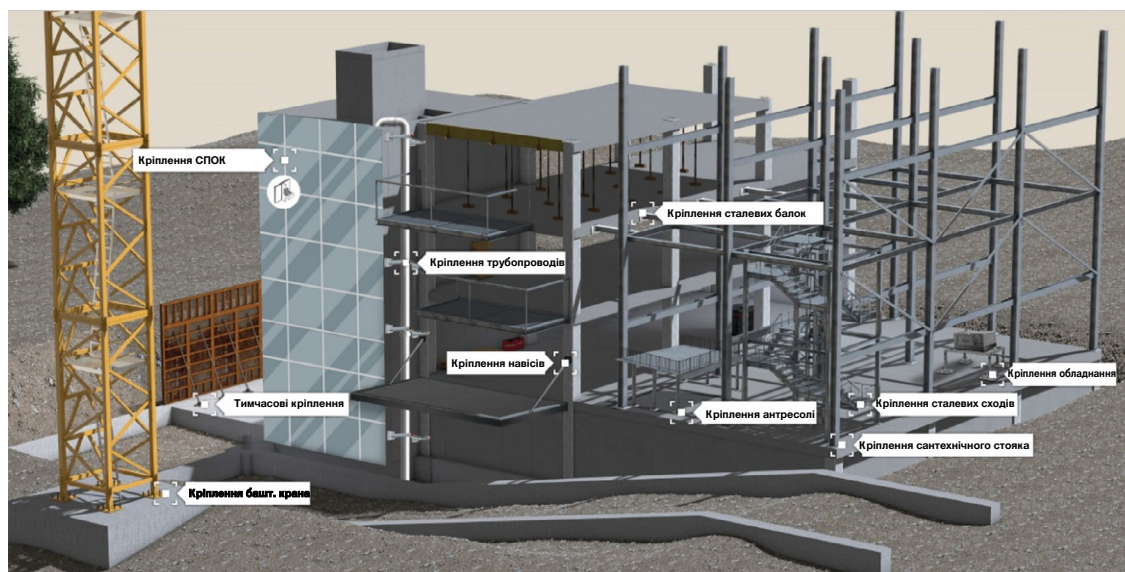


Рис. 2.1 — Приклади типових застосувань у будівлі під час зведення:

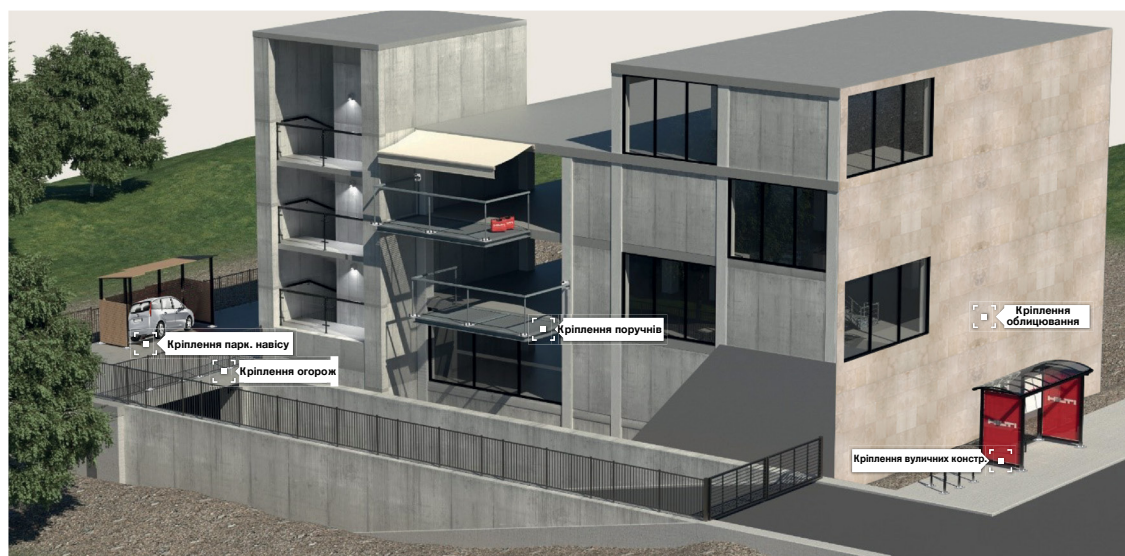


Рис. 2.2 — Приклади типових застосувань для завершальних робіт у будівництві:

На рис. 2.3 наведено типові приклади застосування з'єднань метал-бетон (S2C) та бетон-бетон (C2C) у мостових спорудах. Такі рішення передбачають використання кріплення до бетону. Для з'єднань типу C2C, що виконуються із застосуванням пост-встановленої арматури, нарощування опорних частин або бетонного шару, детальніше див. довідник Hilti C2C.

Примітка: Довідник C2C містить рекомендації щодо використання пост-встановленої арматури у з'єднаннях типу бетон-бетон.

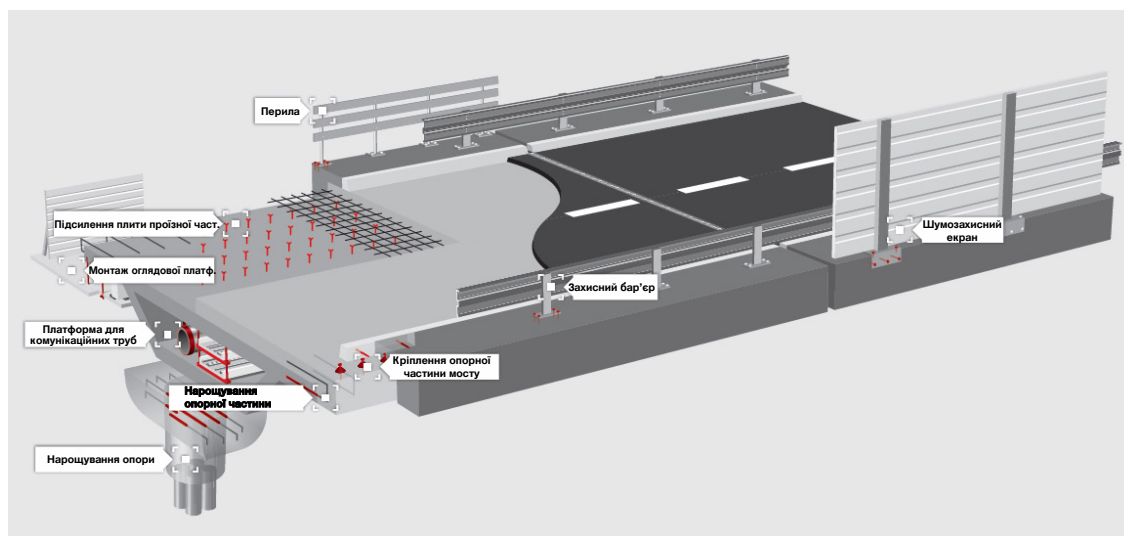


Рис. 2.3 — Приклади типових застосувань у мостових спорудах:

Застосування пост-встановлених з'єднань поширене також у тунельних спорудах. На рис. 2.4 показано приклади місць, де сталеві опорні пластини закріплюються у бетоні за допомогою пост-встановлених анкерів.

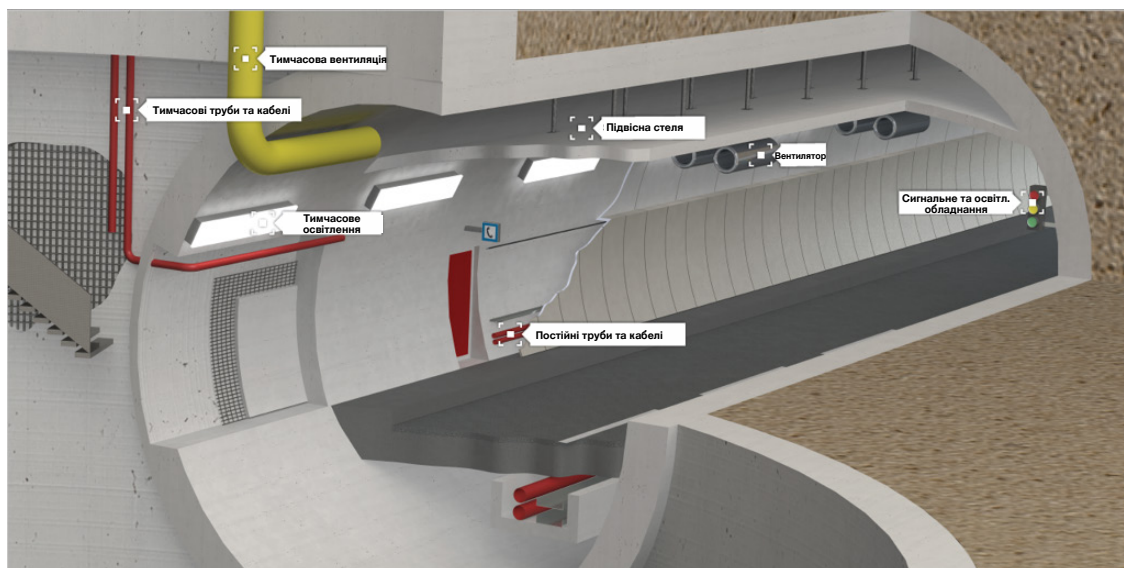


Рис. 2.4 — Приклади типових застосувань у тунельних спорудах:

2.1 Елементи кріплення

Далі наведено основні терміни, які зазвичай використовуються у практиці технології кріплення, з поясненнями та прикладами на рис. 2.5.

Анкер: елемент, що використовується для з'єднання (тобто передачі навантаження) між конструктивними або неконструктивними елементами та матеріалом основи. Зазвичай виготовляється зі сталі. Деякі типи анкерів застосовуються у поєднанні з високоефективними хімічними складами для забезпечення зчеплення з навколишнім бетоном.

Кріплення: металевий вузол, що передає навантаження на анкер; зазвичай складається з опорної пластини (baseplate) і приварених ребер жорсткості, які з'єднують її зі сталевим профілем.

Матеріал основи: матеріал, на який передається навантаження від сталеві конструкції через систему кріплення (це може бути бетон, кам'яна кладка, деревина, природний камінь тощо). У цьому довіднику розглядається лише бетон. Бетон може бути звичайним або спеціальним (газобетон, легкий, фіброармований тощо). Властивості базового матеріалу відіграють ключову роль при виборі відповідного кріплення та визначенні навантаження, яке воно може сприйняти.

Опорна пластина: сталева пластина, розміщена між елементами (наприклад, колонами або балками) та базовим матеріалом для розподілу навантаження. Використовується для з'єднання сталевих профілів з базовим матеріалом.

Сталевий профіль: елемент, що виготовлений шляхом прокатування, пресування або формування й приєднується до опорної пластини.

Зварне з'єднання: шов, утворений шляхом з'єднання двох або більше металевих елементів за допомогою нагрівання, тиску або їх комбінації під час охолодження (наприклад, між сталевим профілем і опорною пластиною).

З'єднання з відступом (із або без заповнення розчином) опорні пластини часто встановлюють на певній висоті над бетонною поверхнею через вирівнювання, ухил або інші причини. Цей відступ між пластиною та поверхнею бетону зазвичай заповнюють розчином для покращення сприйняття навантаження та опору згину.

Ребра жорсткості: допоміжні сталеві пластини, які приварюють до полиць або стінок профілю для підвищення його жорсткості та зменшення деформацій.

Анкер: див. «Анкер».

Система кріплення: збірна система, що складається з опорної пластини та групи анкерів (кріплень).

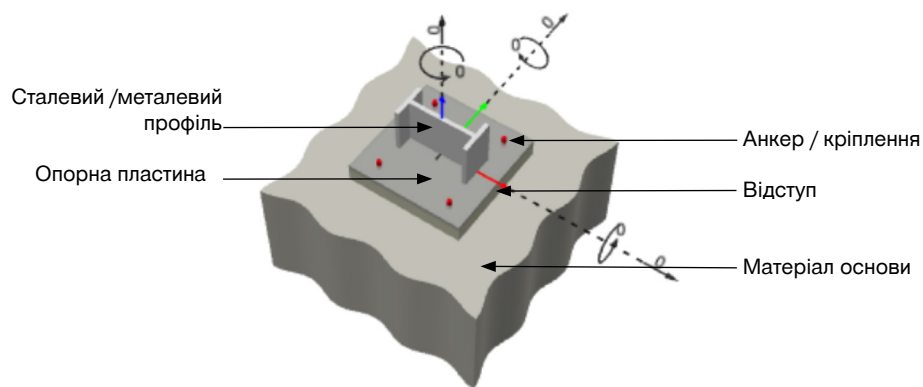


Рис. 2.5 — Елементи з'єднання металу з бетоном (S2C):

2.2 Типи з'єднань

Зазвичай, у будівельній або цивільній інфраструктурі може бути присутня безліч типів з'єднань. Залежно від типу застосування, навантажень, що діють на елемент кріплення та проєктних вимог,

Типи з'єднань можна класифікувати, як показано на рис. 2.6. Головна спільна характеристика з'єднань, розглянутих у цьому довіднику, полягає в тому, що вони є **критично важливими для безпеки**. Це означає, що їхнє руйнування може становити небезпеку для життя людей та/або спричинити значні економічні збитки. З'єднання, не пов'язані з безпекою, не входять до сфери цього довідника. Наприклад, огорожі або малі інформаційні таблички відносяться до неконструктивних, неінженерних з'єднань.

Конструктивні з'єднання — це, головним чином, з'єднання між різними типами конструктивних елементів, які можуть бути основними або другорядними несучими елементами, а також тимчасовими конструкціями, необхідними під час виконання будівельних робіт. Такі з'єднання є невід'ємною частиною системи, що забезпечує стійкість і несучу здатність споруди.

Неконструктивні з'єднання охоплюють кріплення допоміжних елементів до основної конструкції — наприклад, кабелів, труб, машин, поручнів тощо. Вони відіграють важливу роль у функціональності, архітектурі або естетиці будівлі чи інфраструктури, не впливаючи безпосередньо на її конструктивну цілісність.

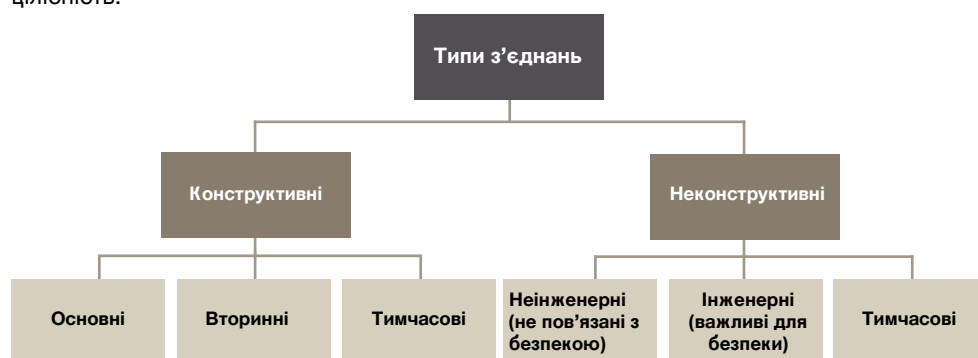


Рис. 2.6 — Типи з'єднань

2.2.1 Основні з'єднання

Сталеві елементи, що входять до складу основної несучої системи будівлі, сприймають навантаження та передають його на базовий матеріал через опорну пластину та анкери — такі з'єднання називаються основними. Зазвичай застосовуються анкери середнього або великого діаметра (приблизно від 16 мм і більше) залежно від типу навантаження та умов роботи. До прикладів основних з'єднань належать колони, балки, головні ригелі, масивні кронштейни та розпірки (див. рис. 2.7).



а) Сталева колона конструкції



б) Сталева балка конструкції

Рис. 2.7 — Приклади основних з'єднань:

2.2.2 Вторинні з'єднання

Це з'єднання, що підтримують несучі елементи конструкції, але не є критично важливими для її загальної цілісності. Вони мають значення для безпеки, тому зазвичай проєктуються індивідуально. Для вторинних з'єднань передача навантаження здійснюється за допомогою систем кріплення, що зазвичай використовують анкери середнього діаметра від 12 мм до 20 мм.

Прикладами таких з'єднань є антресолі, балкони, навісні конструкції та кріплення сходових маршів, як показано на рис. 2.8.



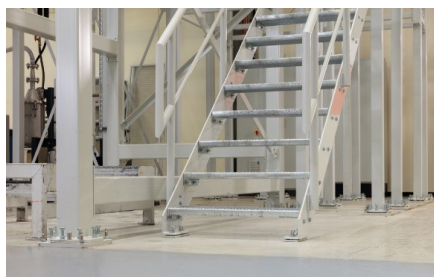
а) Антресоль



б) Балкони



с) Навіси



д) Сталеві сходи

Рис. 2.8 — Приклади вторинних з'єднань:

2.2.3 Тимчасові з'єднання

Це з'єднання, які потрібні лише протягом короткого періоду часу і потім демонтуються. Вони можуть підтримувати конструкцію та/або підвищувати безпеку працівників під час будівельної фази. Діаметри анкерів у таких застосуваннях можуть охоплювати весь діапазон — від малих до великих. Для кріплення поручнів зазвичай достатньо діаметра 8–12 мм, тоді як великі діаметри понад 20 мм зазвичай застосовуються для кріплення великих кранів. Деякі приклади інженерних тимчасових з'єднань — це підпірні конструкції, тимчасові розпірки, опалубка та кріплення для кранів (див. рис. 2.9).



а) Тимчасова підпірка стіни



б) Кріплення баштового крана

Рис. 2.9 — Приклади тимчасових з'єднань

2.2.4 Неконструктивні з'єднання

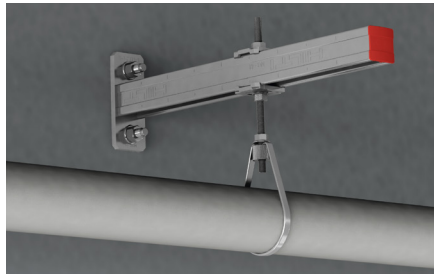
Неконструктивні з'єднання, розглянуті в цьому довіднику, мають значення для безпеки, оскільки навантаження, які вони сприймають, достатньо великі, щоб у разі руйнування загрожувати життю людей або спричинити суттєві економічні збитки. Неконструктивні елементи будівлі не є частиною основної несучої системи й використовуються для кріплення легких сталевих конструкцій до бетону, цегляної кладки тощо. Недостатньо надійне проектування неконструктивних з'єднань може призвести до порушення функціональності будівлі. Деякі приклади неконструктивних з'єднань — це поручні, огорожі, кріплення сидінь, кабельні лотки, трубопровідні з'єднання тощо (див. рис. 2.10).

Примітка: Якщо з'єднання є неконструктивним, це не означає, що воно не має значення для безпеки!

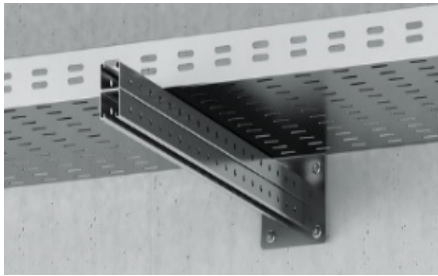
У таких випадках навантаження зазвичай передається на базовий матеріал за допомогою систем кріплення з анкерів діаметром від 8 мм до 12 мм.



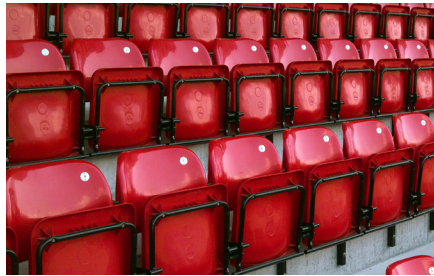
а) Поручні



б) Кріплення спринклерних труб



в) Система підтримки електротехнічних установок



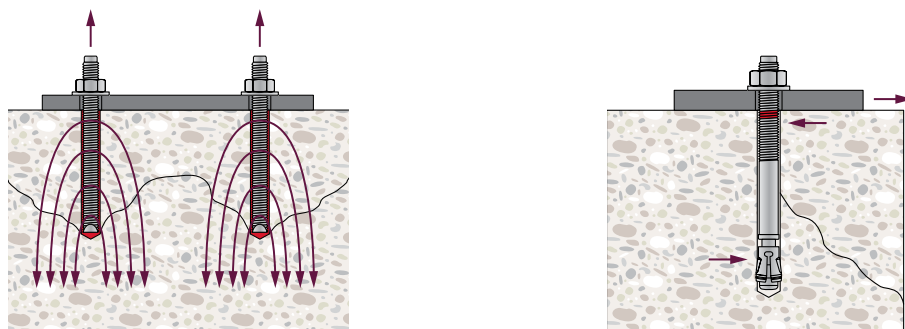
г) Сидіння на стадіоні

Рис. 2.10 — Приклади неконструктивних з'єднань

3. ПОСТ-ВСТАНОВЛЕНІ СИСТЕМИ КРІПЛЕНЬ

3.1 Несучі механізми

Системи кріплення передають прикладені навантаження на базовий матеріал різними способами. При розтягувальному (рис. 3.1 а)) та зсувному навантаженні (рис. 3.1 б)) механізм передачі навантаження пов'язаний із використанням міцності бетону на розтяг. У цьому контексті поняття **теорії розрахунку кріплень** застосовується на відміну від теорії залізобетону, де міцність бетону на розтяг зазвичай не враховується під час розрахунку. Механізми передачі навантаження для різних систем кріплення зазвичай класифікують як: **механічне заклинювання/ключування, тертя та адгезійне зчеплення**.



а) Пост-встановлені анкери при розтягу

б) Пост-встановлені анкери при зсуві

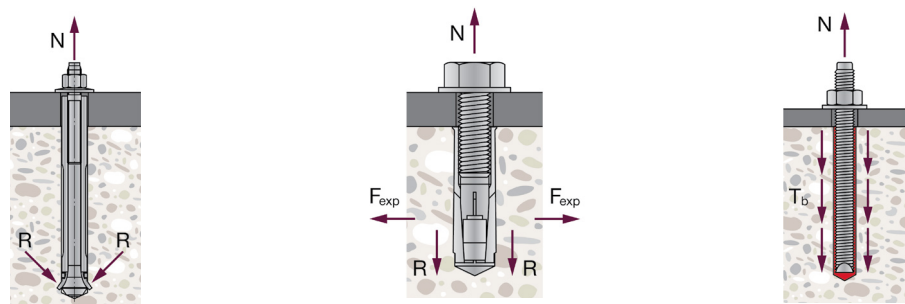
Рис. 3.1 — Ілюстрація використання міцності бетону на розтяг для передачі навантаження пост-встановленими анкерами (теорія розрахунку кріплень)

Механічне заклинювання/ключування описує принцип дії, за якого навантаження передається через контактну поверхню між анкером і основним матеріалом (див. рис. 3.2 а). Деякі пост-встановлені анкери формують механічне заклинювання між анкером і основним матеріалом. Для цього циліндричний отвір модифікують, створюючи виїмку або підріз визначених розмірів у заданому місці — або за допомогою спеціального бура, або підрізанням анкера під час установки.

Примітка: Більшість систем кріплення використовують один або кілька із наведених механізмів.

Механізм тертя — це принцип передачі навантаження, характерний для систем, у яких під час монтажу утворюється розпірна сила завдяки клину або розпірній гільзі, що притискається до стінок отвору. Сила тертя врівноважує зовнішнє розтягувальне зусилля на анкері. Розтягувальне навантаження N передається на основний матеріал через тертя R (див. рис. 3.2 б)

Механізм адгезійного зчеплення передбачає передачу зовнішнього навантаження на бетонний основний матеріал через клейове зчеплення (див. рис. 3.2 с). Сили передаються від анкерного елемента (наприклад, різьбового стрижня) до розчину через механічне заклинювання, а від розчину до бетону — завдяки поєднанню мікрозащеплення та хімічної адгезії між розчином і боковою поверхнею отвору.



а) Механічне заклинювання/ключування

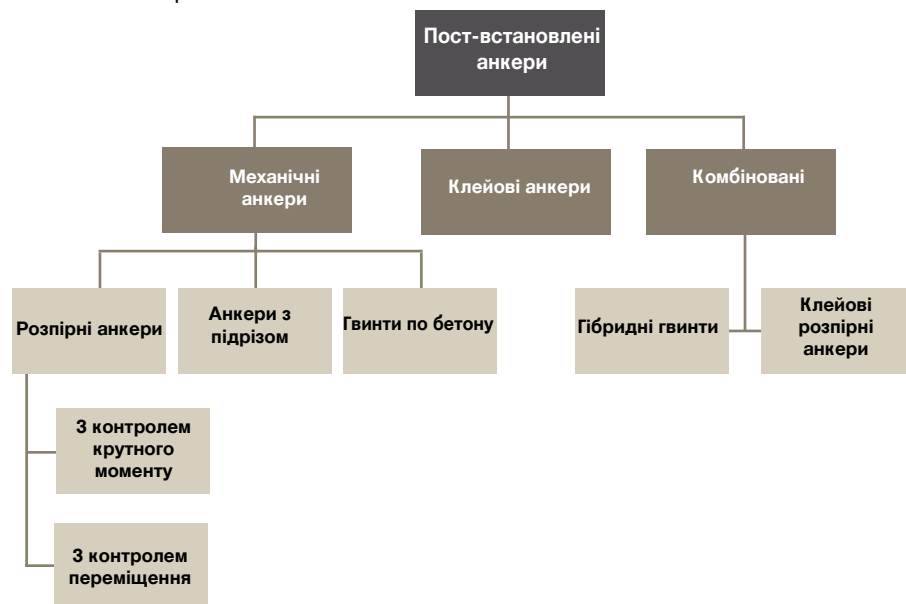
б) Механізм тертя

в) Механізм адгезійного зчеплення

Рис. 3.2 — Типи механізмів сприйняття навантаження в технології кріплення

3.2 Класифікація кріплень

Пост-встановлені анкери передають навантаження від опорної пластини до бетону через різні принципи роботи, як зазначено в розділі 3.1. Їх можна загалом класифікувати як **механічні** та **клеюві** анкери (див. рис. 3.3). Механічні анкери отримують свою несучу здатність завдяки принципам, таким як тертя або механічне заклинювання між сталевим елементом і бетоном. Клеюві анкери, навпаки, передають навантаження через адгезійне зчеплення вздовж меж між сталлю, клейовим складом і бетоном. Деякі системи поєднують властивості як механічних, так і клеювих анкерів.



Примітка: Див. розділ 5, щоб ознайомитися з асортиментом анкерів Hilti кожного типу.

Рис. 3.3 — Класифікація пост-встановлених анкерів

3.2.1 Механічні анкери

Ці системи кріплення працюють на основі механічних принципів — тертя, заклинювання/ключування або їх поєднання — для передачі навантаження на основний матеріал. Механічні анкери можуть додатково класифікуватися таким чином:

Анкер розпірного типу. Ці механічні анкери отримують свою несучу здатність за рахунок тертя, що виникає при розпиранні гільзи об стінки просвердленого отвору. Залежно від способу, у який викликається розпирання гільзи, анкери розпірного типу можна поділити на такі два типи:

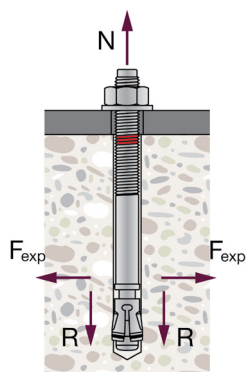


Рис. 3.4 — Анкер розпірного типу з контролем крутного моменту

Анкер розпірного типу з контролем крутного моменту: цей тип анкера викликає розпирання гільзи шляхом прикладання крутного моменту. Коли до гайки прикладають «заданий» момент, конус зтягується в гільзу, змушуючи її розширюватися та притискатися до стінки просвердленого отвору. Такі анкери передають сили на основний матеріал переважно через тертя. Анкери розпірного типу з контролем крутного моменту можуть бути гільзового або болтового типу. Анкер гільзового типу має болт або різьбовий стрижень, гайку, шайбу, дистанційну втулку та розпірну гільзу. Анкер болтового типу має болт із конічним кінцем, гайку, шайбу та розпірний елемент, який розширюється за допомогою конуса.

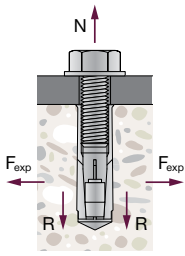


Рис. 3.5 — Анкер розпирного типу з контролем переміщення

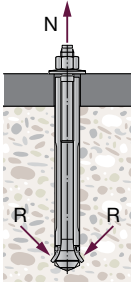


Рис. 3.6 — Анкер з підрізом

Анкер розпирного типу з контролем переміщення: ці анкери складаються з розпірної гільзи та конічного розпирного клина. Вони встановлюються шляхом розширення гільзи під контрольованою деформацією. Це досягається або вбиванням конуса у гільзу, або насадженням гільзи на конус, як показано на рис. 3.5.

Анкер з підрізом: ці механічні анкери забезпечують свою несучу здатність завдяки механічному заклинюванню, створеному підрізанням бетону в зоні анкерування на зануреному кінці кріплення. Зазвичай для створення підрізу використовується спеціальне свердло до встановлення анкера (див. рис. 3.6). Альтернативно, підріз може утворюватися самим анкером під час його встановлення. Анкери з підрізом складаються з конічного кінця різьбового стрижня, гайки, шайби та гільзи з підрізом. На відміну від розпирних анкерів, анкери з підрізом створюють незначні або відсутні розпирні зусилля під час встановлення.

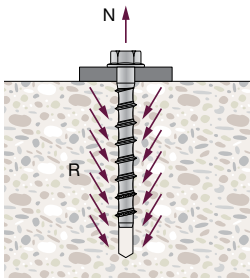


Рис. 3.7 — Анкер-гвинт

Анкер-гвинт: ці механічні анкери забезпечують свою несучу здатність завдяки механічному заклинюванню, що утворюється підрізом бетону вздовж довжини кріплення. Анкери вкручуються у попередньо просвердлений циліндричний отвір, і під час цього процесу різьба анкерного гвинта врізається в бетон, створюючи механічне заклинювання. Приклад цього типу анкера показано на рис. 3.7.

3.2.2 Хімічні анкери

Ці анкери використовують властивість клею утворювати зчеплення між хімічним інтерфейсом «клей – бетон» і хімічним інтерфейсом «клей – кріплення», таким чином забезпечуючи несучу здатність (див. рис. 3.2 с). Клей може бути органічним (наприклад, епоксидним, поліестеровим, вінілестерним) або неорганічним (тобто на основі цементу). Зазвичай клеї складаються з двох компонентів — смоли та затверджувача. Вони можуть поставлятися у вигляді картриджів або пакетів із фольги, а також у скляних або фольгованих капсулах (див. розділ 5). Коли два компоненти змішуються, клей твердне та набуває своїх зчіпних властивостей. Клей розміщується у просвердленому, очищеному отворі, після чого вставляється елемент кріплення (наприклад, різьбовий стрижень, гільза з внутрішньою різьбою тощо). Такі системи можуть бути навантажені лише після того, як клей затвердіє. Час тверднення може відрізнятися залежно від продукту та умов навколишнього середовища (переважно температури) і визначається виробником. Пост-встановлені клейові анкери забезпечують високу гнучкість у проектуванні й можуть бути адаптовані до широкого діапазону діаметрів і глибин анкерування.

3.2.3 Комбіновані механічні та клейові анкери

Деякі анкери працюють за принципом поєднання однієї з механічних дій, описаних раніше, із клейовим зчепленням. Нижче описано два основні типи таких анкерів:

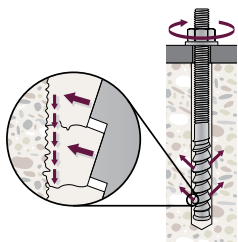


Рис. 3.8 — Клейовий розпирний анкер

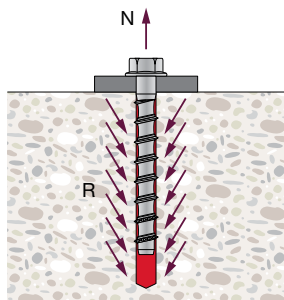


Рис. 3.9 — Гібридний анкер-гвинт

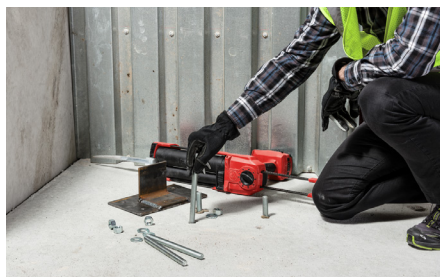
Клейовий розпирний анкер: елементом кріплення є спеціальний різьбовий стрижень із декількома сталевими конусами в нижній частині стрижня (див. рис. 3.8). Він має покриття, яке дозволяє зчепленню руйнуватися на межі «бетон – клей» при прикладанні «заданого» крутного моменту після початкового навантаження, яке утримується клейовим з'єднанням. Після руйнування зчеплення затверділий клей діє як декілька розпирних елементів між кожним конусом і бетоном. Таким чином, ці анкери фактично поєднують принцип роботи анкерів розпирного типу з контролем крутного моменту та клейових анкерів.

Гібридний анкер-гвинт: цей анкер забезпечує свою несучу здатність завдяки механічному заклинюванню, яке утворюється підрізом бетону вздовж довжини анкера, у поєднанні з клейовим зчепленням хімічного складу, що вводиться в просвердлений отвір. Його можна розглядати як гібрид між анкерним гвинтом по бетону та клейовим анкером. Система використовує анкер-гвинт із шестигранною головкою або зовнішньою різьбою у поєднанні з фольгованою капсулою, наповненою компонентами клейової системи, або з інжекційною системою (див. рис. 3.9).

3.3 Типи встановлення

З точки зору процесу встановлення, пост-встановлені анкери можна умовно поділити на **попередньо встановлювані** або **встановлювані через елемент**. У випадку попереднього встановлення анкер спочатку монтується, а потім встановлюється елемент кріплення, як показано на рис. 3.10 а). Отвори в елементі мають точно відповідати розташуванню анкера в основному матеріалі. У випадку встановлення через елемент, елемент кріплення утримується на місці, а анкер монтується через нього, як показано на рис. 3.10 б). Залежно від застосування, розрахункові рішення або монтажники можуть обрати будь-який із цих двох способів.

Примітка: Не всі типи анкерів підходять для обох способів встановлення (див. розділ 5).



а) Попереднє встановлення



б) Встановлення через елемент

Fig. 3.10: Classification of setting type for post-installed anchors

3.4 Напрями навантаження

Сили, що діють на системи кріплення, можуть бути визначені відповідно до принципів будівельної механіки. Розподіл зусиль, які діють на кріпильний елемент або групу анкерів, можна розрахувати за допомогою лінійно-еластичних або нелінійних методів. Зусилля, що передаються через елемент кріплення — наприклад, розтяг, зсув, згин або кручення (або будь-яку їх комбінацію) — створюють навантаження на анкер, і зазвичай воно діє в напрямках розтягу та/або зсуву.

Навантаження на розтяг. Це навантаження, прикладене перпендикулярно до поверхні основного матеріалу вздовж осі анкера (див. рис. 3.11 а)).

Навантаження на зсув. Це навантаження, прикладене перпендикулярно до поздовжньої осі анкера та діюче паралельно до поверхні бетону. Навантаження на зсув може передаватися з або без моментного плеча (див. рис. 3.11).

Навантаження на зсув без плеча важеля. Умови, які мають бути виконані для врахування дії навантаження на анкер без моментного плеча (рис. 3.11 b)):

- Елемент кріплення виготовлений зі сталі та має контакт із анкерами на довжині не менше 50 % товщини елемента.
- Елемент кріплення встановлений одним із двох способів:
 - безпосередньо до бетону без проміжного шару; або
 - із використанням вирівнювального розчину обмеженої товщини (наприклад, $t_{grout} \leq 0.5d$ який повністю заповнює проміжок між шорсткою бетонною поверхнею та елементом кріплення. Міцність розчину має бути не меншою за міцність основного бетону, але не менше ніж 30 N/mm^2).

Навантаження на зсув із плечем важеля. Якщо умови для навантаження на зсув без моментного плеча не виконані, то навантаження на зсув у кріпленні слід вважати таким, що має моментне плече. У цьому випадку в анкері виникає згинальний момент (рис. 3.11 c)).

Комбіноване навантаження на розтяг і зсув. Коли на кріплення діє нахилене навантаження (рис. 3.11 d)), воно може бути розкладене на компоненти розтягу та зсуву. Анкери мають перевірятись із урахуванням цієї комбінованої дії (детальніше див. розділ 6)

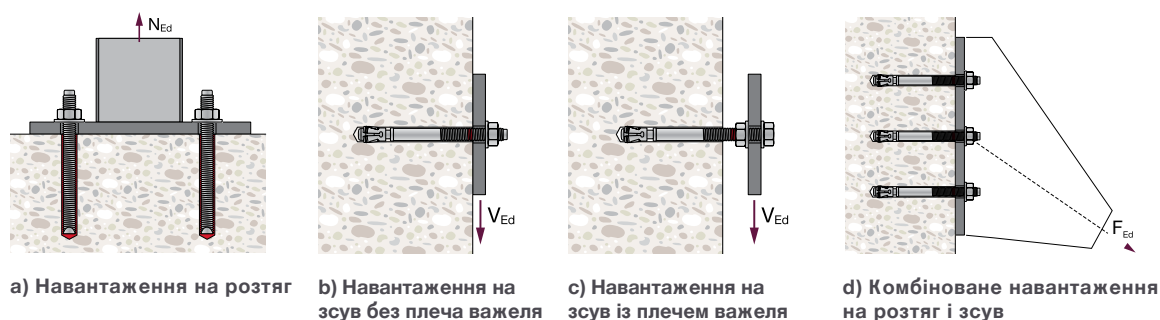


Рис. 3.11 — Навантаження на розтяг і зсув, що діють на анкери, закріплені в бетоні:

3.5 Типи навантажень

Класифікація навантажень може виконуватись залежно від їхньої амплітуди в часі. Основні типи навантажень описані нижче:

- **Статичне навантаження** — це навантаження, яке прикладається повільно до елемента, конструкції або вузла. Такі навантаження зазвичай залишаються приблизно сталими за величиною, напрямком і положенням протягом тривалого періоду часу. Типовим прикладом статичного навантаження є власна вага конструкції (див. рис. 3.12 а).
- **Квазістатичне навантаження** — це навантаження, яке змінюється в часі, проте інерційні ефекти при цьому незначні. Приклади: змінні навантаження, пов'язані з експлуатацією будівлі, або вітрові дії на низькі споруди в районах, не схильних до ураганних вітрів. Такі навантаження у розрахунках розглядаються так само, як і статичні (див. рис. 3.12 а)).
- **Циклічне навантаження** — це навантаження, при якому анкери піддаються повторним або змінним діям у часі, виникає тоді, коли прикладені навантаження часто змінюються або

коли конструкції зазнають дії динамічних сил — наприклад, вітрових поривів, землетрусів чи вібрацій від машин.

- **Змінне циклічне навантаження** — це тип динамічного навантаження, за якого прикладена сила змінює напрямок, і анкер піддається коливним навантаженням, що змінюються у часі в обидва боки (див. рис. 3.12 b)).
- **Ппульсуюче циклічне навантаження** — це інший тип динамічного навантаження, за якого сила коливається навколо певного середнього значення, не змінюючи напрямку (див. рис. 3.12 c)).
- **Сейсмічне навантаження** — це динамічні сили, що виникають під час землетрусу. Під час сейсмічних коливань рух ґрунту змушує конструкції коливатись і тремтіти, що призводить до значних напружень і сил, які діють на пост-встановлені анкери. Величина сейсмічного навантаження залежить від горизонтальних і вертикальних компонентів руху ґрунту і не має періодичного характеру. Таке навантаження зазвичай характеризується невеликою кількістю циклів із великою амплітудою (див. рис. 3.12 e)).
- **Навантаження від утоми матеріалу** — це повторне прикладання циклічних навантажень до анкерів протягом певного часу. Під час дії такого навантаження відбувається поступове та локальне руйнування конструкції через багаторазові зміни напружень. Утома матеріалу виникає, коли конструкція піддається частим навантаженням і розвантаженням із низькою або середньою амплітудою (наприклад, у виробничих механізмах, кранах, ліфтах, на мостах з інтенсивним рухом транспорту). Типова кількість циклів — від 10^4 до 10^8 (див. рис. 3.12 d)).
- **Ударне навантаження** — Стосується раптового та інтенсивного прикладання навантажень, головним чином через раптові удари або вибухи. Воно викликає швидке зростання сили на анкерах, що може призвести до значних рівнів напруження за короткий час. Ударні навантаження є короткочасними, але мають дуже велику амплітуду (див. рис. 3.12 f)).

Схематичні зображення різних типів навантажень і дій на конструкції наведені на рис. 3.12.

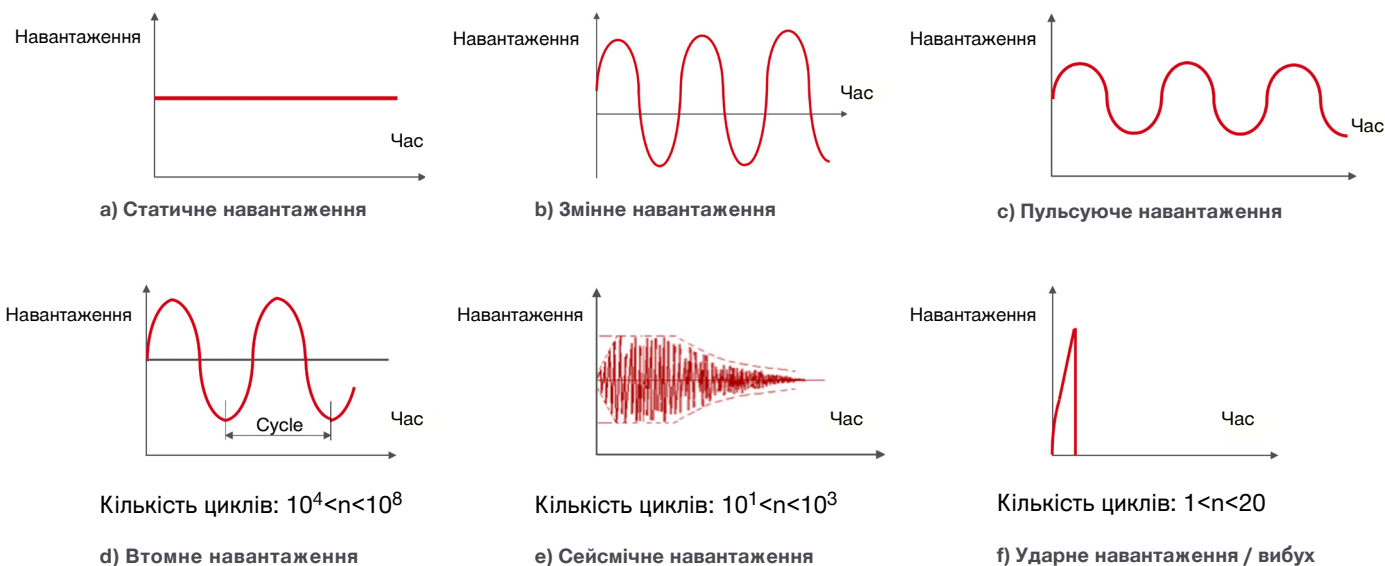


Рис. 3.12 — Різновиди навантажень / дій, що впливають на анкери

3.6 Режими руйнування анкерів

Анкери можуть руйнуватися різними способами, якщо прикладене навантаження перевищує їхній опір. Режими руйнування розрізняють залежно від напрямку навантаження — розтяг (рис. 3.13) або зсув (рис. 3.14). Крім того, можна розрізняти руйнування сталевих елементів анкера (руйнування сталі) та руйнування основного матеріалу або поверхні зчеплення між анкером і основним матеріалом (руйнування бетону).



Рис. 3.13 — Різновиди руйнування при навантаженні на розтяг

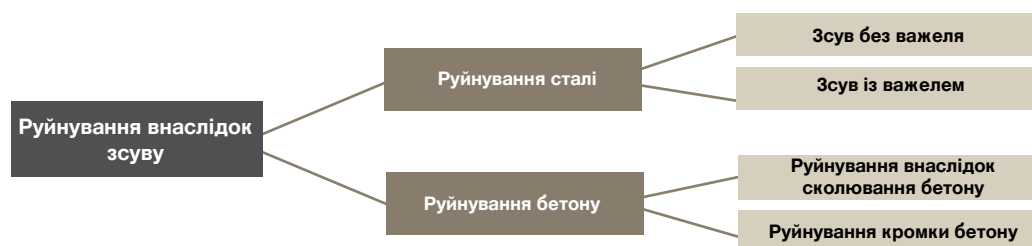


Рис. 3.14 — Різновиди руйнування при навантаженні на зсув

3.6.1 Режими руйнування при розтягу

- **Руйнування сталі** відбувається тоді, коли напруження розтягу, спричинені діючим навантаженням у найменшому поперечному перерізі анкера, перевищують граничну міцність сталі (рис. 3.15).

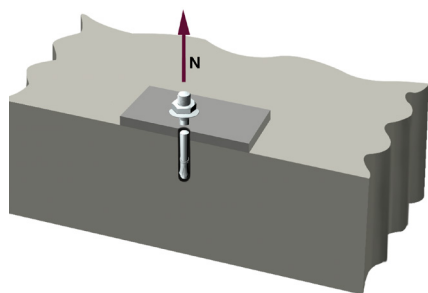
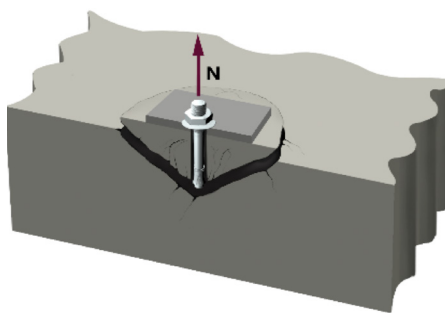


Рис. 3.15 — Руйнування сталі при навантаженні на розтяг

- **Руйнування бетонного конуса** характеризується утворенням поверхні руйнування у формі конуса, що бере початок у зоні передавання навантаження від анкера і поширюється до поверхні бетону під кутом приблизно 35° між нахиленою радіальною тріщиною та поверхнею бетону (рис. 3.16).



Мал. 3.16: Руйнування бетонного конуса при навантаженні на розтяг.

- **Руйнування шляхом висмикування.** Виникає, коли анкер повністю висмикується з просвердленого отвору без значних пошкоджень основного матеріалу (рис. 3.17).

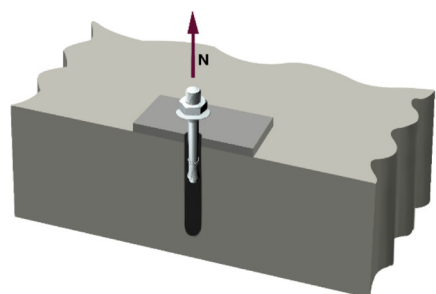


Рис. 3.17 — Руйнування шляхом висмикування при навантаженні на розтяг

- **Комбіноване руйнування: висмикування та виколювання бетону.** Характерне лише для хімічних анкерів. Це руйнування є комбінацією висмикування через втрату зчеплення між анкером і бетоном та утворенням неглибокого бетонного конуса поблизу поверхні бетону (рис. 3.18).

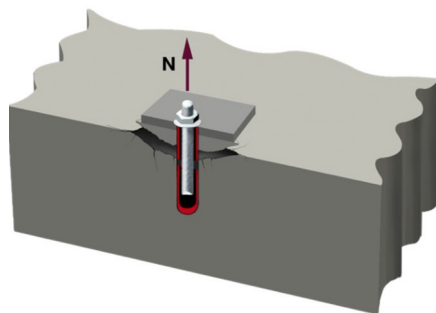


Рис. 3.18 — Комбіноване руйнування: висмикування та виколювання бетону при навантаженні на розтяг

- **Розколювання бетону.** Виникає через кільцеві напруження навколо анкера, що зумовлені місцевою передачею навантаження та силами розпирання, які перевищують міцність бетону на розтяг (рис. 3.19). Такий тип руйнування може статися під час встановлення анкера, якщо не витримано мінімальні відстані між анкерами, до краю або товщини елемента, а також при навантаженні поблизу краю чи за малих відстаней між анкерами.

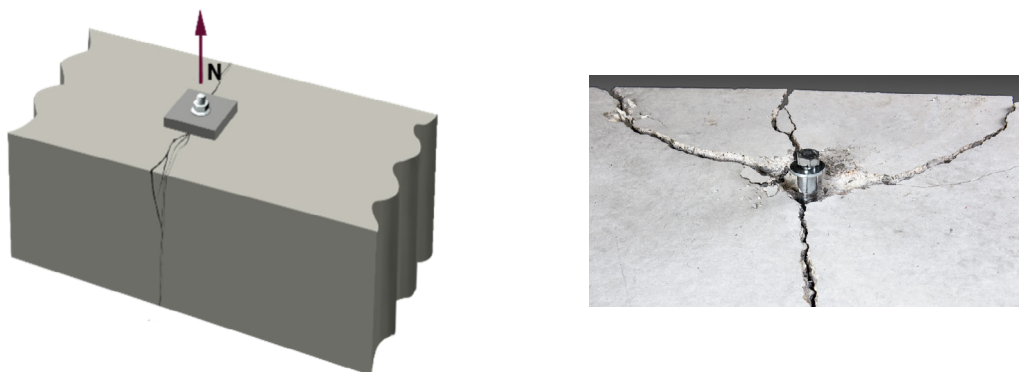


Рис. 3.19 — Розколювання бетону при навантаженні на розтяг

- **Руйнування бетону з боковим виколюванням при навантаженні на розтяг** є наслідком дії високих контактних напружень, що виникають у зоні передачі навантаження анкера (рис. 3.20). Такі високі напруження створюють розривні сили, спрямовані перпендикулярно до напрямку дії навантаження, унаслідок чого на бічній поверхні елемента формується зона виколювання бетону. Такий тип руйнування може бути визначальним у випадках малої відстані до краю елемента або великої глибини закладання, що характерно для анкерів із головками, але зазвичай не спостерігається для пост-встановлених анкерів.

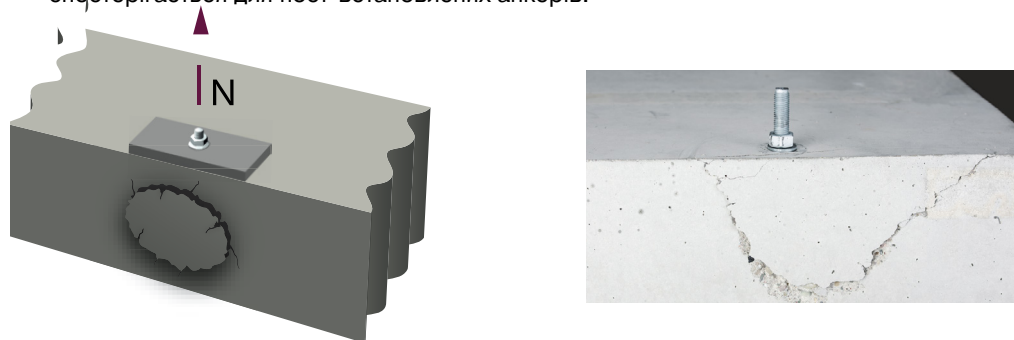


Рис. 3.20 — Руйнування бетону з боковим виколюванням при розтягу

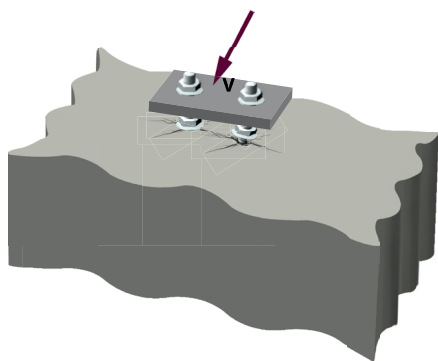
3.6.2 Режими руйнування при зсуві

Нижче наведено режими руйнування, які можуть виникати внаслідок дії зсувного навантаження.

- **Руйнування сталі.** Виникає тоді, коли напруження, спричинені діючим навантаженням у найменшому поперечному перерізі анкера, перевищують граничну міцність сталі (рис. 3.21). Якщо зсувне навантаження діє з плечем, опір зменшується через додаткові розтягувальні напруження, що виникають унаслідок згинального моменту.



а) Руйнування через відсутність плеча важеля.



b) Руйнування сталі з плечем важеля

Рис. 3.21 — Руйнування сталі при зсувному навантаженні

- **Руйнування бетону шляхом виколювання.** Зазвичай спостерігається у випадках недостатньої глибини закладання анкера. Це руйнування спричиняється обертанням анкера та розвитком дугової розтягувальної сили в анкерному стрижні внаслідок поперечної деформації та ексцентриситету між прикладеною зсувною силою і реакцією бетону (рис. 3.22).

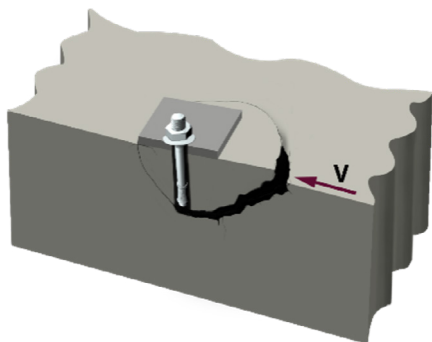


Рис. 3.22 — Руйнування бетону шляхом виколювання при навантаженні на зсув

- **Руйнування краю бетону** Виникає під дією зсувного навантаження, коли анкери розташовані поблизу краю елемента у напрямку навантаження. Характеризується утворенням конусоподібної поверхні руйнування, що бере початок від анкерного стрижня та поширюється до краю бетону під кутом приблизно 35° (рис. 3.23). Такий тип руйнування також називають виколюванням бетону при навантаженні на зсув.

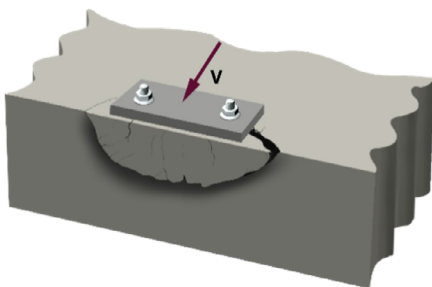


Рис. 3.23 — Руйнування краю бетону при навантаженні на зсув

3.7 Фактори, що впливають на роботу анкерів

Деформативність і несуча здатність анкерів істотно залежать від низки параметрів, таких як: основний матеріал, спосіб монтажу, умови навколишнього середовища та тип навантаження. Дослідження, проведені протягом останніх понад 40 років, визначили основні чинники, які впливають на роботу анкерів. Ці напрацювання стали підґрунтям для формування критеріїв попередньої кваліфікації анкерів.

Нижче наведено деякі з основних факторів, що впливають на їхню роботу.

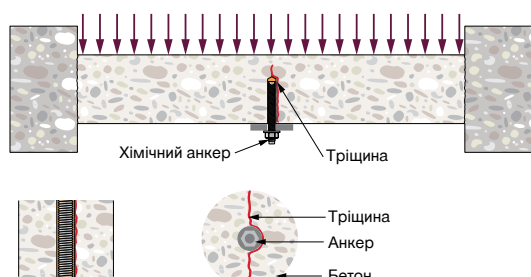
3.7.1 Основний матеріал

У цьому посібнику розглядається лише бетон **нормальної щільності**. Анкери спираються на міцність бетону на розтяг (рис. 3.1). Клас міцності бетону впливає на різні типи бетонних руйнувань при навантаженні на розтяг і зсув. Як добре відомо з розрахунку та будівництва залізобетонних конструкцій, міцність бетону на розтяг є значно нижчою за його міцність на стиск (приблизно у 10 разів). Тому бетон має тенденцію до розтріскування при дії навантаження на розтяг — наприклад, у зоні розтягування перерізу, що зазнає згину. **Несуча здатність анкера зменшується внаслідок утворення тріщин у бетоні**. Рівень цього впливу залежить від механізму передавання навантаження конкретного типу анкера (див. розділ 3.1). На рисунку 3.24 с наведено типову діаграму «навантаження–переміщення» для анкерів у тріснутому та нетріснутому бетоні під час навантаження на розтяг. У нетріснутому бетоні переміщення менше, а несуча здатність — вища. Детальний аналіз поведінки анкерів у тріснутому та нетріснутому бетоні наведено в роботах

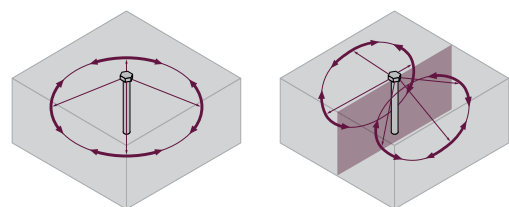
Розширення тріщини, що проходить через місце встановлення анкера, зменшує силу розпирання і, відповідно, ефективність тертя для металевих анкерів розпірного типу. Якщо анкер не може повністю розширитися, переміщення збільшується, а несуча здатність зменшується. Зазвичай розрізняють системи, які можуть компенсувати розкриття тріщин (придатні для тріснутого бетону), і такі, що не можуть (непридатні для тріснутого бетону). Для анкерів підрізного типу несучу поверхню зменшує тріщина, а для хімічних анкерів адгезійне зчеплення на частині бічної поверхні стає неефективним (рис. 3.24 а).

Примітка: Детальнішу інформацію про поведінку анкерів (відповідно до EC2-4 [1] та інших нормативів) наведено в розділі 6.

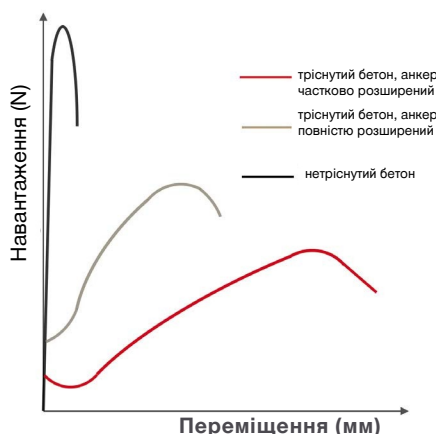
Наявність тріщин у бетоні в межах експлуатаційного стану (ширина тріщини приблизно 0,3 мм) знижує опір бетону до руйнування за конусною схемою до 30 %. Коли бетон піддається утворенню тріщин, радіальні напруження в бетоні перериваються тріщиною (рис. 3.24 b), що призводить до зменшення несучої здатності. У випадку висмикування анкерів зменшення міцності в тріснутому бетоні залежить від типу продукту і має перевірятися під час попередніх випробувань.



а) Вплив розтріскування бетону на хімічні анкери



б) Монтаж із наскрізним кріпленням



с) Схематична крива «навантаження–переміщення» при дії розтягуювального навантаження в тріснутому та нетріснутому бетоні (за результатами випробувань анкерів типу drop-in [2])

Рис. 3.24 — Розподіл зусиль у нетріснутому та тріснутому бетоні

3.7.2 Монтаж

Правильний монтаж є ключовим для досягнення необхідних характеристик роботи анкера і має виконуватись відповідно до інструкцій із встановлення для конкретного типу анкерного продукту. Детальні методи монтажу, обладнання та інструменти описані в розділі 8. У цьому розділі наведено основні аспекти, що можуть впливати на ефективність роботи анкерів. Нижче описано кілька важливих параметрів:

- Свердління.** Існують різні технології свердління (наприклад, ударне свердління або алмазне буріння), які формують отвори з різною шорсткістю бокової поверхні (див. розділ 8.3.2). Типи анкерів, що працюють за рахунок зчеплення або тертя, можуть бути дуже чутливими до вибраного методу свердління (рис. 3.25). Діаметр свердління має підбиратись відповідно до інструкцій виробника анкера. Хімічні анкери встановлюються у отвори збільшеного діаметра, щоб забезпечити шар розчину між бетоном і сталевим елементом. Їхня ефективність зазвичай не погіршується при незначному збільшенні діаметра отвору. Однак надмірно великі отвори можуть суттєво знизити несучу здатність механічних анкерів. Існує ризик, що розпірна гільза не забезпечить належного контакту зі стінками отвору. Робота гвинтових анкерів залежить від точності просвердленого отвору, щоб забезпечити необхідне підрізання під різьбленням.
- Очищення отвору.** Рівень очищення отвору має значний вплив на міцність зчеплення хімічних анкерів. Отвір має бути ретельно очищений від пилу, щоб забезпечити розрахункову міцність на розтяг. Неочищені або недостатньо очищені отвори можуть знизити навантаження при руйнуванні на розтяг до 60 % і більше для ін'єкційних хімічних анкерів. Залежність «навантаження–переміщення» для хімічних анкерів з урахуванням очищення отвору показана на рис. 3.26.

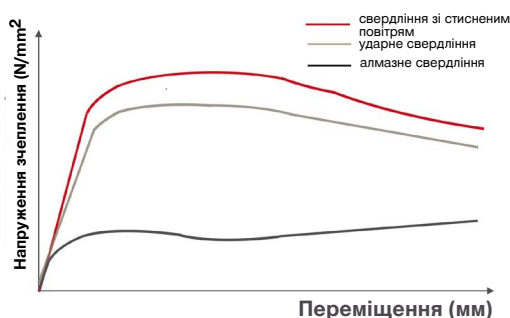


Рис. 3.25 — Графік «напруження зчеплення – переміщення» для хімічних анкерів у очищених отворах, просвердлених ударним або алмазним методом ([2]); приклад системи, непридатної для алмазного буріння.

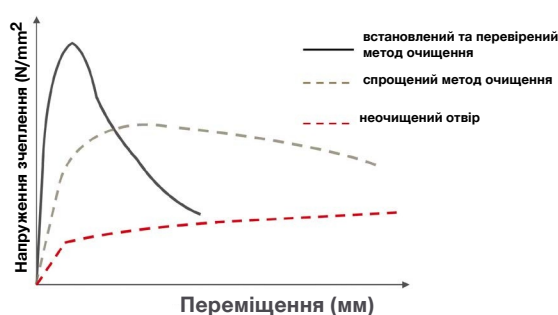


Рис. 3.26 — Крива «навантаження – переміщення» для добре очищених / неочищених отворів у тріснутому бетоні ([2]).

- Монтаж анкерів:**

Для деяких типів кріплень, таких як гвинтові та хімічні анкери, необхідно прикладати відповідний крутний момент, щоб забезпечити правильне встановлення. Важливо прикласти достатній крутний момент, аби зафіксувати анкер у правильному положенні та мінімізувати переміщення між анкером і основним матеріалом під робочим навантаженням (див. рис. 3.7 і рис. 3.8). Для анкерів розпірного типу з контролем крутного моменту прикладання рекомендованого моменту є обов'язковим для активації механізму передачі навантаження (див. рис. 3.4). У випадку анкерів з контролем переміщення або анкерів підрізного типу, крутний момент замінюється енергією, необхідною для встановлення болта у правильне положення відносно розпірної гільзи (див. рис. 3.5 і рис. 3.6). Неправильне прикладання крутного моменту — як недостатнє, так і надмірне — або використання інструментів, не рекомендованих виробником, призводить до помилкового монтажу та незадовільної поведінки анкерного з'єднання за навантаженням і переміщенням (див. рис. 3.24). Для хімічних анкерів необхідно забезпечити належне зчеплення для правильного встановлення, щоб досягти розрахункових характеристик.

3.7.3 Умови навколишнього середовища

Умови навколишнього середовища впливають на несучу здатність анкерів. Під час зовнішнього застосування анкери можуть зазнавати змін вологості та температури. Ці фактори особливо впливають на хімічні анкери.

- **Температура основного матеріалу** має велике значення як під час встановлення, так і під час експлуатації. Час тверднення хімічних анкерів скорочується зі зростанням температури [2]. Недотримання мінімального часу тверднення може не дозволити матеріалу зчеплення досягти повної міцності. Час тверднення залежить від типу використаного розчину або хімічного складу. У процесі експлуатації міцність зчеплення хімічних анкерів залежить від температури основного матеріалу — зі зростанням температури вона знижується (див. рис. 3.28). Також переміщення анкерів змінюється залежно від температури.
- **Цикли замерзання й відтавання:** із зростанням кількості циклів замерзання-відтавання поступово збільшується переміщення анкерів (див. рис. 3.27). Такі цикли впливають на анкери, оскільки спричиняють розширення або стиснення матеріалів — сталевого анкерного стрижня, хімічного складу й бетону, — що з часом може погіршувати зчеплення й стабільність анкера.

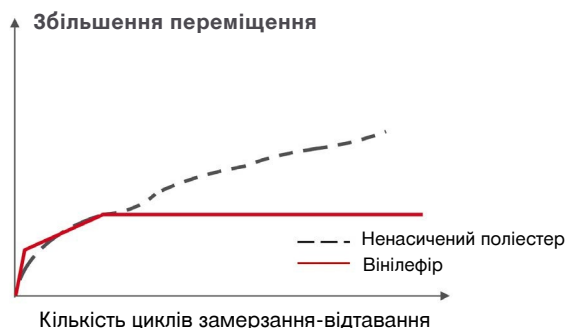


Рис. 3.27 — Вплив циклів замерзання-відтавання на переміщення хімічних анкерів ([2])

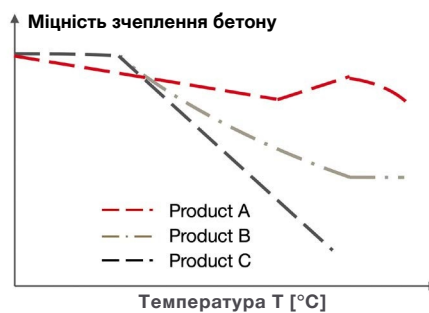


Рис. 3.28 — Вплив температури на міцність зчеплення ([3])

- **Довговічність / захист від корозії.** Необхідно забезпечувати належний захист від корозії анкерів для різних типів застосування. У деяких випадках електроцинкування не є оптимальним рішенням — наприклад, у погано вентильованих фасадних зонах. Для постійно вологих або погано вентильованих приміщень рекомендується використовувати анкери з нержавної сталі. Зазвичай будь-який антикорозійний захист із часом втрачає ефективність. Тому правильний вибір матеріалу анкера має узгоджуватися з розрахунковим терміном експлуатації (наприклад, 50 або 100 років для хімічних анкерів). Докладніше — у розділах [5.1] та [2].

3.7.4 Типи навантажень

Різні напрями та типи навантажень, яким піддаються анкери, описано в розділах [3.4] і [3.5]. Для кожного типу навантаження існують чинники, що впливають на поведінку анкерів під навантаженням і переміщенням. Деякі з них наведено нижче.

Тривале навантаження. Анкери проєктуються для сприйняття навантажень протягом багатьох років. Якщо розтягувальне навантаження діє постійно протягом тривалого часу, можуть виникати ефекти повзучості. Це особливо актуально для хімічних анкерів (див. рис. 3.29). Для цього типу анкерів переміщення збільшується з часом під дією сталого навантаження. Коли переміщення через деформацію зчеплення перевищує допустимий рівень, імовірно руйнування. Вплив тривалого навантаження на міцність зчеплення також залежить від температури бетону протягом розрахункового строку служби.



Рис. 3.29 — Вплив тривалого розтягувального навантаження на поведінку за переміщенням

Сейсмічне навантаження. Анкери під час дії сейсмічного навантаження зазвичай піддаються циклічному навантаженню з великою амплітудою, а основний матеріал (бетон) при цьому вважається розтрісканим за межами експлуатаційного стану (тобто з шириною тріщин понад 0,3 мм) через можливі значні деформації. Такі умови необхідно враховувати під час передкваліфікації та проектування анкерів. На рис. 3.30 схематично показано, як прискорення ґрунту під час землетрусу викликає деформації в конструкції та передачу сейсмічних дій на анкери, що з'єднують несучі та ненесучі елементи. Це призводить до виникнення циклічних навантажень високої інтенсивності та тріщин, ширина яких змінюється з часом.

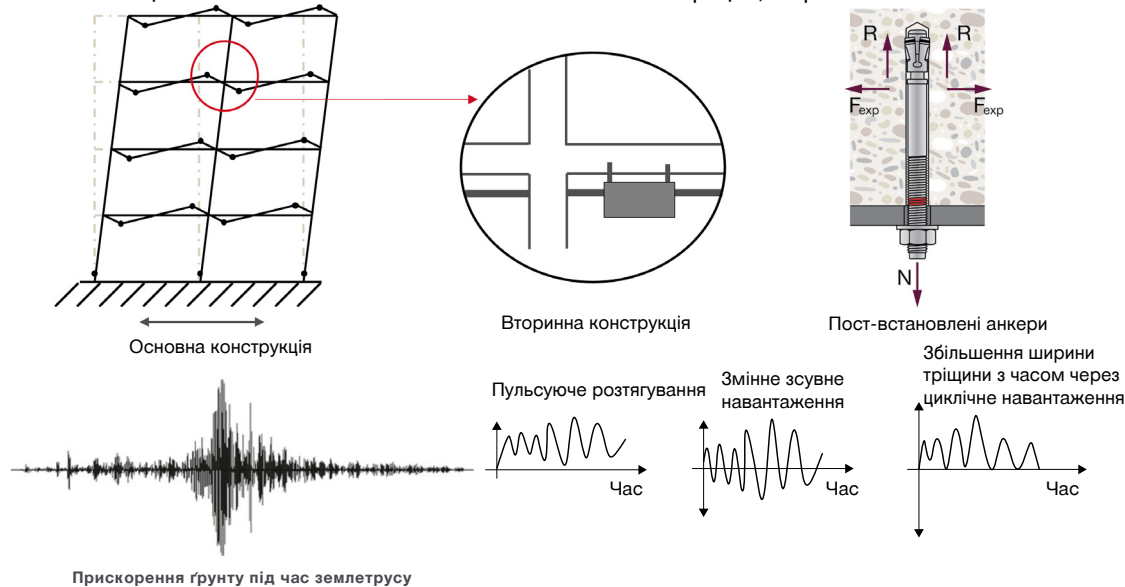


Рис. 3.30 — Сейсмічне проектування анкерів після встановлення

Протягом останніх понад 20 років проведено значні дослідження, спрямовані на визначення умов, за яких анкери можуть безпечно сприймати навантаження під час сейсмічних подій. Hoehler (2006) [4] дослідив вплив циклічного навантаження та швидкості навантаження на різні режими руйнування при розтягу, а також визначив, що максимальна ширина тріщини до 0,8 мм може очікуватися у згинальних системах поза зоною пластичних шарнірів. Результати численних аналітичних досліджень підтверджують поведінку експериментальних анкерів, встановлених у зсувній стінці (Faraone et al., 2022 [5]). Дослідження, наведені в [4], також показали, що вплив швидкості навантаження можна вважати незначним, оскільки він має позитивний або нейтральний ефект на опір різним типам руйнування. Водночас було встановлено, що для анкерів у розтрісканому бетоні зміна амплітуди під час змодельованих сейсмічних подій є критичним фактором. Подальші дослідження сприяли розробленню протоколів навантаження для попередньої кваліфікації анкерів після встановлення під дією розтягувальних і зсувних навантажень ([6], [7]). Дослідження щодо комбінованої дії розтягу та зсуву під час землетрусів поки що обмежені [8].

Втомне навантаження: велика кількість циклів навантаження протягом терміну служби анкерного кріплення (зазвичай понад 1000) може негативно впливати на його міцність на розтяг сталі, а також на властивості основного матеріалу (див. розділ 6.12). Якщо матеріал піддається циклічному навантаженню протягом тривалого часу, він може зруйнуватися після певної кількості циклів навіть тоді, коли навантаження залишається нижчим за граничну статичну міцність. Це зниження міцності називають втомою матеріалу. Вона відповідає максимальній амплітуді навантаження, яку можна витримати для певної кількості циклів. Якщо рівень напружень, за якого більше не виникає руйнування, можна визначити, його називають втомною міцністю. Вищі навантаження зазвичай витримуються меншою кількістю циклів. За останні десятиліття численні дослідники вивчали вплив втомного навантаження на різні режими руйнування анкерів, зокрема руйнування сталі ([9], [10]), висмикування ([11]) та виривання конуса бетону ([12]).

Вплив вогню: під дією високої температури під час пожежі властивості анкерів і основного матеріалу погіршуються. Анкери мають бути сертифіковані для таких умов (див. розділ 6.11). Втрата міцності анкерів у таких випадках залежить переважно від тривалості дії вогню, глибини анкерування та типу руйнування. Reick (2001) [14] зазначає, що сучасні дослідження головним чином базуються на стандартній температурно-часовій кривій ISO 834-1 [13].

Примітка: сучасні дослідження переважно стосуються стандартної температурно-часової кривої відповідно до ISO 834-1 [13].

Reick (2001) охарактеризував напруження в сталі під час руйнування під дією вогню як функцію тривалості пожежі та типу сталі (нержавіюча або оцинкована). Також ним були розроблені рівняння для розрахунку руйнування конуса бетону при впливі вогню тривалістю до 120 хвилин. У більш сучасних дослідженнях поведінку анкерів на клеєвій основі щодо комбінованого руйнування бетону за конусом і висмикування вивчали експериментальними та числовими методами ([15], [16]). Поведінку металевих розпірних анкерів досліджували K. Bergmeister та A. Rieder [17], які відзначили, що залишна несуча здатність таких анкерів зменшується значно більше, ніж у анкерів на клеєвій основі.

4. НОРМАТИВНА БАЗА ДЛЯ СЕРТИФІКАЦІЇ ТА РОЗРАХУНКУ

4.1 Огляд європейської нормативної бази

Анкерні кріплення, встановлені після твердіння бетону, можуть проєктуватися відповідно до положень Єврокоду 2, частина 4 (EC2-4) [1] (див. рис. 4.2). Деталі положень EC2-4 [1] розглядатимуться в розділі 6. Розвиток цих положень протягом останніх десятиліть до моменту публікації EC2-4 [1] схематично показано на рис. 4.1 Сфера застосування анкерів після встановлення поступово впроваджувалася в Європі, починаючи з локальних керівних документів, виданих у 1990-х роках. У період 1989–1997 рр. проєктування перейшло від так званого **методу Карра (К) до методу несучої здатності бетону (CCD)**. У 1997 році Європейська організація технічних оцінок (EOTA) розробила перший нормативний документ для кваліфікації анкерів — ETAG 001 [18]. Розрахунок механічних анкерів подано в Додатку С. Лише у 2019 році цей документ став частиною стандарту EC2-4 [1]. Розрахунок анкерів на клеєвій основі було введено в Технічному звіті EOTA (TR) 029 [19] і нині він також включений до EC2-4 [1].

Примітка: Єврокоди позначаються у цьому посібнику у форматі EN 1992-4 → EC2-4.

Примітка: Метод К базується на простих інженерних моделях, підтверджених регресійним аналізом.

Примітка: Метод CCD визначає несучу здатність для різних комбінацій навантажень і типів конфігурацій анкерів.

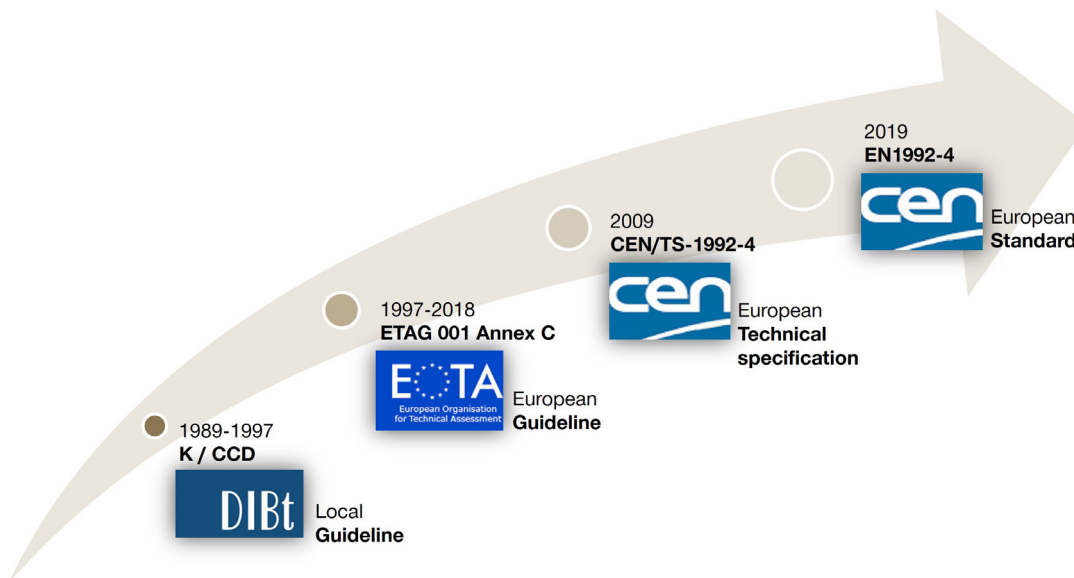


Рис. 4.1 — Хронологія включення пост-встановлених кріплень у Єврокод.

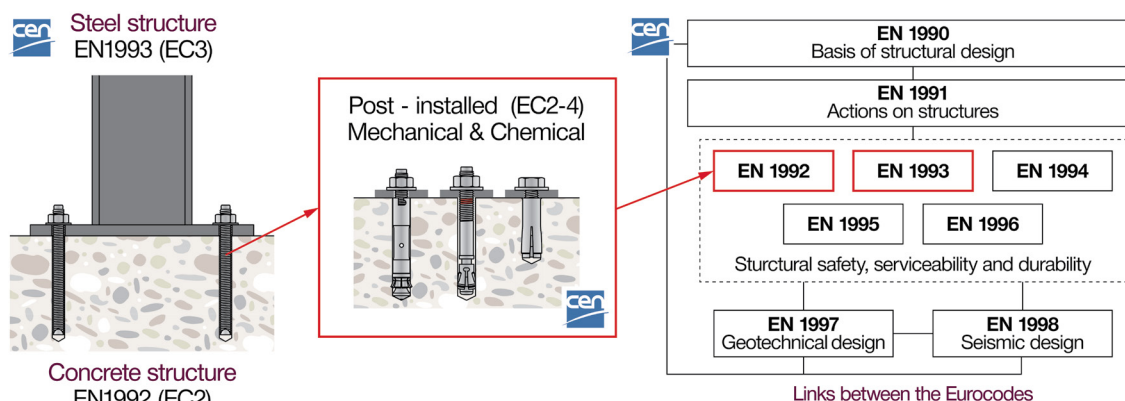


Рис. 4.2 — Взаємозв'язки між Єврокодами та роль EC2-4 у розрахунку пост-встановлених анкерів

Європейський комітет зі стандартизації (CEN) забезпечує платформу для розроблення європейських кодів, стандартів та інших технічних документів, що стосуються різних видів продукції, матеріалів, послуг і процесів. Єврокоди (EC) та стандарти, опубліковані CEN, слугують

довідковими документами для проєктування та будівництва, підтвердження відповідності й визначення умов договорів у галузі будівництва та цивільного інженерного проєктування. Вони охоплюють основні аспекти та принципи конструктивного розрахунку для всіх видів дій і опорів.

Примітка. Єврокоди діють у країнах — членах CEN спільно з чинними національними нормативами (наприклад, національними додатками до окремих Єврокодів).



Рис. 4.3 — Єврокоди та сфера їх застосування

Оцінювання експлуатаційних характеристик анкерів, встановлених після твердіння бетону, регулюється **Європейськими документами з оцінювання (EAD)**, розробленими **Європейською організацією з технічного оцінювання (EOTA)**, до складу якої входять усі органи технічного оцінювання (ТАВ), призначені державами-членами Європейського Союзу та Європейської економічної зони (наприклад, DIBt у Німеччині, CSTB у Франції, ITC-CNR в Італії тощо). Документи EAD охоплюють передумови, припущення, вимоги, випробування, оцінку основних експлуатаційних характеристик і критерії кваліфікації. Оцінені конструкційні системи згідно з конкретним EAD публікуються у **Європейських технічних оцінках (ETA)**, які видаються відповідними **ТАВ**. Документи ETA демонструють підтверджені експлуатаційні характеристики виробів та результати оцінювання методів їх монтажу.

Примітка: лише анкери з маркуванням CE, що відповідає дійсному ETA та EAD, мають викор. в застосуваннях, пов'язаних із безпекою



EOTA координує застосування процедур, установлених для отримання ETA та затвердження EAD. Крім того, як доповнення до європейських стандартів і кодів, **Технічні звіти EOTA (TR)** розробляються як супровідні документи до EAD. Вони містять деталізовану інформацію, пов'язану з будівельною продукцією, зокрема щодо виконання робіт і оцінювання випробувань. Загальна високорівнева структура європейської нормативної системи зображена на рис. 4.4.

Примітка. EOTA відповідає за оцінювання будівельної продукції (у разі відсутності гармонізованого стандарту EN). Проєктування регулюється CEN. Однак, якщо для певного виробу та його призначення не існує стандарту проєктування, EOTA також розробляє проєктні документи (у вигляді технічних звітів TR). Такі документи не повинні суперечити або конфліктувати з проєктними стандартами CEN.



+



Рис. 4.4 — Європейська структура проєктування та оцінювання пост-встановлених кріпильних рішень.

4.2 Розрахунок і сертифікація пост-встановлених анкерів

Згідно зі структурою, наведеною на рис. 4.4, розрахунок і оцінювання охоплюються різними європейськими стандартами та документами EOTA EADs. Регулювання розрахунку здійснюється переважно стандартами CEN, наприклад EC2-4 [1], а в деяких випадках — технічними звітами EOTA TR. Оцінювання передбачає випробування пост-встановлених анкерів за різних впливових умов відповідно до вимог відповідного EAD. Технічні дані публікуються в ETA.

EC2-4 [1] визначає метод розрахунку для пост-встановлених кріплень, які передають навантаження на бетон. Він охоплює всі режими руйнування при навантаженні на розтяг і зсув, як описано в розділі 3.6. Методика використовує характеристичні опори та інші властивості, притаманні конкретному виробу (наприклад, мінімальні відстані до краю, міжосьові відстані, опір вириванню/зчепленню), які наведені у відповідному ETA. Розрахунок опорної плити виконується відповідно до стандартів, що застосовуються для сталевих конструкцій (наприклад, EC3-1-8 [20]). Експлуатаційні характеристики виробу оцінюються згідно з EAD 330232 [21] для механічних анкерів, EAD 330499 [22] — для хімічних і комбінованих анкерів, а також EAD 332795 [23] — для анкерів-шурупів.

Таблиця 4.1 — Документи для розрахунку та сертифікації пост-встановлених анкерів

	Механічний	Хімічний	Анкер-шуруп
			
Сертифікація	Статичне, сейсмічне, вогневе: EAD 330232 Втома: EAD 330232	Статичне, сейсмічне, вогневе (100 років): EAD 330499 Втома: EAD 330250	Статичне, сейсмічне: EAD 332795 Втома, вогонь: Не охоплено
Розрахунок	Статичне та сейсмічне навантаження: EN 1992-4 Втома: EN 1992-4 або EOTA TR 061 Вогонь: EN 1992-4	Статичне та сейсмічне навантаження: EN 1992-4 Втома: EN 1992-4 або EOTA TR 061 Вогонь: EN 1992-4 та EOTA TR 082	Статичне та сейсмічне навантаження: EOTA TR 075 Втома, вогонь: Не охоплено

Еволюція пост-встановлених анкерів. Методи розрахунку та оцінювання, розроблені за останні два десятиліття, наведено нижче на рис. 4.5 і рис. 4.6 відповідно.

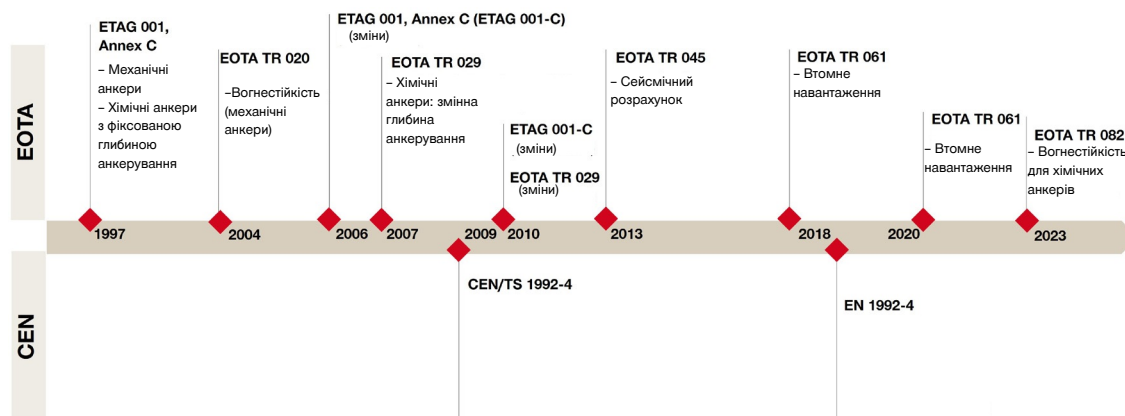


Рис. 4.5 — Еволюція методів розрахунку з 1997 року

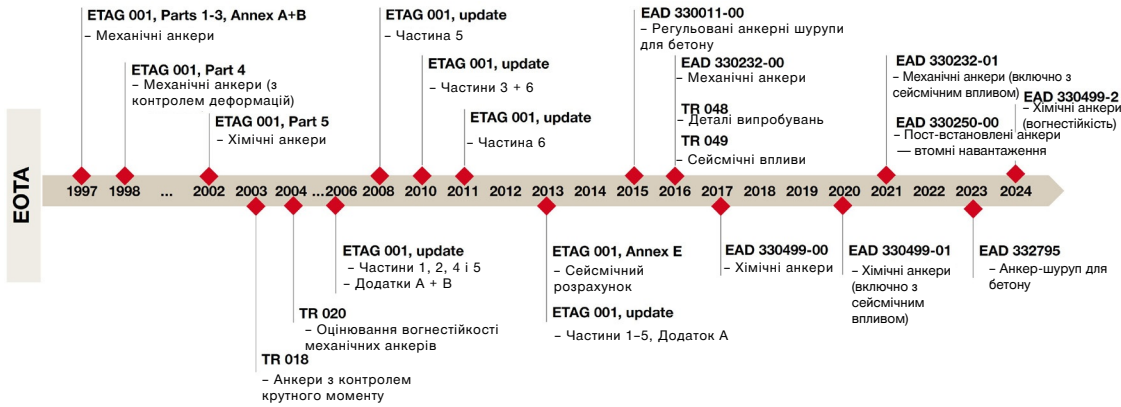


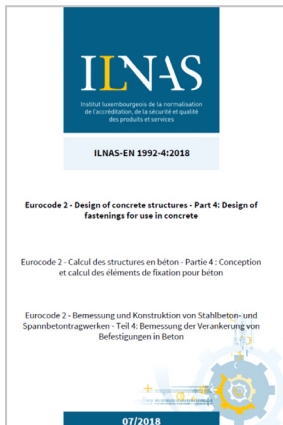
Рис. 4.6 — Еволюція керівних документів із сертифікації з 1997 року

4.3 Розрахунок пост-встановлених анкерів

4.3.1 Розрахунок і сфери застосування відповідно до EC2-4

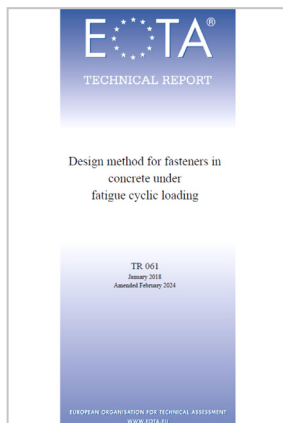
EC2-4 [1] містить вимоги до критеріїв розрахунку пост-встановлених анкерів. Основний обсяг EC2-4 [1] узагальнено нижче:

Примітка. EC2-4 охоплює розрахунок за статичних, сейсмічних і втомних дій, а також за умов вогневого впливу.



- Розрахунок пост-встановлених механічних анкерів, зокрема розпірних, анкерів типу підрізні та анкер-шурупів для бетону.
- Розрахунок пост-встановлених хімічних і комбінованих хімічно-розпірних анкерів.
- Бетон нормальної щільності як основний матеріал.
- Можливість розрахунку як одиночних, так і груп кріплень.
- Розрахунок анкерів на статичні, сейсмічні та втомні дії; також охоплено розрахунок механічних анкерів за умов дії вогню.
- Вимоги до довговічності та категорій експлуатаційних показників анкерів.
- Перевірка бетонного елемента на дії навантажень від кріплень.

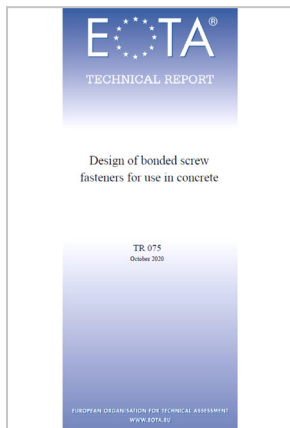
4.3.2 Розрахунок анкерів за втомного навантаження (EOTA TR 061)



- EOTA TR 061 [24] розширює сферу EC2-4 [1], вводячи додаткові методи розрахунку, що враховують реалістичні умови навантаження (очікувану кількість циклів та частки статичних і втомних дій).
- Документ охоплює розрахунок пост-встановлених анкерів, сертифікованих за EAD 330250 [25], при дії розтягу, зсуву та їх комбінації для циклічного (втомного) навантаження.

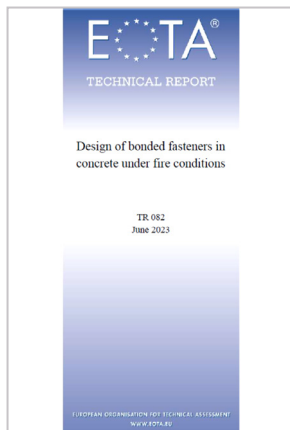
Примітка. Деталізовані положення щодо розрахунку на втому наведено в розділі 6.12.

4.3.3 Розрахунок хімічних гвинтових анкерів (EOTA TR 075)



- Цей технічний звіт є доповненням до EC2-4 [1] для розрахунку анкер-шурупів у бетоні у поєднанні з хімічним (зв'язувальним) матеріалом. Основна відмінність полягає в урахуванні комбінованого опору, який складається з внеску анкер-шурупа та клеєвого матеріалу під дією навантаження на розтяг.

4.3.4 Розрахунок хімічних анкерів за дії вогню (EOTA TR 082)



- Цей технічний звіт охоплює розрахунок хімічних анкерів при впливі вогню при розтягу, зсуві та їх комбінованих діях.
- Він базується на методиці EC2-4 [1] для всіх режимів руйнування з додатковим урахуванням комбінованого висмикування та руйнування бетону у вигляді конуса.
- Документ передбачає два методи аналізу:
Спрощений метод — враховує максимальну температуру вздовж глибини анкерування для розрахунку опору комбінованого висмикування та бетонного конуса.
Метод інтегрування опору — враховує розподіл температури вздовж глибини анкерування більш детально.
- Рекомендовані температурні профілі для одного анкера, підданого впливу вогню, подано у вигляді кубічної поліноміальної залежності між температурою анкера та глибиною анкерування. Дані наведено для тривалості впливу вогню 30, 60, 90 і 120 хвилин.

Примітка. Детальні положення щодо розрахунку на вогнестійкість наведено в розділі 6.11.2.

4.4 Сертифікація пост-встановлених анкерів

Сертифікація пост-встановлених анкерів охоплює процес оцінювання їхньої ефективності та придатності для конкретного застосування. Процес сертифікації включає кілька етапів: аналіз технічної документації виробника, незалежні випробування, контроль якості та врахування впливу навколишнього середовища. Основні характеристики продукції визначаються у Європейському технічному оцінюванні (ETA) та використовуються для розрахунку відповідно до EC2-4 [1] або відповідного EOTA TR. Усі методи сертифікації пост-встановлених анкерів, описані в цьому документі, базуються на EOTA EADs.

4.4.1 Сертифікація механічних анкерів згідно з EAD 330232

Документ EAD 330232 [21] охоплює пост-встановлені механічні металеві анкери, що встановлюються у попередньо просвердлені отвори, перпендикулярні до поверхні бетону, та закріплюються механічними засобами — наприклад, за рахунок тертя або механічного заклинювання.

Цей документ включає оцінювання анкерів із контролем крутного моменту та контролем деформації для розпірних анкерів.

Також охоплює анкери з підрізанням та анкер-шурупи. Для них визначаються характеристичні опори щодо відповідних режимів руйнування на розтяг і зсув. Документ встановлює вимоги до випробувань та оцінювання за такими ключовими параметрами (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 — Основні параметри, охоплені в EAD 330232 [21]

Параметр	Опис
Мінімальний діаметр різби	6 мм (5 мм — для сухих внутрішніх умов і статично невизначених конструкцій)
Мінімальна глибина анкерування	40 мм (30 мм — для сухих внутрішніх умов і статично невизначених конструкцій)
Температура під час монтажу	від -40 °C до +80 °C
Розрахунковий термін служби	50 і 100 років
Основний матеріал	Бетон класу міцності C20/25 – C50/60
	Неконцентрований і розтрісканий бетон
	Вплив сталевих волокон
Чутливість до умов монтажу	Метод свердління
	Допуски діаметра бурів
	Недостатній або надмірний крутний момент
	Мінімальна відстань до краю та між анкерами
Умови навколишнього середовища	Водневе окрихчення (лише для анкер-шурупів)
Типи навантажень	Сейсмічні категорії C1 і C2
	Вплив вогню до 120 хвилин
Захист від корозії	Оцінювання різних типів сталі та/або покриттів
Характеристичні переміщення	Значення для короткочасних і довготривалих навантажень

4.4.2 Сертифікація хімічних і розпірних хімічних анкерів згідно з EAD 330499

EAD 330499 [22] охоплює оцінювання хімічних та розпірних хімічних анкерів. Склеювальний матеріал і закладена металева частина розміщуються в попередньо просвердлених отворах, а анкерування відбувається переважно за рахунок зчеплення. Металева частина може бути різьбовим стрижнем, арматурним стрижнем періодичного профілю, внутрішньою різьбовою гільзою або іншою формою, виготовленою зі сталі, нержавіючої сталі чи ковкого чавуну.

У цьому документі EAD хімічні анкери класифікуються за принципом дії, способом змішування та встановлення, а також за іншими характеристиками, що стосуються монтажу — такими як тип склеювального матеріалу (органічний/неорганічний), технологія свердління тощо.

Характеристичні опори відповідно до релевантних форм руйнування під дією навантажень на розтяг і зсув визначаються з особливим урахуванням міцності зчеплення. Документ EAD 330499 [22] охоплює випробування та оцінювання відповідно до наведених нижче основних вимог (табл. 4.3).

Примітка: Див. відповідний ETA для кожного продукту, щоб отримати характеристичні значення опору, які використовуються під час розрахунку (див. розділи 6.6 та 6.12).

Таблиця 4.3 — Параметри, що враховуються в EAD 330499 [22]

Параметр	Опис
Мінімальний діаметр різьби	6 мм
Мін. та максимальна глибина анкерування	≥ 40 мм та $\geq 4d_i \leq 20d_i$
Температура під час монтажу	від -40 °C до $+40$ °C
Розрахунковий строк служби	50 і 100 років
Основний матеріал	Клас міцності бетону C12/15 – C90/105
	Нетріщинуватий та тріщинуватий бетон
	Вплив сталевих волокон
Чутливість до умов монтажу	Метод свердління
	Очищення отвору
	Напрямок монтажу (вертикальний вниз/вгору та горизонтальний)
	Мінімальна відстань до краю та між анкерами
	Мінімальний час твердіння
Експлуатаційні умови	Цикли заморожування та відтавання
	Висока лужність та сірчиста атмосфера
	Робоча температура
Типи навантажень	Тривале навантаження
	Сейсмічні категорії C1 та C2
	Вплив вогню до 120 хв
Захист від корозії	Оцінювання різних типів сталей та/або покриттів
Характеристичні переміщення	Значення для коротко- та довготривалих навантажень

4.4.3 Сертифікація механічних і хімічних анкерів згідно з EAD 330250

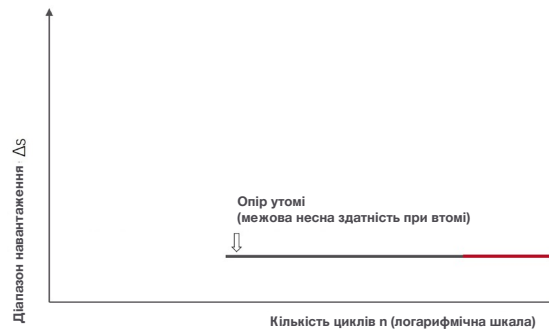
Документ EAD 330250 [25] охоплює як механічні, так і хімічні пост-встановлені анкери, призначені для прийняття втомних навантажень на розтяг і зсув. Анкери зазвичай повинні бути зафіксовані шляхом затягування гайок, щоб запобігти будь-якому послабленню під час дії втомного навантаження. При дії втомних зсувних навантажень не допускається наявність кільцевого зазору між анкером і отвором у закріплюваному елементі. Існує три методи оцінювання ефективності анкерів під дією втомних навантажень, наведені в таблиці 4.4 та на рисунку 4.7.

Таблиця 4.4 — Методи, наведені в EAD для сертифікації за критерієм втоми

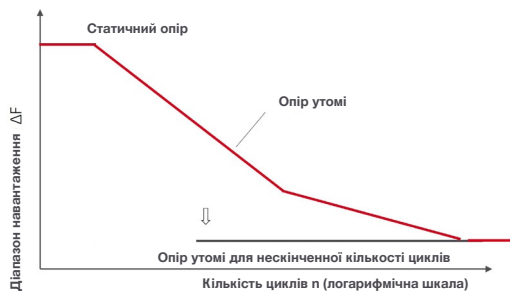
Метод	Характеристики
Метод А	- Опір задається як неперервна функція, що залежить від кількості циклів - Експериментальне визначення базується щонайменше на 9 точках оцінювання - Використовуються методи розрахунку I та II згідно з EOTA TR 061 [24] (див. розділ 6.12 та рис. 4.7a)
Метод В	- Визначається лише межа втомної міцності (рівень витривалості для нескінченної кількості циклів) - Використовується метод розрахунку II згідно з EOTA TR 061 [24] (див. розділ 6.12 та рис. 4.7b)
Метод С	- Лінеаризована функція втомного опору, що залежить від кількості циклів - Експериментальне визначення базується щонайменше на 4 точках оцінювання - Спрощений варіант методу А - Поширюється лише на хімічні та розпірні анкери з контролем моменту затягування - Використовуються методи розрахунку I та II згідно з EOTA TR 061 [24] (див. розділ 6.12 та рис. 4.7c)



а) Метод А



б) Метод В



с) Метод С

Рис. 4.7 — Різні методи оцінювання (графічне представлення)

4.4.4 Сертифікація хімічних гвинтових анкерів згідно з EAD 332795

Документ EAD 332795 [23] охоплює оцінювання пост-встановлених хімічних гвинтових анкерів. Критерії сертифікації таких анкерів враховують параметри надійності, релевантні як для механічних, так і для хімічних анкерів. Експлуатаційні характеристики визначаються комбінацією бетонного гвинта та склеювального складу.

Хімічний гвинтовий анкер не може оцінюватися відповідно до EAD 330499 [22], оскільки зовнішній діаметр різьби сталевго елемента перевищує діаметр просвердленого отвору; також він не підпадає під EAD 330232 [21], оскільки деякі суттєві характеристики відрізняються (наприклад, комбінований механізм виривання та комбінований механізм виривання бетону,

вплив тривалого навантаження, ψ_{sus}^0). Документ EAD 332795 [23] охоплює такі аспекти у своєму обсязі (табл. 4.5):

Таблиця 4.5 — Параметри, що враховуються в EAD 332795 [23]

Параметр	Опис
Мінімальний діаметр	6 мм
Мінімальна та максимальна глибина анкерування	$\geq 40 \text{ мм}$ і $\leq 8d_o$
Температура під час монтажу	-40°C to +40°C
Розрахунковий строк служби	50 років
Основний матеріал	Клас міцності бетону C20/25 – C50/60
	Нетріщинуватий та тріщинуватий бетон
Чутливість до умов монтажу	Метод свердління
	Очищення отвору
	Напрямок монтажу (вертикальний вниз/вгору та горизонтальний)
	Мінімальна відстань до краю та між анкерами
	Мінімальний час твердіння
Експлуатаційні умови	Цикли заморожування та відтавання
	Робоча температура
	Висока лужність і сірчиста атмосфера
	Воднево-крихке руйнування
Типи навантажень	Тривале навантаження
	Сейсмічні категорії C1 та C2
Характеристичні переміщення	Значення для коротко- та довготривалих навантажень

5. РІШЕННЯ HILTI

5.1 Критерії вибору типу анкера

Основні критерії для вибору відповідного пост-встановленого анкера залежать від різних факторів, наведених на рис. 5.1.



Рис. 5.1 — Основні критерії вибору анкера

5.1.1 Базовий матеріал — бетон і його властивості

Сьогодні використовується широкий спектр будівельних матеріалів, що забезпечують різні умови анкерування. Властивості базового матеріалу відіграють вирішальну роль під час вибору відповідного анкера та визначення навантаження, яке він може сприймати. У цьому довіднику як базовий матеріал розглядається лише звичайний бетон. Несуча здатність бетону на розтяг використовується анкером для передачі зусиль. Несуча здатність анкера може зменшуватися, якщо ущільнення бетону виконано неналежним чином.

Бетон, на який посилається цей довідник у контексті пост-встановлених систем кріплення, повинен бути спроектований, детально опрацьований, виготовлений, транспортований, укладений, ущільнений, витриманий і випробуваний відповідно до вимог чинних стандартів Eurocode та інших норм. Матеріал бетону також має відповідати таким вимогам:

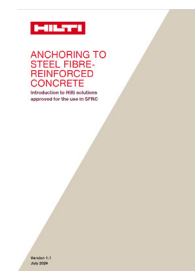
- 1) Звичайний важкий бетон (без волокон) з класом міцності, що відповідає вимогам EAD і стандарту розрахунку, згідно з EN 206 [26].
- 2) Неармований звичайний бетон повинен відповідати мінімальним вимогам до армування відповідно до EC2-1-1 [27], якщо використовується для несучих конструкцій.
- 3) Бетон не повинен бути карбонізованим.
- 4) Максимальний допустимий вміст хлоридів у бетоні для передбачуваного застосування, згідно з EN 206 [26, таблиця 15], становить Cl 0,20 або 0,40 % (відносно вмісту цементу) — залежно від ETA конкретного продукту.

Товщина базового матеріалу також є важливим параметром, який необхідно враховувати для правильного вибору анкера, оскільки придатність залежить від його типу.

Примітка: Анкери можуть встановлюватися в сталеві фібробетон (SFRC) із волокнами відповідно до EN 14889-1 [59], доданими до бетонної суміші, якщо вони були оцінені згідно з EAD 330232 [21] або EAD 330499 [22]. Це оцінювання не враховує можливого позитивного впливу волокон SFRC на роботу анкера.

Примітка: Бетон може розглядатися як нетріщинуватий або тріщинуватий. Це припущення суттєво впливає на розрахункові результати.

Примітка: Див. технічний документ Hilti про кріплення в сталеві фібробетоні для отримання додаткової інформації.



5.1.2 Способи встановлення та конфігурації анкерів

Інші чинники, які потрібно враховувати під час вибору анкера, включають відстань до краю бетонного елемента, крок між анкерами та товщину базового матеріалу. Обмеження щодо розташування анкерів і їх кількості в групі, зумовлені конструктивними вимогами, є важливими параметрами, які необхідно перевіряти під час вибору анкерів.

Примітка: Мінімальні відстані між анкерами, відстані до краю та мінімальну товщину елемента наведено у відповідному ETA.

Також слід враховувати метод встановлення або фіксації анкерів (попереднє встановлення або наскрізне, як пояснено в розділі 3.3).

5.1.3 Тип навантаження

Тип навантаження — статичне, сейсмічне, втомне, вогневе тощо — впливає на правильність вибору анкера, оскільки несуча здатність змінюється залежно від умов навантаження. Для застосування слід використовувати лише ті анкери, які сертифіковані для відповідного типу навантаження. Використання анкерів, що не були належно випробувані або оцінені, може призвести до суттєвих ризиків для безпеки.

5.1.4 Розподіл навантаження в групі анкерів

Вибір анкера залежить від типу навантаження (див. розділи 3.4 і 3.5). При сейсмічному або втомному навантаженні, якщо між анкером і отвором у закріплюваному елементі існує зазор, опір зменшується через «ударний» ефект під час динамічної дії (див. розділ 6.10). Якщо кріплення навантажується у напрямку до краю бетонного елемента (зсув), діаметр монтажного отвору в анкерній пластині має важливе значення. Зазвичай отвір у пластині більший за діаметр анкера, щоб забезпечити легкий монтаж, тому анкери, як правило, не навантажуються рівномірно. Стандарт EC2-4 [1] враховує це, передбачаючи, що навантаження сприймає лише ряд анкерів, розташований ближче до краю елемента. Другий ряд анкерів активується лише за умови значної деформації анкерної пластини, що часто призводить до руйнування бетонної кромки.

Для підвищення ефективності при реверсивних циклічних навантаженнях, характерних для сейсмічних і втомних дій, Hilti розробила набір для заповнення (Hilti filling set) (див. рис. 5.2). Він складається зі спеціальної шайби, яка дозволяє вводити клейовий склад HIT у зазор отвору, сферичної шайби, гайки та контргайки.

Примітка: Використання набору для заповнення Hilti суттєво підвищує опір зсуву. Невигідне припущення, що все навантаження сприймає лише один ряд анкерів, може бути відкинута, оскільки зусилля рівномірно розподіляються між анкерами (див. метод SOFA у розділі 6.5.1).

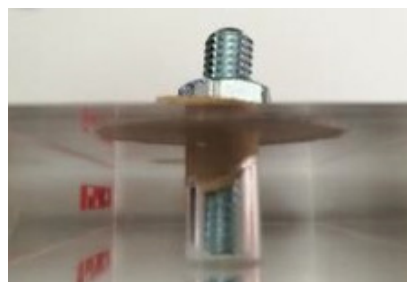
Примітка: Див. технічний паспорт і інструкцію з монтажу (IFU) для набору Hilti filling set, доступні онлайн на сайті Hilti.



а) Набір для заповнення Hilti



б) Набір для заповнення Hilti під час монтажу



в) Неправильний спосіб заповнення отвору

Рис. 5.2 — Набір для заповнення Hilti

5.1.5 Умови навколишнього середовища

Умови навколишнього середовища часто визначають вибір типу анкера.

Температура під час монтажу та в процесі експлуатації відіграє важливу роль у виборі анкера, оскільки вона впливає на процес твердіння хімічних анкерів. За низьких температур складніше вводити клейовий склад через підвищення його в'язкості. Анкери мають проєктуватися відповідно до **діапазонів робочих температур** у процесі експлуатації, зазначених у відповідному ETA, а також **температури монтажу** згідно з IFU, з дотриманням вказаного часу твердіння.

Умови експлуатаційного середовища визначають необхідну корозійну стійкість анкера. Потенціал до корозії є важливим критерієм під час вибору анкера, наприклад, у морських умовах потрібен високий рівень захисту від корозії. Для механічних і хімічних анкерів слід враховувати корозійну стійкість сталевих елементів, гайки, шайби та клейового складу. Найпоширенішим типом корозії в навколишньому середовищі є електрохімічна корозія, що проявляється у трьох основних формах: рівномірна, гальванічна та пітингова. Існують численні способи захисту від корозії за допомогою відповідних матеріалів і покриттів. **Анкери з вуглецевої сталі з цинковим покриттям** забезпечують достатній рівень захисту в умовах низького ризику корозії, наприклад у сухих приміщеннях. Для зовнішніх або потенційно вологих середовищ кращим вибором є **нержавіюча сталь**. У випадках, коли присутні агресивні хімічні речовини, схильні до електрохімічної корозії (наприклад, солі проти обмерзання), слід використовувати **висококорозійностійку сталь**.

Анкери з гарячим цинкуванням або з нержавіючої сталі можуть застосовуватися у зовнішніх умовах, однак мають певні обмеження щодо терміну служби та умов використання. Анкери з оцинкованої сталі або нержавіючої сталі класу A2 рекомендується застосовувати лише в сухих умовах усередині приміщень, із розрахунковим строком служби 50 років. Випробування поведінки різних матеріалів у середовищі дорожніх тунелів показали, що для утримання анкерів у таких висококорозійних умовах необхідні спеціальні сталі з підвищеною стійкістю до корозії. Високолегована нержавіюча сталь 1.4529 (HCR) виявилася єдиним матеріалом, що демонструє мінімальні ознаки корозії. Нержавіюча сталь класу III ("A4") за корозійною стійкістю зазвичай застосовується для зовнішніх або морських умов, а також може використовуватися в хімічно агресивному середовищі з високою вологістю, забезпечуючи довготривалу експлуатацію. Деякі приклади корозійних середовищ наведено на рис. 5.3. Докладніше див. у довіднику Hilti «Довідник із корозії» [28].



а) Дорожні тунелі — середовище з високою корозійною агресивністю



б) Сильна корозія оцинкованої шайби з вуглецевої сталі



с) Корозія сталевих кронштейнів в приміщенні басейну

Рис. 5.3 — Приклади корозійних середовищ

Стандарт EC2-4 [1] визначає вимоги до захисту від корозії для анкерів і поділяє умови застосування на три категорії:

- 1) **Кріплення у сухих / внутрішніх умовах:** не потребують значного захисту від корозії; наприклад, достатньо електрооцинкованого покриття. Цей клас впливу відповідає категоріям X0 та XC1 згідно з EC2-1-1 [27].
- 2) **Кріплення у зовнішніх атмосферних або постійно вологих внутрішніх умовах:** рекомендується використовувати нержавіючі анкери відповідного класу, який визначається згідно з умовами експлуатації — морське, промислове тощо. Як правило, застосовуються аустенітні сталі з вмістом не менше 17 % хрому і 12 % нікелю, а також молібденом для

Примітка: Три основні чинники, що впливають на корозію: температура/ вологість, діоксид сірки та хлориди.



для підвищення стійкості. Ці умови експлуатації відповідають категоріям XC2, XC3 і XC4 згідно з EC2-1-1 [27].

- 3) **Кріплення в умовах високої корозійної агресивності через дію хлоридів і діоксиду сірки:** якщо анкери експлуатуються в одному з таких середовищ: а) занурення в морську воду або зона бризів; хлоридна атмосфера всередині басейнів, дорожніх тунелів чи паркінгів, де застосовуються протижелезні реагенти; б) сильне хімічне забруднення з наявністю діоксиду сірки — анкери повинні бути виготовлені з нержавіючої сталі, спеціально призначеної для умов високої корозійної агресивності. Загалом для таких умов застосовується нержавіюча сталь, що містить близько 20 % хрому, 20 % нікелю та 6 % молібдену. Цей клас впливу відповідає категоріям XD і XS згідно з EC2-1-1 [27].

5.2 Рішення Hilti

Hilti пропонує широкий асортимент анкерів, розроблених для безпечного та надійного кріплення в різних будівельних застосуваннях. Нижче наведено основні анкерні рішення, що пропонує Hilti:

Механічні анкери: Hilti пропонує різні типи механічних анкерів (наприклад, серія HST), зокрема клинові, гільзові та вставні анкери (drop-in). Вони забезпечують високу несучу здатність і можуть використовуватись як для статичних, так і для динамічних навантажень.

Гвинтові анкери. Гвинтові анкери Hilti (наприклад, серія HUS) є універсальним і продуктивним рішенням для кріплення у широкому діапазоні матеріалів — бетони, цегляній кладці, гіпсокартоні. Вони мають самонарізні різьби, що забезпечують легкий монтаж, і можуть використовуватись як для тимчасових, так і для постійних кріплень.

Підрізні анкери: Анкери з підрізом Hilti, такі як серія HDA, ідеально підходять для застосувань, де потрібна висока несуча здатність і малі відстані до краю елемента. Ці анкери демонструють відмінну ефективність у тріщинуватому бетони.

Хімічні анкери: Hilti призначені для зчеплення з основним матеріалом, забезпечуючи високу несучу здатність. Вони зазвичай застосовуються в умовах великих навантажень, малих відстаней до краю та між анкерами, а також коли потрібна змінна глибина анкерування. До хімічних анкерів Hilti належать системи ін'єкційного типу Hilti HIT і капсульні системи HVU, наприклад:

- Гібридні мінеральні склади швидкого твердіння (наприклад, Hilti HIT-HY 200-A V3)
- Епоксидні склади повільного твердіння (наприклад, Hilti HIT-RE 500 V4)
- Капсульні системи (наприклад, HVU2)

Посібник із технології кріплень (Fastening Technology Manual, FTM) [29] містить детальну інформацію про механічні та фізичні властивості всіх пост-встановлених анкерних систем Hilti, враховуючи основні фактори, що впливають на їх розрахунок і кваліфікацію. Документ також містить рекомендації з проєктування та добору анкерів, що допомагають інженерам обрати оптимальне рішення для конкретного застосування.

Примітка: Hilti надає повні технічні дані, програмне забезпечення для розрахунку та інженерну підтримку, щоб допомогти користувачам обрати найбільш відповідне анкерне рішення для конкретного застосування. Рекомендується звертатися до технічних фахівців Hilti або відвідати офіційний вебсайт компанії для отримання детальної інформації про анкерні продукти та їхні області застосування.

Властивості деяких основних продуктів наведено в табл. 5.1 (механічні анкери), табл. 5.2 і 5.3 (хімічні анкери). Спеціальні типи анкерів показані в табл. 5.4.

Примітка: Докладніше див. у посібнику Hilti Fastening Technology Manual (FTM).



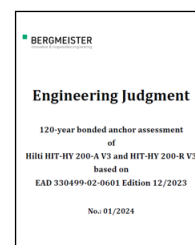
Таблиця 5.1 — Основні характеристики деяких механічних анкерів Hilti

Параметр	HST-4	HSL4	HDA	HUS4
Тип анкера				
Принцип дії	Тертя	Тертя	Механічне зачеплення	Механічне зачеплення
Тип встановлення	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне	Наскрізне
Діапазон розмірів	M8 – M20	M8 – M24	M10 – M20	d8 – d16
Сертифікація	EAD 330232 (статичне, сейсмічне, вогневе), EAD 330250 (втома)			
Стандарт розрахунку	EC2-4	EC2-4, EOTA TR 061	EC2-4, EOTA TR 061	EC2-4
ETA	ETA-21/0878	ETA-19/0556	ETA-99/0009	ETA-20/0867
Матеріал	Вуглецева або нержавіюча сталь (оцинкована)	Вуглецева сталь (оцинкована)	Нержавіюча або оцинкована сталь	Нержавіюча або оцинкована сталь
Характеристики	Статичне, сейсмічне, вогневе	Статичне, сейсмічне, втомне, вогневе	Статичне, сейсмічне, втомне, вогневе	Статичне, сейсмічне, вогневе
Мінімальна відстань до краю	40–80 мм	60–120 мм	80–200 мм	35–65 мм
Ефективна глибина анкерування	30–180 мм	60–210 мм	100–250 мм	40–130 мм
Макс. термін служби	50 років	50 років	50 років	50 років

Таблиця 5.2 — Основні характеристики деяких хімічних анкерів Hilti

Параметр	HIT-RE 500 V4	HIT-HY 200-A V3	HVU2
			
Принцип дії	Зчеплення	Зчеплення	Зчеплення
Сертифікація	EAD 330499 (статичне, сейсмічне, вогневе), EAD 330250 (втома)		
Стандарт розрахунку	EC2-4, EOTA TR 082, EOTA TR 061	EC2-4, EOTA TR 082, EOTA TR 061	EC2-4, EOTA TR082, EOTA TR 061
ETA	ETA-20/0541, ETA-23/0277	ETA-19/0601, ETA-23/0277	ETA-16/0515, ETA-23/0277
Мін. та максимальна глибина анкерування	Від мінімум 60 мм (4d) до 20d		80 мм – 270 мм
Характеристики	Статичне, сейсмічне, вогневе	Статичне, сейсмічне, вогневе	Статичне, сейсмічне, вогневе
Мін./макс. температура монтажу	-5°C to +40°C	-10°C to +40°C	-10°C to +40°C

Примітка: Див. експертний звіт Prof. K. Bergmeister щодо розрахунку терміну служби 120 років для систем HIT-RE 500 V4 і HIT-HY 200-A V3.



Параметр	HIT-RE 500 V4	HIT-HY 200 A V3	HVU2
Робоча температура в процесі експлуатації (макс. довготривала / короткочасна)	Діапазон 1: +24°C / +40°C Діапазон 2: +43°C / +55°C Діапазон 3: +55°C / +75°C	Діапазон 1: +24°C / +40°C Діапазон 2: +50°C / +80°C Діапазон 3: +72°C / +120°C	Діапазон 1: +24°C / +40°C Діапазон 2: +50°C / +80°C Діапазон 3: +72°C / +120°C
Час роботи при +20 °C	30 хв	9 хв	Миттєво
Час твердіння при +20 °C	7 год	60 хв	5 хв
Макс. термін служби	100 років	100 років	50 років

Таблиця 5.3 — Різні типи сталевих елементів для хімічних анкерів

Параметр	HIT-HY 200-A V3 HIT-RE 500 V4	HIT-HY 200-A V3 HIT-RE 500 V4 HVU2	HIT-HY 200-A V3	HIT-HY 200-A V3	HVU2
					
Діапазон розмірів	M8-M30	M8-M20	M8-M20	M12-M20	M8-M30
Тип встановлення	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне	Попереднє / наскрізне
Позначення анкерів	Анкерний стрижень: HAS-U HAS-U HDG HAS-U A4 HAS-U HCR	Внутрішня різьбова гільза: HIS-N HIS-RN	Анкерний стрижень: HIT-Z HIT-Z-F HIT-Z-R	Анкерний стрижень: HAS-D	Анкерний стрижень: HAS-U(-P) HAS-U(-P) HDG HAS-U(-P) A4 HAS-U(-P) HCR

Таблиця 5.4 — Основні характеристики деяких найпопулярніших гібридних анкерів Hilti

Параметр	HIT-Z	Hybrid HUS
		
Принцип дії	Хімічно-розпирне кріплення	Механічне зачеплення та зчеплення
Тип встановлення	Попереднє / наскрізне	Наскрізне
Діапазон розмірів	M8 – M20	d10 – d16
Сертифікація	EAD 330499	EAD 332795
Стандарт розрахунку	EC2-4	EOTA TR 075
ETA	ETA-12/0006	ETA-18/1160
Характеристики	Статичне, сейсмічне навантаження	Статичне, сейсмічне, вогневе навантаження
Мін./макс. температура монтажу	+5°C to +40°C	-10°C to +40°C
Час роботи при +20 °C	9 хв	Миттєво
Час твердіння при +20 °C	60 хв	Можливість негайного навантаження
Макс. термін служби	100 років	50 років

Примітка: Hilti надає технічні дані для різьбових стрижнів діаметром до M80 у поєднанні з HIT-RE 500 V4.

Примітка: Уся інформація, наведена в цьому розділі, зазвичай входить до сфери дії відповідного ETA та інструкції з монтажу (IFU), що надається Hilti. Для нестандартних застосувань рекомендується звертатися до фахівців Hilti.

5.3 Механічний чи хімічний анкер: коли який застосовувати?

Використання механічних або хімічних анкерів має свої переваги та обмеження, що залежать від умов монтажу та вимог розрахунку. Основні критерії наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 — Основні фактори правильного вибору анкерів

Тип анкера	Механічний	Хімічний
Принцип дії	Механічне зачеплення або тертя	Зчеплення
Умови навантаження анкера	Негайно готовий до повного навантаження	Потребує певного часу для твердіння перед повним навантаженням
Вимоги до відстаней і кроку анкерів	Великі відстані до краю та між анкерами (крім гвинтових і анкерів із підрізом)	Підходить для менших відстаней до краю та між анкерами
Стан матеріалу основи	Міцний і стабільний матеріал, здатний витримувати монтажні зусилля	Підходить також для матеріалів із нижчою міцністю
Очищення отвору	Менш чутливий до недостатнього очищення	Більш чутливий до якості очищення отвору
Глибина анкерування	Фіксована або з незначними варіаціями	Доступна змінна та велика глибина анкерування
Температура під час монтажу та експлуатації	Не має суттєвого впливу	Більш чутливий параметр
Повзучість	Не суттєва	Може мати значний вплив при тривалому навантаженні

5.4 Hilti як постачальник комплексних рішень

Hilti пропонує широкий асортимент **механічних і хімічних анкерів**, які охоплюють більшість сфер застосування та варіантів навантаження в різних умовах навколишнього середовища. Крім того, Hilti надає повний комплекс рішень, що включає необхідну технічну експертизу, програмне забезпечення для розрахунків, документацію та сервісну підтримку. Також компанія пропонує рішення для надійної ідентифікації анкерів у бетоні за допомогою **технології Tracefast** (див. розділ 8.3.7). Ця технологія забезпечує повну простежуваність кожного кріплення, дозволяє визначати, що саме встановлено, та формувати уніфіковану стандартизовану документацію, яку можна легко передавати.

Увесь робочий процес проєкту можна умовно поділити на три етапи: **проєктування, виконання робіт та інспекцію**. Два основні етапи — це проєктування та будівництво. Під час першого етапу відповідальність проєктувальників полягає у виборі найбільш відповідного, оптимізованого й сертифікованого рішення в найкоротші терміни. Для підрядників і будівельних компаній ключовими факторами є якість монтажу, продуктивність на об'єкті та належна документація, що забезпечують відповідність вимогам проєкту. Повний комплекс рішень Hilti як постачальника повного циклу наведено на рис. 5.4.

Примітка: Технологія Tracefast може бути особливо корисною для застосувань із високими вимогами до безпеки, наприклад, на атомних електростанціях.



Примітка: Hilti може підтримати вас на всіх етапах — від початкового етапу проєктування, пропонуючи оптимальне рішення в потрібний момент для безпечнішого монтажу. Також Hilti здійснює оцінювання ефективності анкерів у співпраці з різними учасниками процесу — проєктувальниками, інженерами, підрядниками, монтажними командами та замовниками проєктів.



Рис. 5.4 — Hilti як постачальник комплексних рішень для пост-встановлених анкерів

5.5 Етапи розрахунку та монтажу

Дві основні фази — розрахунок і монтаж пост-встановлених анкерів — включають кілька кроків, необхідних для забезпечення правильного проєктування та встановлення.

Різні учасники процесу залучені до кожного етапу та відповідають за виконання певних завдань.

Послідовність етапів і дії, що виконуються, показано на рис. 5.5.



Рис. 5.5 — Схема робочого процесу застосування пост-встановлених анкерів для з'єднання бетон-до-бетону (S2C)

1. Концептуальна стадія проєктування

- Визначення архітектурних і конструктивних критеріїв — форма, розміри, товщина, вплив середовища, вимоги до довговічності та стійкості.
- Визначення типу наявної конструкції, її елементів та деталей.
- Вибір загальних критеріїв і цілей проєктування, нормативних документів, ЕТА, критеріїв підбору рішення та попередніх проектних значень для початку розрахунку.

Примітка: Детальні технічні дані та вимоги до анкерів для концептуальної стадії наведено в Hilti Fastening Technology Manual (FTM).

2. Конструктивний аналіз

- Визначення розрахункових навантажень (статичних, сейсмічних, втомних, вогневих).
- Визначення умов монтажу, що впливають на проєктування.
- Перевірка сумісності матеріалу з'єднуваних елементів і розмірів базового матеріалу.

- Вибрати відповідний метод розрахунку.
- Задати цільову несну здатність (коефіцієнт використання) та/або граничні допустимі напруження.
- Визначити комбінації навантажень.

3. Детальне проєктування / специфікація

- Визначення конкретних вимог проєкту та мети встановлення анкерів.
- Вибір відповідного типу анкера залежно від умов застосування та вимог до навантаження.
- Планування схеми розміщення анкерів і відстаней між ними з урахуванням навантажень і конструктивних вимог.
- Розрахунок і перевірка граничних та експлуатаційних напружень.
- Перевірка коефіцієнта використання несної здатності для різних типів руйнування та їхніх комбінацій.

Примітка: Для детального проєктування викор. Hilti PROFIS Engineering (див. розділ 7).



4. Робоча документація

- Підготовка креслень, що показують положення, відстані та глибину закладення пост-встановлених анкерів.
- Визначення технічних характеристик, методів монтажу та застосування.
- Встановлення вимог до контролю якості та інспекції на будівельному майданчику.

5. Монтаж

- Визначення положення анкерів після сканування матеріалу основи.
- Підготовка поверхні.
- Свердління.
- Очищення отворів.
- Встановлення анкерів.

5.6 Рішення SPEC2SITE

Hilti пропонує широкий портфель рішень для конструкційних з'єднань і прагне спростити нашим партнерам вибір найкращого варіанту для конкретних умов застосування. Ми досягаємо цього завдяки рішенню SPEC2SITE.

SPEC2SITE

За допомогою SPEC2SITE ми прагнемо вдосконалити кожен етап вашого робочого процесу — від розроблення технічних специфікацій до реалізації на об'єкті.

Для інженера ці рішення допомагають створювати більш ефективні технічні специфікації та економічно оптимізовані, надійні й довговічні конструкції.

Для підрядника рішення Hilti допомагають зробити роботу на будмайданчику швидшою, простішою, безпечнішою та більш раціональною. Завдяки поєднанню якісних специфікацій, ефективних практик монтажу та нашої технічної підтримки на місці ми гарантуємо, що рішення буде реалізовано відповідно до вимог. Дізнайтесь більше на нашому вебсайті або зверніться до команди інженерної підтримки Hilti.

6. РОЗРАХУНОК АНКЕРІВ

6.1 Принципи розрахунку

У попередніх розділах розглянуто різні умови навантаження, яких можуть зазнавати післямонтажні анкери як у несучих, так і в ненесучих застосуваннях. Умови/дії навантаження ґрунтуються на відповідних європейських стандартах (див. розд. 4.2). У цьому розділі наведено розрахункові положення на основі EC2-4 [1] і відповідних документів EOTA TR. Розрахунок має підтверджувати дотримання вимог як за **граничним станом придатності (SLS)**, так і за **граничним станом міцності (ULS)**. ГСП охоплює вимоги щодо обмеження деформацій і довговічності. За ГСМ необхідно забезпечити, щоб розрахункове значення дії (E_d) не перевищувало розрахункове значення опору (R_d) як показано на рис. 6.1. Дію навантаження підсилюють ($E_k \cdot \gamma_F$) а опір, навпаки, зменшують (R_k / γ_M) шляхом застосування часткових коефіцієнтів надійності (γ_F and $\gamma_M \geq 1.0$) для досягнення належного рівня безпеки.

Концепція розрахунку за граничним станом міцності:

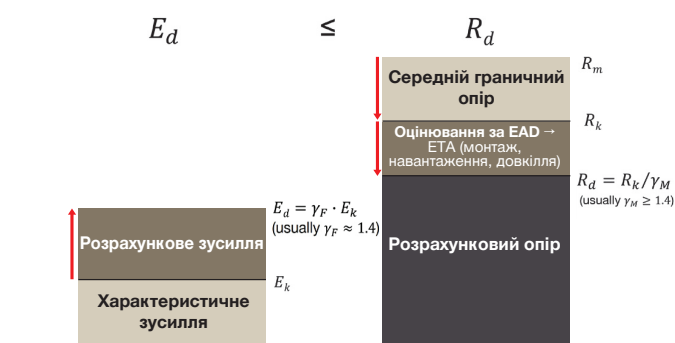


Рис. 6.1: Концепція часткових коефіцієнтів — збільшення дії та зменшення опору (для статичного розрахунку).

6.2 Конфігурації анкерів відповідно до EC2-4

Застосовність положень стандарту EC2-4 [1] обмежується конфігураціями кріплення, наведеними на рис. 6.2 і 6.3. Анкер, розташований на відстані від краю $\geq l_{\text{eff}}$ вважається таким, що знаходиться “далеко від краю”; в іншому випадку він розташований “близько до краю”. Для анкерів, розміщених далеко від країв, перевірку на відрив крайки бетону під дією зсувного навантаження можна не проводити. На рис. 6.2 показано дозволені конфігурації анкерів для кріплень без зазору в отворі — для будь-яких відстаней до країв і напрямків навантажень, а також для кріплень із нормальним зазором в отворі згідно з EC2-4 [1] (див. табл. 6.1), розташованих далеко від країв для всіх напрямків навантажень або біля країв — лише при розтягу. На рис. 6.3 наведено дозволені конфігурації анкерів із зазором у отворі, розташованих біля краю для всіх напрямків навантажень.

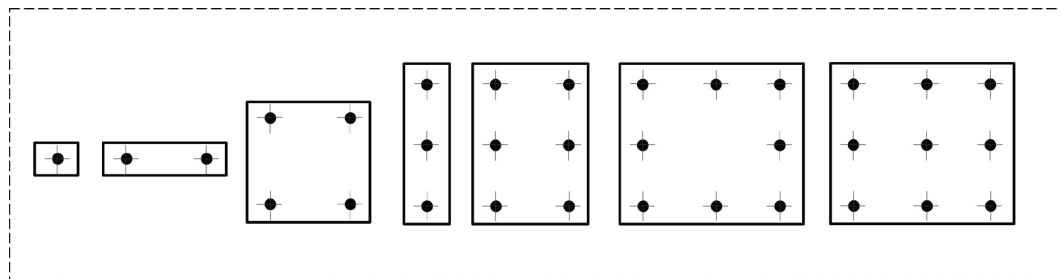


Рис. 6.2 — Кріплення без зазору в отворі для будь-яких відстаней до країв — конфігурації, що охоплюються стандартом EC2-4.

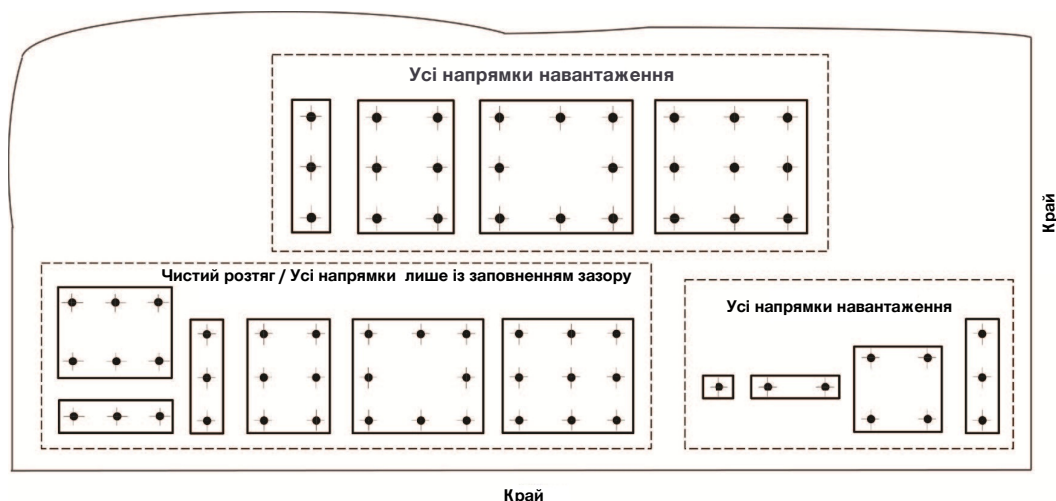


Рис. 6.3 — Кріплення із зазором в отворі, розташоване біля краю — конфігурації, що охоплюються стандартом EC2-4.

6.3 Дії на кріплення (жорстка проти гнучкої опорної пластини)

Стандарт EC2-4 [1] охоплює розрахунок кріплень, для яких **опорна пластина вважається жорсткою** (як показано на рис. 6.4а). Для цього мають виконуватись такі умови:

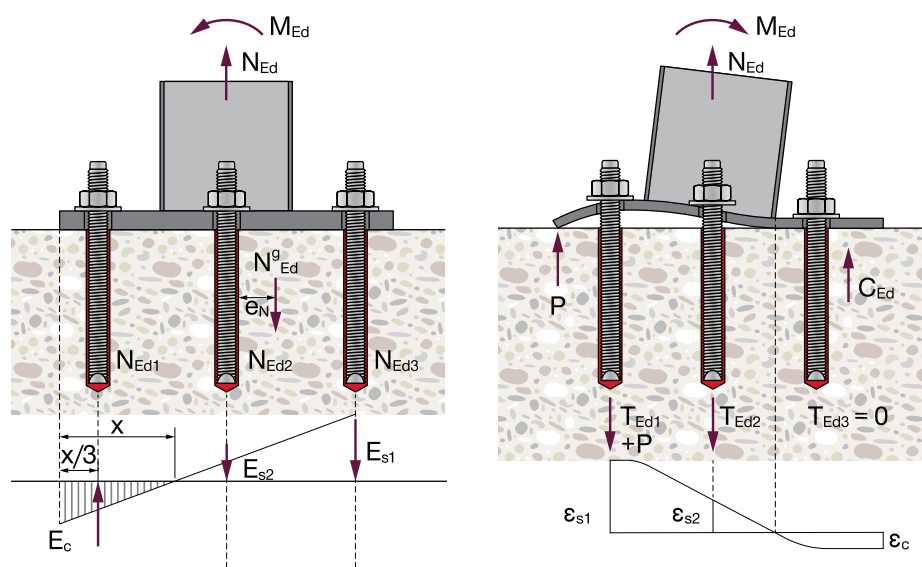
- Усі анкери в групі мають однакову осьову жорсткість, тобто в межах однієї групи можна використовувати лише кріплення з однаковим діаметром і глибиною анкерування. Це дозволяє припускати лінійний розподіл деформацій.
- Опорна пластина залишається пружною під дією розрахункових зусиль, а її деформація є незначною порівняно з осьовим переміщенням анкерів.

Примітка: Розрахунок за EC2-4 передбачає жорстку опорну пластину та відповідний лінійний розподіл напружень.

У зоні стиску під опорною пластиною передбачається, що анкери не сприймають нормальних зусиль, а стискальні сили передаються безпосередньо в бетон через пластину. Осьові та зсувні зусилля, а також згинальні моменти, що діють на вузол кріплення, можуть бути розкладені на сили, що діють на кожен анкер, виходячи з припущення про лінійний розподіл деформацій.

Якщо опорну пластину не можна вважати жорсткою, то зусилля в анкерах будуть більшими через зменшення плеча важеля та появу додаткових підйомних сил (див. рис. 6.4b). Щоб оцінити величину цих зусиль, необхідно враховувати жорсткість пластини у розрахунку. Стандарт EC2-4 [1] не містить вказівок щодо розрахунку кріплень із гнучкою пластиною. Програмне забезпечення Hilti PROFIS Engineering реалізує метод CBFEM (Component Based Finite Element Modeling), який враховує поведінку гнучкої пластини та пропонує альтернативу класичному підходу до розрахунку з жорсткою опорною пластиною. Детальніше про методику CBFEM див. у розділі 7 (рис. 7.9).

Примітка: Вибір розрахункової моделі (жорстка чи гнучка пластина) залежить від конструктивних критеріїв і рішення проєктувальника.

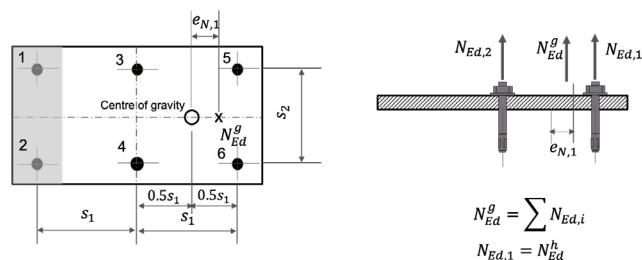


а) Жорстка опорна пластина — лінійний розподіл б) Гнучка опорна пластина — нелінійний розподіл

Рис. 6.4: Приклади розподілу деформацій і анкерних зусиль у системі кріплення, що зазнає згинального моменту та нормальних сил.

6.3.1 Аналіз розтягувальних зусиль

Згідно з EC2-4 [1], розподіл розтягувальних зусиль між анкерами може розраховуватись аналогічно до пружного аналізу залізобетонних конструкцій. Для груп анкерів із різними рівнями розтягувальних сил $N_{Ed,i}$ ексцентриситет e_N розтягувальної сили N_{Ed}^g групи відносно центра ваги натягнутих анкерів впливає на опори бетону для всієї групи. Приклад розподілу розтягувального навантаження на анкери в групі наведено на рис. 6.5. Додаткові приклади подано в EC2-4 [1].



Анкери 1 і 2 працюють у зоні стиску, тому не враховуються. Анкери 3–6 розглядаються як група, що сприймає розтягувальне навантаження. Анкери 5 і 6 сприймають найбільші навантаження через наявність ексцентриситету.

Рис. 6.5 — Приклад визначення розтягувальних зусиль у окремих анкерах групи.

6.3.2 Аналіз зсувних зусиль

Розрахункове зусилля зсуву розподіляється між анкерами залежно від їхньої здатності сприймати зсув, що, у свою чергу, визначається величиною зазору в отворі (див. табл. 6.1) і відстанню до краю. Якщо отвір видовжений у напрямку дії зсуву, анкер не сприймає це навантаження. Усі анкери вважаються такими, що сприймають зусилля зсуву, якщо навантаження діє паралельно до краю або анкери розташовані далеко від краю ($c_i \geq \max\{10h_{ef}; 60d_{nom}\}$). Для перевірок на міцність сталі або виривання всі анкери групи вважаються ефективними. Для перевірки відриву крайки бетону ефективними є лише анкери, розташовані близько до краю ($c_i < \max\{10h_{ef}; 60d_{nom}\}$) які чинять опір зсуву, спрямованому перпендикулярно або паралельно до краю.

Примітка: Згідно з EC2-4, тертя між бетоном і опорною пластиною зазвичай не враховується.

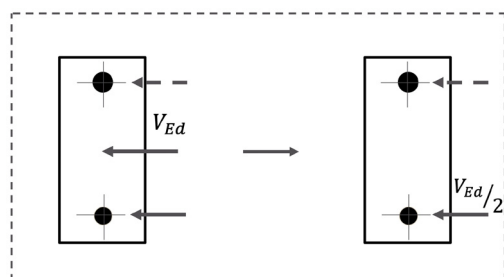
Таблиця 6.1 — Нормальні зазори отворів для анкерів згідно з EC2-4 [1]

Зовнішній діаметр анкера (d^a або d_{nom}^b)	6 мм – 8 мм	10 мм – 24 мм	27 мм і більше
Діаметр монтажного отвору у деталі (d_f)	$d + 1$ or $d_{nom} + 1$	$d + 2$ or $d_{nom} + 2$	$d + 3$ або $d_{nom} + 3$
(a) Якщо болт спирається на деталь		(b) Якщо гільза спирається на деталь	

Примітка: Дотримуйтесь інструкції з використання (IFU) відповідного продукту Hilti щодо вказівок про зазор в отворі в опорній плиті у разі монтажу крізь елемент з клейовими анкерами.

Рис. 6.6 – 6.10 описують, як діє зсувне навантаження та як кріпильні елементи беруть участь у розподілі цього навантаження поблизу краю. У випадку групи анкерів, навантажених паралельно до краю, зсувне навантаження розподіляється рівномірно між усіма анкерами. Проте перевірка потрібна лише для анкерів, розташованих ближче до краю (рис. 6.6). Для групи анкерів, навантажених перпендикулярно до краю, зсувне навантаження сприймає лише передній ряд анкерів (рис. 6.7). Компоненти зсувного навантаження, спрямовані від краю, не враховуються під час перевірки опору бетонної кромки. Перевірку виконують для анкерів, розташованих біля краю (рис. 6.8).

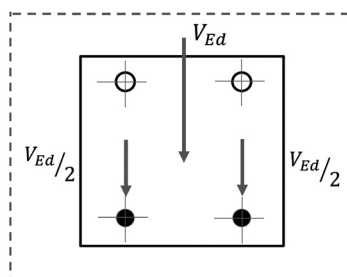
Якщо групу анкерів розташовано в кутовій зоні, обидві кромки необхідно перевіряти з урахуванням дії зусиль як паралельно, так і перпендикулярно до краю (див. рис. 6.9 і 6.10). Якщо зсувне навантаження діє під кутом до краю, застосовуються ті самі правила, що наведені на рис. 6.6 – 6.10, з розділенням зсувних компонентів на перпендикулярні та паралельні відповідно.



← -- Розподіл навантаження на анкер не враховується під час перевірки руйнування бетонної кромки

← Розподіл навантаження на анкер враховується під час перевірки руйнування бетонної кромки

Рис. 6.6 — Група з двох анкерів поблизу кромки, навантажених паралельно до кромки



● Завантажений анкер

○ Незавантажений анкер

Рис. 6.7 — Група з чотирьох анкерів поблизу кромки, навантажених перпендикулярно до кромки

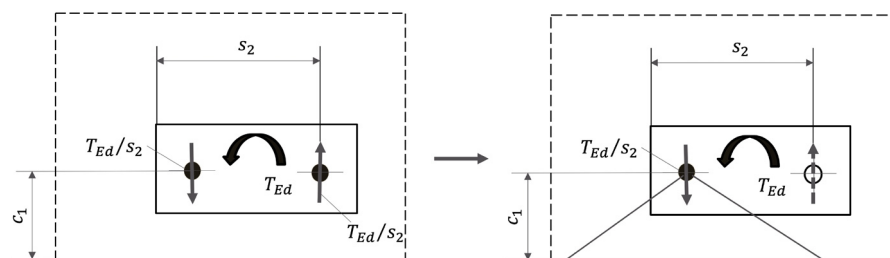


Рис. 6.8 — Група з двох анкерів поблизу кромки, навантажених на кручення

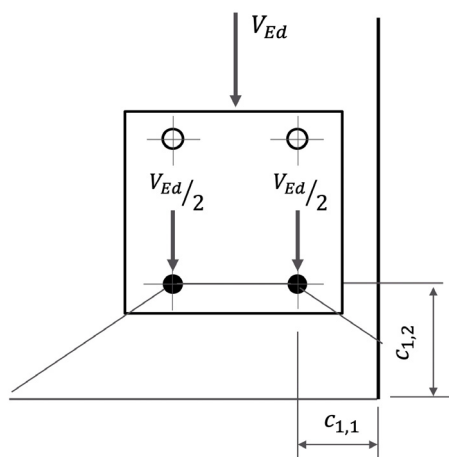


Рис. 6.9 — Група з чотирьох анкерів поблизу кромки, навантажених перп. до кромки

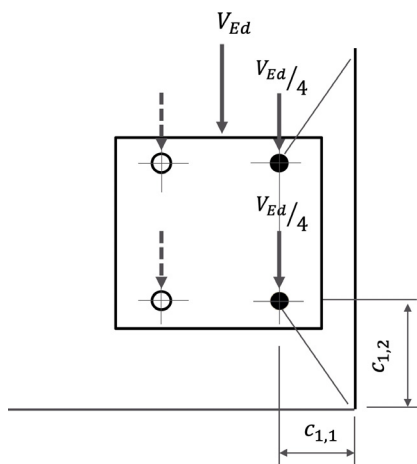


Рис. 6.10 — Зсувне навантаження, прикладене паралельно до кромки

6.4 Альтернативні підходи до розподілу зсувних сил згідно з fib Bulletin 58

EC2-4 [1] має певні обмеження щодо розподілу зсувних навантажень у групах анкерів, розташованих поблизу кромки. Документ “Design of anchorages in concrete” fib Bulletin 58 [30] надає додаткові умови для розрахунку опору зсуву. Він допускає рівномірний розподіл зсуву між усіма анкерами за відсутності або за наявності нормального кільцевого зазору між опорною пластиною та анкерами, розташованими у трьох рядах паралельно до кромки. Більш детальна інформація наведена у наступному розділі.

6.5 Метод SOFA

У практичних випадках з'єднання сталевго елемента з бетоном іноді виконується з використанням декількох анкерів, що виходить за межі дії EC2-4 [1] (групи анкерів із кількістю більше ніж 3×3, рис. 6.11).

Програмне рішення Hilti PROFIS Engineering (див. розділ 7) пропонує два підходи до розрахунку кріплень: розрахунок відповідно до EC2-4 [1] та розрахунок за методом **Hilti SOFA (SOLutions For FASTening)**.

Метод Hilti SOFA передбачає підходи до розрахунку, що відображають сучасний стан наукових досліджень у цій галузі. Рекомендований для застосування у випадках, коли EC2-4 [1] не забезпечує придатного рішення.

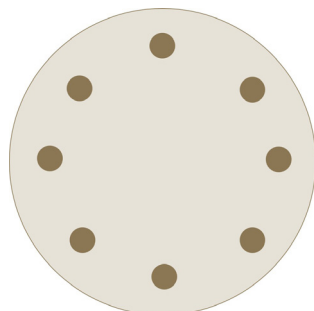
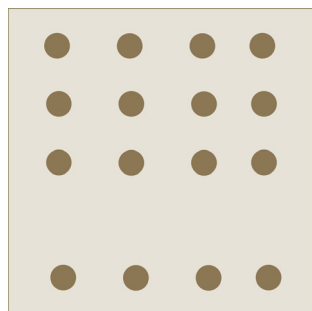


Рис. 6.11 — З'єднання опорної пластини з використанням групи анкерів (4×2)

6.5.1 Розподіл зсуву та розташування анкерів за методом SOFA

Метод SOFA враховує **розподіл зсуву для анкерів із трьома рядами в групі**, з урахуванням або без урахування зазору в отворі згідно з fib Bulletin 58 [30]. Він також розширює схему кріплення до 99 анкерів, використовуючи концепцію зазору.

Техніка заповнення (рис. 6.12 а)). Також визначено розподіл зсуву для регулярних і нерегулярних конфігурацій (рис. 6.12 б)). Це надає проєктувальнику гнучкість обирати схему кріплення поза межами EC2-4 [1] (рис. 6.2 та рис. 6.3).

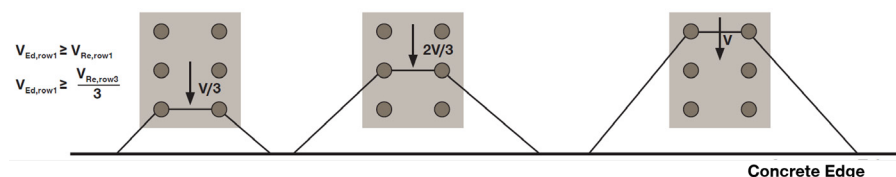


а) Схема анкерів прямокутна понад 3×3

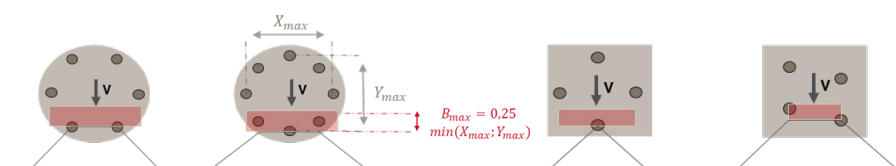
б) Схема анкерів неправильної форми

Рис. 6.12 — Розташування анкерів, дозволене в методі SOFA

Анкери, що сприймають лише розтягувальне навантаження, не потребують заповнення зазору для схем розташування прямокутних понад 3×3, трикутних або круглих. Для інших нерегулярних схем заповнення зазору потрібне як для розтягування, так і для зсуву. Для розташування анкерів у 3 ряди розподіл зсуву відповідає fib Bulletin 58 [30]. Для схем із кількістю рядів понад 3 рівномірний розподіл зсуву не забезпечує подальшого зростання опору руйнуванню бетону по кромці (рис. 6.13 а)). Це обмеження базується на сучасному досвіді досліджень (див. напр. [31]). Якщо схема анкерів має іншу форму (наприклад, круглу, трикутну тощо), метод смуги дозволяє розраховувати несучу здатність бетону по кромці для кріплень у передній зоні, як показано на рис. 6.13 б)).



а) Розподіл зсуву між анкерами у передньому ряду



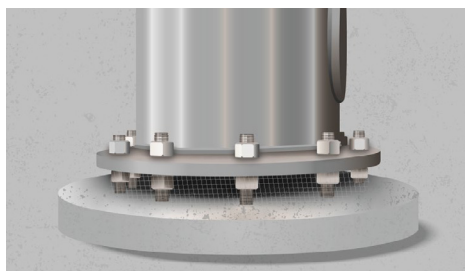
б) Визначення смуги для розширення несучої здатності по кромці за передніми анкерами

Рис. 6.13 — Розподіл зсуву в методі SOFA

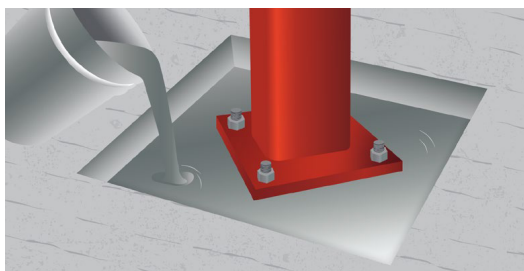
6.5.2 Метод SOFA забезпечує вищий опір для з'єднань з відступом із/без заповнення

Метод SOFA надає комплексні рішення для обох типів з'єднань з відступом — **без заповнення розчином і із заповненням розчином** (рис. 6.14) та забезпечує гнучкість у проєктуванні декількох варіантів, що виходять за межі EC2-4 [1] і fib Bulletin 58 [30]. Цей метод базується на дослідженнях McBride [32].

З'єднання з відступом без заповнення розчином означає, що опорна пластина не має контакту з основним матеріалом і з'єднана лише через анкери (рис. 6.14 а)). З'єднання з відступом із заповненням розчином означає, що опорна пластина має контакт з основним матеріалом через шар розчину. У цьому випадку розчин заливається в зазор між опорною пластиною та бетоном, створюючи суцільне з'єднання між ними (рис. 6.14 б)).



а) З'єднання з відступом без заповнення розчином (експлуатації)



б) Заповнення розчину, що розтікається, у заглиблену основу колони

Рис. 6.14 — З'єднання з відступом із заповненням і без заповнення розчином

Примітка: коли з'єднання з відступом без заповнення розчином піддається дії згинального моменту, частина анкерів має передавати стискальні зусилля в основний матеріал. У такому випадку правильний вибір типу анкера є критичним, оскільки лише деякі типи можуть передавати такі зусилля, наприклад, хімічні анкери.

Порівняння між методом SOFA та EC2-4 [1] для з'єднань з відступом наведено в таблицях 6.2 і 6.3.

Примітка: див. технічні матеріали SOFA для детальнішої інформації щодо з'єднань із заповненням [33] і без заповнення [34] розчином.

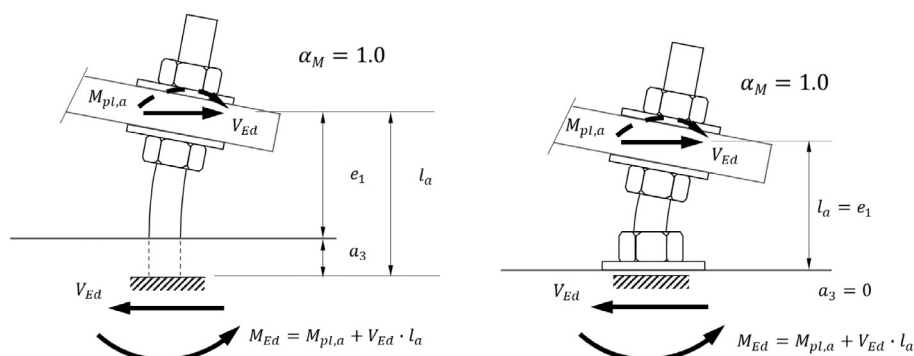
Таблиця 6.2 — З'єднання з відступом із заповненням розчином

Властивість	EC2-4	Метод SOFA
Зсувний опір	Приблизно 1 % втрати міцності на кожен 1 мм плеча важеля для нетріщуватого бетону	Максимальна втрата опору 20 % як у тріщуватому, так і в нетріщуватому бетоні.
Висота відступу	Висота відступу допускається до min (40 мм, 5d); для більших значень див. ungrounded stand-off	Висота відступу допускається до 130 мм
Мін. відстань до кромки	Згідно з ETA на виріб	Згідно з ETA на виріб
Вплив розчину	Розчин не забезпечує переваг	Розчин має позитивний вплив
Зсувна міцність сталі	$V_{Rk,s} = (1 - 0.01 \cdot t_{grout}) \cdot k_7 \cdot V_{Rk,s}^0$	$V_{Rk,s} = 0.8 \cdot k_7 \cdot V_{Rk,s}^0$
Опір виколуванню бетонного конуса	Без змін порівняно з вихідним рівнянням без відступу	Рівняння EC2-4, помножене на коефіцієнт зниження $\psi_{b,g} = \frac{1}{1 + \frac{C \cdot t_{grout}}{d^{3/4}}}$ де $C = 0.043 \text{ (mm}^{-0.25}\text{)}$ — стала, що характеризує пружну взаємодію між кріпленням і бетоном. Згинальні напруження додаються до тиску в зоні кромки
Взаємодія між розтягом і зсувом	Перевірка не потрібна для невеликих товщин шару розчину	Взаємодія між розтягом і зсувом перевіряється за умовою $\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s,grout}}\right)^2 \leq 1.0$

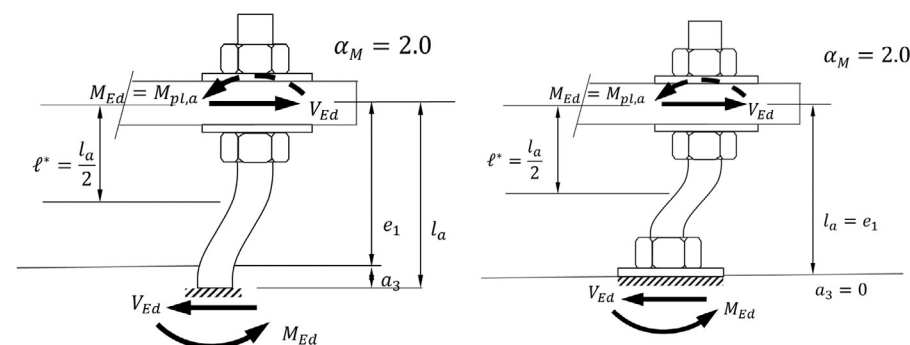
Таблиця 6.3 — З'єднання з відступом без заповнення розчином

Властивість	EC2-4	Метод SOFA
Плече важеля	Відстань від середини сталевієї пластини до точки реакції в бетоні	Відстань від нижньої поверхні вирівнювальної гайки до точки реакції в бетоні
Мін. відстань до кромки	$\max(10h_{ef}, 60d)$ оскільки руйнування бетонної кромки не враховується	Згідно з ETA на вибір
Опір згину	$1.2 \cdot W_{el} \cdot f_{yk}$	$1.7 \cdot W_{el} \cdot f_{yk}$
Опір виколюванню бетонної кромки	Відсутні рекомендації щодо руйнування поблизу кромки за умов відступу	Рівняння EC2-4, помножене на коефіцієнт зниження $\psi_{b,u}$ and $\psi_{b,u} = \frac{1}{1 + \frac{C}{d^{3/4}} \cdot \frac{l_a}{\alpha_M}}$, $C = 0.213 \text{ (mm}^{-0.25}\text{)}$ Згинальні напруження додаються до тиску від зсуву на бетон поблизу кромки
Взаємодія між розтягом і зсувом для сталі	Виконується між розтягом і зсувом безпосередньо через $V_{Rk,s,M}$	Перевіряється окремо для розтягу та зсуву: $\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right)^2 + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s,M}} \leq 1.0$
	$V_{Rk,s,M} = \frac{\alpha_M \cdot M_{Rk,s}^0 \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right)}{l_a} \leq V_{Rk,s}$	$V_{Rk,s,M} = \frac{\alpha_M \cdot M_{Rk,s}^0 \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right)}{l_a} \leq V_{Rk,s}$ and $\alpha_{s,M} = \frac{1.5 \cdot l_a}{\alpha_M \cdot d}$

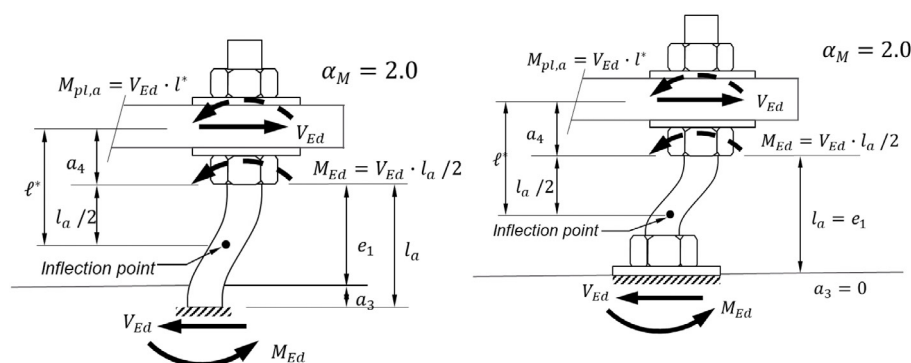
Плече важеля для з'єднань з відступом без заповнення розчином відповідно до EC2-4 [1] і методу SOFA наведене на рис. 6.15 нижче.



а) Вільне обертання опорної пластини (EC2-4 і SOFA)



б) Обмежене обертання опорної пластини (EC2-4)



с) Обмежене обертання опорної пластини (SOFA)

Рис. 6.15 — Положення щодо розрахунку плеча важеля для з'єднань з відступом без заповнення розчином

6.6 Розрахунок анкерів при статичному навантаженні згідно з EC2-4

Перевірки розрахунку для розтягу та зсуву визначаються окремо з урахуванням усіх релевантних режимів руйнування для пост-встановлених анкерів, як показано на рис. 6.16.

Примітка: усі режими руйнування, пов'язані з бетоном, істотно залежать від стану бетону (тріщинуватий/нетріщинуватий, див. розділ 3.7.1). Якщо проєктувальник не може гарантувати, що бетон у місці кріплення протягом усього строку експлуатації залишатиметься нетріщинуватим, слід приймати тріщинуватий бетон.

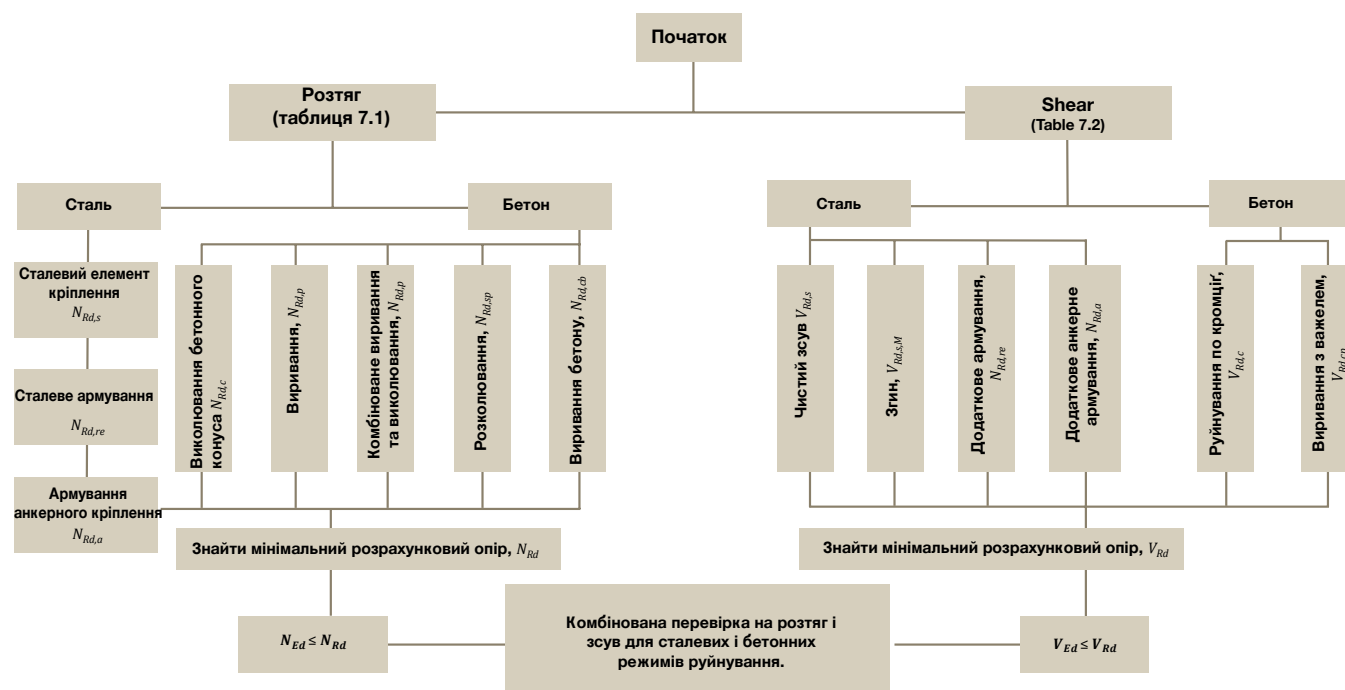


Рис. 6.16 — Перевірки розрахунку згідно з EC2-4

6.6.1 Перевірки анкерів при розтягувальному навантаженні

Розрахункове навантаження на розтяг N_{Ed} має бути меншим за розрахунковий опір N_{Rd} (див. розділ 6.1). Руйнування сталі та виривання N_{Ed}^h) перевіряються для найбільш навантаженого анкера, тоді як інші, пов'язані з бетоном, режими руйнування перевіряються для групи анкерів з урахуванням усіх відповідних граничних умов. Необхідні перевірки для пост-встановлених анкерів на розтяг наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 — Режими руйнування та критерії при навантаженні розтягу за EC2-4 [1]

Режим руйнування	Окремий анкер	Група анкерів	
		Найбільш навантажений анкер	Група
Руйнування сталі анкера	$N_{Ed} \leq N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}}$	$N_{Ed}^h \leq N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}}$	
Виколювання бетонного конуса	$N_{Ed} \leq N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$		$N_{Ed}^g \leq N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$
Виривання	$N_{Ed} \leq N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mp}}$	$N_{Ed}^h \leq N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mp}}$	
Комбіноване виколювання конуса та виривання (лише для хімічних анкерів)	$N_{Ed} \leq N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mp}}$		$N_{Ed}^g \leq N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mc}}$
Виривання бетону (для підрізних анкерів як для анкерів із головкою, якщо $c \leq 0.5 h_{ef}$)	$N_{Ed} \leq N_{Rd,cb} = \frac{N_{Rk,cb}}{\gamma_{Mc}}$		$N_{Ed}^g \leq N_{Rd,cb} = \frac{N_{Rk,cb}}{\gamma_{Mc}}$
Розколювання бетону	$N_{Ed} \leq N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}}$		$N_{Ed}^g \leq N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}}$

Часткові коефіцієнти для режимів руйнування при розтягуванні наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 — Часткові коефіцієнти безпеки при статичному навантаженні на розтяг

Режим руйнування	Частковий коефіцієнт безпеки	Довідкове значення
Сталь	γ_{Ms}	$1.2 \cdot \frac{f_{uk}}{f_{yk}} \geq 1.4$
Бетонний конус	γ_{Mc}	$\gamma_c \cdot \gamma_{inst}$ (γ_{inst} бретється з ETA а $\gamma_c = 1.5^*$)
Виривання	γ_{Mp}	γ_{Mc}
Комбіноване виколювання конуса та виривання	γ_{Mp}	γ_{Mc}
Розколювання бетону	γ_{Msp}	γ_{Mc}

*) Якщо інше не визначено у відповідному Національному додатку до EC2-4.

6.6.1.1 Руйнування сталі

Цей режим руйнування характеризується розривом сталевих частин анкера. Руйнування сталі може статися, якщо анкер піддається дії сили розтягу, а його міцність недостатня, щоб її витримати. У результаті металева частина анкера розривається.

Примітка: щоб підвищити опір до цього виду руйнування, можна застосувати одну або кілька з таких стратегій: збільшити кількість анкерів; вибрати анкер із вищим класом міцності сталі; збільшити діаметр анкера.

Характеристичний опір анкера при руйнуванні сталі, $N_{Rk,s}$ і

$$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk}$$

$N_{Rk,s}$ — береться з відповідної ЕТА.

A_s — розрахункове перерізне січення анкера, наведене у відповідному ЕТА,

f_{uk} — номінальна характеристична границя міцності сталі при розтягу.

6.6.1.2 Виколювання бетонного конуса

Виколювання бетонного конуса при дії сили розтягу виникає, коли прикладене навантаження перевищує здатність бетону, що охоплює групу анкерів, чинити опір. Руйнування основного матеріалу при розтягу в основному залежить від міцності бетону на стиск, його стану (тріщинуватий або нетріщинуватий) і об'єму залученого бетонного конуса. Цей конус визначається глибиною анкерування та наявністю кромки. У випадку сусідніх анкерів на розтяг також необхідно враховувати перекриття бетонних конусів.

Примітка: щоб підвищити опір бетону до виколу, можна скористатись однією з таких стратегій (або їх комбінацією): збільшити відстань між анкерами; збільшити глибину анкерування; використовувати бетон з вищим класом міцності.

Характеристичний опір анкера при руйнуванні бетонного конуса $N_{Rk,c}$,

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.1)}$$

Характеристичний опір окремого анкера, не обмеженого сусідніми анкерами або кромками бетонного елемента, $N_{Rk,c}^0$, визначається міцністю бетону, ефективною глибиною анкерування та коефіцієнтами, пов'язаними зі станом бетону:

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.2)}$$

f_{ck} — номінальна характеристична міцність бетону на стиск (циліндрична), h_{ef} — ефективна глибина анкерування.

$k_1 = k_{cr,N}$ для тріщинуватого бетону і $k_{ucr,N}$ для нетріщинуватого бетону;

значення коефіцієнтів беруться з відповідного ЕТА.

Типові значення: $k_{cr,N} = 7.7$ і $k_{ucr,N} = 11$.

Примітка: пост-встановлені анкери з дуже високими експлуатаційними характеристиками можуть досягати опору бетонного конуса на рівні анкерів із головкою при $k_{cr,N} = 8.9$ і $k_{ucr,N} = 12.7$. Це стосується анкерів Hilti HST4 і HDA, як зазначено у відповідних ЕТА.

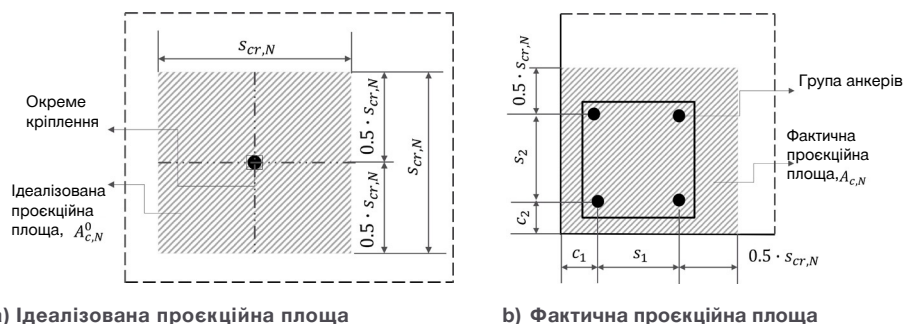
Примітка: припущення про тріщинуватий бетон зменшує опір виколуванню бетону приблизно на 30 %.

Геометричний вплив осевих відстаней та відстаней до кромки на характеристичний опір враховується шляхом розрахунку проєкції ідеального бетонного конуса для окремого анкера ($A_{c,N}^0$) та фактичної проєкції ($A_{c,N}$) з використанням відношення $A_{c,N}/A_{c,N}^0$ (див. рис. 6.17).

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N}$$

EC2-4, рівн. (7.3)

Відстань між анкерами $s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$, $c_{cr,N}$ — відстань до кромки, наведена у відповідному ЕТА.



а) Ідеалізована проєкційна площа

б) Фактична проєкційна площа

Рис. 6.17 — Геометрична зона впливу, врахована при руйнуванні за бетонним конусом

Інші фактори, що впливають на опір бетону до руйнування по конусу, описані нижче.

Для будь-якої групи анкерів, розташованих поблизу однієї або кількох кромки, для розрахунку слід враховувати мінімальну відстань до кромки шляхом застосування коефіцієнта зменшення $\psi_{s,N}$, який відображає вплив нерівномірного розподілу напружень у бетоні. Чим менша відстань до кромки, тим меншим буде цей коефіцієнт, що зумовлює зниження опору. Критична відстань до кромки, $c_{cr,N}$ визначається у відповідному ЕТА (зазвичай $1.5 \cdot h_{ef}$). Цей коефіцієнт обчислюється за таким рівнянням у EC2-4 [1]:

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

Якщо анкери встановлені у бетоні з густим армуванням, вплив відшаровування поверхні враховується коефіцієнтом $\psi_{re,N}$. Для анкерів із глибиною анкерування $h_{ef} < 100$ мм коефіцієнт визначається за рівнянням:

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

Коефіцієнт $\psi_{re,N}$ можна приймати рівним 1,0, якщо виконується хоча б одна з умов: 1) гармування будь-якого діаметра розташоване з кроком ≥ 150 мм; чи 2) армування діаметром ≤ 10 мм розташоване з кроком ≥ 100 мм. Для армування у двох напрямках ці умови мають виконуватись у обох напрямках.

ексцентриситет визначається як відстань між точкою прикладання навантаження та центром ваги групи анкерів і враховується коефіцієнтом $\psi_{ec,N}$. Якщо ексцентриситет має місце у двох напрямках, коефіцієнт визначають окремо для кожного з них:

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_N}{s_{cr,N}} \right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

Якщо група анкерів сприймає згинальний момент, що призводить до виникнення розтягувальних і стискальних сил між опорною пластиною та бетоном, вплив стискальної сили враховується коефіцієнтом $\psi_{M,N}$. Коефіцієнт приймається рівним 1,0, якщо відстань до кромки $c < 1.5 \cdot h_{ef}$ бо відношення між відстанню до нейтральної осі та глибиною анкерування $z / h_{ef} \geq 1.5$. Для груп анкерів з відстанню до кромки $c \geq 1.5 \cdot h_{ef}$ і відношенням між стискальною силою та силою розтягу $C_{Ed} / N_{Ed} < 0.8$ цей коефіцієнт також приймається рівним 1,0. В усіх інших випадках, $\psi_{M,N}$ розраховується за наведеним нижче рівнянням у EC2-4 [1]:

Примітка: цей коефіцієнт $\psi_{M,N}$ може суттєво підвищити опір бетону до руйнування по конусу завдяки позитивному впливу стиску, що виникає внаслідок дії згинального моменту.

$$\psi_{M,N} = 2 - \frac{z}{1.5 \cdot h_{ef}} \geq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.7)}$$

Якщо згин діє у двох напрямках, параметр z визначається для комбінованої дії моментів у двох напрямках і осьової сили.

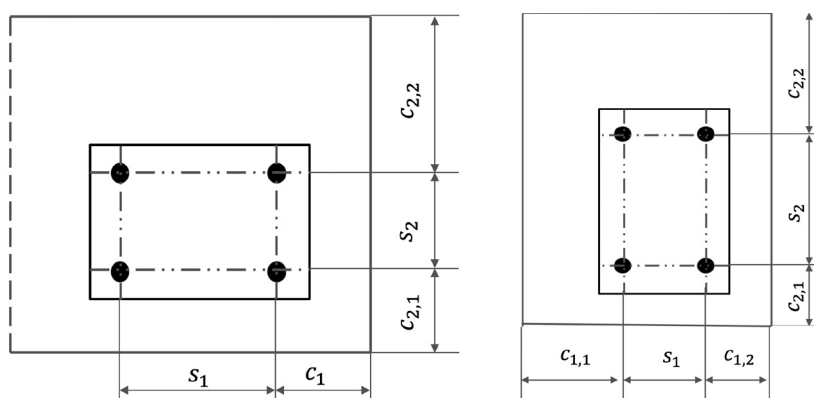
Якщо будь-який анкер або група анкерів обмежені трьома або більше кромками з відстанню до кромки меншою, ніж $c_{cr,N}$, значення h_{ef} модифікується шляхом введення співвідношення між максимальною відстанню до кромки c_{max} та критичною відстанню до кромки $c_{cr,N}$.

$$h'_{ef} = \left\{ \frac{c_{max}}{c_{cr,N}} \cdot h_{ef} \right\} \text{ для одного анкера} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.8)}$$

У випадку групи анкерів h'_{ef} розглядається як максимальне зі співвідношень між відстанями до кромки і міжцентровими відстанями (s_{max} , $s_{cr,N}$), див. рис. 6.18:

$$h'_{ef} = \max \left\{ \frac{c_{max}}{c_{cr,N}} \cdot h_{ef}; \frac{s_{max}}{s} \cdot h_{ef} \right\} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.9)}$$

Для анкера без зазору в отворі, де три анкери в ряду дозволено розташовувати поблизу кромки, s_{max} — це максимальна відстань між зовнішніми анкерами по центрах $\leq 2 s_{cr,N}$. Анкери, розташовані вздовж трьох або всіх чотирьох кромки з прямокутною опорною пластиною, показані на рис. 6.18.



а) Три кромки ($c_1; c_{2,1}; c_{2,2}$) $\leq c_{cr,N}$

б) Усі чотири кромки ($c_{1,1}; c_{1,2}; c_{2,1}; c_{2,2}$) $\leq c_{cr,N}$

Рис. 6.18 — Анкери біля трьох або більше кромки

6.6.1.3 Виривання анкера з бетону

Якщо сталь і бетон мають достатню міцність для сприйняття навантаження, слід перевірити, чи здатний анкер передати його на основний матеріал. Режим руйнування, при якому анкер висмикується з бетону без розвитку повного опору бетону, називається вириванням. Руйнування анкера при вириванні під дією сили розтягу для пост-встановлених анкерів залежить від різних факторів, зокрема типу анкера, способу встановлення та матеріалу основи.

Характеристичний опір анкера при вириванні $N_{Rk,p}$ береться з відповідного ЕТА.

Примітка: щоб підвищити опір до виривання, можна застосувати одну або кілька з таких стратегій: вибір анкера з вищим опором; збільшення діаметра анкера; збільшення кількості анкерів.

6.6.1.4 Розколювання бетону

Коли до анкера прикладена сила розтягу, у бетоні виникають радіальні сили, що створюють напруження розтягу. Якщо сила розтягу перевищує міцність бетону на розтяг, це може призвести до розколювання або утворення тріщин навколо анкера. Розколювання може статися з двох причин: під час встановлення анкера або під час дії навантаження.

1. **Розколювання бетону під час встановлення** може статися, коли прикладається момент затягування, а сила розширення, створена анкерами, спричиняє тріщини або розкол бетону. Правильний вибір типу анкера, техніки свердління та методів монтажу (див. розділ 8), а також достатня товщина основного матеріалу є важливими для запобігання цьому виду руйнування.

Примітка: цього руйнування можна уникнути, дотримуючись таких умов, наведених у відповідному ЕТА: 1) мінімальна відстань до кромки c_{min} 2) мінімальна відстань між анкерами, s_{min} 3) мінімальна товщина основного матеріалу, h_{min} .

2. **Розколювання бетону** може виникнути через перевантаження.

Розколювання бетону під дією навантаження перевіряється для необхідного характеристичного кроку анкерів $s_{cr,sp} = 2 c_{cr,sp}$ як зазначено у відповідному ЕТА.

Розрахунок не потрібен, якщо дотримано мінімальну характеристичну відстань до кромки: для окремого анкера $c \geq 1.0 c_{cr,sp}$ для групи анкерів $c \geq 1.2 c_{cr,sp}$ і глибини $h \geq h_{min}$ (h_{min} відповідає $c_{cr,sp}$ згідно з ЕТА).

Примітка: якщо характеристичні опори для руйнування по бетонному конусу та виривання (для пост-встановлених механічних анкерів) або комбінованого виривання і руйнування бетону (для хімічних анкерів) розраховані для тріщинуватого бетону, і армування сприймає сили розколювання, обмежуючи ширину тріщин до $w_k \leq 0.3$ мм, перевірка не потрібна. Армування для запобігання розколюванню слід розміщувати симетрично та якомога ближче до анкера (для групи — до кожного анкера).

Якщо докладна інформація про необхідне армування відсутня, площа поперечного перерізу арматури $\Sigma A_{s,re}$, що чинить опір силам розколювання, визначається за формулою:

$$\Sigma A_{s,re} = k_4 \cdot \frac{\Sigma N_{Ed}}{f_{yk,re} \cdot Y_{Ms,re}} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.22)}$$

Таблиця 6.6 — Значення коефіцієнта k_4 для різних типів анкерів

	Анкери з контролем деформації (розпирні)	Анкери з контролем крутного моменту та анкерні болти на клейовій основі	Підрізні анкери та гвинтові анкери для бетону	Хімічні анкери
k_4	2.0	1.5	1.0	0.5

ΣN_{Ed} = повна розрахункова сила розтягу / дії на анкер

$f_{yk,re}$ = номінальна границя текучості арматурної сталі $\leq 600 \text{ N/mm}^2$

Якщо наведені критерії не виконуються, характеристичний опір анкера або групи анкерів визначається за формулою:

$$N_{Rk,sp} = N_{Rk,sp}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{h,sp} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.23)}$$

$N_{Rk,sp}^0$ — значення, наведене у відповідному ЕТА.

Фактори $A_{c,N}$, $A_{c,N}^0$, $\psi_{s,N}$, $\psi_{re,N}$, $\psi_{ec,N}$ враховуються аналогічно до випадку руйнування по бетонному конусу (див. розділ 6.6.1.2). Проте значення $c_{cr,N}$ та $s_{cr,N}$ замінюються на $c_{r,sp}$, відповідно, які відповідають мінімальній товщині елемента h_{min} .

Вплив фактичної товщини основного матеріалу враховується коефіцієнтом $\psi_{h,sp}$.

З урахуванням більшої товщини основного матеріалу, значення коефіцієнта $\psi_{h,sp}$ може бути збільшене до 2,0. Таким чином, якщо пост-встановлені анкери змонтовані в товстшому бетонному елементі, опір розколюванню можна покращити:

$$\psi_{h,sp} = \left(\frac{h}{h_{min}} \right)^{2/3} \leq \max \left\{ 1; \left(\frac{h_{ef} + 1.5c_1}{h_{min}} \right)^{2/3} \right\} \leq 2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.24)}$$

Примітка: ефективні стратегії підвищення опору цьому виду руйнування: збільшення відстані до кромки та між анкерами; зменшення глибини анкерування; або врахування утворення тріщин розколювання й повторний розрахунок для тріщинуватого бетону з урахуванням достатнього армування в основному матеріалі для обмеження їх ширини.

6.6.1.5 Комбіноване виривання та виколування бетонного конуса

Цей режим руйнування застосовний лише для хімічних анкерів.

Характеристичний опір групи анкерів $N_{Rk,p}$ визначається за формулою:

$$N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,NP} \cdot \psi_{s,NP} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,NP} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.13)}$$

Опір для одного анкера, не вплинутого сусідніми анкерами або кромками бетонного елемента, визначається за діаметром, ефективною глибиною анкерування та значенням адгезійного опору:

$$N_{Rk,p}^0 = \psi_{sus} \cdot \tau_{Rk} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.14)}$$

τ_{Rk} — адгезійний опір, зазначений у відповідному ЕТА: $\tau_{Rk,cr}$ — для тріщинуватого бетону, $\tau_{Rk,ucr}$ — для нетріщинуватого бетону.

Вплив тривалого навантаження на анкери враховується коефіцієнтом ψ_{sus} . Їй коефіцієнт залежить від співвідношення між тривалими навантаженнями (включно з постійними діями та постійною складовою змінних дій) і повними навантаженнями при граничному стані. Якщо це співвідношення (α_{sus}) менше за продуктозалежний коефіцієнт, що враховує вплив тривалого навантаження на міцність зчеплення, наведений у ЕТА, приймається $\psi_{sus} = 1$.

$$\psi_{sus} = 1 \text{ for } \alpha_{sus} \leq \psi_{sus}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.14a)}$$

$$\psi_{sus} = \psi_{sus}^0 + 1 - \alpha_{sus} \text{ for } \alpha_{sus} \geq \psi_{sus}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.14b)}$$

Примітка: значення α_{sus} залежить від прийнятих припущень щодо навантажень.

Якщо в ЕТА немає даних про продукт, приймається $\psi_{sus} = 0.6$.

Геометричний вплив осьового кроку анкерів і відстані до кромки на характеристичний опір враховується коефіцієнтом $\frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0}$ що розраховується аналогічно до випадку руйнування по бетонному конусу (див. розділ 6.6.1.2).

Розрахункова ідеалізована площа впливу зчеплення одного анкера дорівнює $A_{p,N}^0 = s_{cr,Np} \cdot s_{cr,Np}$ де відстань $s_{cr,Np}$ визначається з урахуванням опору зчеплення й коефіцієнта тривалого навантаження конкретного продукту:

$$s_{cr,Np} = 7.3d \cdot (\psi_{sus} \cdot \tau_{Rk})^{0.5} \leq 3 \cdot h_{ef} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.15)}$$

Опір зчеплення τ_{Rk} приймається як $\tau_{Rk,ucr}$ для нетріщинуватого бетону класу C20/25.

$A_{p,N}$ — фактична площа впливу зчеплення, що враховує фактичний крок між сусідніми анкерами ($s \leq s_{cr,Np}$) та відстань до кромки бетонного елемента ($c \leq c_{cr,Np}$).

Подібно до руйнування по бетонному конусу (див. розділ 6.6.1.2), на цей вид руйнування впливають такі фактори: щільно розташовані анкери ($A_{p,N} / A_{p,N}^0$), нерівномірний розподіл напружень через розміщення анкерів поблизу кромки ($\psi_{s,Np}$), коефіцієнт розшарування для арматури $\psi_{re,Np}$, а також коефіцієнт ексцентриситету для різних сил розтягу в групі анкерів $\psi_{ec,Np}$. Ці коефіцієнти для даного виду руйнування розраховуються аналогічно до випадку руйнування по бетонному конусу. При цьому $s_{cr,N}$ і $c_{cr,N}$ замінюються на $s_{cr,Np}$ і $c_{cr,Np}$.

Крім того, коефіцієнт групового ефекту для щільно розташованих хімічних анкерів $\psi_{g,Np}$ визначається за такими виразами:

$$\psi_{g,Np} = \psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0.5} \cdot (\psi_{g,Np}^0 - 1) \geq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.17)}$$

$$\psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - \sqrt{(n-1)} \cdot \left(\frac{\tau_{Rk}}{\tau_{Rk,cr}} \right)^{1.5} \geq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.18)}$$

$$\tau_{Rkc} = \frac{k_3}{\pi \cdot d} \cdot \sqrt{(h_{ef} \cdot f_{ck})} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.19)}$$

$k_3 = 7.7$ для тріщинуватого бетону і 11.0 — для нетріщинуватого.

6.6.1.6 Комбіноване виривання та виколування бетонного конуса для гібридної системи (хімічний гвинтовий анкер у бетоні) згідно з EOTA TR 075

Опір комбінованому вириванню та руйнуванню бетонного конуса для анкерів-гвинтів на клейовій основі визначається згідно з документом EOTA TR 075 [35] і залежить як від опору анкерного гвинта, так і від властивостей клейового матеріалу. Характеристичний адгезійний опір τ_{Rk} наведений у відповідних рівняннях EC2-4 [1] для комбінованого виривання і руйнування бетонного конуса (як описано в попередньому розділі), замінюється характеристичним опором $N_{Rk,p,b}$ клейового компонента анкерів-гвинтів. Це положення застосовується як для тріщинуватого, так і для нетріщинуватого бетону.

Комбінований опір: характеристичний комбінований опір вириванню та руйнуванню бетонного конуса $N_{Rk,p,ucr/cr}$ для групи анкерів-гвинтів визначається шляхом окремого розрахунку опорів гвинта та клейового шару, після чого результати комбінуються за формулою:

$$N_{Rk,p,ucr/cr} = N_{Rk,p,CS,ucr/cr} + \alpha_b \cdot N_{Rk,p,B,ucr/cr} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (1) і (12)}$$

$$\alpha_b = 1 - (1 - \varphi_{b,ucr/cr}) \cdot (s_{cr,Np} - s) / s_{cr,Np} \leq 1 \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (3) і (13)}$$

Опір механічної частини (гвинтового елемента) визначається $N_{Rk,p,CS,ucr/cr}$ а опір хімічної частини $N_{Rk,p,B,ucr/cr}$. Обидва опори поєднують із використанням коефіцієнта $\varphi_{b,ucr/cr}$ для урахування внеску зчепних властивостей клейового матеріалу в нетріщинуватому/тріщинуватому бетоні.

Опір гвинтового анкера. Характеристичний опір окремого анкерного гвинта $N_{R,k,p,CS,ucr/cr}^0$ береться з відповідного ETA для продукту.

Опір частини бетонного гвинта в групі анкерів розраховується за формулою:

$$N_{Rk,p,CS,ucr/cr} = n \cdot N_{Rk,p,CS,ucr/cr}^0 \cdot \psi_{ec,Np,CS} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (2) і (15)}$$

Коли на окремі анкери в групі діють різні сили розтягу, груповий ефект враховується коефіцієнтом:

$$\psi_{ec,Np,CS} = \frac{1}{1 + 2 \cdot (e_N / s)} \leq 1 \quad e_N \text{ та } s \text{ визначаються аналогічно до EC2-4 [1] } n \text{ — кількість анкерів у групі.}$$

Опір клейового елемента. Характеристичний опір клейового матеріалу $N_{R,k,p,B,ucr/cr}^0$ для одного анкера береться з відповідного ETA.

Опір клейового шару в групі анкерів розраховується за формулою:

$$N_{Rk,p,B,ucr/cr} = N_{Rk,p,B,ucr/cr}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{sus} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,Np} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (5) і (16)}$$

Коефіцієнт тривалого навантаження приймається як

$$\psi_{sus} = 1.0 \quad \text{для } \alpha_{sus} \leq \psi_{sus}^0 \quad \text{EOTA TR 075 рівн. (6) і (17)}$$

$$\psi_{sus} = (\psi_{sus}^0 - \alpha_{sus} + \varphi_{b,ucr/cr}) / \varphi_{b,ucr/cr} \text{ for } \alpha_{sus} > \psi_{sus}^0 \quad \text{EOTA TR 075 рівн. (7) і (18)}$$

ψ_{sus}^0 — коефіцієнт, який враховує вплив тривалого навантаження на міцність зчеплення анкерів, визначений у відповідному ЕТА.

Коефіцієнт ($\varphi_{b,ucr/cr}$) що враховує внесок властивостей зчеплення в нетріщинуватому/тріщинуватому бетоні, розраховується за наведеним нижче рівнянням, і його значення не перевищує 1,0:

$$\varphi_{b,ucr/cr} = N_{Rk,p,B,ucr}^0 / (N_{Rk,p,CS,ucr}^0 + N_{Rk,p,B,ucr}^0) \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (4) і (14)}$$

Груповий ефект для щільно розташованих анкерів враховується коефіцієнтом $\psi_{g,Np}$ і визначається за формулами:

$$\psi_{g,Np} = \psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0.5} \cdot (\psi_{g,Np}^0 - 1) \geq 1 \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (9) і (19)}$$

$$\psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - (\sqrt{n} - 1) \cdot \left(\frac{N_{Rk,p,B,ucr/cr}^0}{N_{Rk,c}} \right)^{1.5} \geq 1 \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (10) і (20)}$$

$$N_{Rk,c} = k_3 \cdot h_{ef}^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (11) і (21)}$$

$$k_3 = k_{ucr,N} = 11.0 \text{ and } k_3 = k_{cr,N} = 7.7$$

Характерна відстань між анкерами визначається рівнянням:

$$s_{cr,Np} = 4.1 \cdot \left(\psi_{sus} \cdot \frac{d}{h_{ef}} \cdot (N_{Rk,p,CS,ucr,c20/25}^0 + N_{Rk,p,B,ucr,c20/25}^0) \right)^{0.5} \leq 3h_{ef} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (8)}$$

d — номінальний діаметр анкерного гвинта, $N_{Rk,p,CS,ucr,c20/25}^0$ і $N_{Rk,p,B,ucr,c20/25}^0$ — характеристичні опори гвинтової та клейової частини для одного анкера в нетріщинуватому бетоні певної міцності.

$A_{p,N}$ — фактична проекційна площа, $A_{p,N}^0$ — ідеалізована проекційна площа бетонного конуса.

Коефіцієнт $\psi_{s,Np}$ враховує вплив відстані до кромки для анкерів, навантажених на розтяг $\psi_{re,N}$ враховує наявність арматури в бетоні, $\psi_{ec,Np}$ враховує ексцентриситет навантаження для групи анкерів.

6.6.1.7 Виривання бетону

Коли до пост-встановленого анкера прикладається сила розтягу, у бетоні навколо анкера виникають радіальні розтягувальні сили. Ці сили спричиняють відрив бетону або його “виривання” разом з анкером, що призводить до втрати несучої здатності. Такий тип руйнування зазвичай трапляється, коли анкер встановлений поблизу краю.

Цей тип руйнування потрібно перевіряти лише для пост-встановлених анкерів із підрізом, що працюють як анкерні елементи з головкою, якщо відстань до краю $s \leq (0.5 \cdot h_{ef})$. Для груп анкерів, розташованих перпендикулярно до краю, перевірка виконується лише для анкерів, розташованих найближче до краю.

Опір вириванню бетону визначається за таким рівнянням:

$$N_{Rk,cb} = N_{Rk,cb}^0 \cdot \frac{A_{c,Nb}}{A_{c,Nb}^0} \cdot \psi_{s,Nb} \cdot \psi_{g,Nb} \cdot \psi_{ec,Nb} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.25)}$$

Характеристичний опір одного анкера, який не зазнає впливу сусідніх анкерів або додаткових країв, визначається за формулою:

$$N_{Rk,cb}^0 = k_s \cdot c_1 \cdot \sqrt{A_h} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.26)}$$

Де, k_s — коефіцієнт, що залежить від стану бетону: 8,7 — для тріщинуватого бетону, 12,2 — для нетріщинуватого бетону; A_h — визначається згідно з рівнянням (7.12) EC2-4 [1] або наведено у відповідному ЕТА.

Еталонна проекційна площа для окремого анкера з відстанню до краю c_1 :

$$A_{c,Nb}^0 = 4c_1^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.27)}$$

$A_{c,Nb}$ — фактична проєкційна площа, яка визначається аналогічно до випадків руйнування за конусом або комбінованого руйнування (див. рис. 6.17).

Коефіцієнт враховує вплив порушення розподілу напружень у бетоні через близькість до краю:

$$\psi_{s,Nb} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c_2}{2c_1} \right) \leq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.28)}$$

Коефіцієнт $\psi_{g,Nb}$ враховує груповий ефект анкерів, розташованих у ряд паралельно до краю:

$$\psi_{g,Nb} = \sqrt{n} + 1 - \sqrt{n} \cdot \left(\frac{s_2}{4c_1} \right) \geq 1 \text{ де } s_2 \leq 4c_1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.29)}$$

Коефіцієнт, що враховує ексцентриситет розтягувального навантаження: $\psi_{ec,Nb}$:

$$\psi_{ec,Nb} = \left(\frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{e_N}{4c_1}} \right) \leq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.30)}$$

Примітка: Щоб уникнути цього типу руйнування, необхідно збільшити відстань до краю.

6.6.1.8 Список для підвищення ефективності анкера проти типів руйнування при розтягу

Деякі параметри, що впливають на опір пост-встановлених анкерів, наведено у таблиці 6.7. У таблиці показано, як збільшення певних параметрів може вплинути на опір анкера до різних типів руйнування.

Таблиця 6.7 — Узагальнення факторів, що впливають на опір анкерів при розтягу

Тип руйнування Параметри	Сталь	Конус бетону	Виривання	Комбіноване виривання та конус бетону	Розколювання бетону	Виривання бетону
Кількість анкерів	↑	●	↑	↑	●	●
Діаметр анкера	↑	●	↑	↑	●	●
Відстань між анкерами	●	↑	●	↑	↑	↑
Відстань до краю	●	↑	●	↑	↑	↑
Ефективна глибина	●	↑	●	↑	↓	●
Міцність сталі	↑	●	●	●	●	●
Міцність бетону	●	↑	↑	↑	↑	↑
Товщина бетону	●	●	●	●	↑	●
Міцність зчеплення анкера	●	●	●	↑	↑	●
Ексцентриситет навантаження	●	↓	●	↓	↓	↓

Позначення:



— фактор має позитивний вплив на опір, тому його значення слід збільшити для досягнення вищого опору;



— фактор має негативний вплив на опір, тому його значення слід зменшити;



— фактор не впливає на опір.

6.6.2 Перевірки анкерів при зсувному навантаженні

Необхідні перевірки для пост-встановлених анкерів на зсув згідно з EC2-4 [1] наведено в таблиці 6.8. Розрахункове зсувне навантаження V_{Ed} має бути меншим за розрахунковий опір V_{Rd} (див. розділ 6.1). Руйнування сталі анкера — з важелем або без — перевіряється для найбільш навантаженого анкера. Інші види руйнування, пов'язані з бетоном, перевіряються для групи анкерів з урахуванням усіх граничних умов.

Таблиця 6.8 — Види руйнування та критерії перевірки при зсувному навантаженні згідно з EC2-4 [1]

Вид руйнування	Окремий анкер	Група анкерів	
		Найбільш навантажений анкер	Група
Руйнування сталі анкера без важеля	$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}}$	$V_{Ed}^h \leq V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}}$	
Руйнування сталі анкера з важелем	$V_{Ed} \leq V_{Rd,s,M} = \frac{V_{Rk,s,M}}{\gamma_{Ms}}$	$V_{Ed}^h \leq V_{Rd,s,M} = \frac{V_{Rk,s,M}}{\gamma_{Ms}}$	
Виривання бетону	$V_{Ed} \leq V_{Rd,cp} = \frac{V_{Rk,cp}}{\gamma_{Mc}}$		$V_{Ed}^g \leq V_{Rd,cp} = \frac{V_{Rk,cp}}{\gamma_{Mc}}$
Руйнування краю бетону	$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$		$V_{Ed}^g \leq V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$

Відповідні часткові коефіцієнти безпеки для розрахунку опору анкерів на зсув наведено в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 — Часткові коефіцієнти безпеки для зсуву при статичному навантаженні

Тип руйнування	Частковий коеф. безпеки	Розрахункові значення
Сталь	γ_{Ms}	$1.0 \cdot f_{uk} / f_{yk} \geq 1.25$ для $f_{uk} \leq 800$ МПа та $f_{uk} / f_{yk} \leq 0.8$ 1.5 для $f_{uk} > 800$ МПа та $f_{uk} / f_{yk} > 0.8$
Виривання бетону	γ_{Mc}	$\gamma_c \cdot \gamma_{inst}$ (γ_{inst} береться з ЕТА і $\gamma_c = 1.5^*$)
Руйнування краю бетону	γ_{Mc}	$\gamma_c \cdot \gamma_{inst}$ (γ_{inst} береться з ЕТА і $\gamma_c = 1.5^*$)

*) Якщо інше не зазначено у відповідному Національному додатку до EC2-4.

6.6.2.1 Руйнування сталі без плеча важеля

Руйнування сталі без важеля для пост-встановлених анкерів відповідає ситуації, коли анкер руйнується під дією зсувних сил.

Характеристичний опір окремого анкера $V_{Rk,s}^0$ наведено у відповідному ЕТА.

Для анкерів з постійним перерізом по всій довжині $V_{Rk,s}^0$ визначається за формулою:

$$V_{Rk,s}^0 = k_6 \cdot A_s \cdot f_{uk} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.34)}$$

Коефіцієнт k_6 залежить від граничної міцності сталі f_{uk} : $k_6 = 0.6$ для

$f_{uk} \leq 500$ МПа та 0.5 для $500 \leq f_{uk} \leq 1000$ МПа. A_s — площа поперечного перерізу анкера.

Коли відношення ефективної глибини закладення до діаметра $h_{ef}/d \leq 5$ для бетону класу міцності на стиск $\leq C20/25$, значення $V_{Rk,s}^0$ необхідно помножити на коефіцієнт 0.8.

Характеристичний опір анкера $V_{Rk,s}$ справедливий для можливого шару розчину товщиною

$$t_{grout} \leq d/2 \text{ is:}$$

$$V_{Rk,s} = k_7 \cdot V_{Rk,s}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.35)}$$

$k_7=1$ для окремого анкера, а для групи анкерів значення k_7 береться з ЕТА.

Якщо зазначена умова не виконується, опір $V_{Rk,s}$ необхідно зменшити за формулою:

$$V_{Rk,s} = (1 - 0.01 \cdot t_{grout}) \cdot k_7 \cdot V_{Rk,s}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.36)}$$

Це рівняння застосовується лише для не розтрісканого бетону та у випадках, коли товщина шару розчину менша за 40 мм.

Примітка: Для підвищення опору при цьому типі руйнування можна: 1) обрати більш міцний сталевий матеріал; 2) збільшити діаметр анкера; 3) збільшити кількість анкерів.

6.6.2.2 Руйнування сталі з плечем важеля

Коли на анкер діє зсувна сила з важелем, у ньому виникає додаткова сила розтягу, спричинена згинальним моментом. Отже, розрахунковий опір при зсуві з важелем залежить від моменту ($M_{Rk,s}$) і ступеня защемлення анкера (α_M) з боку елемента кріплення.

Характеристичний опір окремого анкера при зсуві з важелем $V_{Rk,s,M}$ визначається за формулою:

$$V_{Rk,s,M} = \frac{\alpha_M \cdot M_{Rk,s}}{l_a} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.37)}$$

($\alpha_M = 1.0$) — якщо відсутнє защемлення і, елемент кріплення може вільно обертатись (див. рис. 6.14);

($\alpha_M = 2.0$) — якщо є защемлення і обертання елемента кріплення не відбувається (див. рис. 6.14).

l_a — це важіль, який, як правило, розраховується відповідно до рис. 6.15 а) і б).

Якщо шайба та гайка безпосередньо прилягають до бетонної поверхні або шару розчину (міцність $\geq 30 \text{ N/mm}^2$) при товщині шару $t_{grout} \leq d/2$, тоді $a_3=0$ (див. рис. 6.15 а) і б)).

$$M_{Rk,s} = M_{Rk,s}^0 \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right) \quad \text{EC2-4, рівн. (7.38)}$$

де $M_{Rk,s}^0$ — характеристичний опір на вигин окремого анкера.

Примітка: Розрахункові положення EC2-4 [1] для зсуву з важелем не застосовні поблизу краю елемента та не розрізняють проходки з шаром розчину та без нього. Для врахування цих умов слід користуватись методом SOFA, описаним у розділі 6.5.2, який враховує сучасні дослідження в цій галузі.

6.6.2.3 Виривання бетону при зсуві

Цей тип руйнування відповідає утворенню вириву бетону на протилежному боці від напрямку прикладеного навантаження при дії зсувних сил. Таке руйнування може виникати, коли група коротких анкерів розташована на значній відстані від країв елемента.

Для механічних пост-встановлених анкерів характеристичний опір $V_{Rk,cp}$ розраховується за формулою:

$$V_{Rk,cp} = k_8 \cdot N_{Rk,c} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.39 а)}$$

Для пост-встановлених анкерів на клеєній основі опір $V_{Rk,cp}$ визначається за формулою:

$$V_{Rk,cp} = k_B \cdot \min \{N_{Rk,c}; N_{Rk,p}\} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.39 c)}$$

k_B — коефіцієнт, що визначається згідно з відповідною ЕТА. $N_{Rk,c}$ визначається відповідно до розділу 6.6.1.2, а $N_{Rk,p}$ — відповідно до розділу 6.6.1.3.

Примітка: Руйнування типу «виривання бетону» залежить від опору при руйнуванні за типом бетонного конуса та при вириванні анкера з бетону. Отже, якщо опір цих типів руйнування підвищується, опір при вириванні бетону також буде вищим.

6.6.2.4 Руйнування бетонної кромки

Руйнування бетонної кромки може виникати під час дії зсувних сил, коли анкери розташовані близько до країв елемента.

Примітка: Цей тип руйнування необхідно перевіряти лише для анкерів, у яких відстань до краю $c \leq \max(10h_{ef}; 60d)$ у напрямку дії зсувного навантаження. Ця перевірка не застосовується, якщо зсувна сила діє через важіль. Анкери, розташовані найближче до краю, перевіряються на руйнування кромки. Якщо анкери розташовані поблизу кількох країв, перевірку необхідно виконати для кожного з них.

Характеристичний опір $V_{Rk,c}$ одного анкера або групи анкерів, навантажених у напрямку до краю, визначається за формулою:

$$V_{Rk,c} = V_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{h,v} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{re,V} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.40)}$$

Характеристичний опір окремого анкера $V_{Rk,c}^0$ визначається як:

$$V_{Rk,c}^0 = k_v \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c^{1.5} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.41)}$$

Коефіцієнт k_v is 1.7 дорівнює 1.7 для тріщинуватого бетону і 2.4 для нетріщинуватого. Показники ступенів α та β залежать від відстані до краю (c_1), глибини анкерування (l_f), та діаметра анкера (d_{nom}):

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1}\right)^{0.5} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.42)}$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1}\right)^{0.2} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.43)}$$

Примітка: Значення l_f наведено у відповідній ЕТА.

Відношення $\frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0}$ враховує геометричний вплив відстаней між анкерами. $A_{c,V}^0$ — еталонна проєкційна площа:

$$A_{c,V}^0 = 4.5 c_1^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.44)}$$

$A_{c,V}$ — фактична площа тіла руйнування бетону у зоні анкера до бічної поверхні бетону. Вона зменшується через перекриття зон руйнування сусідніх анкерів і розраховується залежно від умов: $s < 3c_1$, $c_2 < 1.5 c_1$, $h < 1.5c_1$. Див. рис. 6.20.

Вплив відстані до краю враховується коефіцієнтом ψ_s , який обчислюється за формулою:

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c_2}{1.5c_1}\right) \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.45)}$$

Оскільки опір бетонної кромки не зменшується пропорційно до товщини елемента, цей ефект враховується коефіцієнтом $\psi_{h,v}$:

$$\psi_{h,v} = \sqrt{\left(\frac{1.5 c_1}{h}\right)} \geq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.46)}$$

Опір залежить від значення відстані до краю, перпендикулярної до напрямку навантаження (c_1) і від товщини бетонного елемента (h). Вплив ексцентриситету (e_V) у розподілі зсувного навантаження в групі анкерів враховується коефіцієнтом $\psi_{ec,V}$:

$$\psi_{ec,V} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2 \cdot e_V}{3 \cdot c_1}\right)} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.47)}$$

Для випадку перевірки анкерів, розташованих поблизу кількох країв, враховується кут між напрямком прикладеного зсувного навантаження і перевірюваною кромкою за допомогою коефіцієнта $\psi_{\alpha,V}$:

$$\psi_{\alpha,V} = \frac{1}{\sqrt{(\cos \alpha_V)^2 + (0.5 \sin \alpha_V)^2}} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.48)}$$

α_V — це кут між розрахунковим зсувним навантаженням V_{Ed} (для окремого анкера або групи анкерів V_{Ed}^g і лінією, перпендикулярною до перевірюваної кромки. (Див. рис. 6.19).

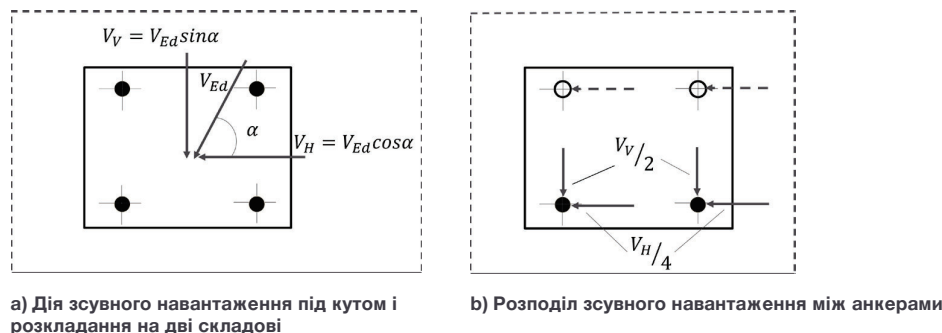


Рис. 6.19 — Зсувне навантаження під кутом

Вплив крайового армування з урахуванням стану бетону враховується коефіцієнтом $\psi_{re,V}$.

$\psi_{re,V} = 1.0$ для анкерів у неушкодженому або тріснутому бетоні без крайового армування.

$\psi_{re,V} = 1.4$ для анкерів у тріснутому бетоні з крайовим армуванням (діаметр хомута ($d_s \geq 12$ мм) і з малим кроком хомутів $a \leq 100$ мм і $a \leq 2c_1$).

Примітка: Коефіцієнт $\psi_{re,V}$ може бути прийнятий більшим за 1 лише тоді, коли глибина анкерування h_{ef} перевищує у 2,5 раза захисний шар бетону для крайового армування.

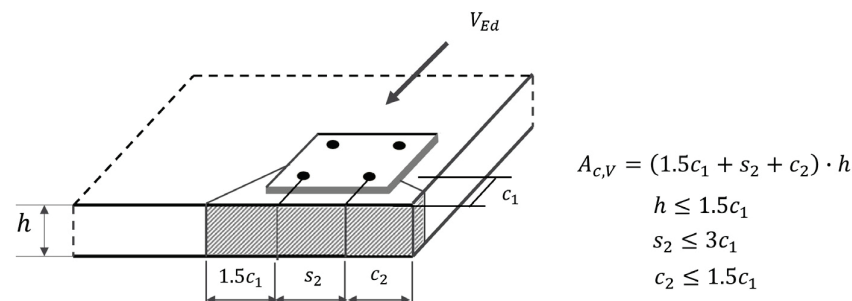
Якщо анкери розміщені у тонкому бетоні з $c_{2,max} \leq 1.5 c_1$ і $h \leq 1.5 c_1$, значення c_1 замінюється згідно з виразами:

$$c_1' = \max \left\{ \frac{c_{2,max}}{1.5}; \frac{h}{1.5} \right\} \text{ для окремих анкерів} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.49)}$$

$$c_1' = \max \left\{ \frac{c_{2,max}}{1.5}; \frac{h}{1.5}; \frac{s_{2,max}}{3} \right\} \text{ для груп анкерів} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.50)}$$

$c_{2,max}$ — більша з двох відстаней до країв, паралельних напрямку дії навантаження;

$s_{2,max}$ — максимальний крок між анкерами у напрямку 2 всередині групи.



$$A_{c,V} = (1.5c_1 + s_2 + c_2) \cdot h$$

$$h \leq 1.5c_1$$

$$s_2 \leq 3c_1$$

$$c_2 \leq 1.5c_1$$

Рис. 6.20 — Приклади фактичної проєкційної площі $A_{c,V}$ ідеалізованих тіл руйнування бетону.

Примітка: Опір цьому виду руйнування можна підвищити за рахунок: 1) збільшення відстані до краю для першого ряду анкерів; 2) збільшення глибини анкерування; 3) збільшення відстані між анкерами в групі; і 4) збільшення діаметра анкерів.

6.6.2.5 Список для підвищення ефективності анкера проти типів руйнування при зсуві

Деякі параметри, які впливають на опір пост-встановлених анкерів, наведено в таблиці 6.10. У ній показано, як збільшення різних параметрів може вплинути на опір щодо конкретних типів руйнування.

Таблиця 6.10 — Підсумок факторів, що впливають на опір анкерів при зсуві

Тип руйнування Параметри	Сталь (зсув без плеча)	Сталь (зсув із плечем)	Виривання бетону	Руйнування кромки бетону
Кількість анкерів	↑	↑	●	●
Діаметр анкера	↑	↑	●	↑
Відстань між анкерами	●	●	↑	↑
Відстань до краю	●	●	↑	↑
Ефективна глибина	●	●	↑	↑
Міцність сталі	↑	↑	●	●
Міцність бетону	●	●	↑	↑
Товщина бетону	●	●	●	↑
Ексцентриситет навантаження	●	●	↓	↓

Умовні позначення:

- ↑ — параметри, що позитивно впливають на опір (їх потрібно збільшувати, щоб підвищити опір).
- ↓ — параметри, що негативно впливають на опір (їх потрібно зменшувати, щоб підвищити опір).
- — параметри, які не впливають на опір.

6.7 Розрахунок із урахуванням додаткового армування згідно з EC2-4

У багатьох випадках при розтягу або зсуві визначальним є руйнування бетону. Щоб підвищити опір у таких умовах, можна враховувати належним чином спроектоване додаткове армування або наявне (ненавантажене) армування в існуючому елементі. Загалом таке армування застосовують для сприйняття або розтягувального, або зсувного навантаження, тобто не обох напрямків одночасно. У наступних розділах наведено рівняння перевірок і вимоги до деталювання додаткового армування.

6.7.1 Додаткове армування, розраховане на сприйняття розтягу

Під час проєктування **пост-встановлених анкерів із додатковим армуванням** перевірку на **руйнування бетонного конуса** можна не виконувати, якщо додаткове армування розраховане на сприйняття всього розтягувального навантаження. Таке додаткове армування має відповідати таким вимогам:

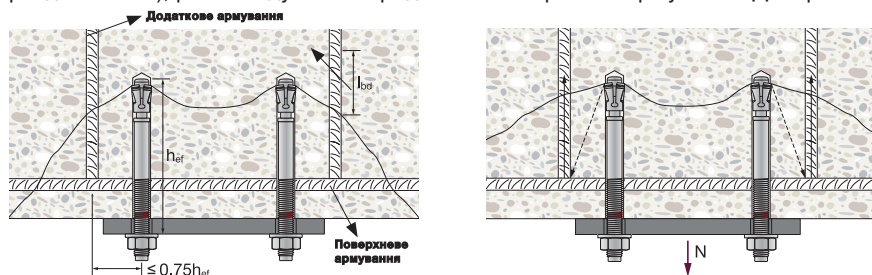
- Армування повинно складатися з рифлених арматурних стрижнів і деталізуватись у вигляді хомутів або петель із діаметром оправки ϕ_m згідно з EC2-1-1 [27]. Для арматури діаметром $\phi \leq 16$ мм межа текучості повинна становити $f_{yk, re} \leq 600 \text{ Н/мм}^2$.
- Якщо додаткове армування розраховане на найбільш навантажений анкер, таке саме армування слід передбачити для всіх анкерів.
- Ексцентриситет, пов'язаний з кутом утворення конуса руйнування, можна зменшити, розташувавши додаткове армування якомога ближче до анкерів. Рекомендована відстань між армуванням і анкером — $\leq 0.75 h_{ef}$.
- Довжина анкерування в зоні бетонного конуса l_1 визначається так:
 - для анкерування з гнутими, гачковими або петльовими стрижнями: $l_1 \geq 4\phi$
 - для анкерування з прямими стрижнями, із привареними або без поперечних стрижнів: $l_1 \geq 10\phi$

Додаткове армування проєктується відповідно до моделі «розпівка-тяга» — підходу, який використовується для аналізу та розрахунку конструкцій зі складними шляхами передавання навантажень і наявними розривами. Він передбачає створення спрощених діаграм розтягувальних і стискувальних зусиль, які забезпечують умови рівноваги.

Додаткове армування повинно анкеруватись за межами передбачуваного конуса руйнування, із довжиною анкерування l_{bd} (див. рис. 6.21) згідно з EC2-1-1 [27].

Руйнування бетонного конуса при анкеруванні до кінця додаткового армування слід перевіряти за тією самою формулою (див. розділ 6.6.1.2) для $N_{Rk, c}$.

Для сприйняття зусиль, визначених за моделлю «розпівка-тяга» та розколювальних напружень (див. розділ 6.6.1.4), рекомендується передбачати поверхневе армування. Див. рис. 6.21.



а) Кріплення з додатковим армуванням, що сприймає розтягувальне навантаження

б) Модель «розпівка-тяга»

Рис. 6.21 — Додаткове армування з пост-встановленими анкерами

6.7.1.1 Руйнування сталі

Характеристичний опір текучості додаткового армування для одного анкера визначається за формулою:

$$N_{Rk, re} \leq \sum_{i=1}^{n_{re}} A_{s, re, i} \cdot f_{yk, re}, \text{ де } f_{yk, re} \leq 600 \text{ Н/мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.31)}$$

n_{re} — кількість стрижнів додаткового армування, ефективних для одного анкера, $A_{s, re}$ — площа поперечного перерізу додаткового армування.

Примітка: Опір додаткового армування на руйнування сталі може бути підвищений за рахунок використання арматури більшого діаметра та сталі з вищою міцністю.

6.7.1.2 Руйнування анкерного кріплення

Опір анкерування додаткового армування $N_{Rd,a}$ визначається за формулою:

$$N_{Rd,a} \leq \sum_{i=1}^{n_{re}} N_{Rd,ai}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.32)}$$

Опір одного стрижня $N_{Rd,a}^0$ залежить від довжини анкерування (l_1), міцності зчеплення (f_{bd}), діаметра арматури (ϕ) та інших коефіцієнтів (α_1, α_2).

$$N_{Rd,a}^0 = \frac{(l_1 \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_{bd})}{(\alpha_1 \cdot \alpha_2)} \leq A_{s,re} \cdot f_{yk,re} \cdot \frac{1}{\gamma_{Ms,re}} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.33)}$$

Примітка: коефіцієнти f_{bd} та α_1, α_2 визначаються згідно з EC2-1-1, розділи 8.4.2 і 8.4.4.

Примітка: Використання арматури більшого діаметра, більшої довжини анкерування та вищої міцності зчеплення дозволяє підвищити опір додаткового армування до руйнування конуса для анкерів.

6.7.2 Додаткове армування, розраховане на сприйняття зсувного навантаження

Під час проектування пост-встановлених анкерів із додатковим армуванням **перевірку на руйнування бетонної кромки можна не виконувати**, якщо додаткове армування розраховане на сприйняття всього навантаження. Вимоги до зсувного додаткового армування такі самі, як і для випадку розтягувального навантаження, наведеного в розділі 6.7.1. Додаткове зсувне армування розташовується після аналізу за моделлю «розпирка-тяга», як описано для випадку розтягу. Для спрощення можна прийняти кут стиснених розпірок рівним 45° (див. рис. 6.22).

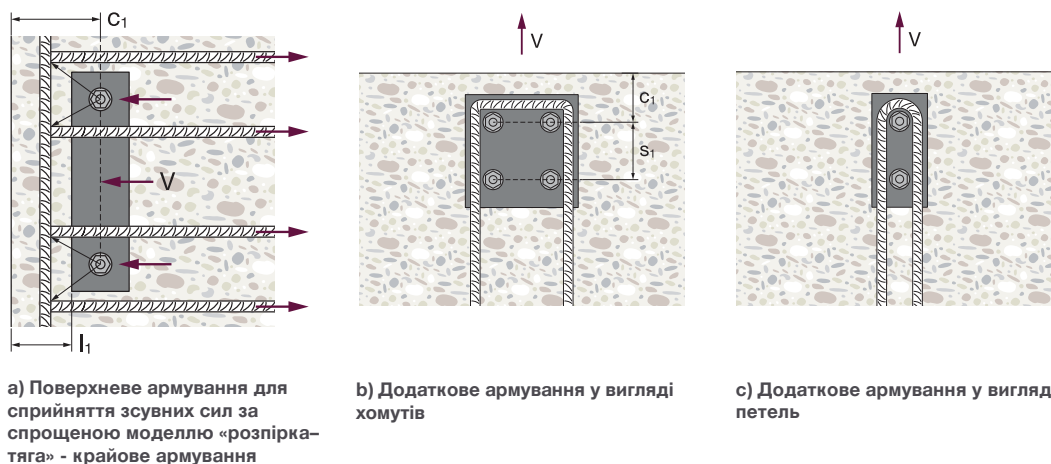


Рис. 6.22 — Додаткове зсувне армування для анкерів

6.7.2.1 Руйнування сталі

Характеристичний опір додаткового армування для одного анкера у випадку руйнування сталі визначається за формулою:

$$N_{Rk,re} \leq k_{10} \cdot \sum_{i=1}^{n_{re}} A_{s,re,i} \cdot f_{yk,re}, \quad \text{де} \quad f_{yk,re} \leq 600 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.51)}$$

k_{10} — коефіцієнт ефективності; $k_{10} = 1.0$ для поверхневого армування (див. рис. 6.22 а) та $k_{10} = 0.5$ для додаткового армування у вигляді хомутив або петель, що охоплюють анкер (див. рис. 6.22 б) і рис. 6.22 с).

6.7.2.2 Руйнування анкерного кріплення

Якщо додаткове армування виконано у вигляді хомутив або петель, що контактують з анкером, перевірка несучої здатності армування передбачається, і перевірка тіла виколування бетону не потрібна (див. рис. 6.22 б) і рис. 6.22 с).

Несуча здатність додаткового армування для одного анкера при руйнуванні анкерного кріплення визначається за формулою:

$$N_{Rd,a} \leq \sum_{i=1}^{n_{re}} N_{Rd,ai}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.52)}$$

$$\text{Де, } N_{Rd,a}^0 = (l_1 \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_{bd}) / (\alpha_1 \cdot \alpha_2) \leq A_{s,re} \cdot f_{yk,re} \cdot 1 / \gamma_{Ms,re} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.53)}$$

6.8 Взаємодія між розтягувальним і зсувним навантаженням

Пост-встановлені анкери, що зазнають одночасно сил розтягу та зсуву, мають перевірятися на комбіновану дію відповідно до положень EC2-4 [1].

Розрахункова перевірка виконується окремо для випадку руйнування сталі та для інших видів руйнування, відмінних від сталевих, за рівняннями, наведеними в таблиці 6.11 і на рис. 6.23.

Таблиця 6.11 — Перевірка при комбінованій дії

Вид руйнування	Перевірка
Сталь	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,s}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s}}\right)^2 \leq 1$
Руйнування, відмінне від сталевих	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}\right)^{1.5} + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}\right)^{1.5} \leq 1$ or $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}} \leq 1.2$ and $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}} \leq 1$ and $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}} \leq 1$, найб. знач. $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}$ і $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}$ для різних видів руйнування мають бути враховані.
Руйнування, відмінне від сталевих (додаткове армування)	$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}\right)^{k_{11}} + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}\right)^{k_{11}} \leq 1$, $k_{11} = 2/3$ або визначається у відповідній ЕТА.

Примітка: якщо зсувне навантаження прикладено з плечем важеля, перевірка на руйнування сталі не потрібна.

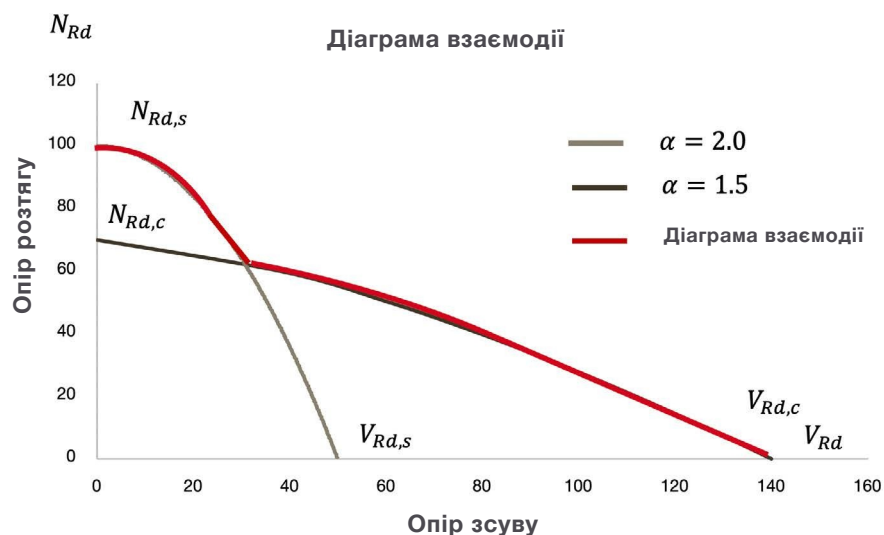


Рис. 6.23 — Діаграма взаємодії між опором розтягу та опором зсуву

6.9 Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при статичному навантаженні

6.9.1 Розрахунок при статичному навантаженні без додаткового армування

6.9.1.1 Приклад розрахунку для механічних розпірних анкерів

Вимоги проекту: профіль IPBv 120/HE 120 M закріплюється до бетонної плити за допомогою сталеві опорної пластини. З'єднання виконується механічними анкерами (див. рис. 6.24).

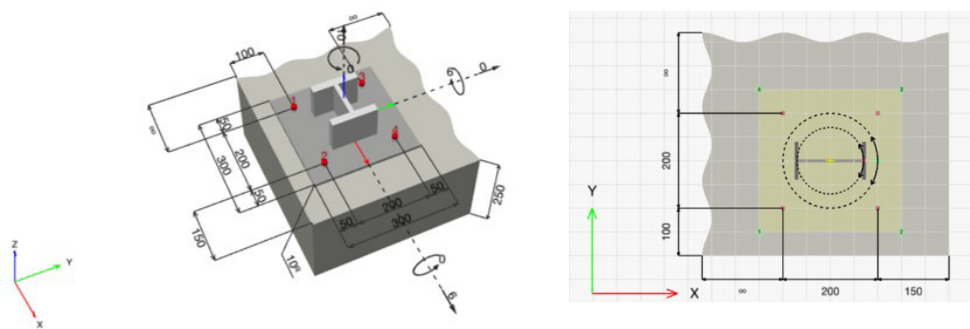


Рис. 6.24 — З'єднання опорної пластини з використанням пост-встановлених механічних анкерів

Вихідні дані проекту:

Геометрія бетону:	Товщина плити, $h = 250 \text{ мм}$
Геометрія опорної пластини:	Розміри пластини, $l \times w = 300 \times 300 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 15 \text{ мм}$
Матеріали:	Бетон звичайної щільності C25/30, з тріщинами
	Поверхнєве армування: 200 мм
Навантаження:	Сила розтягу, $N_{Ed} = 10 \text{ кН}$
	Згинальний момент, $M_{Ed} = 6 \text{ кНм}$
	Сила зсуву, $V_{Ed} = 6 \text{ кН}$ (без відступу)
Сталевий профіль:	IPBv 120 /HE 120 M
Розрахунковий термін служби:	50 років

Деталі пост-встановлених анкерів:

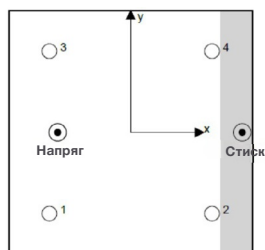
Тип анкера:	Механічний
Кількість анкерів:	4
Відстань між анкерами по осі X:	200 мм
Відстань між анкерами по осі Y:	200 мм
Відстань до краю по осі X:	150 мм
Відстань до краю по осі Y:	100 мм

Умови встановлення пост-встановлених анкерів:

Метод свердління / орієнтація:	ударно-обертальне свердління, горизонтально, сухим способом
Температура під час монтажу:	24 °C (довгострокова) / 40 °C (короткострокова)
Корозійна стійкість:	анкери експлуатуються в морському агресивному середовищі
Обране рішення:	Hilti HST4-R — металевий розпірний анкер (ETA-21/0878 [36])

1) Аналіз сил розтягу

Момент, що діє на групу анкерів $M_{Ed} = 6 \text{ kNm}$, розподіляється між анкерами як сили розтягу та стиску. Для цього визначається нейтральна вісь і виконується аналіз сил у кожному анкері (див. рис. 6.25). Загальна сила розтягу для групи анкерів становить $N_{Ed} = 32.5 \text{ кН}$.



Анкер	Сила [кН]	Тип
1	15.4	Розтяг
2	0.8	Розтяг
3	15.4	Розтяг
4	0.8	Розтяг

Рис. 6.25 — Аналіз сил у анкерах

2) Аналіз зсувних сил

Загальна сила зсуву, що діє на групу анкерів, становить $V_{Ed} = 6 \text{ кН}$. Вона розподіляється між усіма чотирма анкерами для перевірки на руйнування сталі та висмикування. Для перевірки руйнування бетонної кромки сила зсуву розподіляється лише між анкерами, розташованими біля найближчої кромки, відповідно до принципів, показаних на рис. 6.9 і 6.10, з урахуванням кромок, паралельних і перпендикулярних до дії сили зсуву.

3) Характеристики запропонованого анкера Властивості обраного рішення наведено в таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 — Характеристики анкера

Тип анкера	Механічний	
Модель анкера	HST4-R	
Діаметр анкера	d	16 мм
Ефективна глибина анкерування	h_{ef}	115 мм
Номінальна глибина анкерування	h_{nom}	128 мм



Розрахункові перевірки виконуються з урахуванням жорсткої опорної пластини відповідно до EC2-4 [1], а характеристичні опори взято з ETA-21/0878 [36]. Детальну інформацію про розрахунок опору за різними видами руйнування наведено в розділі 6.6.

Перевірка на руйнування від сили розтягуРуйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{M,s}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,s} = 75 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,s} = \left(\frac{75}{1.4}\right) = 53.6 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 15.4 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Виривання анкера:

Опір вириванню анкера розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,p} = \frac{\psi_c N_{Rk,p}}{\gamma_{M,p}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$\psi_c = 1.118 \quad \text{influence of concrete strength for C25/30, ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rk,p} = 38 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$\gamma_{M,p} = 1.5 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,p} = \left(\frac{1.118 \cdot 38}{1.5}\right) = 28.3 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 15.4 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за формулою:

$$N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 8.9 \cdot \sqrt{25} \cdot 115^{1.5} = 54.9 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1 і EC2-4, рівн. (7.2)}$$

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = (3 \cdot 115) = 345 \text{ мм}, c_{cr,N} = 172.5 \text{ мм} \quad \text{EC2-4, розд. 7.2.1.4 (3)}$$

$$A_{c,N} = (100 + 200 + 172.5) \cdot (150 + 200 + 172.5) = 246,881 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рис. 7.4}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (345 \cdot 345) = 119,025 \text{ мм}^2; \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{100}{172.5}\right) = 0.87 \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

$$\psi_{re,N} = 1.0, \text{ поверхневе армування з кроком 200 мм}$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}}\right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

$$\text{Ексцентриситет по осі X } e_{c,N} = 89.8 \text{ мм}, \psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot 89.8}{345}\right)} = 0.66$$

$$\text{Ексцентриситет по осі Y: } e_{c,N} = 0 \text{ мм, отже } \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$\text{Фактор згинального моменту } \psi_{M,N} = 1.0 \text{ (через близькість до краю)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.7)}$$

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 54.9 \cdot \left(\frac{246,881}{119,025}\right) \cdot 0.87 \cdot 1.0 \cdot 0.66 = 65.4 \text{ кН}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$N_{Rd,c} = \left(\frac{65.4}{1.5}\right) = 43.6 \text{ кН} > N_{Ed} = 32.5 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Розколювання бетону

Згідно з критеріями EC2-4 [1], розд. 7.2.1.7 (2) b) 2), розколювання бетону сприймається армуванням у бетоні за умови обмеження ширини тріщин $w_k \leq 0.3$ мм.

Перевірка на дії сили зсуву:Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі для найбільш навантаженого анкера за допомогою наступного рівняння:

$$V_{Rd,s} = \frac{V_{Rk,s}}{\gamma_{Ms}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2}$$

$$\gamma_{Ms} = 1.25 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

$$V_{Rk,s} = 72.4 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

$$V_{Rd,s} = \left(\frac{72.4}{1.25} \right) = 57.9 > V_{sd1} = 1.5 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Виривання бетону:

Опір вириванню бетону розраховується для групи анкерів:

$$V_{Rk,cp} = k_8 \cdot N_{Rk,c} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.39a)}$$

$$V_{Rd,cp} = \frac{V_{Rk,cp}}{\gamma_{Mcp}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2}$$

$$\gamma_{Mcp} = 1.5 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

$$k_8 = 2.74 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

Характеристичний опір одного анкера береться з перевірки на руйнування бетонного конуса.

$$N_{Rk,c}^0 = 54.9 \text{ кН}, \psi_{s,N} = 0.87, \psi_{re,N} = 1.0 \text{ [такий самий як для виривання]}, \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} = 54.9 \cdot \frac{246,881}{119,025} \cdot 0.87 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 99 \text{ кН},$$

$$V_{Rk,cp} = 99 \cdot 2.74 = 271.3 \text{ кН}$$

$$V_{Rd,cp} = \left(\frac{271.3}{1.5} \right) = 180.8 \text{ кН} > V_{Ed} = 6 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування бетонної кромки: зусилля зсуву, прикладене паралельно кромці в напрямку Y'

Опір бетонної кромки перевіряється для зусилля зсуву, прикладеного паралельно лівій кромці в напрямку Y', навантаження сприймається всіма анкерами.

$$V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

$$l_f = h_{ef} = 115 \text{ мм}, c_1 = 100 \text{ мм}, c_2 = 150 \text{ мм}, k_v = 1.7 \text{ для тріщинуватого бетону}$$

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1} \right)^{0.5} = 0.1 \cdot \left(\frac{115}{100} \right)^{0.5} = 0.11 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.42)}$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1} \right)^{0.2} = 0.1 \cdot \left(\frac{16}{100} \right)^{0.2} = 0.07 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.43)}$$

$$V_{Rk,c}^0 = k_v \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5} = 1.7 \cdot 16^{0.11} \cdot 115^{0.07} \cdot \sqrt{25} \cdot 100^{1.5} = 15.9 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.41)}$$

$$A_{c,v}^0 = 4.5 c_1^2 = 4.5 \cdot 100^2 = 45,000 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.44)}$$

$$A_{c,v} = (150 + 200 + 1.5 \cdot 100) \cdot (1.5 \cdot 100) = 75,000 \text{ мм}^2$$

$$\psi_{s,v} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c_2}{1.5 c_1} \right) \leq 1.0 = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{150}{1.5 \cdot 100} \right) = 1.0$$

$$\psi_{h,v} = 1.0, \psi_{ec,v} = 1.0, \psi_{\alpha,v} = 2.0 \text{ for } \alpha_v = 90^\circ$$

$$V_{Rk,c} = V_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{h,v} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{re,V} = 15.9 \cdot \frac{75,000}{45,000} \cdot 2.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 53 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = \left(\frac{53}{1.5} \right) = 35.3 \text{ kN} > V_{Ed} = 6 \text{ kN}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування бетонної кромки: зусилля зсуву, прикладене перпендикулярно до кромки в напрямку $X^\pm$ -direction (вирішальна кромка)

Опір бетонної кромки перевіряється для зусилля зсуву, прикладеного перпендикулярно до нижньої кромки в напрямку $X^\pm$, навантаження сприймають передні анкери.

$$V_{Rd,c} = \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$$

EC2-4, Табл. 7.2

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

ETA-21/0878, Табл. C2

$$l_f = h_{ef} = 115 \text{ мм}, c_1 = 150 \text{ мм}, c_2 = 100 \text{ мм}, k_v = 1.7 \text{ — бетон із тріщинами}$$

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1} \right)^{0.5} = 0.1 \cdot \left(\frac{115}{150} \right)^{0.5} = 0.088$$

EC2-4, рівн. (7.42)

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1} \right)^{0.2} = 0.1 \cdot \left(\frac{16}{150} \right)^{0.2} = 0.064$$

EC2-4, рівн. (7.43)

$$V_{Rk,c}^0 = k_v \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5} = 1.7 \cdot 16^{0.088} \cdot 115^{0.064} \cdot \sqrt{25} \cdot 150^{1.5} = 26.9 \text{ кН}$$

EC2-4, рівн. (7.41)

$$A_{c,V}^0 = 4.5 \cdot c_1^2 = 4.5 \cdot 150^2 = 101,250 \text{ мм}^2$$

EC2-4, рівн. (7.44)

$$A_{c,V} = (100 + 200 + 1.5 \cdot 150) \cdot (1.5 \cdot 150) = 118,125 \text{ мм}^2$$

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c_2}{1.5 \cdot c_1} \right) \leq 1.0 = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{100}{1.5 \cdot 150} \right) = 0.833$$

$$\psi_{h,v} = 1.0, \psi_{ec,V} = 1.0, \psi_{\alpha,V} = 1.0$$

$$V_{Rk,c} = V_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{h,v} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{re,V} = 26.9 \cdot \frac{118,125}{101,250} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.833 \cdot 1.0 \cdot 1.0$$

$$V_{Rk,c} = 26.2 \text{ кН}$$

$$V_{Rd,c} = \left(\frac{26.2}{1.5} \right) = 17.5 \text{ кН} > V_{Ed} = 6 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Перевірка на комбіновану дію сил розтягу та зсуву:

Руйнування сталі

EC2-4, Табл. 7.3

$$\text{Відношення між діючим зусиллям і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{15.4}{53.6} \right) = 0.28 \leq 1.0$$

$$\text{Відношення між діючим зусиллям і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{1.5}{57.9} \right) = 0.03 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.28^2 + 0.03^2 = 0.08 \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування, відмінне від сталевих

EC2-4, Табл. 7.3

$$\text{Відношення між діючим зусиллям і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{32.5}{43.6} \right) = 0.75 \leq 1.0$$

$$\text{Відношення між діючим зусиллям і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{6}{17.5} \right) = 0.34 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.75^{1.5} + 0.34^{1.5} = 0.85 \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

6.9.1.2 Приклад розрахунку для гвинтового анкера в бетоні

Вимоги проєкту: Поручні кріпляться до бетону через опорну пластину з використанням пост-встановлених гвинтових анкерів (див. рис. 6.26).

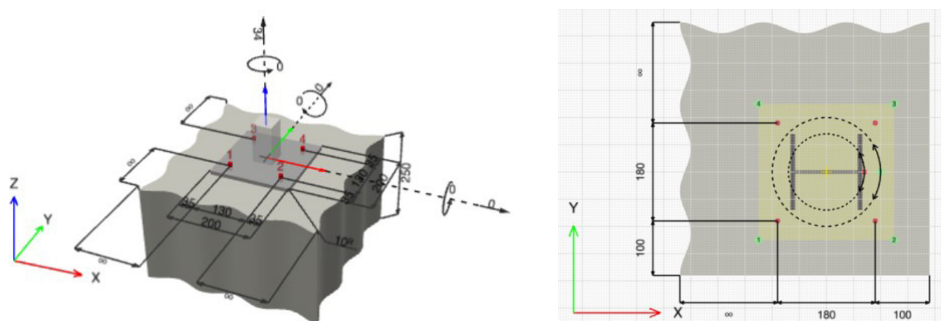


Рис. 6.26 — З'єднання опорної пластини з використанням пост-встановлених гвинтових анкерів у бетоні

Вихідні дані проєкту:

Геометрія бетону:	Товщина плити, $h = 250 \text{ мм}$
Геометрія опорної пластини:	Розміри пластини, $l \times w = 200 \times 200 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 20 \text{ мм}$
Матеріали:	Бетон звичайної щільності C20/25, з тріщинами
	Поверхнєве армування крок 200 мм
Навантаження:	Сила розтягу, $N_{Ed} = 34 \text{ кН}$
Сталевий профіль:	Square bar for handrail, $50 \times 50 \text{ мм}$
Розрахунковий термін служби:	50 років

Деталі пост-встановлених анкерів:

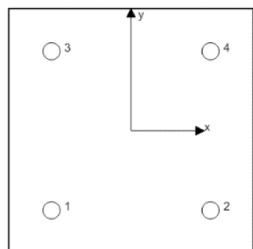
Тип анкера:	Механічний
Кількість анкерів:	4
Відстань між анкерами по осі X:	130 мм
Відстань між анкерами по осі Y:	130 мм

Умови встановлення пост-встановлених анкерів:

Метод свердління / орієнтація:	ударно-обертальне свердління, горизонтально, сухим способом
Темп. монтажу / під час служби:	24 °C (довгострокова) / 40 °C (короткострокова)
Обране рішення:	Металевий розширювальний анкер Hilti HUS4-H (ETA-20/0867 [37])

4) Аналіз сил розтягу:

Загальна сила розтягу для групи анкерів, $N_{Ed} = 34 \text{ кН}$ рівномірно розподіляється між усіма анкерами (рис. 6.27).



Анкер	Сила [кН]	Тип
1	8.5	Розтяг
2	8.5	Розтяг
3	8.5	Розтяг
4	8.5	Розтяг

Рис. 6.27 — Аналіз сил у анкерах

5) Характеристики запропонованого анкера. Обране рішення наведено в таблиці 6.13.

Таблиця 6.13 — Характеристики анкера

Тип анкера	Механічний	
Модель анкера	HUS4-H	
Діаметр анкера	d	10 мм
Ефективна глибина анкерування	h_{ef}	68 мм
Номінальна глибина анкерування	h_{nom}	90 мм



Розрахункові перевірки виконуються з урахуванням жорсткої опорної пластини відповідно до EC2-4 [1], а характеристичні опори взято з ETA-20/0867 [37]. Деталі щодо розрахунку опорів за окремими видами руйнування див. у розділі 6.6.

Перевірка на види руйнування від сили розтягу:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі для найбільш навантаженого анкера:

$$N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{M,s}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,s} = 55 \text{ кН} \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,s} = \left(\frac{55}{1.4} \right) = 36.7 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 8.5 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Виривання анкера з бетону:

Опір вириванню розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,p} = \frac{\psi_c \cdot N_{Rk,p}}{\gamma_{M,p}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$\psi_c = 1.0 \quad \text{influence of concrete strength for C20/25, ETA-20/0867, Табл. C1}$$

$$N_{Rk,p} \geq N_{Rk,c}^0 = 15.8 \text{ кН} \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1}$$

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{20} \cdot 68^{1.5} = 19.3 \text{ кН} \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1 і EC2-4, рівн. (7.2)}$$

$$\gamma_{M,p} = 1.5 \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,p} = \left(\frac{1.0 \cdot 19.3}{1.5} \right) = 12.9 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 8.5 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за формулою:

$$N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{20} \cdot 68^{1.5} = 19.3 \text{ кН} \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1 і EC2-4, рівн. (7.2)}$$

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = (3 \cdot 68) = 204 \text{ мм}, c_{cr,N} = 102 \text{ мм} \quad \text{EC2-4, розд. 7.2.1.4 (3)}$$

$$A_{c,N} = 111,556 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, Рис. 7.4}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (204 \cdot 204) = 41,616 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

$\psi_{re,N} = 1.0$ — поверхневе армування з кроком 200 мм

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}} \right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

Ексцентриситет уздовж осей X і Y: $e_{c,N} = 0$ мм отже $\psi_{ec,N} = 1.0$

$$\text{Коефіцієнт для згинального моменту: } \psi_{M,N} = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.7)}$$

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 19.3 \cdot \left(\frac{111,556}{41,616} \right) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 51.7 \text{ кН}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$N_{Rd,c} = \left(\frac{51.7}{1.5} \right) = 34.5 \text{ кН} > N_{Ed} = 34 \text{ кН}$$

Перевірку виконано

Розколювання бетону:

Згідно з EC2-4 [1], розд. 7.2.1.7 (2) b) 2), руйнування від розколювання бетону запобігається армуванням у бетоні, якщо ширина тріщин обмежена значенням $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Перевірка на використання:

Руйнування сталі:

EC2-4, Табл. 7.3

$$\text{Співвідношення між діючим зусиллям і опором: } \beta_N = \left(\frac{8.5}{36.7} \right) = 0.24 \leq 1 \quad \text{Перевірку виконано }$$

Руйнування, відмінне від сталевго:

EC2-4, Табл. 7.3

$$\text{Співвідношення між діючим зусиллям і опором: } \beta_N = \left(\frac{34}{34.5} \right) = 0.99 \leq 1 \quad \text{Перевірку виконано }$$

Унаслідок оновлення конструкції елементів зусилля розтягу збільшилося на 15 %, і переглянуте розрахункове зусилля становить $N_{Ed} = 39 \text{ кН}$. Наявні гвинтові анкери HUS4-N більше не можуть бути використані, оскільки коефіцієнт використання перевищує 100 %. Анкери було демонтовано, і встановлено вимогу замінити їх рішенням з вищими показниками ефективності та можливістю повторного застосування. Розрахунок виконано для гібридної системи гвинтового анкера (табл. 6.14).

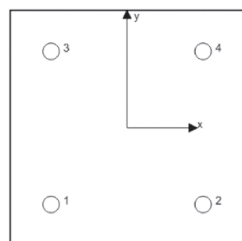
Таблиця 6.14 — Характеристики анкера

Тип анкера	Гібридний	
Специфікація анкера	HUS4-MAX капсула	
Діаметр анкера	d	10 мм
Ефективна глибина анкерування	$h_{ef} = h_{nom}$	85 мм



Примітка: Для застосувань з підсиленням конструкцій використовується німецьке національне схвалення Z-21.8-2137 [38].

Загальне зусилля розтягу для групи анкерів $N_{Ed} = 39 \text{ кН}$ — рівномірно розподілене між усіма анкерами (рис. 6.28).



Анкер	Зусилля [кН]	Тип
1	9.75	Розтяг
2	9.75	Розтяг
3	9.75	Розтяг
4	9.75	Розтяг

Рис. 6.28 — Аналіз зусиль у анкерах

Перевірка виконана згідно з вимогами EC2-4 [1], EOTA TR 075 [35], а розрахункові опори взято з ETA-18/1160 [39]. Деталі розрахунку опору для різних видів руйнування наведено в розділі 6.6.

Перевірка руйнування при дії зусилля розтягу:

Руйнування сталі:

Опір сталі перевіряється для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{M,s}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,s} = 55 \text{ кН} \quad \text{ETA-18/1160, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,s} = \left(\frac{55}{1.5}\right) = 36.7 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 9.75 \text{ кН} \quad \text{Перевірка виконана} \quad \checkmark$$

Комбіноване виривання й виколювання бетонного конуса

Опір комбінованого виривання й виколювання бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за формулами:

$$N_{Rd,p} = \frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{M,p}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,p,CS,cr}^0 = 19.3 \text{ кН} \quad \text{ETA-18/1160, Табл. C1}$$

$$\psi_{sus} = 1.0$$

$$N_{Rk,p,B,cr}^0 = 4.5 \text{ кН} \quad \text{ETA-18/1160, Табл. C1}$$

$$N_{Rk,c} = k_3 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{20} \cdot 85^{1.5} = 26.9 \text{ кН} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (21)}$$

$$s_{cr,Np} = 4.1 \cdot \left(\psi_{sus} \cdot \frac{d}{h_{ef}} \cdot (N_{Rk,p,CS,ucr,c20/25}^0 + N_{Rk,p,B,ucr,c20/25}^0) \right)^{0.5}$$

$$s_{cr,Np} = 4.1 \cdot \left(1.0 \cdot \frac{10}{85} \cdot (27.6 + 10.4) \right)^{0.5} \leq 3 \cdot h_{ef} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (8)}$$

$$s_{cr,Np} = 255 \text{ мм}, c_{cr,Np} = 127.5 \text{ мм}$$

$$A_{p,N} = 148,225 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рис. 7.4}$$

$$A_{p,N}^0 = s_{cr,Np} \cdot s_{cr,Np} = (255 \cdot 255) = 65,025 \text{ мм}^2; \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$\psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - \sqrt{(n-1)} \cdot \left(\frac{N_{Rk,p,B,ucr/cr}^0}{N_{Rk,c}} \right)^{1.5} \geq 1.0, \psi_{g,Np}^0 = 1.93 \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (20)}$$

$$\psi_{g,Np} = \psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0.5} \cdot (\psi_{g,Np}^0 - 1) \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (19)}$$

$$\psi_{g,Np} = 1.26$$

$$\psi_{s,Np} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

$$\psi_{re,Np} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0, \psi_{re,Np} = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

$$\psi_{ec,Np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}} \right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

Ексцентриситет уздовж осей X та Y: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$, $\psi_{ec,N} = 1.0$

Коефіцієнт для згинального моменту: $\psi_{M,N} = 1.0$

$$N_{Rk,p,B,ucr/cr} = N_{Rk,p,B}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,Np} \cdot \psi_{ec,Np} = 4.5 \cdot \left(\frac{148,225}{65,025} \right) \cdot 1.26 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 13 \text{ кН}$$

$$N_{Rk,p,CS,cr} = n \cdot N_{Rk,p,CS,cr}^0 \cdot \psi_{ec,Np,CS} = 4 \cdot 19.3 \cdot 1.0 = 77.3 \text{ кН} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (15)}$$

$$\varphi_{b,ucr/cr} = N_{Rk,p,B,ucr}^0 / (N_{Rk,p,CS,ucr}^0 + N_{Rk,p,B,ucr}^0) = 4.5 / (19.3 + 4.5) = 0.19 \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (14)}$$

$$\alpha_b = 1 - (1 - \varphi_{b,cr}) \cdot (s_{cr,Np} - s) / s_{cr,Np} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (13)}$$

$$\alpha_b = 1 - (1 - 0.19) \cdot (255 - 130) / 255 = 0.6$$

$$N_{Rk,p,ucr/cr} = N_{Rk,p,CS,ucr/cr} + \alpha_b \cdot N_{Rk,p,B,ucr/cr} = 77.3 + 0.6 \cdot 13.0 = 85.5 \text{ kN} \quad \text{EOTA TR 075, рівн. (12)}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$N_{Rd,c} = \left(\frac{85.1}{1.5} \right) = 57 \text{ kN} > N_{Ed} = 39 \text{ kN}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за формулою:

$$N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{20} \cdot 85^{1.5} = 26.9 \text{ кН} \quad \text{ETA-20/0867, Табл. C1 і EC2-4, рівн. (7.2)}$$

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = (3 \cdot 85) = 255 \text{ мм}, c_{cr,N} = 127.5 \text{ мм} \quad \text{EC2-4, розд. 7.2.1.4 (3)}$$

$$A_{c,N} = 148,225 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, Рис. 7.4}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (255 \cdot 255) = 65,025 \text{ мм}^2; \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

 $\psi_{re,N} = 1.0$, поверхнєве армування зі кроком 200 мм.

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}} \right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

Ексцентриситет уздовж осей X і Y становить $e_{c,N} = 0$ мм, $\psi_{ec,N} = 1.0$ Коефіцієнт для згинального моменту $\psi_{M,N} = 1.0$

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 26.9 \cdot \left(\frac{148,225}{65,025} \right) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 61.3 \text{ кН}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$N_{Rd,c} = \left(\frac{61.3}{1.5} \right) = 41 \text{ кН} > N_{Ed} = 39 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування при розколюванні бетону:Відповідно до вимог EC2-4 [1], розд. 7.2.1.7 (2) b) 2), руйнування при розколюванні компенсується наявністю армування в бетоні, при цьому ширина тріщин обмежена умовою $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.Перевірка коефіцієнта використання:

Руйнування сталі:

EC2-4, Табл. 7.3

Відношення між діючим навантаженням і опором при розтягу

$$\beta_N = \left(\frac{9.75}{36.7} \right) = 0.27 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування, відмінне від сталевих:

EC2-4, Табл. 7.3

Відношення між діючим навантаженням і опором при розтягу

$$\beta_N = \left(\frac{39}{41} \right) = 0.95 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

6.9.2 Розрахунок при статичному навантаженні з додатковим армуванням

Вимога проєкту: Профіль IPBi 140 / HEA 140 A закріплено до бетонної балки за допомогою сталеві опірної пластини. З'єднання виконується із застосуванням механічних анкерів (рис. 6.29).

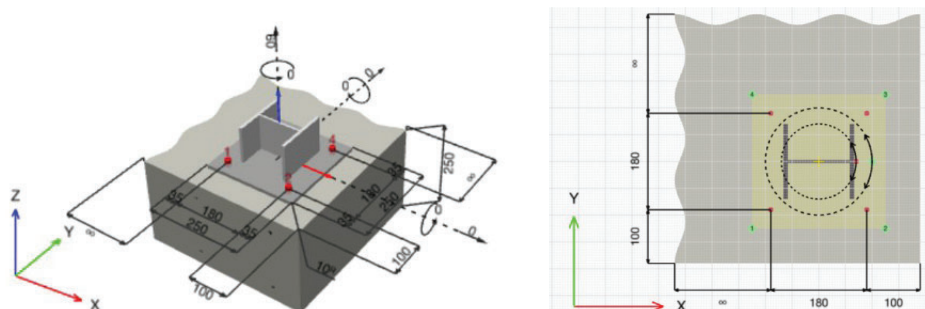


Рис. 6.29 — З'єднання опорної пластини з використанням пост-встановлених механічних анкерів

Основні дані проєкту:

Геометрія бетону:	Висота балки, $h = 250 \text{ мм}$
Geometry of baseplate:	Розмір пластини, $l \times w = 250 \times 250 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 20 \text{ мм}$
Materials:	Бетон звичайної щільності C25/30, з тріщинами
	Арматура $f_{yk} = 500 \text{ Н/мм}^2$
	Поверхнєве армування з кроком 100 мм і діаметром $\varnothing 12$
Навантаження:	Зусилля розтягу, $N_{Ed} = 60 \text{ кН}$
Сталевий профіль:	IPBi 140 / HEA 140 A
Розрахунковий строк служби:	50 років

Деталі пост-встановлених анкерів:

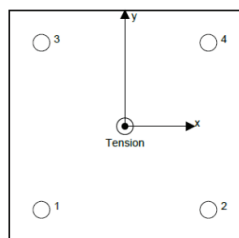
Тип анкера:	Механічний
Кількість анкерів:	4
Крок між анкерами за X:	180 мм
Крок між анкерами за Y:	180 мм
Відстань до кромки вздовж X:	100 мм
Відстань до кромки вздовж Y:	100 мм

Умови встановлення пост-встановлених анкерів:

Спосіб/орієнтація свердління:	ударно-обертальне перфоратором / горизонтально, «сухе»
Темп. монтажу/експлуатації:	24 °C (довгострокова) / 40 °C (короткострокова)
Розрахунковий строк служби:	50 років
Корозійна стійкість:	Експлуатація в умовах морського корозійного середовища
Вибір системи/рішення:	металевий розпірний анкер Hilti HST4-R (ETA-21/0878 [36])

1) Аналіз зусиль розтягу:

Загальне зусилля розтягу для групи анкерів $N_{Ed} = 60 \text{ кН}$ рівномірно розподіляється між усіма анкерами (рис. 6.30).



Анкер	Зусилля [кН]	Тип
1	15	Розтяг
2	15	Розтяг
3	15	Розтяг
4	15	Розтяг

Рис. 6.30 — Аналіз зусиль у анкерах

2) Деталі запропонованого анкера: Запропоноване рішення наведено в таблиці 6.15.

Таблиця 6.15 — Характеристики анкера

Тип анкера	Механічний	
Специфікація анкера	HST4-R	
Діаметр анкера	d	16 мм
Ефективна глибина анкерування	h_{ef}	155 мм
Номінальна глибина анкерування	h_{nom}	168 мм



Розрахункові перевірки виконано з урахуванням жорсткої опорної пластини згідно з вимогами EC2-4 [1]. Характеристичні значення опорів прийнято за даними ETA-21/0878 [36]. Детальні розрахунки опору для кожного виду можливого руйнування наведено в розділі 6.7.

Перевірка руйнування при дії зусилля розтягу:

Руйнування сталі:

Опір сталі визначається для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,s} = \frac{N_{Rk,s}}{\gamma_{M,s}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1}$$

$$N_{Rk,s} = 75 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,s} = \left(\frac{75}{1.4} \right) = 53.6 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 15 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування від виривання

Опір вириванню анкера визначається для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,p} = \frac{\psi_c \cdot N_{Rk,p}}{\gamma_{M,p}} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.1)}$$

$$\psi_c = 1.118 \quad \text{influence of concrete strength for C25/30, ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rk,p} = 38 \text{ кН} \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$\gamma_{M,p} = 1.5 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C1}$$

$$N_{Rd,p} = \left(\frac{1.118 \cdot 38}{1.5} \right) = 28.3 \text{ кН} > N_{Ed}^h = 15 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за наступною формулою:

$$N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}$$

EC2-4, Табл. 7.1

ETA-21/0878, Табл. C1 і EC2-4, рівн. (7.2)

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 8.9 \cdot \sqrt{25} \cdot 155^{1.5} = 85.9 \text{ кН}$$

EC2-4, Розд. 7.2.1.4 (3)

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = (3 \cdot 155) = 465 \text{ мм}, c_{cr,N} = 232.5 \text{ мм}$$

EC2-4, Рис. 7.4

$$A_{c,N} = (100 + 180 + 232.5) \cdot (100 + 180 + 232.5) = 262,656 \text{ мм}^2$$

EC2-4, рівн. (7.3)

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (465 \cdot 465) = 216,225 \text{ мм}^2$$

EC2-4, рівн. (7.4)

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{100}{232.5}\right) = 0.83 \leq 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.5)

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{155}{200} = 1.275 > 1.0$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}}\right)}$$

EC2-4, рівн. (7.6)

Ексцентриситет уздовж осі X: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$ $\psi_{ec,N} = 1.0$ Ексцентриситет уздовж осі Y $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$ $\psi_{ec,N} = 1.0$ Коефіцієнт для згинального моменту: $\psi_{M,N} = 1.0$

EC2-4, рівн. (7.7)

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 85.9 \cdot \left(\frac{262,656}{216,225}\right) \cdot 0.83 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 86.6 \text{ кН}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$N_{Rd,c} = \left(\frac{86.6}{1.5}\right) = 57.7 \text{ кН} < N_{Ed} = 60 \text{ кН}$$

Перевірку не виконано ❌

Розколювання бетону:

Відповідно до критеріїв EC2-4 [1], розд. 7.2.1.7 (2) b) 2), руйнування при розколюванні обмежується наявним армуванням у бетоні за умови обмеження ширини тріщин $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Для забезпечення опору виколуванню бетонного конуса враховується наявне додаткове армування на розтяг; схема наведена на рис. 6.31.

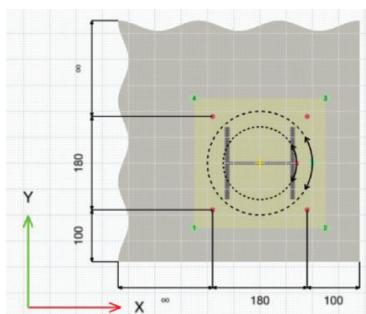
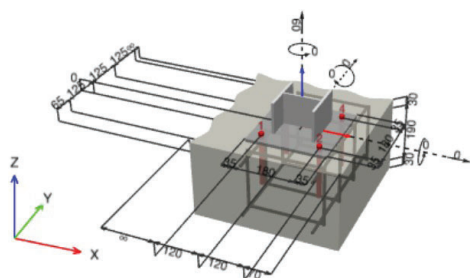


Рис. 6.31 — Додаткове армування в бетонній основі

Застосовано додаткове армування діаметром 10 мм у вигляді замкнених стрімен із кроком 125 мм. Діаметр поверхневого армування також 10 мм. З урахуванням моделі «розпирка-тяга» згідно з EC2-4 [1], розд. 7.2.1.2 і 7.2.1.9, зусилля в кожному елементі наведено в табл. 6.16 відповідно до моделі на рис. 6.32.

Таблиця 6.16 — Зусилля в додатковому армуванні

Арматура	Тип	Напрямок	Зусилля розтягу (кН)
Поверхнєве армування	Пряма арматура	Горизонтальна	3.0
0	Закритий хомут	Вертикальна 1 (0-V1)	10.8
		Вертикальна 2 (0-V2)	10.8
		Горизонтальна (0-H)	4.3
1	Закритий хомут	Вертикальна 1 (1-V1)	8.4
		Вертикальна 2 (1-V2)	8.4
		Горизонтальна (1-H)	4.0
2	Закритий хомут	Вертикальна 1 (2-V1)	10.8
		Вертикальна 2 (2-V2)	10.8
		Горизонтальна (2-H)	4.3

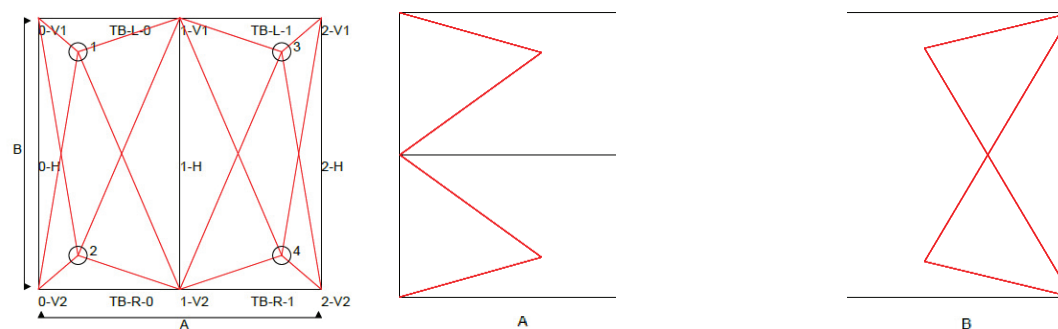


Рис. 6.32 — Модель «розпівка-тяга»

Руйнування сталі поздовжньої арматури:

Опір сталі поздовжньої арматури визначається за формулою:

$$N_{Rd,re} = \frac{N_{Rk,re}}{\gamma_{Ms,re}}$$

$$\gamma_{Ms,re} = 1.15$$

$$N_{Rk,re} = A_{s,re} \cdot f_{s,re}, A_{s,re} = 79 \text{ мм}^2 \text{ і } f_{s,re} = 500 \text{ МПа}, N_{Rk,re} = 79 \cdot 500 = 39.5 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,re} = \left(\frac{39.5}{1.15} \right) = 34.4 \text{ кН} > N_{Ed,re} = 3 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування сталі додаткового армування (горизонтальне):

$$N_{Rd,re} = \frac{N_{Rk,re}}{\gamma_{Ms,te}}$$

$$\gamma_{Ms,te} = 1.15$$

$$N_{Rk,re} = A_{s,re} \cdot f_{s,re}, A_{s,re} = 79 \text{ мм}^2 \text{ і } f_{s,re} = 500 \text{ МПа}, N_{Rk,re} = 79 \cdot 500 = 39.5 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,re} = \left(\frac{39.5}{1.15} \right) = 34.4 \text{ кН} > N_{Ed,re} = 4 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування сталі додаткового армування (вертикальне):

$$N_{Rd,re} = \frac{N_{Rk,re}}{\gamma_{Ms,te}}$$

$$\gamma_{Ms,te} = 1.15$$

Примітка: Для зсувних навантажень передбачено додаткове зсувне армування. Див. розділ 7 — Hilti PROFIS Engineering.

$$N_{Rk,re} = A_{s,re} \cdot f_{s,re}, A_{s,re} = 79 \text{ мм}^2 \text{ і } f_{s,re} = 500 \text{ МПа}, N_{Rk,re} = 79 \cdot 500 = 39.5 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,re} = \left(\frac{39.5}{1.15} \right) = 34.4 \text{ кН} > N_{Ed,re} = 8.4 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Вертикальне анкерування арматури всередині конуса руйнування

$$N_{Rd,a} = \frac{l_1 \cdot \pi \cdot d_{s,re} \cdot f_{bd}}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}, l_1 = 70 \text{ мм}, d_{s,re} = 10 \text{ мм}, f_{bd} = 2.69 \text{ МПа}$$

$$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 1.0$$

EC2-1, Розд. 8.4.2 і 8.4.4

$$N_{Rd,a} = \left(\frac{70 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 2.69}{0.7 \cdot 1.0} \right) = 8.5 \text{ кН} > N_{Ed,re} = 8.4 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

6.10 Розрахунок при сейсмічних діях згідно з EC2-4

Як зазначено в розділі 3.7, робота пост-встановлених анкерів чутлива до умов, характерних для сейсмічних подій — таких як циклічне навантаження та значне розкриття тріщин, тому проектування анкерів у сейсмонезбезпечних зонах повинно враховувати ці фактори. **Сейсмічні події** — це природні явища, що можуть виникати з різною імовірністю (ризиком) у певних географічних регіонах (рис. 6.33). **Сейсмічна небезпека** (рис. 6.33) є функцією **сейсмічного ризику**, який залежить від прискорення ґрунту під час землетрусів, тоді як **вразливість** конструкції визначається її типом і класом важливості. **Сейсмічні категорії** застосовуються для оцінки потенційної небезпеки конструкцій і визначають вимоги до проектування з метою забезпечення їхньої сейсмостійкості. Сейсмічну працездатність анкерів поділено на дві категорії — C1 і C2, де C1 відповідає загалом нижчому рівню небезпеки, а C2 характеризує підвищений рівень сейсмічного ризику.

- **Категорія працездатності C1** визначає несучу здатність анкерів лише за опором на граничному стані міцності (максимально допустиме розкриття тріщи $\Delta w = 0.5 \text{ мм}$).
- **Категорія працездатності C2** визначає несучу здатність з урахуванням опорів як на стані міцності, так і на граничному стані пошкоджень (максимально допустиме розкриття тріщин $\Delta w = 0.8 \text{ мм}$).

Вимоги для категорії C2 є суворішими. Рекомендована категорія сейсмічної працездатності визначається згідно з EC2-4 [1] та відповідними національними нормами.

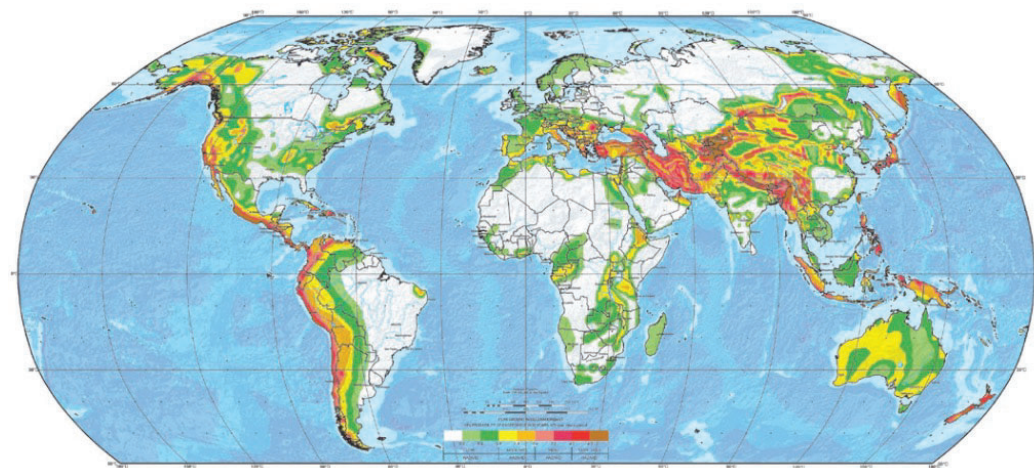


Рис. 6.33 — Карта сейсмічної небезпеки (джерело: The Global Seismic Hazard Assessment Program, GSHAP).

У всіх випадках анкери не допускається встановлювати в ділянках бетонних елементів, де очікується пластичне деформування перерізу (наприклад, у зонах пластичних шарнірів, див. рис. 6.34), оскільки ширина тріщин у цих місцях, ймовірно, перевищить граничне значення $\Delta w = 0.8 \text{ мм}$, для якого анкери проходили оцінювання.

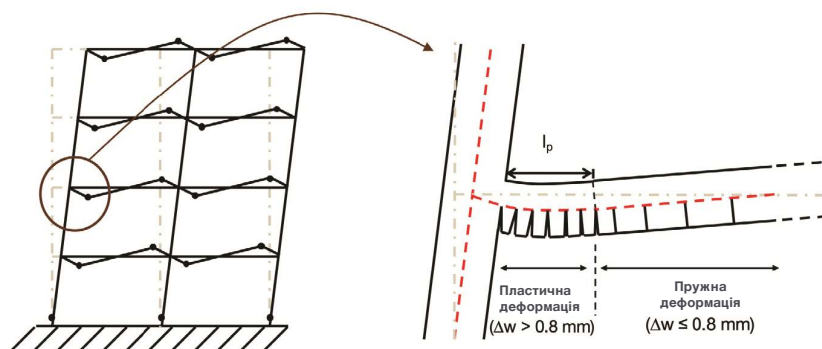


Рис. 6.34 — Приклад пластичних і пружних зон у залізобетонних елементах ([4])

6.10.1 Визначення сейсмічних дій

Розрахункове значення сейсмічних дій визначається відповідно до EC8-1 [40] та EC2-4 [1], додаток С, з урахуванням усіх можливих ефектів вертикальних і горизонтальних коливань ґрунту як для конструкційних, так і для неконструкційних з'єднань.

Примітка. Кріплення з відступом або із шаром розчину завтовшки $\geq 0,5d$ не підпадають під дію EC2-4 при розрахунках на сейсмічні дії.

6.10.1.1 Вертикальні сейсмічні дії

Розрахункове сейсмічне навантаження для опорних пластин **конструктивних типу (тип А)** визначається згідно з EC8-1 [40]. EC2-4 [1] також охоплює розрахунок сейсмічного навантаження для **неконструктивних застосувань (тип В)**. Для з'єднань типу А вертикальний вплив сейсмічних коливань ґрунту враховується, якщо розрахункове вертикальне прискорення ґрунту, $\alpha_{vg} > 2.5 \text{ ms}^{-2}$. Типова схема наведена на рис. 6.35 і показує вертикальний вплив сейсмічних дій для з'єднань типу В, зокрема в тих випадках, коли вертикальне навантаження передається через безпосередню опору елемента на конструкцію.

Для з'єднання, показаного в точці 1, слід враховувати вертикальний вплив сейсмічних дій, тоді як для з'єднання 2 цей вплив можна не враховувати, якщо $\alpha_{vg} < 2.5 \text{ m/s}^2$.

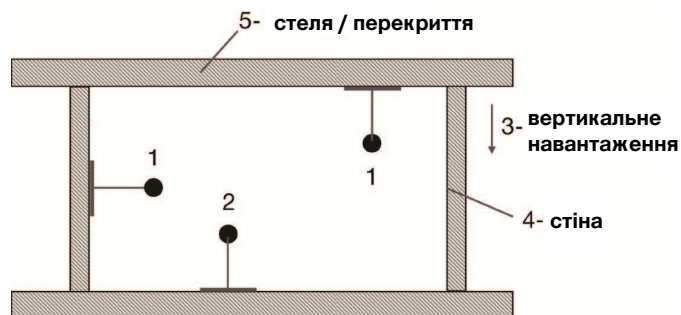


Рис. 6.35 — Модель, що показує вертикальний вплив сейсмічної дії

Горизонтальний вплив сейсмічної дії може бути розрахований відповідно до вимог, наведених у EC8-1 [40], із урахуванням коефіцієнта поведінки q_d .

6.10.1.2 Горизонтальні сейсмічні дії

Горизонтальну складову сейсмічної дії для з'єднань типу В слід враховувати, якщо виконується умова, наведена в розділі 4.3.5.1 (3) EC8-1 [40]. Горизонтальний вплив визначається відповідно до вимог EC8-1 [40] із застосуванням коефіцієнта поведінки q_a як показано в таблиці 6.17.

Сейсмічний ефект визначається через горизонтальну силу F_a (див. рівняння (4.25) EC8-1 [40]) із модифікацією коефіцієнта S_a .

EC2-4, рівн. (C.3)

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[\left(1 + \frac{z}{H} \right) \cdot A_a - 0.5 \right] \geq \alpha \cdot S$$

EC2-4, рівн. (C.4)

$$A_a = \frac{3}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right)^2}$$

α_g — розрахункове прискорення ґрунту для типу А (див. EC8-1 [40], розд. 3.2.1);

S — ґрунтовий коефіцієнт (EC8-1 [40], розд. 3.2.2);

T_a — власний період коливань для з'єднань типу В;

T_1 — власний період коливань будівлі у відповідному напрямку;

z — висота елемента типу В над рівнем прикладання сейсмічної дії;

H — загальна висота будівлі (від фундаменту або жорсткого підвалу).

Значення параметра A_a може бути розраховане за наведеним рівнянням. Якщо один із власних періодів коливань невідомий, можна використовувати орієнтовні значення з таблиці 6.17.

Вертикальний вплив сейсмічної дії розраховується шляхом прикладання вертикальної сили F_{va} визначеної за наступним рівнянням:

$$F_{va} = S_{va} \cdot W_a \cdot \gamma_a / q_a$$

EC2-4, рівн. (C.5)

$$S_{va} = \alpha_v \cdot A_a$$

EC2-4, рівн. (C.6)

Примітка. Стандарт EC2-4 вводить параметр A_a для спрощення розрахунків за EC8-1, оскільки власний період коливань приєднаного елемента часто є невідомим.

Таблиця 6.17 — Коефіцієнти для неконструктивних елементів згідно з EC2-4 [1]

#	Тип неконструктивного елемента	q_a	A_a
1	Консольні парапети або декоративні елементи	1.0	3.0
2	Вивіски та рекламні щити		3.0
3	Димарі, щогли та резервуари на опорах, що працюють як незакріплені консолі на більш ніж половині своєї висоти		3.0
4	Сховища небезпечних матеріалів, трубопроводи з небезпечними рідинами	2.0	3.0
5	Зовнішні та внутрішні стіни		1.5
6	Перегородки та фасади		1.5
7	Димарі, щогли та резервуари на опорах, що працюють як незакріплені консолі на менш ніж половині своєї висоти або закріплені/розтяжками при центрі мас		1.5
8	Ліфти		1.5
9	Підлоги з технічним простором, електричне та комунікаційне обладнання		3.0
10	Конвеєри		3.0
11	Елементи анкерування постійних шаф і стелажів, установлених на підлозі		1.5
12	Елементи анкерування підвісних (фальш-) стель і світильників		1.5
13	Трубопроводи високого тиску, системи пожежогасіння		3.0
14	Трубопроводи для неагресивних рідин		3.0
15	Комп'ютерні, комунікаційні системи та стелажі для зберігання		3.0

6.10.2 Визначення сейсмічного опору анкерів

Таблиця 6.18 містить рекомендацію EC2-4 [1] щодо застосування анкерів, оцінених за категоріями сейсмічної працездатності C1 та C2, залежно від рівня сейсмічності та класу важливості будівлі/споруди згідно з EC8-1 [40].

Таблиця 6.18 — Відповідність між сейсмічними категоріями, рівнями сейсмічності та класами важливості будівель/споруд згідно з EC8-1 [40]

Рівень сейсмічності			Клас важливості згідно з EC8-1, розд. 4.2.5			
1	Клас	$\alpha_g \cdot S^c$	I	II	III	IV
2	Дуже низький	$\alpha_g \cdot S \leq 0.05g$	Не вимагається категорія сейсмічної працездатності			
3	Низький	$0.05g \leq \alpha_g \cdot S \leq 0.1g$	C1	C1 ^a or C2 ^b		C2
4	≥ Низький	$\alpha_g \cdot S > 0.1g$	C1	C2		

Примітка. Таблиця 6.18 у національних додатках до EC2-4 може бути змінена.

a= C1 — для з'єднань типу B; b = C2 — для з'єднань типу A
c: α_g — прискорення ґрунту для типу A; S — ґрунтовий коефіцієнт.

Для забезпечення сейсмостійкості можуть застосовуватись різні підходи до проектування:

1) розрахунок за несучою здатністю, 2) пружний розрахунок, 3) розрахунок анкерів із урахуванням пластичних властивостей сталі.

6.10.2.1 Розрахунок за принципом несучої здатності

Цей підхід зосереджується на тому, щоб конструкції були спроєктовані з урахуванням **захисту від крихкого руйнування** окремих елементів або з'єднань під час сейсмічних впливів. Його мета — забезпечити **керований і передбачуваний механізм руйнування**, який дозволяє уникнути неконтрольованого обвалення конструкції. У межах підходу «розрахунок за принципом несучої здатності» анкери — як у конструкційних з'єднаннях (тип A), так і в неконструктивних (тип B) — проєктуються на максимальне навантаження. Це навантаження відповідає або формуванню **пластичного механізму** текучості в приєднаному сталевому елементі (рис. 6.36 а), або в сталевій опорній пластині (рис. 6.36 б) з урахуванням зміцнення матеріалу при деформації та ефекту перевищення розрахункової міцності, або ж визначається несучою здатністю жорсткого елемента чи конструктивної частини (рис. 6.36 с)).

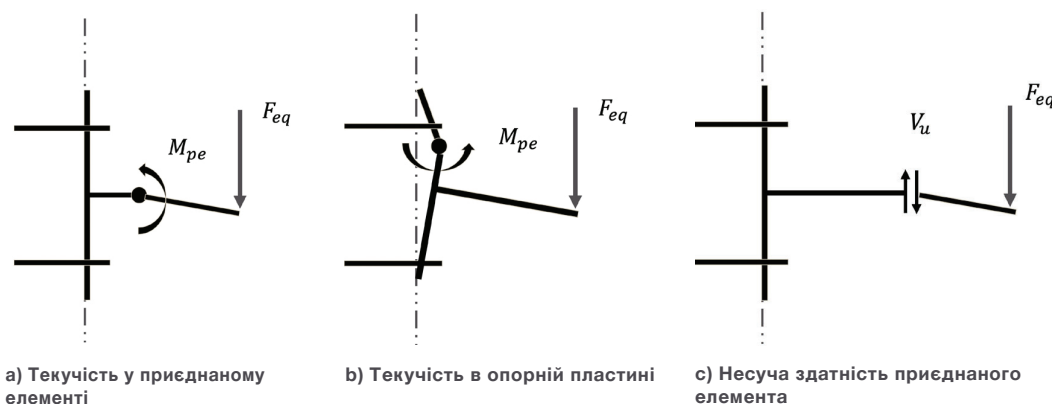


Рис. 6.36 — Сейсмічне проєктування шляхом «захисту кріплення»

Примітка. Підхід простий у застосуванні, однак анкери зазнають найбільших навантажень. Для формування необхідного пластичного механізму може знадобитися спеціальне деталювання приєднаного елемента.

6.10.2.2 Розрахунок за пружною моделлю

Цей підхід зосереджується на проектуванні конструкцій таким чином, щоб вони залишалися в межах пружного стану під час сейсмічної дії. Мета полягає в тому, щоб забезпечити **стійкість конструкцій до сейсмічного впливу без значних пошкоджень або руйнування**. Підхід базується на аналізі конструкцій із використанням лінійно-пружної моделі поведінки. У межах пружного розрахунку анкерів впливи навантажень для конструкційних з'єднань визначаються відповідно до EC8-1 [40] із коефіцієнтом поведінки $q = 1.0$. Для неконструктивних з'єднань розрахункові дії також приймаються з коефіцієнтом поведінки $q_a = 1.0$. Якщо дії визначаються відповідно до підходу, описаного в розділі 6.10.1, із тим самим коефіцієнтом $q_a = 1.0$, отримані результати слід помножити на коефіцієнт підсилення 1,5. Для більш точного розрахунку це додаткове підсилення можна не застосовувати.

6.10.2.3 Розрахунок із урахуванням пластичності анкерів

Сейсмічні вимоги часто передбачають урахування пластичності анкерів, що підвищує здатність конструкцій поглинати енергію під час землетрусів. **Анкери сприяють запобіганню руйнуванню**, забезпечуючи **керувану деформацію**, яка підвищує загальну сейсмостійкість конструкції. Розрахунок анкерів відповідно до підходу «із вимогами до пластичності кріплення» потребує виконання таких умов:

- Кріплення повинно мати ETA, що підтверджує відповідність категорії працездатності C2.
- Щоб забезпечити руйнування сталі, мають виконуватись такі співвідношення:

$$1) \text{ Для руйнування сталі одного анкера: } R_{ks,eq} \leq 0.7 \cdot (R_{k,conc,eq} / \gamma_{inst})$$

$$2) \text{ Для руйнування сталі двох або більше анкерів: } (R_{ks,eq} / E_d^h) \leq 0.7 \cdot (R_{k,conc,eq} / E_d^h \cdot \gamma_{inst})$$

$R_{ks,eq}$ — характеристичний опір сталі при руйнуванні; $R_{k,conc,eq}$ — характеристичний опір бетону при відповідних видах руйнування.

Для групи з двох або більше анкерів перевірку руйнування при вириванні виконують для найбільш навантаженого анкера відповідно до пункту 1).

- Пластичне (в'язке) кріплення: гранична міцність на розтяг $f_{uk} \leq 800 \text{ MPa}$ 800 МПа, а відношення межі текучості до граничної міцності $f_{yk} / f_{uk} \leq 0.8$.

Примітка. Цей підхід до проектування вимагає вибору таких анкерів, які за заданих граничних умов (наприклад, відстаней до країв і між анкерами) руйнуються внаслідок розриву сталі при розтягуванні.

Розрахунковий опір анкерів під час сейсмічної дії визначається за формулою:

$$R_{d,eq} = R_{k,eq} / \gamma_{m,eq} \quad \text{EC2-4, рівн. (C.7)}$$

Характеристичний сейсмічний опір визначається як: $R_{k,eq}$:

$$R_{k,eq} = \alpha_{gap} \cdot \alpha_{eq} \cdot R_{k,eq}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (C.8)}$$

- Кріплення та фіксуючий елемент у випадку зсувного навантаження, наведені у відповідній ETA
- α_{gap} — коефіцієнт зменшення, наведений у відповідній ETA, який враховує інерційний ефект, спричинений зазором між анкером і сталевим елементом (ефект удару) під час дії зсуву;
- α_{eq} — коефіцієнт, що враховує вплив сейсмічної дії та утворення тріщин, зокрема:
 - а) Формування значних ширин розкриття тріщин;
 - б) Нерівномірну жорсткість анкерів на розтяг у групі через випадковий розподіл тріщин.

Значення наведені в таблиці 6.19 α_{eq} .

Примітка. Кільцевий зазор між анкерами та опорною пластиною призводить до нерівномірного розподілу зусиль зсуву та значного ефекту удару під час сейсмічної дії (див. [58]). Обмеження цих ефектів є особливо важливим у разі динамічних навантажень із великою амплітудою реверсивних дій, зокрема під час землетрусів. Щоб зробити анкери придатними для роботи при реверсивних зсувних навантаженнях, компанія Hilti розробила комплект для заповнення (див. розділ 5.1). Міцність на зсув можна суттєво підвищити, приймаючи коефіцієнт $\alpha_{gap} = 1.0$ у розрахунках.

Примітка. Докладніше про комплект для заповнення Hilti наведено в розділі 5.1.

Таблиця 6.19 — Коефіцієнт зменшення α_{eq} згідно з EC2-4 [1]

Навантаження	Вид руйнування	Одиночний анкер	Група анкерів
Розтяг	Руйнування сталі	1.0	1.0
	Руйнування бетонного конуса; анкер із головкою або анкер із підрізом із коефіцієнтом k_t -як у анкерів із головкою	1.0	0.85
	Руйнування бетонного конуса; інші анкери	0.85	0.75
	Виривання	1.0	0.85
	Комбіноване виривання та руйнування бетону (клеєвий анкер)	1.0	0.85
	Розколювання бетону	1.0	0.85
	Руйнування бетону від відколу	1.0	0.85
Зсув	Руйнування сталі	1.0	0.85
	Виривання бетону при зсуві; анкер із головкою або анкер із підрізом із коефіцієнтом k_t -як у анкерів із головкою	1.0	0.85
	Виривання бетону при зсуві; інші анкери	0.85	0.75
	Руйнування бетонної кромки	1.0	0.85

$R_{k,eq}^0$ — це базовий характеристичний сейсмічний опір для заданого виду руйнування.

Для руйнування сталі та виривання під дією розтягувального або зсувного навантаження значення $R_{k,eq}^0$ беруть із відповідного ETA (тобто $V_{RK,s,eq}$, $N_{RK,s,eq}$, $N_{RK,p,eq}$).

Для комбінованого руйнування бетону та виривання у випадку пост-встановлених анкерів із клеєвим з'єднанням $R_{k,eq}^0$ визначається як для статичного або квазістатичного навантаження (див. розділ 6.6.1), але з використанням характеристичного опору зчеплення $\tau_{RK,eq}$ наведеного у відповідному ETA.

Для всіх інших видів руйнування $R_{k,eq}^0$ визначається як для статичного або квазістатичного навантаження, тобто: для розтягувального навантаження: $N_{RK,c}$, $N_{RK,sp}$, $N_{RK,cp}$, $N_{RK,re}$, $N_{RK,a} = \gamma_c \cdot N_{Rd,a}$, а для зсуву: $V_{RK,c}$, $V_{RK,cp}$, $V_{RK,a} = \gamma_c \cdot V_{Rd,a}$.

Часткові коефіцієнти надійності для розрахунку опору при сейсмічному навантаженні можуть прийматись такими ж, як і для статичного розрахунку (див. розділ 6.6).

Check for combination of tension and shear load:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,eq}} \right)^{k_{15}} + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,eq}} \right)^{k_{15}} \leq 1$$

EC2-4, рівн. (C.9)

- N_{Ed} та V_{Ed} — це розрахункові сейсмічні дії на анкери для відповідних видів руйнування.
- $k_{15} = 1$ для руйнування сталі; $2/3$ — для кріплень із додатковим армуванням, що працюють лише на зусилля розтягу або зсуву; 1 — в усіх інших випадках.

6.10.2.4 Зміщення кріплень під час сейсмічної дії

Переміщення в **граничному стані пошкодження (DLS)** та **граничному стані міцності (ULS)** визначаються в ETA для кожної глибини анкерування та діаметра анкера як для зусиль розтягу, так і для зсуву $\delta_{N,C2,DLS}$, $\delta_{V,C2,DLS}$, $\delta_{N,C2,ULS}$ and $\delta_{V,C2,ULS}$. Переміщення анкера має обмежуватись значеннями $\delta_{N,req,DLS} \leq \delta_{N,C2,DLS}$ під дією зусиль розтягу та $\delta_{V,req,DLS} \leq \delta_{V,C2,DLS}$ під дією зусиль зсуву у стані DLS. Таке обмеження необхідне для забезпечення функціональності й несучої здатності з'єднання залежно від умов застосування. Анкери також повинні бути здатні сприймати очікувані повороти. Поворот з'єднання θ_p можна приймати рівним $\delta_{N,eq} / s_{max}$, де $\delta_{N,eq}$ — переміщення анкера під час сейсмічного навантаження, а s_{max} — відстань між крайнім рядом анкерів і протилежним краєм елемента кріплення. (EC2-4 [1], рівняння (C.10))

Примітка. Комплект для заповнення Hilti дозволяє зменшити переміщення при зсуві в станах DLS і ULS.

Якщо в проєкті передбачається жорстка опора, необхідно перевірити, що граничне переміщення сумісне з розрахунковою поведінкою конструкції. Проєктувальник може вимагати менших значень переміщень або поворотів, ніж наведені в ETA для DLS.

Стандарт EC2-4 [1] дозволяє лінійно зменшувати навантаження для врахування максимальних переміщень у конкретному випадку застосування за такими формулами:

$$N_{Rd,eq,red} = N_{Rd,eq} \cdot \frac{\delta_{N,req,DLS}}{\delta_{N,eq,DLS}} \quad \text{EC2-4, рівн. C.11 a)}$$

$$V_{Rd,eq,red} = V_{Rd,eq} \cdot \frac{\delta_{V,req,DLS}}{\delta_{V,eq,DLS}} \quad \text{EC2-4, рівн. C.11 b)}$$

6.10.3 Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при сейсмічному навантаженні

Вимога проєкту: квадратний профіль із порожниною всередині приєднується до бетонної плити за допомогою сталеві опірної пластини. З'єднання виконується з використанням хімічних анкерів (рис. 6.37).

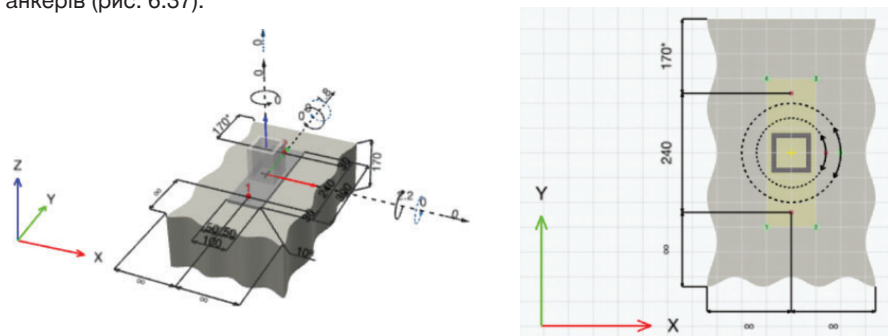


Рис. 6.37 — З'єднання опірної пластини з використанням пост-встановлених хімічних анкерів

Основні дані проєкту:

Геометрія бетону:	Товщина плити, $h = 170 \text{ мм}$
Геометрія опірної пластини:	Розміри плити, $l \times w = 300 \times 100 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 20 \text{ мм}$ бетон
Матеріали:	Нормальної щільності C25/30, тріщинуватий
	Поверхнєве армування з кроком 200 мм
Навантаження:	Згинальний момент, $M_{Ed} = 2.2 \text{ кНм}$

Граничне переміщення	Зсув, $V_{Ed} = 1.8 \text{ кН}$ (без відступу).
Сталевий профіль:	$\delta_{N,req(DLS)} = 1 \text{ мм}$ у розтягу та $\delta_{V,req(DLS)} = 5 \text{ мм}$ у зсуві.
Розрахунковий строк служби:	Квадратний порожнистий 80x80x10 мм
Категорія сейсм. працездатності:	50 років
Тип перевірки на сейсмічні дії:	C2
	Пружний розрахунок

Відомості про пост-встановлені анкери:

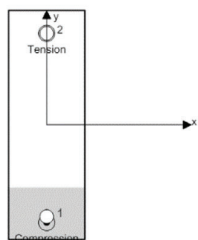
Тип анкера:	Хімічний
Кількість анкерів:	2
Крок між анкерами по осі Y:	240 мм
Відстань до кромки по осі Y:	170 мм

Умови влаштування пост-встановлених анкерів:

Метод/орієнтація свердління:	ударно-обертальне свердління, горизонтально, сухим способом
Темп. під час монтажу/експлуатації:	24 °C (довгострокова) / 40 °C (короткострокова).
Розрахунковий строк служби:	50 років
Обрана система/рішення:	ін'єкційний анкер Hilti HIT-HY 200-A V3 з анкерним стрижнем HAS-U 8.8 (ETA-19/0601 [41]), без набору заповнення Hilti.

1) Аналіз зусиль розтягу та зсуву:

Момент, що діє на групу анкерів, $M_{Ed,eq} = 2.2 \text{ кНм}$ розподіляється між анкерами як розтяг і стиск. Для цього визначають нейтральну вісь і розраховують зусилля в кожному анкері (див. рис. 6.38). Загальне зусилля розтягу в групі: $N_{Ed,eq} = 8.9 \text{ кН}$. Загальне зусилля зсуву: $V_{Ed,eq} = 1.8 \text{ кН}$. Для перевірок на міцність сталі та на виривання з бетону зусилля зсуву рівномірно розподіляється між двома анкерами; для перевірки руйнування бетонної кромки по зсуву все зусилля сприймає передній анкер.



Анкер	Зусилля [кН]	Тип
1	0	Стиск
2	8.9	Розтяг

Рис. 6.38. Аналіз зусиль в анкерах

2) Відомості про запропонований анкер: Запропоноване рішення наведено в табл. 6.20.

Таблиця 6.20 — Властивості анкера для сейсмічних розрахунків

Тип анкера	Хімічний	
Специфікація анкера	HIT-HY 200-A V3 + HAS U 8.8	
Діаметр анкера	d	16 мм
Ефективна глибина анкерування	h_{ef}	100 мм



Розрахункові перевірки виконано з урахуванням жорсткої опорної пластини відповідно до EC2-4 [1]; характеристичні опори взято з ETA-19/0601 [41]. Детальні розрахунки опорів для різних видів руйнування наведено в розділі 6.10.

Перевірка несучої здатності при зусиллях розтягу:Руйнування сталі:

Опір анкера до руйнування сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,s,eq} = \frac{N_{Rk,s,eq}}{\gamma_{M,s,eq}} \quad \text{EC2-4, рівн. (C.7) Додаток С, Розд. С.5}$$

$$N_{Rk,s,eq}^0 = A_s \cdot f_{uk} = 157 \cdot 800 = 125.6 \text{ кН} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. С23}$$

$$N_{Rk,s,eq} = \alpha_{eq} \cdot N_{Rk,s,eq}^0 = 1.0 \cdot 125.6 = 125.6 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, рівн. (C.8) і Табл. С.3}$$

$$\gamma_{M,s,eq} = 1.5 \quad \text{ETA-19/0601, Табл. С1}$$

$$N_{Rd,s,eq} = \left(\frac{125.6}{1.5} \right) = 83.7 \text{ кН} > N_{Ed,eq}^h = 8.9 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \checkmark$$

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса перевіряють для всієї групи анкерів за такою формулою:

$$N_{Rd,c,eq} = \frac{N_{Rk,c,eq}}{\gamma_{M,c,eq}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1, Додаток-С, розд. С.5}$$

$$N_{Rk,c,eq}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{25} \cdot 100^{1.5} = 38.5 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.2)}$$

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = (3 \cdot 100) = 300 \text{ мм}, c_{cr,N} = 150 \text{ мм} \quad \text{EC2-4, Розд. 7.2.1.4 (3)}$$

$$A_{c,N} = (150 + 150) \cdot (150 + 150) = 90,000 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, Рис. 7.4}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (300 \cdot 300) = 90,000 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.4)}$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.5)}$$

$$\psi_{re,N} = 1.0, \text{ поверхнєве армування з кроком } 200 \text{ мм}$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}} \right)} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.6)}$$

Ексцентриситет вздовж осі X: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$, отже $\psi_{ec,N} = 1.0$

Ексцентриситет вздовж осі Y: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$, отже $\psi_{ec,N} = 1.0$

Коефіцієнт впливу згинального моменту: $\psi_{M,N} = 1.0$ EC2-4, рівн. (7.7)

Коеф. зниження: $\alpha_{eq} = 0.85$ для одинарного анкера. EC2-4, Табл. С3

$$N_{Rk,c,eq} = \alpha_{eq} \cdot N_{Rk,c,eq}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$$

$$N_{Rk,c,eq} = 0.85 \cdot 38.5 \cdot \left(\frac{90,000}{90,000} \right) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 32.7 \text{ кН}, \gamma_{M,c} = 1.5$$

$$N_{Rd,c,eq} = \left(\frac{32.7}{1.5} \right) = 21.8 \text{ кН} > N_{Ed,eq} = 8.9 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \checkmark$$

Комбіноване руйнування бетонного конуса та виривання:

Опір комбінованому руйнуванню бетонного конуса та вириванню визначають відповідно до EC2-4 [1]

$$N_{Rd,p,eq} = \frac{N_{Rk,p,eq}}{\gamma_{M,p,eq}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.1, Додаток-С, Розд. С.5}$$

Характеристичний опір для цього виду руйнування визначається як:

$$N_{Rk,p,eq} = \alpha_{eq} \cdot N_{Rk,p}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,Np} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.13)}$$

$$\tau_{Rk,eq} = 4.6 \text{ МПа} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C23}$$

$$\tau_{Rk,ucr} = 18 \text{ МПа для C20/25} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C1}$$

$$\tau_{Rk,cr} = 9.5 \text{ МПа для C20/25} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C1}$$

$$\psi_{sus} = 1.0 \text{ і } \alpha_{sus} = 0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.14a), ETA-19/0601, Табл. C1}$$

$$s_{cr,Np} = 7.3 \cdot d \cdot (\psi_{sus} \cdot \tau_{Rk})^{0.5} = 7.3 \cdot 16 \cdot (1.0 \cdot 18)^{0.5} = 496 \geq 3 \cdot 100$$

$$s_{cr,Np} = 300 \text{ мм} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.15)}$$

$$c_{cr,Np} = s_{cr,Np} / 2 = (300 / 2) = 150 \text{ мм}$$

$$k_3 = 7.7 \text{ для тріщинуватого бетону} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C1}$$

$$\tau_{Rk} = \frac{k_3}{\pi \cdot d} \cdot \sqrt{(h_{ef} \cdot f_{ck})} = \frac{7.7}{\pi \cdot 16} \cdot \sqrt{(100 \cdot 25)} = 7.66 \text{ МПа} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.19)}$$

$$\psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - \sqrt{(n-1)} \cdot \left(\frac{\tau_{Rk,eq}}{\tau_{Rk,cr}} \right)^{1.5} = \sqrt{1} - \sqrt{(1-1)} \cdot \left(\frac{4.6}{18} \right)^{1.5} \geq 1, \psi_{g,Np}^0 = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.18)}$$

$$\psi_{g,Np} = \psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0.5} \cdot (\psi_{g,Np}^0 - 1) = 1 - \left(\frac{240}{371.7} \right)^{0.5} \cdot (1 - 1) \geq 1, \psi_{g,Np} = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.17)}$$

$$e_{c,N} = 0, \psi_{ec,Np} = \left(\frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{e_{c,N}}{s_{cr,Np}}} \right) = \left(\frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{0}{453}} \right) = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.21)}$$

$$\psi_{s,Np} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c}{c_{cr,Np}} \right) = 1.0 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.20)}$$

$$\psi_{re,N} = 1.0$$

$$A_{p,N}^0 = s_{cr,Np} \cdot s_{cr,Np} = 300 \cdot 300 = 90,000 \text{ мм}^2$$

$$A_{p,N} = A_{p,N}^0 = 90,000 \text{ мм}^2$$

$$N_{Rk,p}^0 = \psi_{sus} \cdot \tau_{Rk,eq} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} = 1 \cdot 4.6 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 100 = 23.1 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.14)}$$

$$\text{Зменшуючий коефіцієнт } \alpha_{eq} = 1.0 \text{ для одного анкера} \quad \text{EC2-4, Табл. C.3}$$

$$N_{Rk,p,eq} = \alpha_{eq} \cdot N_{Rk,p}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,Np}$$

$$N_{Rk,p,eq} = 1.0 \cdot 23.1 \cdot \frac{90,000}{90,000} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 23.1 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,p,eq} = \left(\frac{23.1}{1.5} \right) = 15.4 \text{ кН} > N_{Ed,eq} = 8.9 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Руйнування від розколювання бетону:

Згідно з критеріями EC2-4 [1], п. 7.2.1.7 (2) b) 2), розколювання бетону запобігає армування, яке обмежує ширину тріщин до $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Перевірка при дії зусиль зсуву:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$V_{Rd,s,eq} = \frac{V_{Rk,s,eq}}{\gamma_{Ms,eq}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2 Додаток С, Розд. C.5}$$

$$\gamma_{Ms,eq} = 1.25 \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C2}$$

$$\alpha_{gap} = 0.5 \text{ та } \alpha_{eq} = 0.85 \quad \text{EC2-4, Розд. C.5 і Табл. C.3}$$

$$V_{Rk,s,eq}^0 = 40 \text{ кН} \quad \text{ETA-19/0601, Табл. C24}$$

$$V_{Rk,s,eq} = \alpha_{gap} \cdot \alpha_{eq} \cdot k_7 \cdot V_{Rk,s,eq}^0 = 0.5 \cdot 0.85 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 40 = 17 \text{ кН}$$

$$V_{Rd,s,eq} = \left(\frac{17}{1.25} \right) = 13.6 \text{ кН} > V_{sd1,eq} = 0.9 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Виривання бетону при зсуві:

Опір вириванню бетону розраховується для групи анкерів:

$$V_{Rd,cp,eq} = \frac{V_{Rk,cp,eq}}{\gamma_{Mcp,eq}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2 Додаток С, Розд. С.5}$$

$$\gamma_{Mcp,eq} = 1.5 \quad \text{ETA-19/0601, Табл. С2}$$

$$k_8 = 2 \quad \text{EC2-4, Розд. С.5 і Табл. С.3}$$

$$\alpha_{gap} = 0.5 \text{ і } \alpha_{eq} = 0.75$$

Характеристичний опір одного анкера береться з перевірки на виколювання бетонного конуса:

$$N_{Rk,c}^0 = 38.5 \text{ кН}, \psi_{s,N} = 1.0, \psi_{re,N} = 1.0 \text{ [як для виколювання бетонного конуса]}, \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$A_{c,N} = (150 + 240 + 150) \cdot (150 + 150) = 162,000 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, Рис. 7.4}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (300 \cdot 300) = 90,000 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.3)}$$

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} = 38.5 \cdot \frac{162,000}{90,000} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 38.5 \text{ кН},$$

$$V_{Rk,cp} = 69.3 \cdot 2 = 138.6 \text{ кН}$$

$$V_{Rk,cp,eq} = \alpha_{gap} \cdot \alpha_{eq} \cdot k_8 \cdot N_{Rk,c} = 0.5 \cdot 0.75 \cdot 138.6 = 52 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, Додат. С, Розд. С.5}$$

$$V_{Rd,cp,eq} = \left(\frac{52}{1.5} \right) = 34.7 \text{ кН} > V_{Ed,eq} = 1.8 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано } \checkmark$$

Руйнування бетонної кромки: зсув, спрямований перпендикулярно до кромки Y⁺

Опір бетонної кромки перевіряється для зсуву, спрямованого перпендикулярно до нижньої кромки у напрямку Y⁺ — сила діє на передні анкери.

$$V_{Rd,c,eq} = \frac{V_{Rk,c,eq}}{\gamma_{Mc,eq}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2}$$

$$\gamma_{Mc} = 1.5$$

$$l_f = h_{ef} = 100 \text{ мм}, c_1 = 170 \text{ мм}, k_v = 1.7 \text{ для тріщинуватого бетону}$$

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1} \right)^{0.5} = 0.1 \cdot \left(\frac{100}{170} \right)^{0.5} = 0.077 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.42)}$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1} \right)^{0.2} = 0.1 \cdot \left(\frac{16}{170} \right)^{0.2} = 0.062 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.43)}$$

$$V_{Rk,c}^0 = k_v \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1.5} = 1.7 \cdot 16^{0.077} \cdot 100^{0.062} \cdot \sqrt{25} \cdot 170^{1.5} = 31.1 \text{ кН} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.41)}$$

$$A_{c,V}^0 = 4.5 c_1^2 = 4.5 \cdot 170^2 = 130,050 \text{ мм}^2 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.44)}$$

$$A_{c,V} = 86,700 \text{ мм}^2$$

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c_2}{1.5c_1} \right) \leq 1.0, \psi_{s,V} = 1.0$$

$$\psi_{h,v} = 1.225, \psi_{ec,V} = 1.0, \psi_{\alpha,V} = 1.0$$

$$\alpha_{gap} = 0.5 \text{ і } \alpha_{eq} = 0.85 \quad \text{EC2-4, Розд. С.5 і Табл. С.3}$$

$$V_{Rk,c,eq} = \alpha_{gap} \cdot \alpha_{eq} \cdot V_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{h,v} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{re,V}$$

$$V_{Rk,c,eq} = 0.5 \cdot 0.85 \cdot 31.1 \cdot \frac{86,700}{130,050} \cdot 1.0 \cdot 1.225 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 10.8 \text{ кН}$$

$$V_{Rd,c,eq} = \left(\frac{10.8}{1.5} \right) = 7.2 \text{ кН} > V_{Ed,eq} = 1.8 \text{ кН} \quad \text{Перевірку виконано } \checkmark$$

Перевірка на комбіновану дію розтягу та зсуву:

Руйнування сталі: EC2-4, Табл. 7.3, Додат. С, Розд. С.5

$$\text{Відношення між дією навантаження та опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{8.9}{83.7} \right) = 0.11 \leq 1.0$$

Відношення між дією навантаження та опором при зсуві: $\beta_v = \left(\frac{0.9}{13.6}\right) = 0.07 \leq 1.0$

$$\beta_N^{k_{15}} + \beta_v^{k_{15}} = 0.11^{1.0} + 0.07^{1.0} = 0.18 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування, відмінне від сталевго:

EC2-4, Табл.7.3 Додаток С, Розд. С.5

Відношення між дією навантаження та опором при розтягу: $\beta_N = \left(\frac{8.9}{15.4}\right) = 0.58 \leq 1.0$

Відношення між дією навантаження та опором при зсуві: $\beta_v = \left(\frac{1.8}{7.2}\right) = 0.25 \leq 1.0$

$$\beta_N^{k_{15}} + \beta_v^{k_{15}} = 0.58^{1.0} + 0.25^{1.0} = 0.83 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Примітка: Використання набору заповнення Hilti забезпечує коефіцієнт використання для сталевго руйнування 14 %, а для руйнування, відмінного від сталевго — 71 %.

Далі виконується перевірка розрахунку для іншого комбінованого рішення з пост-встановленим анкером за тих самих граничних умов (див. таблицю 6.21).

Таблиця 6.21 — Властивості анкера для сейсмічних дій (комбінована система)

Тип анкера	Комбінований - механічний і хімічний	
Специфікація анкера	HUS4-MAX	
Діаметр анкера	d	12 мм
Ефективна глибина занурення	h_{ef}	100 мм



Зведені значення коефіцієнтів використання для різних режимів руйнування при дії розтягу та зсуву наведено в таблиці 6.22. Для порівняння також наведено рішення з HIT-HY 200 A-V3 M12 з максимально допустимою ефективною глибиною занурення $h_{ef} = 140$ мм для елемента товщиною 170 мм (див. таблицю 6.22). Як видно, для цього рішення коефіцієнт використання суттєво перевищує 100 %, отже воно неприйнятне.

Таблиця 6.22 — Коефіцієнти використання за різними режимами руйнування

Напрямок дії навантаження	Режим руйнування	Використання [%] – HUS4 MAX d12 $h_{ef} = 100$ мм	Використання [%] – HIT-HY 200 A-V3 M16 $h_{ef} = 100$ мм	Використання [%] – HIT-HY 200 A-V3 M12 $h_{ef} = 140$ мм
Розтяг	Руйнування сталі	17	11	20
	Виколування бетонного конуса	41	41	25
	Комб. виривання та виколування	71	58	92
Зсув	Руйнування сталі	11	7	12
	Виривання бетону	11	6	5
	Руйнування бетонної кромки	27	25	25
Комбінація	Руйнування сталі	28	18	31
	Руйн. відмінне від сталевго	98	83	117

Значення переміщень також перевірено для розрахунку за сейсмічними діями типу C2 та наведено в таблиці 6.23.

Таблиця 6.23 — Переміщення $\delta_{N,eq(DLS)}$ і $\delta_{V,eq(DLS)}$

Навантаження	Переміщення [мм]	HUS4 MAX d12, $h_{ef} = 100 \text{ мм}$	HIT- HY 200 A-V3 M16, $h_{ef} = 100 \text{ мм}$
Розтяг	$\delta_{N,eq(DLS)}$	0.7 мм	0.4 мм
Зсув	$\delta_{V,eq(DLS)}$	4.9 мм	3.2 мм

Отримані значення переміщень відповідають вимогам проекту, тому зменшення розрахункового опору для режимів руйнування при дії розтягу та зсуву не потрібне. Однак якщо допустиме переміщення менше за розрахункове, значення опору необхідно зменшити пропорційно відношенню між необхідним і розрахунковим переміщенням, як пояснено в розділі 6.10.2.4. Відповідно, коефіцієнти використання також зростатимуть унаслідок зменшення опору з урахуванням впливу граничних переміщень.

Примітка: Спостерігається, що для однакового навантаження використання опору залишається в допустимому діапазоні для сейсмічних дій типу C2 як для систем HIT-HY 200-A V3 M16, так і для HUS4-MAX d12. Водночас розмір анкера, необхідний для гібридної системи HUS4-MAX, є меншим, ніж для HIT-HY 200 при тій самій ефективній глибині занурення. Крім того, анкер HIT-HY 200-A V3 потребує часу твердіння, щоб досягти необхідних характеристик, як зазначено в розділі 5. Отже, система анкерів HUS4-MAX забезпечує більш оптимальне рішення з простішим монтажем.

6.11 Розрахунок при впливі вогню згідно з EC2-4 та EOTA TR 082

Відповідно до принципів EC2-1-2 [42], формат перевірки «дія проти опору» під час впливу вогню відповідає підходу для статичного навантаження, але із зменшеними коефіцієнтами надійності (таблиця 6.24). Різницю між урахуванням у вогневих умовах і при статичному розрахунку показано на рис. 6.39.

Концепція розрахунку за граничним станом міцності:

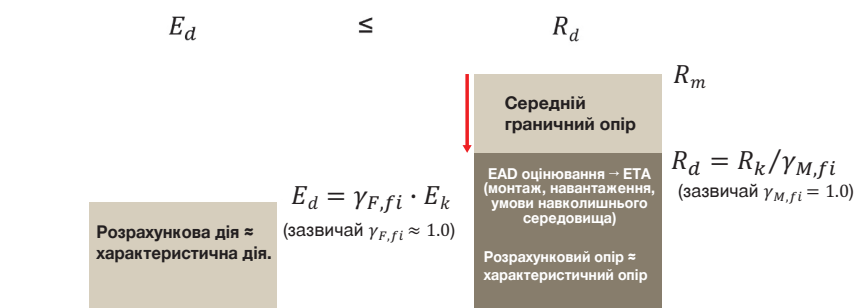
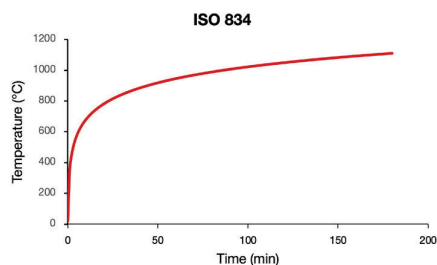
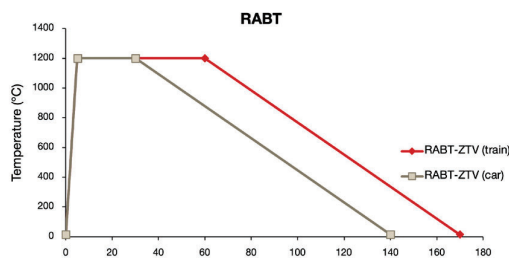


Рис. 6.39 — Концепція «дія–опір» у розрахунку на вплив вогню

Вогнестійкість анкерів оцінюється з урахуванням температурно-часових профілів, класифікованих за EN 13501-2 [43], із використанням стандартної температурно-часової кривої ISO 834-1 [13] (STC), яку також застосовує EC2-1-2 [42]. Для спеціальних застосувань, наприклад у тунелях для автомобілів/залізниць, можуть використовуватися інші вогневі криві — наприклад, RABT для автомобільних тунелів (RABT-ZTV-ING (Car) [44]) і ZTV/EBA для залізничних тунелів (RABT-ZTV-ING (Train) [44], [45]); див. рис. 6.40.



Крива ISO (у межах дії EC2-4 [1])



Крива RABT-ZTV для тунелів (поза сферою дії EC2-4 [1])

Рис. 6.40 — Вогневі криві, що враховуються під час розрахунку

Примітка: Різні температурно-часові криві впливають на роботу пост-встановлених анкерів. Для отримання додаткової інформації зверніться до Hilti.

Методика розрахунку визначена в EC2-4 [1], додатку D, щодо відповідних режимів руйнування для пост-встановлених анкерів. Однак перевірка розрахунку на комбіноване виривання та виколування бетонного конуса не охоплена. Тому EC2-4 [1] обмежується лише механічними анкерами (див. розділ 6.11.1). Для хімічних анкерів EOTA опублікувала документ TR 082 [46], у якому описано розрахунок для комбінованого руйнування. Область застосування розрахункової методики за EC2-4 [1] і EOTA TR 082 [46] розглядається далі — у розділах 6.11.1 та 6.11.2.

Примітка: EC2-4, додаток D не містить положень для розрахунку хімічних анкерів при впливі вогню.

6.11.1 Розрахунок при впливі вогню згідно з EC2-4

Розрахунок кріплень на вплив вогню залежить від двох основних критеріїв: **вогнестійкість** і **вогневий вплив**. Загалом для розрахунку слід приймати **тріщинуватий** бетон. Руйнування від розколювання не розраховується, тому в бетоні має бути передбачено достатнє армування для сприйняття цього виду руйнування. Вплив вогню може спричинити обсипання бетону, що також необхідно враховувати відповідним коефіцієнтом для армування в бетоні.

Методика в EC2-4 [1] охоплює пост-встановлені механічні анкери для **однобічного** вогневого впливу **до 120 хв**. Якщо потрібен розрахунок на вплив з більш ніж одного боку, **відстань до кромки з другого боку має бути не меншою за 300 мм і $2h_{ef}$** . За таких великих відстаней до кромки можна вважати, що вогонь не матиме впливу на протилежний (віддалений) бік.

Анкери, розраховані на вогневий вплив, повинні мати **ЕТА для застосування в тріщинуватому бетоні та характеристичні опори при вогневому впливі**. Розрахунок анкерів при вогневому впливі виконується за методикою для температури навколишнього середовища, наведеною в EC2-4 [1] для статичного навантаження (див. розділ 6.6). Водночас замість коефіцієнтів і опорів для нормальної температури застосовують часткові коефіцієнти та характеристичні опори для вогневого впливу відповідно до вимог EC2-1-2 [42]. Посилаючись на таблиці 6.4 і 6.8 щодо опорів при статичному навантаженні, розрахункові опори для вогневого впливу отримують із застосуванням відповідних часткових коефіцієнтів надійності для вогню, визначених у таблиці 6.24.

Таблиця 6.24 — Часткові коефіцієнти надійності для розрахунку при впливі вогню згідно з EC2-4 [1]

Напрямок дії	Частковий коефіцієнт надійності	Базове значення
Розтяг	Сталь	$\gamma_{M,s,fi}$
	Виколювання бетонного конуса	$\gamma_{M,c,fi}$
	Виривання	$\gamma_{M,p,fi}$
	Комбіноване виколювання конуса та виривання	$\gamma_{M,p,fi}$
Зсув	Сталь	$\gamma_{M,s,fi}$
	Виривання бетону при зсуві	$\gamma_{M,cp,fi}$
	Руйнування бетонної кромки	$\gamma_{M,c,fi}$

6.11.1.1 Перевірка при розтягуювальному навантаженні

Опір сталевому руйнуванню

Розрахунковий опір сталевому руйнуванню визначається згідно з EC2-4 [1], додатком D, розділ D.4.2, де характеристичний опір $N_{Rk,s,fi}$ береться з відповідного ETA.

Примітка: Дослідження показали, що анкери з нержавіючої сталі мають вищу міцність на розтяг порівняно з анкерами з вуглецевої сталі, навіть у внутрішніх умовах. Застосування нержавіючої сталі дає змогу оптимізувати розрахунок і підвищити довговічність кріплення.

Опір вириванню

Опір вириванню визначається за тією самою формулою, що й для сталевому руйнуванню або статичного опору, за винятком того, що частковий коефіцієнт надійності для умов пожежі береться з відповідного ETA та EC2-4 [1] (див. таблицю 6.24).

Характеристичний опір $N_{Rk,p,fi}$ визначається на основі формули опору для статичного навантаження з урахуванням коефіцієнта зниження:

$$N_{Rk,p,fi} = 0.25 \cdot N_{Rk,p} \quad (\text{при впливі вогню} < 90 \text{ хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, рівн. (D.4)}$$

$$N_{Rk,p,fi} = 0.20 \cdot N_{Rk,p} \quad (\text{при впливі вогню від 90 до 120 хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, рівн. (D.5)}$$

$N_{Rk,p}$ — це значення опору, визначене для статичного навантаження в бетоні класу C20/25 (див. розділ 6.6.1).

Опір виколюванню бетонного конуса

Опір виколюванню бетонного конуса розраховується за формулою для опору при статичному навантаженні (див. розділ 6.6.1). При цьому вводиться коефіцієнт зниження відносно характеристичного опору одного анкера, який не зазнає впливу сусідніх кріплень або кромки бетону — $N_{Rk,c}^0$ відповідно до EC2-4 [1].

Примітка: Позитивний вплив підвищеної міцності бетону понад C20/25 не враховується під час розрахунку при вогневому впливі для режимів руйнування, пов'язаних із бетоном.

$$N_{Rk,c,fi}^0 = \frac{h_{ef}}{200} \cdot N_{Rk,c}^0 \leq N_{Rk,c}^0 \quad (\text{при впливі вогню} < 90 \text{ хв}) \text{ EC2-4 Додаток-D, рівн. (D.2)}$$

$$N_{Rk,c,fi}^0 = 0.8 \cdot \frac{h_{ef}}{200} \cdot N_{Rk,c}^0 \leq N_{Rk,c}^0 \quad (\text{при впливі вогню від 90 до 120 хв}) \text{ EC2-4 Додаток-D, рівн. (D.3)}$$

Вогнестійкість суттєво зменшується для малих глибин занурення. Для глибини занурення 200 мм і більше базовий характеристичний опір при виколуванні бетонного конуса під час впливу вогню приймається таким самим, як і для статичного навантаження. Залежність зміни опору для одного анкера при різній глибині занурення під час вогневого впливу до 90 хв показана на графіку рис. 6.41.



Рис. 6.41 — Коефіцієнт зниження для опору виколуванню бетонного конуса

Характеристичний опір $N_{Rk,c,fi}$ розраховується за тією самою формулою, що й для статичного навантаження, але із заміною $N_{Rk,c}$ на $N_{Rk,c,fi}$. Крім того, для вогневого впливу враховуються часткові коефіцієнти, $\psi_{s,N,fi}$, $\psi_{ec,N,fi}$, $\psi_{M,N,fi}$, $\psi_{re,c,fi}$ etc. тощо. Фактична та розрахункова проєкції площі $A_{c,N}^0$ і $A_{c,N}$ визначаються відповідно до геометрії анкера, відстаней між анкерами та до кромки — як для розрахунку при впливі вогню.

Примітка: Для розрахунку при вогневому навантаженні критична відстань до кромки та відстань між анкерами є більшими, ніж для звичайного розрахунку: $s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 4h_{ef}$, $c_{cr,N} = s_{cr,N}/2$

6.11.1.2 Перевірка при зсувному навантаженні

Опір сталевому руйнуванню

Зсув без плеча важеля

Опір сталевому руйнуванню, коли зсувна сила діє без плеча важеля, визначається за тим самим принципом, що й для статичного навантаження. Характеристичний опір $V_{Rk,s,fi}$ береться з відповідного ЕТА, а розрахунковий опір визначається згідно з EC2-4 [1], розділ 7.2.2 і додаток D, розділ D.4.3.1.

Анкери з нержавіючої сталі також демонструють кращу поведінку під час дії зсуву, ніж анкери з вуглецевої сталі.

Зсув із плечем важеля

Характеристичний опір при зсуві з плечем важеля визначається на основі формули для статичного навантаження (див. розділ 6.6.1).

Однак характеристичний опір згину, $M_{Rk,s,fi}$ відповідно до EC2-4 [1], Додаток D (D.4.3.1) рівн. (D.7) задається так:

$M_{Rk,s,fi} = 1.2 \cdot W_{el} \cdot \sigma_{Rk,s,fi}$, W_{el} — модуль опору перерізу для напруженого перерізу;
 $\sigma_{Rk,s,fi}$ — характеристична межа міцності сталі на розтяг/зсув при впливі вогню, визначена згідно з EC2-4 [1], розділ D.4.2.1.

Опір вириванню бетону

Опір вириванню бетону визначається за такими формулами:

$$V_{Rk,c,fi(90)} = k_8 \cdot N_{Rk,c,fi(90)} \quad (\text{при впливі вогню} < 90 \text{ хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, розд. D.4.3.2}$$

$$V_{Rk,c,fi(120)} = k_8 \cdot N_{Rk,c,fi(120)} \quad (\text{при впливі вогню від 90 до 120 хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, розд. D.4.3.2}$$

k_8 — коефіцієнт, який береться з відповідного ETA так само, як і для статичного навантаження (при нормальній температурі). $N_{Rk,c,fi(90)}$, $N_{Rk,c,fi(120)}$ — знижені значення опору при впливі вогню, наведені раніше в цьому розділі. Загалом ці значення не перевищують опір при статичному навантаженні $N_{Rk,c}$ (див. рис. 6.41). Так само опір вириванню при вогневому впливі є меншим, ніж при статичному навантаженні.

Опір руйнуванню бетонної кромки

Характеристичний опір одного анкера визначається як опір при статичному навантаженні, помножений на коефіцієнт зниження, який залежить від тривалості вогневого впливу:

$$V_{Rk,c,fi(90)}^0 = 0.25 \cdot V_{Rk,c}^0 \quad (\text{при впливі вогню} < 90 \text{ хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, розд. D.4.3.3}$$

$$V_{Rk,c,fi(120)}^0 = 0.20 \cdot V_{Rk,c}^0 \quad (\text{при впливі вогню від 90 до 120 хв}) \text{ EC2-4, Додаток D, розд. D.4.3.3}$$

$V_{Rk,c}^0$ — початкове значення характеристичного опору одного анкера в тріщинуватому бетоні класу C20/25 при нормальній температурі для руйнування бетонної кромки, пов'язаного зі статичним зсувом.

Перевірка розрахунку при комбінованій дії

Перевірка комбінованої дії при вогневому впливі виконується за тією самою формулою, що і для статичного навантаження (див. розділ 6.8).

6.11.2 Розрахунок при впливі вогню згідно з EOTA TR 082

Цей технічний звіт охоплює розрахунок хімічних анкерів на однобічний вогневий вплив у тріщинуватому бетоні класів від C20/25 до C50/60. Втім, у розрахункових перевірках допускається приймати лише бетон класу C20/25. Для врахування розрахунку хімічних анкерів за EOTA TR 082 [46] анкери повинні мати ETA відповідно до EAD 330499 [22]. Перевірки всіх режимів руйнування, релевантних для механічних анкерів і визначених у EC2-4 [1], застосовні і до хімічних анкерів, що розраховуються за EOTA TR 082 [46]. Додаткова перевірка для хімічних анкерів — комбіноване виривання та виколування бетонного конуса — визначена виключно в цьому технічному звіті.

Опір комбінованому вириванню та виколуванню бетонного конуса для хімічних анкерів при навантаженні розтягу

EOTA TR 082 [46] рекомендує два методи розрахунку анкерів при вогневому впливі:

- 1) Спрощений метод
- 2) Метод інтеграції опору

Нижче подано основні положення обох методів (див. рис. 6.42).



Рис. 6.42 — Основні характеристики методів розрахунку для комбінованого виривання та виколювання бетонного конуса згідно з EOTA TR 082 [46]

Розрахунковий опір визначається за загальною формулою з урахуванням відповідного часткового коефіцієнта надійності для впливу вогню. Характеристичний опір анкера $N_{Rk,p}$ виводиться на основі формули, застосовної для статичного навантаження.

6.11.2.1 Спрощений метод

У спрощеному методі для визначення опору при комбінованому вириванні та виколюванні бетонного конуса під час вогневого впливу використовується максимальна температура температурного профілю вздовж глибини занурення хімічного анкера.

$$N_{Rk,p,fi} = \psi_{sus,fire} \cdot \tau_{Rk,p,fi,min} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} \quad \text{EOTA TR 082, рівн (7.2)}$$

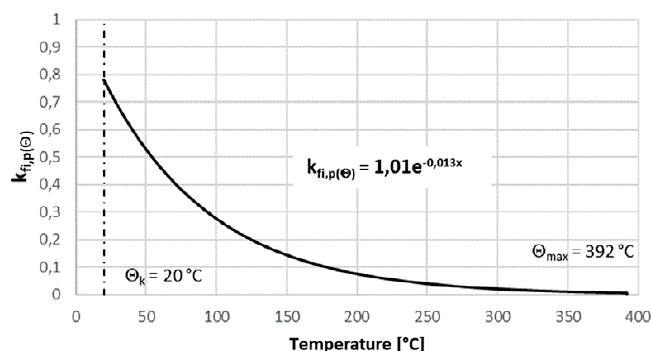
Характеристичний опір зчеплення при вогневому впливі визначається як знижений статичний опір зчеплення при відповідній максимальній температурі вздовж профілю.

$$\tau_{Rk,p,fi,min} = k_{fi,p(\theta)} \cdot \tau_{Rk,cr}, \quad \text{EOTA TR 082, рівн (7.1)}$$

$$k_{fi,p(\theta)}(20^\circ\text{C}) = 1.0. \text{ Отже, } \tau_{Rk,p,fi}(20^\circ\text{C}) = \tau_{Rk,cr}$$

$$k_{fi,p(\theta)} (21^\circ\text{C} \leq \theta \leq \theta_{max}) \text{ — береться з відповідного ЕТА.}$$

$k_{fi,p(\theta)} (\theta > \theta_{max}) = 0$. На рис. 6.43 наведено приклад температурної кривої для хімічного анкера HIT-HY 200-A V3, що демонструє коефіцієнт зниження залежно від температури при вогневому впливі.



Примітка: Більш детальні криві зниження температури для конкретних продуктів наведені у відповідних ЕТА.

Рис. 6.43 — Приклад температурної кривої зниження в ЕТА 19/0601 (хімічний анкер Hilti HIT-HY 200-A V3)

$\tau_{Rk,cr}$ — характеристичний опір зчеплення для тріщинуватого бетону при нормальній температурі для бетону класу міцності C20/25, який береться з відповідного ЕТА. Додаткову інформацію щодо продукт-специфічних графіків можна знайти в затверджених документах Hilti (FTM [29]) та ЕТА.

$\psi_{sus,fire}$ — коефіцієнт тривалої дії навантаження, $\alpha_{sus,fire}$ — відношення між тривалими діями та загальними діями при граничному стані несучої здатності (ULS) для впливу вогню.

$$\psi_{sus,fire} = 1 \text{ for } \alpha_{sus,fire} \leq \psi_{sus,fire} \quad \text{EOTA TR 082, рівн. (7.3)}$$

Якщо значення не наведено у відповідному ЕТА, слід застосовувати ЕТА, $\psi_{sus,fire}^0 = \psi_{sus}^0$

$$\psi_{sus,fire} = \psi_{sus,fire}^0 + 1 - \alpha_{sus,fire} \text{ for } \alpha_{sus,fire} > \psi_{sus,fire}^0 \quad \text{EOTA TR 082, рівн. (7.4)}$$

6.11.2.2 Метод інтеграції опору

Цей метод передбачає покроковий розрахунок, який враховує зниження опору зчеплення для кожного сегмента вздовж усієї довжини занурення анкера. Глибина занурення розбивається на сегменти. Довжина сегмента Δx є меншою за $2d$ і зазвичай приймається рівною 10 мм. зазвичай приймається рівною 10 мм. Для кожного сегмента визначається максимальна температура за допомогою поліноміального виразу температурної кривої. Опір зчеплення обчислюється для кожного сегмента відповідно до визначеної максимальної температури. Підсумковий характеристичний опір отримується шляхом інтегрування опорів зчеплення всіх сегментів уздовж повної довжини анкера.

Опір комбінованому вириванню та виколюванню бетонного конуса при впливі вогню згідно з EOTA TR 082, рівн. (7.5):

$$N_{Rk,p,fi}^0 = \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \int_0^{h_{ef}} \tau_{Rk,p,fi} \cdot \theta(x) \cdot dx \approx \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \sum_0^{h_{ef}} K_{fi,p} \cdot \theta(x) \cdot \tau_{Rk,cr} \cdot \Delta x$$

Характеристичний опір зчеплення групи анкерів при впливі вогню розраховується за такими параметрами:

$$\tau_{Rk,p,ucr,fi} = \tau_{Rk,p,ucr} \cdot N_{Rk,p,fi}^0 / N_{Rk,p}^0 \quad \text{EOTA TR 082, рівн. (7.6)}$$

$$\psi_{g,Np,fi} = 1 \quad \text{EOTA TR 082, розд. 7.2.3}$$

$$s_{cr,Np,fi} = 7.3d \cdot (\psi_{sus,fire} \cdot \tau_{Rk,p,ucr,fi})^{0.5} \leq 4 \cdot h_{ef} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.15), EOTA TR 082, рівн. (7.7)}$$

$$\psi_{s,Np,fi} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c}{c_{cr,Np,fi}} \right) \leq 1 \quad \text{EC2-4, рівн. (7.20), EOTA TR 082, рівн. (7.9)}$$

Примітка: Цей метод може бути корисним для більш оптимізованого та ефективного розрахунку анкерів на вогневий вплив. Оскільки ручні розрахунки є складними й трудомісткими, рекомендується використовувати PROFIS Engineering Suite (див. розділ 7).

EOTA TR 082 [46] подає розподіл температур уздовж глибини занурення анкерів при вогневому впливі для визначення опору зчеплення. Температурний профіль анкера знижується зі збільшенням глибини занурення і має найвищу температуру у верхній зоні контакту між сталеву пластину та бетоном. Температурні профілі для типових діаметрів анкерів і глибин занурення при тривалості вогневого впливу 30, 60, 90 та 120 хв наведено в EOTA TR 082 [46], таблиці А.1 та А.2. Залежність між температурою (T) та положенням уздовж глибини занурення анкера (x) описується поліномом третього ступеня:

$$T(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad \text{EOTA TR 082, рівн. (8.1)}$$

У цьому рівнянні: x — глибина занурення анкера; a, b, c, d — коефіцієнти, що відповідають певним глибинам занурення та конкретній тривалості вогневого впливу.

Температурний профіль для анкера M12 із глибиною занурення 70, 90, 110 і 130 мм при вогневому впливі

температурний профіль для анкера M12 із глибиною занурення 110 мм при тривалості вогневого впливу 60 хв наведено на рис. 6.44 а). Температурні профілі для анкера M12 із глибиною занурення 110 мм при впливі вогню 30, 60, 90 та 120 хв показані на рис. 6.44 б). Як видно з графіків, зі збільшенням глибини занурення температура суттєво знижується.

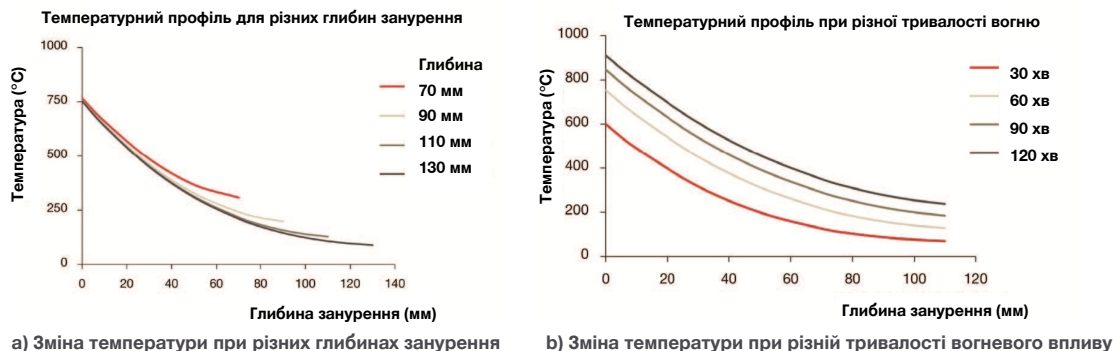
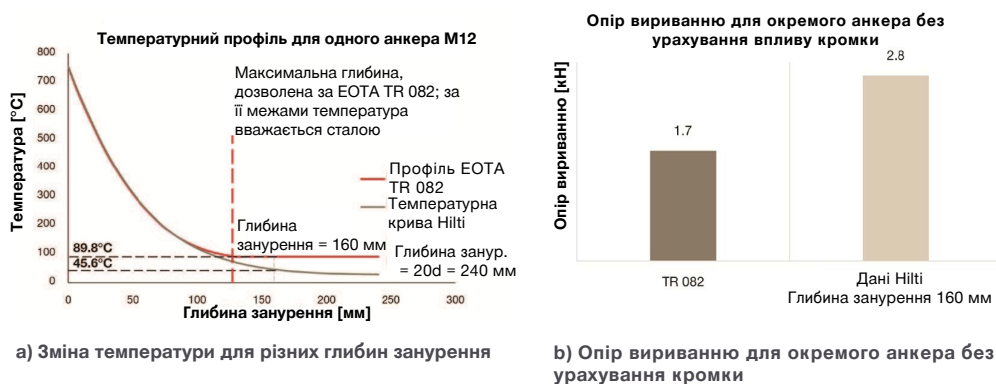


Рис. 6.44 — Профілі зниження температури згідно з EOTA TR 082 [46] для анкерного стрижня M12

Температурні криві, наведені в EOTA TR 082 [46], обмежені певними діаметрами та глибинами занурення анкерів. Інтерполяція чи екстраполяція для інших довжин анкерів не допускається; за межами визначених значень температура вважається сталою. Такий підхід є консервативним. **Hilti розробила детальніші температурні криві та реалізувала їх у програмному забезпеченні PROFIS Engineering** (див. розділ 7). Вони охоплюють широкий діапазон діаметрів і глибин занурення (до 20 d), а температурний профіль визначається за тими ж принципами, що й у EOTA TR 082 [46]. Це забезпечує точніший розрахунок фактичної температури, ніж при використанні базових кривих EOTA TR 082 [46], для анкерів певного діаметра й глибини занурення. Деталізований розрахунок дає змогу враховувати зменшення температури зі збільшенням глибини занурення, що робить розрахунок більш оптимізованим і економічним. Приклад наведено на рис. 6.45. Температурний профіль згідно з EOTA TR 082 [46] і за даними Hilti для анкера M12 із глибиною занурення 20 d (240 мм) при вогневому впливі 60 хв показано на рис. 6.45 а). Згідно з EOTA TR 082 [46], температура вважається сталою, оскільки екстраполяція за межі 130 мм не допускається. За даними Hilti, температура далі зменшується: нижче 130 мм вона становить близько 50 % від мінімального значення, прийнятого за EOTA TR 082 [46]. За рахунок цього зменшення температура нижча, а отже, опір вищий — що дає змогу досягти більш оптимізованих результатів. Порівняння опору вириванню для окремого анкера M12 за EOTA TR 082 [46] та за методом Hilti показано на рис. 6.45 б). Розрахунок опору вириванню згідно з EOTA TR 082 [46] виконано для ефективної глибини 160 мм, причому температура нижче 130 мм вважалася сталою (89,8 °C, див. рис. 6.45 а). Для глибини 30 мм (160 – 130 мм) опір вириванню за даними Hilti розраховано з урахуванням зниження температури для кожного сегмента завдовжки 10 мм — відповідно до наявного рівняння для температурних кривих.

Примітка: Температурні криві Hilti Fire ґрунтуються на тих самих принципах, що й EOTA TR 082, але забезпечують більш детальні результати.

Примітка: Температурні криві Hilti враховують ті самі критерії теплових і фізичних властивостей хімічних анкерів, що наведені в EOTA TR 082.



Примітка: Опір вириванню розраховано для анкера HIT-RE 500 V4 згідно з ETA 20/0541.

Рис. 6.45 — Порівняння даних EOTA TR 082 [46] і розрахункових кривих Hilti для анкерного стрижня M12

6.11.3 Приклад розрахунку пост-встановленого анкера при впливі вогню

6.11.3.1 Приклад розрахунку для механічних анкерів

Вимоги проекту: Профіль типу I кріпиться до бетонної плити за допомогою сталеві опірної пластини. З'єднання виконується за допомогою механічних анкерів (див. рис. 6.46).

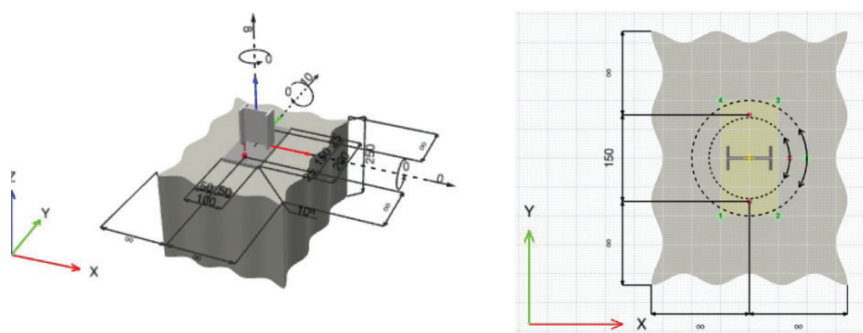


Рис. 6.46 — З'єднання опірної пластини з використанням пост-встановлених механічних анкерів

Вихідні дані проекту:

Геометрія бетонного елемента:	Товщина плити, $h = 250 \text{ мм}$
Геометрія опірної пластини:	Розміри пластини, $l \times w = 200 \times 100 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 15 \text{ мм}$
Матеріали:	Бетон звичайної густини C25/30, тріщинуватий
	Поверхнєве армування з кроком 100 мм і діаметром $\varnothing 12$
Навантаження:	Зусилля розтягу, $N_{Ed} = 8 \text{ кН}$
	Зсув, $V_{Ed} = 10 \text{ кН}$ (no stand-off)
Сталевий профіль:	Профіль I 80 $L \times W \times T \times FT = 80 \times 42 \times 5.9 \times 5.9 \text{ мм}$
Розрахунковий строк служби:	50 років
Вплив вогню:	з одного боку
Тривалість вогневого впливу:	60 хв

Характеристики пост-встановлених анкерів:

Тип анкера:	механічний
Кількість анкерів:	2
Відстань між анкерами по осі Y:	150 мм

Умови встановлення пост-встановлених анкерів

Метод / орієнтація свердління: Ударно-обертальне свердління / горизонтальне, сухе
 Обрана система / рішення: Металевий розпірний анкер Hilti HST4-R (ETA-21/0878 [36])

1) Аналіз зусиль розтягу та зсуву

Сумарні зусилля розтягу та зсуву на групу анкерів: $N_{Ed,fi} = 10 \text{ кН}$ і $V_{Ed,fi} = 10 \text{ кН}$ — розподіляються між двома анкерами. Результати наведено на рис. 6.47.

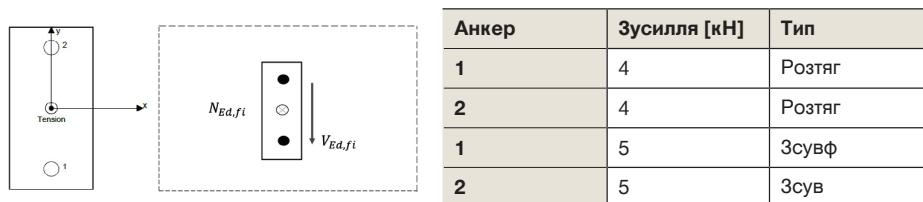


Рис. 6.47 — Аналіз зусиль в анкерах

2) Характеристики запропонованого анкера. Запропоноване анкерне рішення наведено в таблиці 6.25.

Таблиця 6.25 — Властивості анкера

Тип анкера	Механічний	
Маркування анкера	HST4-R	
Діаметр анкера	d	12 мм
Ефективна глибина занурення	h_{ef}	70 мм
Номінальна глибина занурення	h_{nom}	80 мм



Розрахункові перевірки виконуються з урахуванням жорсткої опорної пластини відповідно до EC2-4 [1], а характеристичні опори беруться з ETA-21/0878 [36]. Детальніше про розрахунок опорів для різних режимів руйнування див. розділ 6.11.1.

Перевірка руйнування при дії навантаження розтягуРуйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за допомогою такої формули:

$$N_{Rd,s,fi} = \frac{N_{Rk,s,fi}}{\gamma_{M,s,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1 Додаток D, розд. D.4.2

$$N_{Rk,s,fi} = 12.2 \text{ кН}$$

ETA-21/0878, Табл. C11

$$\gamma_{M,s,fi} = 1.0$$

ETA-21/0878, Табл. C11

$$N_{Rd,s,fi} = \left(\frac{12.2}{1.0} \right) = 12.2 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 4 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Виривання:

Опір вириванню розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,p,fi} = \frac{\psi_c N_{Rk,p,fi}}{\gamma_{M,p,fi}}$$

EC2-4, рівн. (7.1) Додаток D, розд. D.4.2.3

на вогневий вплив слід приймати бетон класу не нижче C20/25

$$\psi_c = 1.0$$

ETA-21/0878, Табл. C11

$$N_{Rk,p,fi} = 7 \text{ кН}$$

$$\gamma_{M,p,fi} = 1.0,$$

ETA-21/0878, Табл. C11

$$N_{Rd,p,fi} = \left(\frac{1 \cdot 7.0}{1.0} \right) = 7 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = \text{кН}$$

Перевірку виконано ✓

Виколювання бетонного конуса:

Опір виколюванню бетонного конуса перевіряють для всієї групи анкерів за такою формулою:

$$N_{Rd,c,fi} = \frac{N_{Rk,c,fi}}{\gamma_{M,c,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1 Додаток D, розд. D.4.2.2

$$N_{Rk,c \text{ for } c_{20}/25}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1.5}$$

EC2-4, рівн. (7.2)

$$N_{Rk,c \text{ for } c_{20}/25}^0 = 8.9 \cdot \sqrt{20} \cdot 70^{1.5} = 23.3 \text{ кН}$$

ETA-21/0878, Табл. C11

$$N_{Rk,c,fi}^0 = \frac{h_{ef}}{200} \cdot N_{Rk,c}^0 = \frac{70}{200} \cdot 23.3 = 8.2 \text{ кН}$$

EC2-4, Додаток D, рівн. (D.2)

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 4 \cdot h_{ef} = (4 \cdot 70) = 280 \text{ мм}, c_{cr,N} = 140 \text{ мм}$$

EC2-4, розд. 7.2.1.4 (3)

$$A_{c,N} = (140 + 150 + 140) \cdot (140 + 140) = 120,400 \text{ мм}^2$$

EC2-4, Рис. 7.4

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (280 \cdot 280) = 78,400 \text{ мм}^2$$

EC2-4, рівн. (7.3)

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1, \text{ отже } \psi_{s,N} = 1.0 \text{ для нескінченної відстані до кромки}$$

EC2-4, рівн. (7.4)

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.5)

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{70}{200} = 0.85$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}} \right)}$$

EC2-4, рівн. (7.6)

Коефіцієнти від ексцентриситету визначають уздовж двох осей X та Y. Ексцентриситет уздовж осей X і Y: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$, отже, $\psi_{ec,N} = 1.0$. Коефіцієнт для згинального моменту: $\psi_{M,N} = 1.0$

$$N_{Rk,c,fi} = N_{Rk,c,fi}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 8.2 \cdot \left(\frac{120,400}{78,400} \right) \cdot 1.0 \cdot 0.85 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 10.7 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,c,fi} = \left(\frac{10.7}{1.0} \right) = 10.7 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 8 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Розколювання бетону:

Згідно з критеріями, наведеними в EC2-4 [1], розділ 7.2.1.7 (2) b) 2), розколювання бетону не відбувається за наявності армування в бетоні за умови обмеження ширини тріщин $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Перевірка при дії зусиль зсуву:Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$V_{Rd,s,fi} = \frac{V_{Rk,s,fi}}{\gamma_{M,s,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.2 Додаток D, розд. D.4.3.1

$$\gamma_{M,s,fi} = 1.0$$

ETA-21/0878, Табл. C12

$$V_{Rk,s,fi} = 12.2 \text{ кН}$$

ETA-21/0878, Табл. C12

$$V_{Rd,s,fi} = \left(\frac{12.2}{1.0} \right) = 12.2 \text{ кН} > V_{Ed,fi} = 5 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування при вириванні бетону:

Опір вириванню бетону розраховується для групи анкерів за формулою:

$$V_{Rk,cp,fi} = k_8 \cdot N_{Rk,c,fi} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.39a) Додаток D, рівн. (D.8)}$$

$$V_{Rd,cp,fi} = \frac{V_{Rk,cp,fi}}{\gamma_{Mcp,fi}} \quad \text{EC2-4, Табл. 7.2}$$

$$\gamma_{Mcp,fi} = 1.0 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C12}$$

$$k_8 = 2.74 \quad \text{ETA-21/0878, Табл. C2}$$

Характеристичний опір одного анкера визначається з перевірки руйнування бетонного конуса:

$$N_{Rk,c,fi}^0 = 8.2 \text{ kN}, \psi_{s,N} = 1.0, \psi_{re,N} = 1.0 \text{ [як при руйнуванні конуса]}, \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$N_{Rk,c,fi} = N_{Rk,c,fi}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} = 8.2 \cdot \left(\frac{120,400}{78,400}\right) \cdot 1.0 \cdot 0.85 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 10.7 \text{ kH}$$

$$V_{Rk,cp,fi} = 10.7 \cdot 2.74 = 29.3 \text{ kH}$$

$$V_{Rd,cp,fi} = \left(\frac{29.3}{1.0}\right) = 29.3 \text{ kH} > V_{Ed,fi} = 10 \text{ kH} \quad \text{Перевірку виконано} \quad \checkmark$$

Перевірка комбінованого навантаження (розтяг і зсув):

Руйнування сталі:

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

$$\text{Співвідношення між дією і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{4}{12.2}\right) = 0.33 \leq 1.0$$

$$\text{Співвідношення між дією і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{5}{12.2}\right) = 0.41 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.33^2 + 0.41^2 = 0.28 \leq 1.0$$

Перевірку виконано $\checkmark$

Руйнування, не пов'язане зі сталлю:

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

$$\text{Співвідношення між дією і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{8}{10.7}\right) = 0.75 \leq 1.0$$

$$\text{Співвідношення між дією і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{10}{29.3}\right) = 0.34 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.75^{1.5} + 0.34^{1.5} = 0.85 \leq 1.0$$

Перевірку виконано $\checkmark$

6.11.3.2 Приклад розрахунку для хімічних анкерів

Вимоги проекту такі самі, як і для механічних анкерів (за винятком умов навантаження) (рис. 6.48).

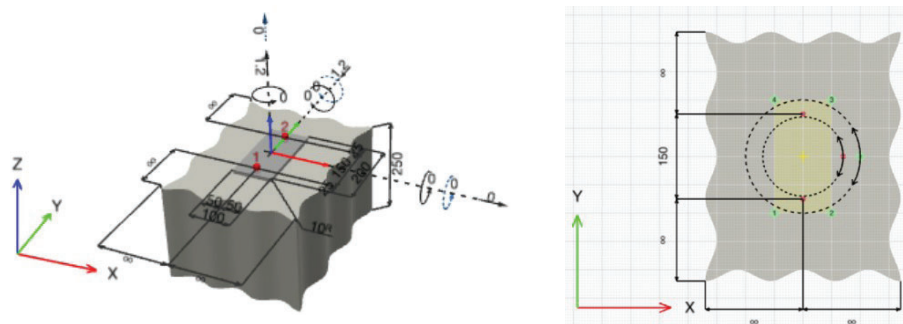


Рис. 6.48 — З'єднання опорної пластини з використанням пост-встановлених хімічних анкерів.

1) Аналіз сил розтягу та зсуву:

Загальна сила розтягу на групу анкерів $N_{Ed,fi} = 1.2 \text{ кН}$ а сила зсуву — $V_{Ed,fi} = 1.2 \text{ кН}$ обидві сили розподіляються між двома анкерами. Схему показано на рис. 6.49.



Рис. 6.49 — Аналіз сил в анкерному з'єднанні

2) Характеристики запропонованого анкера: Як альтернативний варіант запропоновано хімічний анкер, наведений у таблиці 6.26.

Таблиця 6.26 — Властивості анкера

Тип анкера	Хімічний	
Найменування	HIT-RE 500 V4 + HAS-U	
Діаметр анкера	d	16 мм
Ефективна глибина занурення	h_{ef}	140 мм



Розрахункова перевірка виконана з урахуванням жорсткої опорної пластини відповідно до EC2-4 [1] і EOTA TR 082 [46]. Характеристичні опори взято з ETA-20/0541 [47]. Деталі розрахунку для різних типів руйнування наведено в розділі 6.11.2.

Перевірка руйнувань при дії розтягу:

Руйнування сталі:

Розрахунковий опір за руйнуванням сталі визначають для найбільш навантаженого анкера за формулою:

$$N_{Rd,s,fi} = \frac{N_{Rk,s,fi}}{\gamma_{M,s,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1 Додаток D, розд. D.4.2

$$N_{Rk,s,fi} = 3.79 \text{ кН}$$

ETA-20/0541, Табл. C39

$$\gamma_{M,s,fi} = 1.0$$

ETA-20/0541, Табл. C39

$$N_{Rd,s,fi} = \left(\frac{3.79}{1.0} \right) = 3.79 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 0.6 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Комбіноване виривання та руйнування бетонного конуса:

Комбіноване виривання та руйнування бетонного конуса перевіряють за рівняннями EOTA TR 082 [46]. У цьому прикладі розрахунок виконано за «Спрощеним методом» (див. розділ 6.11.2), оскільки його зручно виконувати вручну. Далі буде наведено порівняння результатів «Спрощеного методу» та «Методу інтегрування опору». Приклад розрахунку за «Методом інтегрування опору» буде виконано в програмі PROFIS Engineering (див. розділ 7).

$$N_{Rd,p,fi} = \frac{N_{Rk,p,fi}}{\gamma_{M,p,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1, Додаток-С, розд. C.5

Характеристичний опір анкера при вириванні $N_{Rk,p}$ задається як:

$$\tau_{Rk,p,fi \min} = k_{fi,p(\theta)} \cdot \tau_{Rk,cr}$$

EOTA TR 082, рівн. (7.1)

Використовуючи температурний профіль із EOTA TR 082 [46], отримуємо максимальну температуру 167°C на глибині занурення 110 мм. Отже, ефективна глибина, де враховується адгезійна міцність, становить (140-110) = 30 мм, див. рис. 6.50.

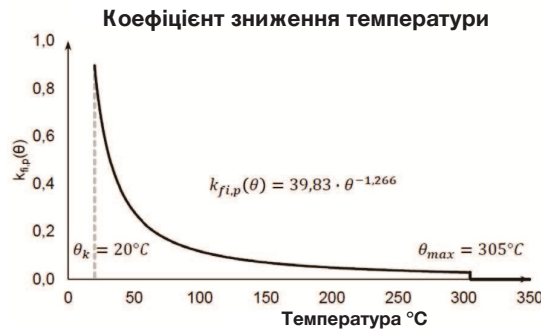
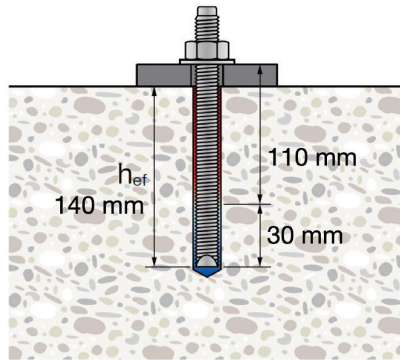


Рис. 6.50 — Температурний профіль, врахований у спрощеному методі

$$k_{fi,p}(\theta) = 39,83 \cdot \theta^{-1,266}$$

ETA-20/0541 [46], Рис. С.5

$$\tau_{Rk,cr} = 11,0 \text{ МПа}$$

ETA-20/0541, Табл.С1

$$k_{fi,p}(\theta) = 39,83 \cdot \theta^{-1,266} = 39,83 \cdot 167^{-1,266} = 0,061$$

$$\tau_{Rk,p,fi\ min} = 0,061 \cdot 11 = 0,67 \text{ МПа}$$

$$\psi_{sus}^0 = 0,88, \alpha_{sus,fi} = 0,5$$

ETA-20/0541, Табл. С2

$$\psi_{sus,fire} = 1,0$$

EOTA TR 082, рівн. (7.3)

$$N_{Rk,p,fi}^0 = \psi_{sus,fire} \cdot \tau_{Rk,p,fi\ min} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} = 1,0 \cdot 0,67 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 30$$

EOTA TR 082, рівн. (7.2)

$$N_{Rk,p,fi}^0 = 1,01 \text{ кН}$$

$$\tau_{Rk,p,ucr} = 17 \text{ МПа}$$

ETA-20/0541, Табл. С1
EC2-4, рівн. (7.14)

$$N_{Rk,p}^0 = \psi_{sus} \cdot \tau_{Rk,cr} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} = 1 \cdot 11 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 140 = 77,4 \text{ кН}$$

$$\tau_{Rk,p,ucr,fi} = \tau_{Rk,p,ucr} \cdot N_{Rk,p,fi}^0 / N_{Rk,p}^0 = 17 \cdot \frac{1,01}{77,4} = 0,22 \text{ МПа}$$

EOTA TR 082, рівн. (7.6)

$$s_{cr,Np,fi} = 7,3d \cdot (\psi_{sus,fire} \cdot \tau_{Rk,p,ucr,fi})^{0,5} = 7,3 \cdot 16 \cdot (1 \cdot 0,22)^{0,5} = 55,1$$

$$s_{cr,Np,fi} = 55,1 < 4 \cdot 140 = 560 \text{ мм}$$

EOTA TR 082, рівн. (7.7)

$$c_{cr,Np,fi} = s_{cr,Np,fi} / 2 = (55,1 / 2) = 27,6 \text{ мм. } \psi_{g,Np,fi} = 1,0,$$

$$\text{Ексцентриситет: } e_N = 0, \psi_{ec,Np,fi} = 1,0$$

$$\psi_{s,Np,fi} = 0,7 + 0,3 \cdot \left(\frac{c}{c_{cr,Np,fi}} \right), \psi_{s,Np,fi} = 1, \psi_{re,N,fi} = 1,0$$

$$A_{p,N,fi}^0 = s_{cr,Np,fi} \cdot s_{cr,Np,fi} = 55,1 \cdot 55,1 = 3,038 \text{ мм}^2 \quad A_{p,N,fi} = (55,1 \cdot 55,1) = 3,038 \text{ мм}^2$$

$$N_{Rk,p,fi} = N_{Rk,p,fi}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np,fi} \cdot \psi_{s,Np,fi} \cdot \psi_{re,N,fi} \cdot \psi_{ec,Np,fi} = 1,01 \cdot \frac{3,038}{3,038} \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0$$

$$N_{Rk,p,fi} = 1,01 \text{ кН}$$

EC2-4, рівн. (7.13)

$$N_{Rd,p,fi} = \left(\frac{1,01}{1,0} \right) = 1,01 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 0,6 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування бетонного конуса:

Опір за руйнуванням бетонного конуса перевіряється для всієї групи анкерів за такою формулою:

$$N_{Rd,c,fi} = \frac{N_{Rk,c,fi}}{\gamma_{Mc,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1 Додаток D, розд. D.4.2.2

$$N_{Rk,c\ for\ C20/25} = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5} = 7,7 \cdot \sqrt{20} \cdot 140^{1,5} = 57 \text{ кН}$$

EC2-4, рівн. (7.2)

$$N_{Rk,c,fi}^0 = \frac{h_{ef}}{200} \cdot N_{Rk,c}^0 < N_{Rk,c}^0, N_{Rk,c,fi}^0 = \frac{140}{200} \cdot 57 = 39.9 \text{ кН}$$

EC2-4, Додаток D, рівн. (D.2)

$$s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 4 \cdot h_{ef} = (4 \cdot 140) = 560 \text{ мм}, c_{cr,N} = 280 \text{ мм}$$

EC2-4, розд. 7.2.1.4 (3) EC2-4,

$$A_{c,N} = (280 + 150 + 280) \cdot (280 + 280) = 397,600 \text{ мм}^2$$

Рис. 7.4

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} = (560 \cdot 560) = 313,600 \text{ мм}^2$$

EC2-4, рівн. (7.3)

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{280}{280}\right) = 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.4)

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.5)

$$\psi_{re,N} = 1.0 \text{ тому } h_{ef} > 100 \text{ мм}$$

$$\psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot e_{c,N}}{s_{cr,N}}\right)}$$

EC2-4, рівн. (7.6)

Ексцентриситет уздовж осей X та Y: $e_{c,N} = 0 \text{ мм}$, отже $\psi_{ec,N} = 1.0$

$$\text{Коефіцієнт для згинального моменту } \psi_{M,N} = 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.7)

$$N_{Rk,c,fi} = N_{Rk,c,fi}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N} = 39.9 \cdot \left(\frac{397,600}{313,600}\right) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 50.6 \text{ кН}$$

$$N_{Rd,c,fi} = \left(\frac{50.6}{1.0}\right) = 50.6 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 1.2 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування бетону внаслідок розколювання

Відповідно до критеріїв, наведених у EC2-4 [1], розділ 7.2.1.7 (2) b) 2), розколювання бетону запобігається наявністю арматури у бетоні, за умови що ширина тріщини не перевищує $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Перевірка руйнувань від зсуву:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за такою формулою:

$$V_{Rd,s,fi} = \frac{V_{Rk,s,fi}}{\gamma_{Ms,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.2 Додаток D, розд. D.4.3.1

$$\gamma_{Ms,fi} = 1.0$$

ETA-20/0541, Табл. C42

$$V_{Rk,s,fi} = 3.79 \text{ кН}$$

ETA-20.0541, Табл. C42

$$V_{Rd,s,fi} = \left(\frac{3.79}{1.0}\right) = 3.79 \text{ кН} > V_{Ed,fi} = 0.6 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування бетону від виколювання:

Опір руйнуванню бетону від виколювання розраховується для групи анкерів за формулою:

$$V_{Rk,cp,fi} = k_8 \cdot N_{Rk,c,fi}$$

EC2-4, рівн. (7.39a) Додаток D, рівн. (D.8)

$$V_{Rd,cp,fi} = \frac{V_{Rk,cp,fi}}{\gamma_{Mcp,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.2

$$\gamma_{Mcp,fi} = 1.0$$

ETA-20/0541, Табл. C42

$$k_8 = 2.0$$

ETA-20/0541, Табл. C7

Характеристичний опір одного анкера визначається з перевірки на руйнування бетонного конуса:

$$N_{Rk,c,fi}^0 = 1.01 \text{ кН},$$

$$\psi_{s,Np,fi} = 1.0, \psi_{re,Np,fi} = 1.0, \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$N_{Rk,c,fi} = N_{Rk,c,fi}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,Np,fi} \cdot \psi_{re,Np,fi} \cdot \psi_{ec,Np,fi} = 1.01 \cdot \left(\frac{3,038}{3,038}\right) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 1.01 \text{ кН}$$

$$V_{Rk,cp,fi} = 1.01 \cdot 2 = 2.02 \text{ кН}$$

$$V_{Rd,cp,fi} = \left(\frac{2.02}{1.0} \right) = 2.02 \text{ кН} > V_{Ed,fi} = 1.2 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Перевірка при комбінованій дії розтягу та зсуву:

Руйнування сталі:

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

$$\text{Відношення між прикладеним зусиллям і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{0.6}{3.79} \right) = 0.16 \leq 1.0$$

$$\text{Відношення між прикладеним зусиллям і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{0.6}{3.79} \right) = 0.16 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.16^2 + 0.16^2 = 0.05 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Руйнування, відмінне від сталевих

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

$$\text{Відношення між прикладеним зусиллям і опором при розтягу: } \beta_N = \left(\frac{0.6}{1.01} \right) = 0.59 \leq 1.0$$

$$\text{Відношення між прикладеним зусиллям і опором при зсуві: } \beta_v = \left(\frac{1.2}{2.02} \right) = 0.59 \leq 1.0$$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.59^{1.5} + 0.59^{1.5} = 0.91 \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

Той самий приклад розрахунку перевіряється в PROFIS Engineering за методом інтеграції опору (Resistance Integration Method). Перевірка виконується окремо для комбінованого виривання анкера та руйнування бетонного конуса; розрахунок для цього випадку наведено нижче.

Комбіноване виривання й виколування бетонного конуса:

$$N_{Rd,p,fi} = \frac{N_{Rk,p,fi}}{\gamma_{M,p,fi}}$$

EC2-4, Табл. 7.1, Додаток-С, розд. С.5

$$N_{Rk,p,fi}^0 = \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \int_0^{h_{ef}} \tau_{Rk,p,fi} \cdot \theta(x) \cdot dx$$

$$N_{Rk,p,fi}^0 \approx \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \sum_0^{h_{ef}} K_{fi,p} \cdot \theta(x) \cdot \tau_{Rk,cr} \cdot \Delta x$$

EOTA TR 082, рівн. (7.5)

$$\tau_{Rk,cr} = 11.0 \text{ МПа}$$

ETA-20/0541, Табл. С1

$$\psi_{sus}^0 = 0.88, \alpha_{sus} = 0,$$

ETA-20/0541, Табл. С2

$$\psi_{sus,fire} = 1.0$$

EOTA TR 082, рівн. (7.3)

$$\tau_{Rk,p,ucr} = 17 \text{ МПа}$$

ETA-20/0541, Табл. С1

$$\tau_{Rk,p,ucr,fi} = \tau_{Rk,p,ucr} \cdot N_{Rk,p,fi}^0 / N_{Rk,p}^0 = 0.7 \text{ МПа}$$

EOTA TR 082, рівн. (7.6)

$$s_{cr,Np,fi} = 7.3d \cdot (\psi_{sus,fire} \cdot \tau_{Rk,p,ucr,fi})^{0.5} = 7.3 \cdot 16 \cdot (1.0 \cdot 0.7)^{0.5}$$

$$s_{cr,Np,fi} = 97.5 < 4 \cdot 140 = 560 \text{ мм}$$

EOTA TR 082, рівн. (7.7)

$$c_{cr,Np,fi} = s_{cr,Np,fi} / 2 = (97.5 / 2) = 48.8 \text{ мм}$$

$$\psi_{g,Np,fi} = 1.0,$$

$$\text{Ексцентриситет, } e_N = 0, \psi_{ec,Np,fi} = 1.0$$

$$\psi_{s,Np,fi} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c}{c_{cr,Np,fi}} \right) = 1.0, \psi_{s,Np,fi} = 1.0, \psi_{re,Np,fi} = 1.0$$

$$A_{p,N,fi}^0 = s_{cr,Np,fi} \cdot s_{cr,Np,fi} = (97.5 \cdot 97.5) = 9,510 \text{ мм}^2$$

$$A_{p,N,fi} = (97.5 \cdot 97.5) = 9,510 \text{ мм}^2$$

$$N_{Rk,p,fi}^0 = \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \int_0^{h_{ef}} \tau_{Rk,p,fi} \cdot \theta(x) \cdot dx \approx \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \sum_0^{h_{ef}} K_{fi,p} \cdot \theta(x) \cdot \tau_{Rk,cr} \cdot \Delta x = 3.2 \text{ кН}$$

$$N_{Rk,p,fi} = N_{Rk,p,fi}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np,fi} \cdot \psi_{s,Np,fi} \cdot \psi_{re,Np,fi} \cdot \psi_{ec,Np,fi} = 3.2 \cdot \frac{9,510}{9,510} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0$$

$$N_{Rk,p,fi} = 3.2 \text{ кН}$$

EC2-4, рівн. (7.13)

$$N_{Rd,p,fi} = \left(\frac{3.2}{1.0} \right) = 3.2 \text{ кН} > N_{Ed,fi} = 0.6 \text{ кН}$$

Перевірку виконано ✓

Примітка: Кінцеве використання (ступінь завантаження) для комбінованої дії розтягу та зсуву становить 12 %. Крім того, при застосуванні детального методу інтеграції опору зменшення діаметра та глибини закладення становить приблизно 25–30 %. Отже, існує можливість оптимізації, наприклад, використання менших або коротших анкерів.

Оптимізовані розміри анкера та результати наведено в таблиці 6.27.

Таблиця 6.27 — Підсумок коефіцієнта використання для оптимізованого анкерного рішення

Напрямок навантаження	Режим руйнування	Ступінь використання [%] – HIT-RE 500 V4 + HAS-U M12, $h_{ef} = 97 \text{ мм}$
Розтяг	Сталь	30
	Бетонний конус	6
	Виривання й виколювання бетонного конуса	80
Зсув	Сталь	30
	Бетонна кромка	40
Комбінація	Сталь	18
	Руйнування, відмінне від сталевго	97

6.12 Розрахунок при втомному навантаженні згідно з EC2-4 та EOTA TR 061

Динамічні навантаження необхідно розрізняти за типом: сейсмічні, ударні та втомні — залежно від частоти виникнення, амплітуди та швидкості прикладання. Основні характеристики цих трьох типів динамічних дій наведено на рис. 3.12 та в розділі 3.5. Приклади застосувань, де враховується втома матеріалу: крани, підйомники, роботи, елементи мостів і тунелів, вантажопідіймальне обладнання тощо.

6.12.1 Область застосування та перевірка відповідно до EC2-4 та EOTA TR 061

Розрахунок пост-встановлених анкерів на втомне навантаження регламентується EC2-4 [1], який передбачає перевірки для випадків дії розтягу, зсуву та комбінованих навантажень, що можуть спричинити відповідні режими руйнування. Документ **EOTA TR 061** [24] надає більш деталізовані вимоги для розрахунку при циклічному втомному навантаженні — як у поєднанні зі статичним або квазістатичним навантаженням, так і окремо. Це дозволяє враховувати очікувану кількість циклів динамічних дій протягом розрахункового строку експлуатації з'єднання. Обидва документи — стандарт і технічний звіт — охоплюють розрахунок пост-встановлених анкерів для однакових класів бетону (C20/25 до C50/60) та для тріщинного і нетріщинного бетону. Кільцеві зазори не допускаються, проте для їх заповнення може використовуватись набір заповнення Hilti — див. розділ 5.1.4. Основні відмінності між вимогами EC2-4 [1] та EOTA TR 061 [24] наведено в таблиці 6.28.

Таблиця 6.28 — Порівняння між EC2-4 [1] та EOTA TR 061 [24]

Параметри		Сфера застосування в EC2-4	Сфера застосування в EOTA TR 061
Базові положення для врахування втоми	Мінімальна кількість циклів, що потребує перевірки на втому	Вимога не визначена	1) $n > 1000$ циклів навантаження для пульсуючих навантажень розтягу 2) $n > 100$ циклів для чергуючих або пульсуючих зсувних навантажень
	Перевірка втоми на вплив кліматичних варіацій та обмежувальних сил на анкер	Не встановлено вимог	Перевірка обов'язкова, якщо: $\Delta\sigma_{sk} = \sigma_{sk,max} - \sigma_{sk,min} \geq 100 \text{ Н/мм}^2$ (для розтягу) $\Delta\tau_{sk} = \tau_{sk,max} - \tau_{sk,min} \geq 60 \text{ Н/мм}^2$ (для зсуву)
	Допуск на кільцеві зазори	Не допускається	Така сама вимога, як у EC2-4
	Зсувні навантаження при втомі	Розглядаються лише навантаження без плеча важеля	Така сама вимога, як у EC2-4
Методи розрахунку та концепція опору при втомі	Метод розрахунку	Один метод для визначення розрахункового опору при розтягу та зсуві	Два методи розрахунку: повний метод і спрощений метод (див. розділи 6.12.2.1 і 6.12.2.2)
	Метод оцінки / ETA	Загальне посилання на ETA	Відповідна ETA згідно з EAD 330250 (див. також таблицю 6.35)
	Ефективна глибина закладення хімічних анкерів	Конкретних критеріїв не визначено	Визначається зменшення ефективної глибини під поверхнею бетону: $h_{ef,fat} = h_{ef} - \Delta h_{ef}$ і $\Delta h_{ef} = \max(1.25 \cdot d, 25 \text{ мм})$
	Концепція розрахунку кріплень із урахуванням втоми	Не розглянуто	Докладний опис наведено в таблиці 6.34
	Накладання статичних і втомних циклічних навантажень	Не визначено	Визначено п'ять випадків на основі статичних і циклічних навантажень (EOTA TR 061, розділ 2.2.2), згідно з діаграмою Гудмана (див. рис. 6.52)
	Урахування максимальної очікуваної кількості циклів	Не визначено	Розрахункові методи для рівнів витривалості (кількість циклів ∞) — див. розділ 6.12.2.1
Перевірки	Комбіноване виривання й виколування бетонного конуса	EC2-4 не охоплює цю перевірку	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,p,E,n} \leq 1$
	Показники для комбінованої дії розтягу та зсуву	α_s, α_c беруться з ETA	$\alpha_s \leq 2.0$ (визначається в ETA). $\alpha_c = 1.5$ або також може бути взято з ETA
	Руйнування бетонного конуса та розколювання	$0.5 N_{Rk,c}$ для 2×10^6 циклів навантаження	Конкретне значення не наведено; перевірка проводиться за попереднім рівнянням
	Руйнування від виколування бетону або кромки	Виривання - $0.5 V_{Rk,cp}$ для 2×10^6 циклів. Руйнування кромки - $0.5 V_{Rk,c}$ для 2×10^6 циклів	Конкретне значення не наведено; перевірка проводиться за попереднім рівнянням
	Руйнування бетонної кромки	Розглядається лише навантаження, спрямоване до кромки	Розглядається навантаження як до кромки, так і від кромки (див. рис. 6.51)

Примітка: За умов втомного навантаження зсув із плечем важеля не охоплюється вимогами EC2-4 і EOTA TR 061.

Перевірки розрахунку при дії розтягу, зсуву та комбінованих навантажень, визначені в EOTA TR 061 [24], наведено в таблицях 6.29, 6.30 і 6.31.

Таблиця 6.29 — Режими руйнування та критерії при навантаженні розтягу згідно з EOTA TR 061 [24]

Режим руйнування	Окремий анкер	Група анкерів	
		Найбільш навантажений анкер	Група
Руйнування сталі	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,s,E,n} \leq 1.0$	$\Delta N_{Ed} / \psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,E,n} \leq 1.0$	
Руйнування бетонного конуса	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,c,E,n} \leq 1.0$		$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,c,E,n} \leq 1.0$
Виривання	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,p,E,n} \leq 1.0$	$\Delta N_{Ed} / \psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,p,E,n} \leq 1.0$	
Розколювання бетону	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,sp,E,n} \leq 1.0$		$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,sp,E,n} \leq 1.0$
Комбіноване виривання й виколування бетонного конуса	$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,p,E,n} \leq 1.0$		$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,p,E,n} \leq 1.0$

Примітка: Випробування на втому підтверджують, що руйнування сталі зазвичай є більш критичним, ніж втрати адгезійної міцності або бетонні режими руйнування.

Таблиця 6.30 — Режими руйнування та критерії при навантаженні зсуву згідно з EOTA TR 061 [24]

Режим руйнування	Окремий анкер	Група анкерів	
		Найбільш навантажений анкер	Група
Руйнування сталі	$\Delta V_{Ed} / \Delta V_{Rd,s,E,n} \leq 1.0$	$\Delta V_{Ed} / \psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,E,n} \leq 1.0$	
Руйнування бетону від виколування	$\Delta V_{Ed} / \Delta V_{Rd,cp,E,n} \leq 1.0$		$\Delta V_{Ed} / \Delta V_{Rd,cp,E,n} \leq 1.0$
Руйнування бетонної кромки	$\Delta V_{Ed,c+} / \Delta V_{Rd,c+,E,n} + \Delta V_{Ed,c-} / \Delta V_{Rd,c-,E,n} + \Delta V_{Ed,cp} / \Delta V_{Rd,cp,E,n} \leq 1.0$		$\Delta V_{Ed,c+} / \Delta V_{Rd,c+,E,n} + \Delta V_{Ed,c-} / \Delta V_{Rd,c-,E,n} + \Delta V_{Ed,cp} / \Delta V_{Rd,cp,E,n} \leq 1.0$

Таблиця 6.31 — Режими руйнування та критерії при комбінованому навантаженні згідно з EOTA TR 061 [24]

Режим руйнування	Окремий анкер	Група анкерів	
		Найбільш навантажений анкер	Група
Руйнування сталі		$\left(\Delta N_{Ed} / \psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,E,n} \right)^{\alpha_{sn}} + \left(\Delta V_{Ed} / \psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,E,n} \right)^{\alpha_{sn}} \leq 1$	
Руйнування бетону		$\Delta N_{Ed} / \Delta N_{Rd,c(p,sp,cb),E,n}^{\alpha_c} + \left(\Delta V_{Ed,cp} / \Delta V_{Rd,cp,E,n} + \Delta V_{Ed,c+} / \Delta V_{Rd,c+,E,n} + \Delta V_{Ed,c-} / \Delta V_{Rd,c-,E,n} \right)^{\alpha_c} \leq 1$	
Показники степенів у рівняннях:		$\alpha_s \leq 2.0$ — визначається у відповідній ETA для продукту; $\alpha_c = 1.5$ або може бути також узятю з ETA.	

Примітка: Область розрахунку, визначена в EC2-4 [1], охоплює такі положення: 1) Перевірка комбінованого руйнування й виривання бетонного конуса не визначена. 2) Не враховано пульсуючі або чергуючі зсувні навантаження окремо для перевірки бетонного руйнування при комбінованій дії. 3) Степеневі показники, які застосовуються для перевірки комбінованих дій, не визначено. 4) Усі інші перевірки виконуються так само, як у EOTA TR 061 [24].

$\Delta N_{Ek} = N_{Ek,max} - N_{Ek,min}$ і $\Delta V_{Ek} = V_{Ek,max} - V_{Ek,min}$ — амплітуда втомного навантаження при розтягу та зсуві для 2×10^6 циклів. Вона визначає різницю між максимальним навантаженням

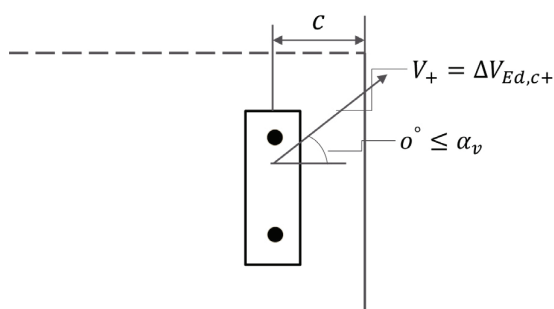
і постійно діючим навантаженням у розтягу та зсуві. Величини $N_{Rk,c}$, $N_{Rk,cb}$, $N_{Rk,sp}$, $V_{Rk,c}$, $V_{Rk,cp}$ обчислюються за тими ж формулами, що й для статичного розрахунку (див. розділ 6.6).

Розрахункова перевірка включає розподіл зсувних зусиль у кріпленнях для всіх можливих кутів до кромки, як показано на рис. 6.51:

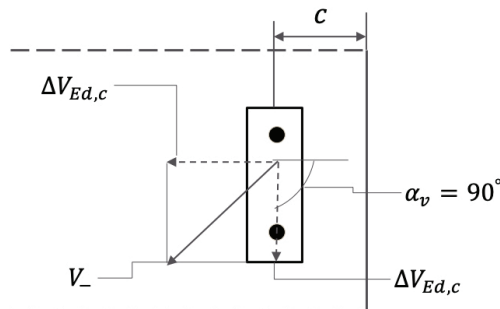
$\Delta V_{Rd,c+,E,n}$ — визначається за V_{Rkc} при $0^\circ < \alpha_v < 90^\circ$

$\Delta V_{Rd,c-,E,n}$ — визначається за V_{Rkc} при $\alpha_v = 90^\circ$

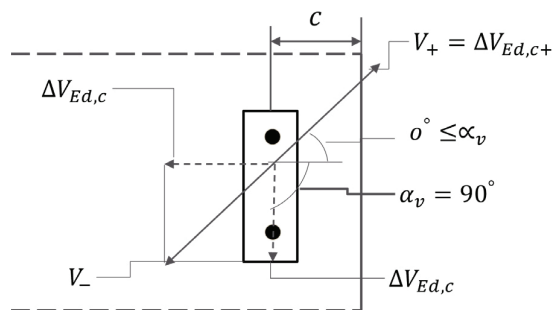
$\Delta V_{Rd,cp,E,n}$ — визначається за V_{Rkcp}



Пульсуюче зсувне навантаження, прикладене до кромки бетонного елемента:



Пульсуюче зсувне навантаження, прикладене від кромки бетонного елемента.



Чергуюче зсувне навантаження, що діє по чергово до кромки та від кромки бетонного елемента.

Рис. 6.51 — Розподіл зсувного навантаження, що діє на кріплення

6.12.2 Методи розрахунку згідно з EOTA TR 061

Часткові коефіцієнти для розрахунку навантаження при втомі та відповідного опору визначаються за тим самим принципом, що й у розділі 6.6 та EC0 [48]. Однак EOTA TR 061 [24] містить додаткові положення для розрахунку часткових коефіцієнтів для прикладених навантажень.

$E_d = \gamma_{F,fat} \cdot E_k$ де E_d — розрахункове навантаження, E_k — характеристичне навантаження.

Часткові коефіцієнти надійності для навантаження та опору при втомних умовах визначено в EC2-4 [1] і EOTA TR 061 [24], вони наведені у таблицях 6.33 та 6.32.

Таблиця 6.32 — Часткові коефіцієнти надійності для навантаження при втомі

Рекомендоване значення		Умова
γ_{Efat}	1.0	Коли навантаження з урахуванням втоми визначено за фактичними комбінаціями.
	1.2	Коли навантаження з урахуванням втоми визначено за фактичними комбінаціями.

Таблиця 6.33 — Часткові коефіцієнти надійності для опору при втомі

Режим руйнування	Частковий коефіцієнт надійності	Рекомендоване значення
Розтяг	Сталь	$\gamma_{Ms,N,fat}$
	Бетонний конус	$\gamma_{Mc,N,fat}$
	Виривання	$\gamma_{Mp,N,fat}$
Зсув	Сталь	$\gamma_{Ms,V,fat}$
	Виколування бетону	$\gamma_{Mc,V,fat}$
	Руйнування бетонної кромки	$\gamma_{Mp,V,fat}$

*) У разі руйнування сталі, при нескінченній кількості циклів навантаження ($n = \infty$), тобто при межі витривалості, приймається: $\gamma_{Ms,N,fat} = 1.35$. У проміжній зоні коефіцієнт $\gamma_{Ms,N,fat}$ визначається за формулою: $\gamma_{Ms,fat,n} = \gamma_{M,fat} + (\gamma_{Ms} - \gamma_{M,fat}) \cdot (\Delta F_{Rk,n} - \Delta F_{Rk,\infty}) / (\Delta F_{Rk} - \Delta F_{Rk,\infty})$ ЕОТА TR 061, розд. 2, рів. (3)

Розрахунок анкерів виконується залежно від впливу втоми. Поняття або критерії опору при втомі наведені в таблиці 6.34. В ЕОТА TR 061 [24] визначено два методи:

Метод I — Повний метод і Метод II — Спрощений метод (див. таблицю 6.35).

Примітка: Застосовний метод розрахунку при навантаженні з урахуванням втоми залежить від типу оцінки анкера, використаного для з'єднання, відповідно до EAD 330250 [25]. Див. таблицю 6.35 і наступні розділи для детальної інформації.

Таблиця 6.34 — Вплив втоми на анкери (EOTA TR 061 [24], Таблиця 2.1)

Етап	Результат	Примітка
Крива S–N для розрахункового опору з урахуванням втоми при нижчому навантаженні та кількості циклів ($\Delta F_{Rd,0,n}$), $F_{Eld} = 0$		Крива S–N показує межу витривалості матеріалу при n циклах навантаження та може бути визначена для кожного режиму руйнування (Метод I). Мінімальний опір при втомі може бути задано на рівні межі витривалості $\Delta F_{Rd,0,\infty}$ (Метод II).
Опір при втомі для нижчого циклічного навантаження F_{Eld} та n циклів навантаження, $\Delta F_{Rd,E,n}$		Діаграма Гудмана визначає опір при втомі $\Delta F_{Rd,E,n}$ для різних комбінацій статичних і втомних навантажень. Сірі та червоні стрілки відповідають статичному навантаженню та опору при втомі у випадку чергуючого або пульсуючого навантаження.
Перевірка граничного стану несучої здатності (ULS) з урахуванням втоми		Для розрахунку застосовуються діаграми взаємодії, побудовані з урахуванням нижчого циклічного навантаження F_{Eld} .

Таблиця 6.35 — Взаємозв'язок між методом випробувань і методом розрахунку при циклічному навантаженні з урахуванням втоми

Метод оцінки (EAD 330250 [25])			
Метод розрахунку	A — Безперервна функція опору при втомі залежно від кількості циклів навантаження	B — Межа витривалості	C — Колективні дії, перетворені до одного рівня з еквівалентним ступенем пошкодження
Метод I	X	Не застосовується	X
Метод II	X	X	X

6.12.2.1 Метод I — Повний метод

Цей метод описує три різні випадки розрахунку з урахуванням втоми, наведені в таблиці 6.36.

Виділяють такі умови:

- a) можливо точно визначити нижче циклічне навантаження, змінне, пульсуюче або верхнє негативне циклічне навантаження (тобто частки **статичного та втомного навантажень відомі**);
- b) відома верхня межа навантажень, **кількість циклів n** протягом розрахункового строку експлуатації.

Таблиця 6.36 — Умови застосування (Повний метод)

Випадок розр.	Умова	Умова для опору при втомі	Опір при втомі	Умова для циклічного навантаження	Циклічне навантаження
1	a)	Опір при втомі ($\Delta F_{Rd,E,n}$) відповідає розрахунковій межі витривалості ($\Delta F_{Rd,E,\infty}$) для пульсуючого/змінного навантаження з урахуванням нижчого циклічного рівня	$\Delta F_{Rd,E,n} = \Delta F_{Rd,E,\infty}$	Ураховується лише розрахункова складова втомного навантаження	$\Delta F_{Ed} = F_{Eupd} - F_{Elod}$
2	b)	Опір при втомі відповідає розрахунковому опору при нульовому початковому навантаженні та n циклів	$\Delta F_{Rd,E,n} = \Delta F_{Rd,0,n}$	$F_{Elod} > 0$ але значення невідоме	$\Delta F_{Ed} = F_{Eupd}$
				$F_{Eupd} < 0$ але значення невідоме	$\Delta F_{Ed} = -F_{Elod}$
				$F_{Elod} < 0$ і $F_{Eupd} > 0$ але значення невідоме	ΔF_{Ed}
3	a) і b)	Опір при втомі відповідає розрахунковому опору при пульсуючому/змінному навантаженні з урахуванням нижчого циклічного рівня та n циклів	$\Delta F_{Rd,E,n}$	Ураховується лише розрахункова складова втомного навантаження	$\Delta F_{Ed} = F_{Eupd} - F_{Elod}$

Для врахування поєднання статичних і циклічних навантажень, вплив нижчого циклічного навантаження на опір при втомі може бути визначений за допомогою **діаграми Гудмана**.

Цю діаграму можна побудувати для заданої кількості циклів n або для межі витривалості (тобто нескінченної кількості циклів). Як показано на рис. 6.52, вона визначає опір при втомі залежно від нижчого циклічного навантаження для кожного режиму руйнування. Метод I (повний метод) використовує цю діаграму для різних випадків навантаження, наведених у таблиці 6.36, для визначення опору при втомі, враховуючи всі можливі впливи, пов'язані з втомним навантаженням.

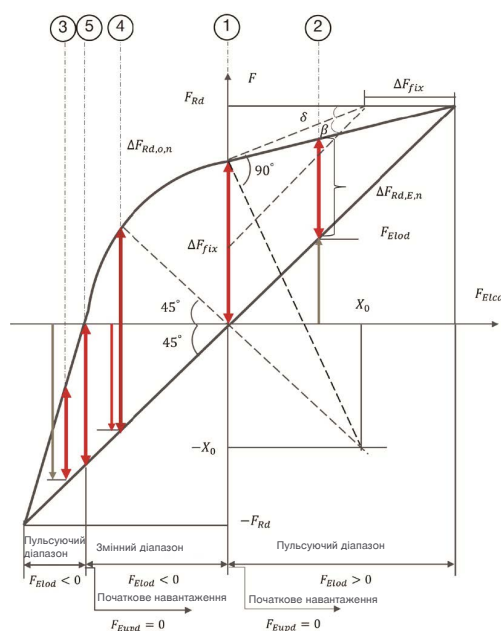


Рис. 6.52 — Діаграма Гудмана, показує залежність опору при втомі від нижчого циклічного / статичного навантаження

Випадки 1) і 5) передбачають, що **все навантаження є втомним**, тобто $F_{Elod} = 0$. Амплітуда не змінює знак, тобто відбувається **пульсуюча дія** у позитивному або негативному напрямку відповідно.

Випадки 2) і 3) передбачають наявність статичного навантаження $F_{Elod} > 0$ а діапазон його амплітуди лежить у позитивному або негативному напрямку — тобто це **пульсуюче втомне навантаження**.

Положення 4) визначає змінне втомне навантаження, коли $F_{Elod} < 0$.

6.12.2.2 Метод II — Спрощений метод

Точне визначення F_{Elod} та верхньої межі кількості циклів n протягом строку експлуатації неможливе. Це простий і консервативний підхід до розрахунку з урахуванням втоми, при якому **усі навантаження вважаються втомними**.

Оскільки кількість циклів невідома, опір при втомі визначається для нескінченної кількості циклів ($n = \infty$), $\Delta F_{Rd,E,n} = \Delta F_{Rd,E,\infty}$, Опір при втомі дорівнює розрахунковій межі витривалості, коли початкове навантаження $F_{Elod} = 0$.

Розрахункове циклічне навантаження визначається за тими ж критеріями, що й для випадку 2 у Методі I (див. розділ 6.12.2.1).

6.12.3 Приклад розрахунку пост-встановлених анкерів при втомному навантаженні

6.12.3.1 Приклад розрахунку для високочастотного втомного навантаження

Вимога проєкту: Сталеву трубу кріплять до бетонної плити за допомогою сталевій опорної пластини. З'єднання виконується за допомогою пост-встановлених хімічних анкерів (рис. 6.53).

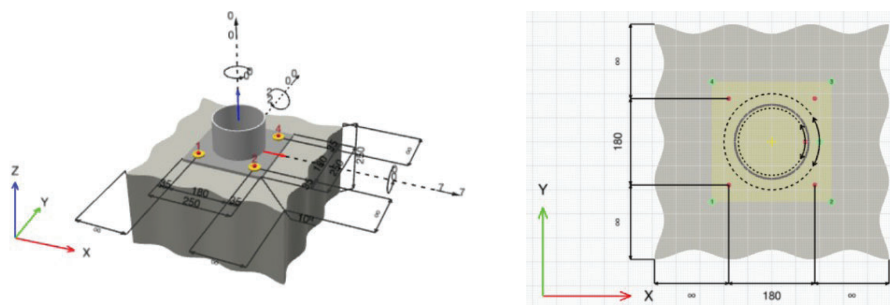


Рис. 6.53 — Кріплення опорної пластини з використанням пост-встановлених хімічних анкерів

Вихідні дані проєкту:

Геометрія бетону:	Товщина плити, $h = 250 \text{ мм}$
Геометрія опорної пластини:	Розміри, $l \times w = 250 \times 250 \text{ мм}$
	Товщина пластини, $t = 20 \text{ мм}$
Матеріали:	Бетон нормальної щільності C25/30, з тріщинами
	Крок поверхневого армування — 100 мм ($\varnothing 12$)
Навантаження:	Момент, $M_{Ed} = 2 \text{ кНм}$
	Зсув, $V_{Ed} = 7 \text{ кН}$ (без відступу)
Сталевий профіль:	Труба, $L \times W \times T$ (159 X 159 x 4.5мм)
Розрахунковий строк служби:	50 років
Кількість циклів навантаження:	$\leq 1 \times 10^8$ (Метод II для рівня витривалості; уся дія вважається втомним навантаженням.)

Дані щодо пост-встановлених анкерів

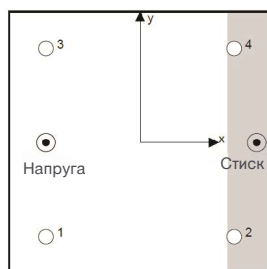
Тип анкера:	хімічний
Кількість анкерів:	4
Відстань між анкерами по осі X:	180 мм
Відстань між анкерами по осі Y:	180 мм

Умови встановлення пост-встановлених анкерів:

Метод свердління / орієнтація:	Ударно-обертальне свердління, горизонтальне, сухе Hilti
Обране рішення / система:	HIT-HY 200 A-V3 + HAS-U A4 (ETA-23/0277 [50]) із набором заповнення Hilti

1) Аналіз зусиль розтягу та зсуву:

Момент, що діє на групу анкерів, $\Delta M_{Ed} = 2 \text{ кНм}$, розподіляється між анкерами на розтяг і стиск. Загальна сила розтягу на групі анкерів становить $\Delta N_{Ed} = 10.3 \text{ кН}$. Для цього визначається нейтральна вісь, а сили на кожен анкер аналізуються окремо. Сумарні результати для зусиль розтягу та зсуву показані на рис. 6.54.



Анкер	Зусилля [кН]	Тип
1	5.2	Розтяг
3	5.2	Розтяг
1	1.75	Зсув
2	1.75	Зсув
3	1.75	Зсув
4	1.75	Зсув

Рис. 6.54 — Аналіз зусиль в анкерах

2) Характеристики запропонованого анкера: Для умов втомного навантаження використовується анкер, наведений у таблиці 6.37.

Таблиця 6.37 — Властивості анкера

Тип анкера	Хімічний	
Маркування анкера	HIT-HY 200 A-V3 + HAS-U A4	
Діаметр анкера	d	20 мм
Ефективна глибина анкерування	h_{ef}	125 мм



РОЗРАХУНОК АНКЕРА ТА ПЕРЕВІРКА РЕЖИМІВ РУЙНУВАННЯ

Розрахункові перевірки виконуються з урахуванням жорсткої опорної пластини згідно з EC2-4 [1], EOTA TR 061 [24]. Характеристичні опори взяті з ETA-23/0277 [50]. Детальні методики визначення опорів для різних типів руйнування наведено в розділі 6.12.

Перевірка при навантаженні розтягу:

Руйнування сталі:

Опір до руйнування сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за такою формулою:

$$\frac{\Delta N_{Ed}}{\psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,0,n}} \leq 1.0$$

EOTA TR 061, Табл. 2.2

$$\Delta N_{Rd,s,0,n} = \frac{\Delta N_{Rk,s,0,n}}{\gamma_{M,s,N,fat}}$$

ETA-23/0277, Табл. C4

$$\Delta N_{Rk,s,0,n} = 20.1 \text{ кН}$$

EOTA TR 061, розд. 2.1

$$\gamma_{M,s,N,fat} = 1.35$$

$$\Delta N_{Rd,s,0,n} = \frac{20.1}{1.35} = 14.9 \text{ кН}$$

$$\Delta N_{Ed} = 5.2 \text{ кН}$$

$$\psi_{FN} = 0.50$$

ETA-23/0277, Табл. C4

$$\frac{\Delta N_{Ed}}{\psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,0,n}} = \frac{5.2}{0.50 \cdot 14.9} = 0.70 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Комбіноване виривання й виколювання бетонного конуса

Опір комбінованому вириванню й виколюванню бетонного конуса розраховується для групи анкерів при дії розтягуювального навантаження за наведеними нижче рівняннями. Для навантаження з урахуванням втоми застосовуються такі рівняння:

$$\frac{\Delta N_{Ed}^g}{\psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,p,0,n}} \leq 1.0$$

ЕОТА TR 061, Табл. 2.2

$$\Delta N_{Rd,p,0,n} = \frac{\Delta N_{Rk,p,0,n}}{\gamma_{M,p,N,fat}}$$

ЕТА-23/0277, Табл. С4

$$\Delta N_{Rk,p,0,n} = \eta_{k,p,N,fat,n} \cdot \Delta N_{Rk,p}$$

EC2-4, рівн. (7.13)

$$N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,Np}$$

ЕТА-19/0601, Табл. С17

$$\tau_{Rk,c} = 6.13 \text{ MPa}$$

ЕТА-19/0601, Табл. С1

$$\tau_{Rk,ucr} = 18 \text{ MPa for C20/25}$$

ЕТА-19/0601, Табл. С1

$$\tau_{Rk,cr} = 9.71 \text{ MPa for C20/25}$$

$$\psi_{sus} = 1.0 \text{ as } \psi_{sus}^0 = 0.8 \text{ and } \alpha_{sus} = 0$$

EC2-4, рівн. (7.14a), ЕТА-19/0601, Табл. С1

$$h_{ef,fat} = h_{ef} - \Delta h_{ef} = (125 - 25) = 100 \text{ mm}$$

ЕОТА TR 061, рівн. (4)

$$s_{cr,Np} = 7.3d \cdot (\psi_{sus} \cdot \tau_{Rk})^{0.5} = 7.3 \cdot 20 \cdot (1.0 \cdot 6.13)^{0.5} = 495 > 3 \cdot 100 = 300 \text{ mm}$$

EC2-4, рівн. (7.15)

$$c_{cr,Np} = \frac{s_{cr,Np}}{2} = (300/2) = 150 \text{ mm}$$

EC2-4, рівн. (7.18)

$$\psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - \sqrt{(n-1)} \cdot \left(\frac{\tau_{Rk}}{\tau_{Rk,cr}} \right)^{1.5} = \sqrt{2} - \sqrt{(2-1)} \cdot \left(\frac{9.71}{18} \right)^{1.5} \geq 1, \psi_{g,Np}^0 = 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.17)

$$\psi_{g,Np} = \psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0.5} \cdot (\psi_{g,Np}^0 - 1) = 1 - \left(\frac{180}{375} \right)^{0.5} \cdot (1 - 1) \geq 1, \psi_{g,Np} = 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.21)

$$\text{Ексцентриситет } e_{c,N} = 0, \psi_{ec,Np} = 1.0$$

EC2-4, рівн. (7.20)

$$\psi_{s,Np} = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{c}{c_{cr,Np}} \right) = 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{0}{172.5} \right) = 1.0$$

$$\psi_{re,N} = 1.0$$

$$A_{p,N}^0 = s_{cr,Np} \cdot s_{cr,Np} = 300 \cdot 300 = 90,000 \text{ mm}^2$$

$$A_{p,N} = (100 + 180 + 100) \cdot (100 + 180 + 100) = 144,400 \text{ mm}^2$$

$$N_{Rk,p}^0 = \psi_{sus} \cdot \tau_{Rk} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef} = 1.0 \cdot 9.71 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 100 = 61 \text{ kH}$$

EC2-4, рівн. (7.14)

$$N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 \cdot \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \cdot \psi_{g,Np} \cdot \psi_{s,Np} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,Np} = 61 \cdot \frac{144,400}{90,000} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 97.9 \text{ kH}$$

$$\Delta N_{Rk,p,0,n} = 0.40 \cdot 97.9 = 39.2 \text{ kH}$$

$$\eta_{k,p,fat,n} = 0.40$$

ЕТА-23/0277, Табл. С4

$$\gamma_{M,p,N,fat} = 1.5$$

ЕОТА TR 061, Cl. 2.1

$$\Delta N_{Rd,p,0,n} = \frac{39.2}{1.5} = 26.1 \text{ kH}$$

$$\Delta N_{Ed}^g = 10.3 \text{ kH}$$

$$\frac{\Delta N_{Ed}^g}{\Delta N_{Rd,p,0,n}} = \frac{10.3}{26.1} = 0.40 \leq 1.0$$

Перевірку виконано 

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса розраховується для групи анкерів при дії розтягувального навантаження за наведеними нижче рівняннями. Для навантаження з урахуванням втоми застосовуються такі формули:

$$\frac{\Delta N_{Ed}^g}{\Delta N_{Rd,c,0,n}} \leq 1.0$$

ЕОТА TR 061, Табл. 2.2

$$\Delta N_{Rd,c,0,n} = \frac{\Delta N_{Rk,c,0,n}}{\gamma_{M,c,N,fat}}$$

ЕТА-23/0277, Табл. С4

$$\Delta N_{Rk,c,0,n} = \eta_{k,c,N,fat,n} \cdot N_{Rk,c}$$

EC2-4, рівн. (7.2)

$$k_1 = 7.7,$$

$$h_{ef} = 125 \text{ mm}$$

$$\Delta N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_f^{1.5} = 7.7 \cdot \sqrt{25} \cdot 125^{1.5} = 53.8 \text{ kH}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N} \text{ with } s_{cr,N} = 2 \cdot c_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef} = 3 \cdot 125 = 375 \text{ mm і } c_{cr,N} = 187.5 \text{ mm}$$

$$A_{c,N}^0 = 375 \cdot 375 = 140,625 \text{ mm}^2$$

$$A_{c,N} = (187.5 + 187.5) \cdot (187.5 + 180 + 187.5) = 208,125 \text{ mm}^2$$

(Анкери 1 і 3 працюють на розтяг)

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c}{c_{cr,N}} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{187.5}{187.5}, \psi_{s,N} = 1.0 \leq 1.0$$

$$\psi_{re,N} = 0.5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1 = 0.5 + \frac{125}{200} = 1.125, \psi_{re,N} \leq 1.0, \text{ отже } \psi_{re,N} = 1.0$$

$$\text{Ексцентриситет } e_{N,1} = e_{N,2} = 0, \psi_{ec,N} = 1.0$$

$$\psi_{M,N} = 2 - \frac{z}{1.5 \cdot h_{ef}} = 2 - \frac{201.5}{1.5 \cdot 125} \geq 1.0, \psi_{M,N} = 0.93, \text{ отже } \psi_{M,N} = 1.0$$

$$z = 201.5 \text{ мм}$$

див. «Аналіз перерізу», виконаний, наприклад, у PROFIS Engineering

$$\begin{aligned} \Delta N_{Rk,c} &= \Delta N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec1,N} \cdot \psi_{ec2,N} \cdot \psi_{M,N} \\ &= 53.8 \cdot \frac{208,125}{140,625} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \end{aligned} \quad \text{EC2-4, рівн. (7.1)}$$

$$\Delta N_{Rk,c} = 79.6 \text{ кН}$$

$$\eta_{k,c,N,fat,n} = 0.50$$

ETA-23/0277, Табл. C4

$$\Delta N_{Rk,c,0,n} = 0.50 \cdot 79.6 = 39.8 \text{ кН}$$

EOTA TR 061, Cl. 2.1

$$\gamma_{M,c,N,fat} = 1.5$$

$$\Delta N_{Rd,c,0,n} = \frac{39.8}{1.5} = 26.5 \text{ кН}$$

$$\Delta N_{Ed}^g = 10.3 \text{ кН}$$

$$\frac{\Delta N_{Ed}^g}{\Delta N_{Rd,c,0,n}} = \frac{10.3}{26.5} = 0.39 \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

Розколювання бетону:

Відповідно до критеріїв, наведених у EC2-4 [1], розділ 7.2.1.7 (2) b) 2), розколювання бетону запобігається за рахунок армування, при цьому ширина тріщин обмежується $w_k \leq 0.3 \text{ мм}$.

Перевірка при зсувному навантаженні:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за наведеним нижче рівнянням:

$$\frac{\Delta V_{Ed}}{\psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,0,n}} \leq 1$$

EOTA TR 061, Табл. 2.3

$$\Delta V_{Rd,s,0,n} = \frac{\Delta V_{Rk,s,0,n}}{\gamma_{M,s,V,fat}}$$

$$\Delta V_{Rk,s,0,n} = 11.1 \text{ кН}$$

ETA-23/0277, Табл. C5

$$\gamma_{M,s,V,fat} = 1.35$$

EOTA TR 061, рівн. (3)

$$\Delta V_{Rd,s,0,n} = \frac{11.1}{1.35} = 8.2 \text{ кН}$$

$$\Delta V_{Ed} = 1.75 \text{ кН}$$

$$\psi_{FV} = 0.50$$

ETA-23/0277, Табл. C5

$$\frac{\Delta V_{Ed}}{\psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,0,n}} = \frac{1.75}{0.50 \cdot 8.2} = 0.43 \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

Виривання бетону:

Опір вириванню бетону розраховується для групи анкерів. Для навантаження з урахуванням втоми застосовуються такі рівняння:

$$\frac{\Delta V_{Ed,cp}}{\Delta V_{Rd,cp,0,n}} \leq 1$$

EOTA TR 061, Табл. 2.3

$$\Delta V_{Rd,cp,0,n} = \frac{\Delta V_{Rk,cp,0,n}}{\gamma_{M,c,V,fat}}$$

ETA-23/0277, Табл. C5

$$\Delta V_{Rk,cp,0,n} = \eta_{k,c,V,fat,n} \cdot V_{Rk,cp}$$

$$V_{k,cp} = k_8 \cdot N_{Rk,c}$$

$$N_{Rk,c}^0 = 53.8 \text{ кН}$$

$$A_{c,N}^0 = s_{cr,N} \cdot s_{cr,N}$$

$$A_{c,N}^0 = 385 \cdot 385 = 140,625 \text{ мм}^2$$

$$A_{c,N} = (187.5 + 180 + 187.5) \cdot (187.5 + 180 + 187.5) = 308,025 \text{ мм}^2$$

$$\psi_{s,N} = 1.0, \psi_{re,N} = 1.0, \psi_{ec,N} = 1.0, \psi_{M,N} = 1.0$$

$$N_{Rk,c} = 53.8 \cdot \frac{308,025}{140,625} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 117.9 \text{ кН}$$

$$k_8 = 2$$

$$V_{Rk,cp} = 2 \cdot 117.9 = 235.7 \text{ кН}$$

ETA-23/0277, Табл. C5

$$\eta_{k,c,V,fat,n} = 0.50$$

$$\Delta V_{Rk,cp,0,n} = 0.50 \cdot 235.7 = 117.9 \text{ кН}$$

EOTA TR 061, Cl. 2.1

$$\gamma_{M,c,V,fat} = 1.5$$

$$\Delta V_{Rd,cp,0,n} = \frac{117.9}{1.5} = 78.6 \text{ кН}$$

$$\Delta V_{Ed,cp} = 7 \text{ кН}$$

$$\frac{\Delta V_{Ed,cp}}{\Delta V_{Rd,cp,0,n}} = \frac{7}{78.6} = 0.09 \leq 1.0$$

Перевірку виконано ✓

Перевірка при комбінованій дії розтягу та зсуву:

Руйнування сталі:

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

Відношення між діючим зусиллям і опором при розтягу: $\beta_N = 0.70 \leq 1.0$ Відношення між діючим зусиллям і опором при зсуві: $\beta_N = 0.43 \leq 1.0$

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha = 0.70^{0.7} + 0.43^{0.7} = 1.33.$$

ETA-23/0277, Табл. C6

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha \geq 1$$

Перевірку не виконано ✗

Руйнування, відмінне від сталевого:

EC2-4, Додаток D, розд. D.4.4

Відношення між діючим зусиллям і опором при розтягу: $\beta_N = 0.40 \leq 1.0$ Відношення між діючим зусиллям і опором при зсуві, $\beta_v = 0.09 \leq 1.0$ $\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha$

$$= 0.40^{1.5} + 0.09^{1.5} = 0.28.$$

ETA-23/0277, Табл. C6

$$\beta_N^\alpha + \beta_v^\alpha \leq 1$$

Перевірку виконано ✓

6.12.3.2 Приклад розрахунку для низькочастотного втомного навантаження

Вимога проєкту: така ж, як у попередньому прикладі, за винятком кількості циклів навантаження.У цьому випадку кількість циклів втомного навантаження приймається як 1×10^6 а розрахунок виконано за методом I (Повний метод) згідно з EOTA TR 061 [24].

Розрахункові перевірки виконуються з урахуванням жорсткої опорної пластини згідно з EC2-4 [1], EOTA TR 061 [24]; характеристичні опори взято з ETA-23/0277 [50]. Детальні формули для визначення опорів різних режимів руйнування наведено в розділі 6.12.

Перевірка при розтягувальному навантаженні:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за такою формулою:

$$\frac{\Delta N_{Ed}}{\psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,0,n}} \leq 1$$

$$\Delta N_{Rd,s,0,n} = \frac{\Delta N_{Rk,s,0,n}}{\gamma_{M,s,N,fat}}$$

$$\Delta N_{Rk,s,0,n} = 31.4 \text{ кН}$$

$$\gamma_{M,s,N,fat} = 1.39$$

$$\Delta N_{Rd,s,0,n} = \frac{31.4}{1.39} = 22.6 \text{ кН}$$

$$\Delta N_{Ed} = 5.2 \text{ кН}$$

$$\psi_{FN} = 0.5$$

$$\frac{\Delta N_{Ed}}{\psi_{FN} \cdot \Delta N_{Rd,s,0,n}} = \frac{5.2}{0.5 \cdot 22.6} = 0.46 \leq 1$$

EOTA TR 061, Табл. 2.2

ETA-23/0277, Табл. C1

EOTA TR 061, розд. 2.1

ETA-23/0277, Табл. C1

Перевірку виконано 

Примітка. Порівняно з попереднім прикладом розрахунковий опір сталі при розтягу зріс завдяки меншій очікуваній кількості циклів навантаження.

Комбіноване виривання й виколювання бетонного конуса:

Опір комбінованому вириванню й виколюванню бетонного конуса, розрахований у попередньому прикладі, залишається чинним.

Руйнування бетонного конуса:

Опір руйнуванню бетонного конуса, розрахований у попередньому прикладі, залишається чинним.

Перевірка при зсувному навантаженні:

Руйнування сталі:

Опір руйнуванню сталі розраховується для найбільш навантаженого анкера за такою формулою:

$$\frac{\Delta V_{Ed}}{\psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,0,n}} \leq 1$$

$$\Delta V_{Rd,s,0,n} = \frac{\Delta V_{Rk,s,0,n}}{\gamma_{M,s,V,fat}}$$

$$\Delta V_{Rk,s,0,n} = 17.1 \text{ кН}$$

$$\gamma_{M,s,V,fat} = 1.367$$

$$\Delta V_{Rd,s,0,n} = \frac{17.1}{1.367} = 12.5 \text{ кН}$$

$$\Delta V_{Ed} = 1.75 \text{ кН}$$

$$\psi_{FV} = 0.50$$

$$\frac{\Delta V_{Ed}}{\psi_{FV} \cdot \Delta V_{Rd,s,0,n}} = \frac{1.75}{0.50 \cdot 12.5} = 0.29 \leq 1$$

EOTA TR 061, Табл. 2.3

ETA-23/0277, Табл. C2

EOTA TR 061, рівн. (3)

ETA-23/0277, Табл. C5

Перевірку виконано 

Примітка: У порівнянні з попереднім прикладом опір сталі при зсуві збільшився через меншу кількість очікуваних циклів навантаження.

Руйнування бетону від виколювання:

Опір руйнуванню бетону від виколювання, розрахований у попередньому прикладі, залишається чинним.

Примітка. Розрахунок задовольняє вимоги для низькоциклового втомного навантаження з використанням тих самих анкерів. У практичних умовах оцінка очікуваної кількості циклів навантаження (у цьому випадку 1×10^6) може бути корисною для досягнення більш оптимізованого проектного рішення згідно з методом I із EOTA TR 061 [24].

6.13 Розрахунок пост-встановлених кріплень за EC2-4 (спрощені методи)

У додатку G стандарту EC2-4 [1] визначено три методи розрахунку пост-встановлених анкерів у граничному стані несучої здатності, показані на рис. 6.55.



Рис. 6.55 — Методи розрахунку згідно з EC2-4

6.13.1 Розрахунок за методом А

Метод А охоплює перевірку за всіма відповідними типами руйнування при навантаженні на розтяг і зсув, як пояснено в попередніх розділах цього розділу.

6.13.2 Розрахунок за методом В

У цьому методі використовується одне характеристичне значення опору — F_{Rk}^0 та розрахунковий опір $F_{Rd} = F_{Rk}^0 / \gamma_m$ визначається за формулою:

$$F_{Rd}^0 = F_{Rk}^0 / \gamma_m \quad \text{EC2-4, рівн. (G.1)}$$

Коли відстані між анкерами або до краю елемента менші за критичні, враховуються впливові коефіцієнти.

Геометричний коефіцієнт впливу: A_c / A_c^0 і ψ_s

Коефіцієнти впливу: ефект густо розташованої арматури — ψ_{Re} вплив міцності бетону на стиск — ψ_c .

Модифікований розрахунковий опір з урахуванням кількості навантажених анкерів n визначається за формулою:

$$F_{Rd} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_c}{A_c^0} \cdot \psi_s \cdot \psi_{Re} \cdot \psi_c \cdot F_{Rd}^0 \quad \text{EC2-4, рівн. (G.2)}$$

Опір анкера на зсув V_{Rks} / γ_m обмежується значенням F_{Rd} .

Примітка. Метод В за своєю суттю подібний до колишнього методу Карра.

Примітка. Для анкерів на основі клеїв рівняння додатково множиться на коефіцієнт тривалого навантаження ψ_{sust} .

6.13.3 Розрахунок за методом С

Цей метод не враховує менші за критичні відстані між анкерами або до краю елемента. Усі інші розрахункові критерії аналогічні методу В, наведеному в розділі 6.13.2.

6.14 Розрахунок надлишкових неконструктивних кріплень згідно з EC2-4 та CEN/TR 17079

Залежно від специфічних вимог до безпеки споруди систему кріплення формують так, щоб навантаження передають у матеріал основи **або через окремі анкери/групу кріплень, або через багатоанкерну систему у надлишковому виконанні**. Одиночне кріплення передбачає фіксацію елемента одним анкером, тоді як надлишкове кріплення використовує додаткові анкери для підвищення стійкості та безпеки. **Якщо один анкер відмовляє** або має надмірні переміщення, надлишкова неконструктивна система покладається на елемент кріплення, здатний перерозподілити навантаження від анкеру, що працює недостатньо ефективно, **на сусідні анкери**.

EC2-4 [1] охоплює розрахунок пост-встановлених кріплень для статично визначуваних і статично невизначуваних конструктивних та неконструктивних з'єднань. CEN/TR 17079 [51] визначає детальний обсяг застосування пост-встановлених анкерів для кріплення статично невизначуваних неконструктивних легких систем за таких умов:

- У кожній точці кріплення може бути встановлено один або кілька анкерів, а елементи **з'єднуються з мінімум трьома точками кріплення**.
- Коли в одній точці кріплення використовується більше одного анкера, **усі кріплення повинні бути одного типу, розміру та довжини**.
- Для надлишкових систем **елемент кріплення має бути достатньо жорстким**, щоб передавати навантаження на суміжні анкери без впливу на роботу в умовах SLS та ULS, як це потрібно.

Примітка: Неконструктивні легкі елементи включають трубопроводи, підвісні стелі, фасадні системи тощо.

Інші релевантні деталі — тип анкерів, їхні розміри та матеріали, навантаження на кріплення, міцність бетону, габарити бетонних елементів тощо — наведено в CEN/TR 17079 [51].

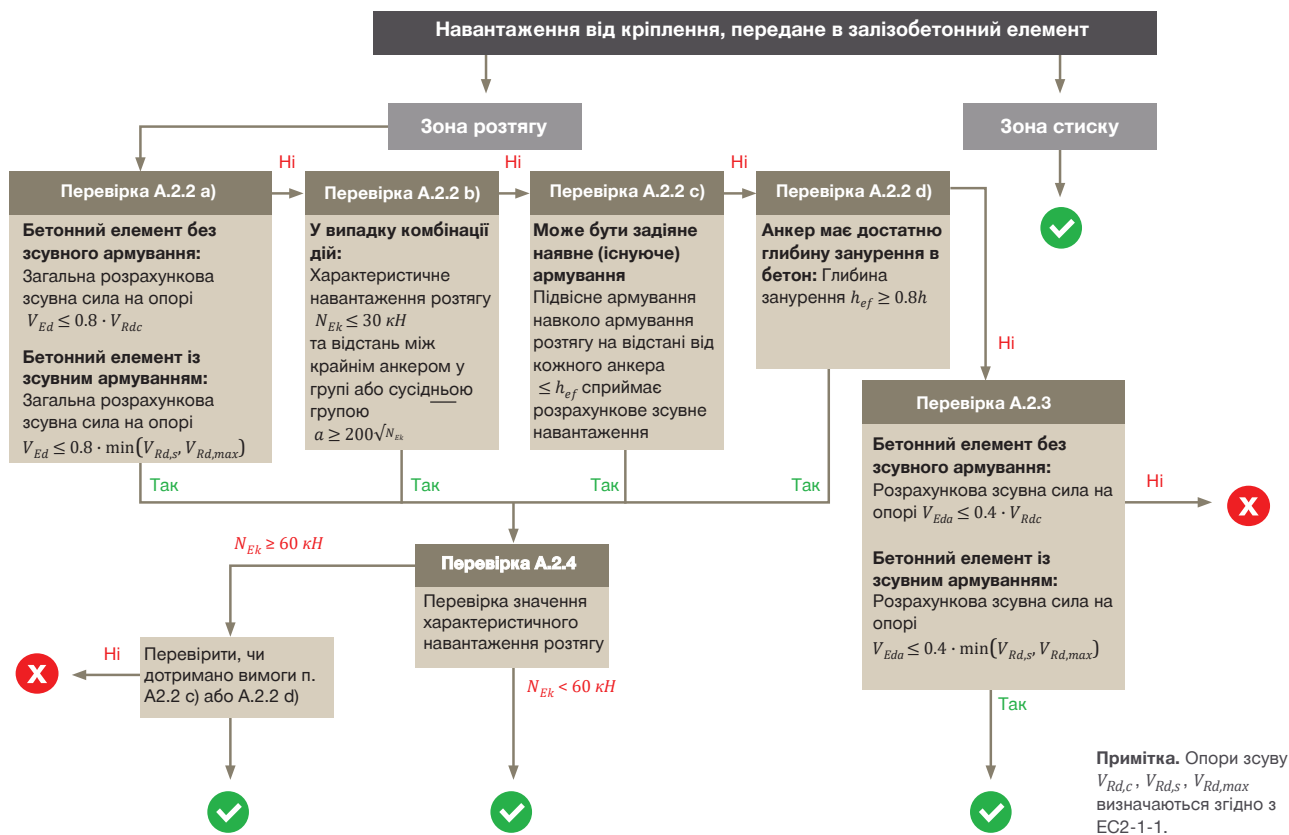
Перевірка охоплює розрахункове навантаження, обмежене значеннями 2,0 кН та 3,0 кН для систем із мінімум трьома та чотирма точками кріплення відповідно (див. CEN/TR 17079 [51], таблиця 4.1).

Отже, перевірка точок кріплення після перерозподілу навантажень не потрібна.

У межах цього діапазону розрахункових навантажень кріплення проектується згідно з EC2-4 [1], додаток G (методи A і B), як описано в попередніх розділах.

6.15 Перевірка бетонних елементів на дії від кріплень

Пост-встановлені анкери передають розрахункові навантаження від сталевого профілю з опорною пластиною на бетонний елемент. Необхідно перевірити, чи здатний бетонний елемент сприймати навантаження, що передаються анкерами, відповідно до принципів EC2-1-1 [27]. Додаток A EC2-4 [1] визначає обсяг перевірки на дію зсувних навантажень у бетонному елементі. Те саме показано на рис. 6.56.



- ✓ Залізобетонний елемент перевірено на дію зусиль, переданих кріпленням.
- ✗ Залізобетонний елемент не перевірено на дію зусиль, переданих кріпленням

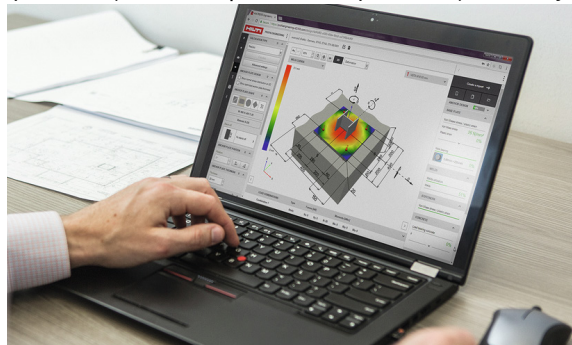
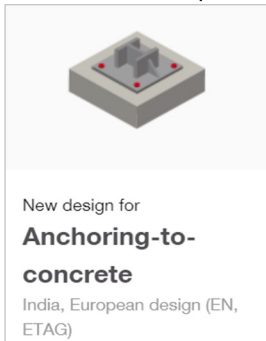
Рис. 6.56 — Перевірка бетонного елемента згідно з EC2-4 [1], додаток А

7. PROFIS ENGINEERING SUITE — ПРОЄКТУВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ

7.1 Вступ

Пост-встановлені анкери можна розраховувати вручну, однак отримання оптимізованого рішення може зайняти багато часу. У таких випадках необхідним стає використання спеціального програмного забезпечення, яке дозволяє інженерам швидко знаходити найоптимальніше рішення, уникаючи повторних розрахунків і ручних помилок. **PROFIS Engineering** — це зручне хмарне програмне забезпечення для розрахунків конструкцій, яке усуває ці проблеми. Воно містить модулі для різних сфер будівництва, зокрема для з'єднань **сталь-бетон, бетон-бетон і сталь-цегляна кладка**. Програма надає інженерам інструменти для аналізу та оптимізації рішень із кріплення, розрахунку опорів кріплень за різних типів навантажень і граничних умов, а також для формування детальних звітів про розрахунок. Вона охоплює різні методи проєктування та види навантажень (статичні, сейсмічні, вогневі та втомні), розглянуті в попередніх розділах. Використання PROFIS Engineering дозволяє зробити процес розрахунку швидшим і точнішим. Загальна ефективність зростає, а розроблені рішення стають безпечнішими та надійнішими для будівельних проєктів. Програмне забезпечення гарантує, що зазначені системи пост-встановленого кріплення відповідають чинним стандартам і нормам, забезпечуючи надійність і безпечність конструкційних з'єднань.

Крім того, PROFIS Engineering містить функції для візуалізації та представлення результатів розрахунку — зокрема, 3D-відображення зусиль і конструктивних елементів, а також 2D-перерізи, що демонструють необхідне армування та деталі. Програма також формує звіти з детальними обчисленнями. Ефективність рішення (тобто коефіцієнт використання) може бути відображена миттєво.



Інтерфейс PROFIS Engineering для проєктування з'єднання типу S2C

Інтерфейс PROFIS — приклад застосувань типу S2C

Рис. 7.1 — Модулі пакета PROFIS Engineering для проєктування з'єднань типу S2C

7.2 Чому варто використовувати PROFIS Engineering Suite?

PROFIS Engineering має низку переваг, які роблять його пріоритетним вибором для інженерів-практиків. Це повноцінне рішення для застосувань типу S2C (steel-to-concrete) — від створення моделі до формування розрахунків і звітів. Усі типи застосувань, розглянуті в розділі 2 цього довідника, можуть бути спроектовані в PROFIS ефективно, швидко, точно й прозоро. Програмне забезпечення забезпечує комплексний структурний аналіз з урахуванням усіх методів розрахунку, таких як EC2-4 [1], EOTA TR 061 [24], EOTA TR 082 [46] тощо. Результати ручних розрахунків, що розглядають різні варіанти рішень, можна порівняти з результатами, отриманими у програмі, завдяки детальному звіту про розрахунок, який формується автоматично. Це дозволяє знайти найоптимальніше та найдоцільніше рішення. Ключові можливості PROFIS Engineering узагальнено на рис. 7.2.



Рис. 7.2 — PROFIS як основне ПЗ для повного проєктування опорних плит і анкерних з'єднань типу S2C

7.3 Розрахунок пост-встановлених анкерів для застосувань типу S2C у PROFIS

У цьому розділі наведено послідовність розрахунку та підсумкові результати для пост-встановлених анкерів і опорної плити.

7.3.1 Властивості бетону та умови встановлення

Властивості бетону вибираються зі списку в PROFIS. Доступний діапазон класів бетону: від C12/15 до C50/60. Геометрію матеріалу основи задають зміною довжини, ширини та товщини (рис. 7.3). Кромки визначаються вибором опції «Infinity» або введенням конкретних значень у напрямках X і Y. Усі ці параметри можна змінювати, натискаючи безпосередньо на геометрію.

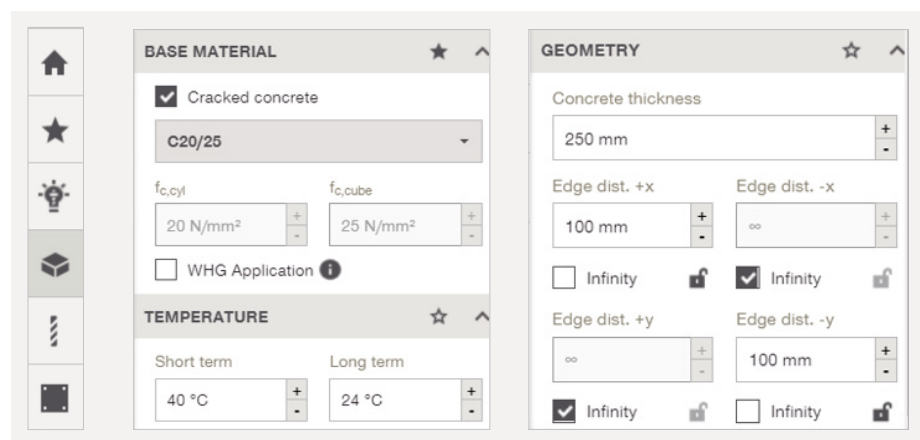


Рис. 7.3: Вибір матеріалу основи (бетон) і задання геометричних параметрів у PROFIS.

Умови монтажу визначають вибір температури під час встановлення або ін'єктування хімічного розчину (див. таблицю 5.2). Також задаються метод свердління, стан отворів (сухі/вологі/заповнені водою) та метод затягування (описано в розділі 8). Ця частина розрахункової процедури впливає на вибір відповідного продукту з чинним ETA, а також на параметри встановлення. Інтерфейс PROFIS Engineering показано на рис. 7.4.

Примітка: PROFIS дає змогу вводити власні значення класів бетону (наприклад, вище C50/60), якщо для відповідного продукту доступні технічні дані.

Рис. 7.4 — Визначення умов монтажу в PROFIS

7.3.2 Армування бетону та додаткове армування

PROFIS допомагає проектувальнику врахувати вплив армування, якщо воно присутнє в бетонному елементі, відповідно до вимог EC2-4 [1] (рис. 7.5). У програмі можна змодельовати різне розташування арматури та врахувати його вплив на різні моделі руйнування. Також можна задати наявність додаткового армування (як описано в розділі 6.7) для досягнення оптимізованого рішення при розрахунку.

Рис. 7.5 — Вибір параметрів армування в PROFIS

7.3.3 Вибір типу опорної пластини

Опорна сталева пластина визначається за формою — прямокутною, квадратною, круглою, трапецієподібною тощо — та за класом сталі. Клас матеріалу можна обрати зі стандартного списку, наведеного в довіднику, або задати індивідуальний клас сталі.

У такому випадку користувач самостійно вводить границю плинності, межу міцності на розтяг, модуль пружності, густину та коефіцієнт Пуассона. Геометричні параметри опорної пластини задаються шляхом введення довжини, ширини та товщини. Положення пластини можна регулювати за допомогою параметра Rotation (обертання), а умови встановлення з відступом від основи (Stand-off) вибираються зі списку доступних параметрів у PROFIS

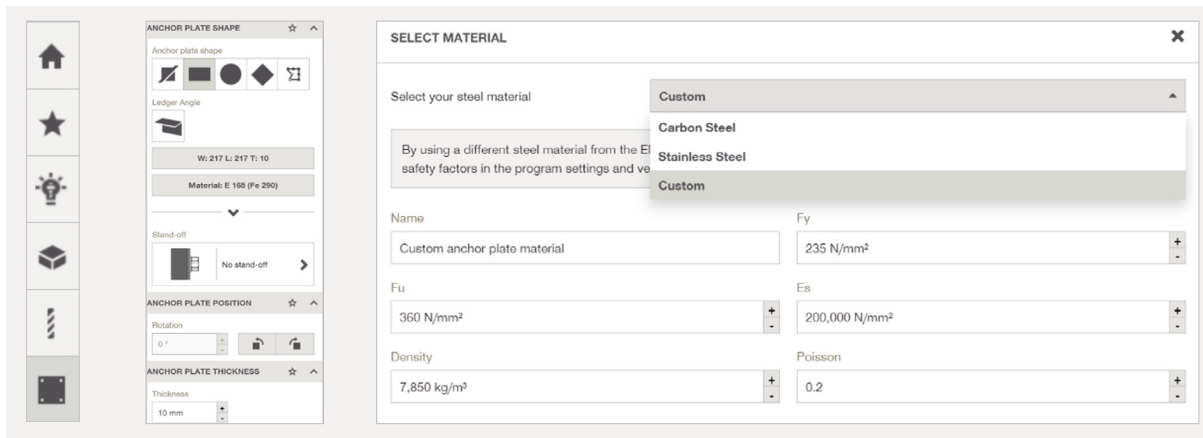


Рис. 7.6: Визначення анкерної пластини в PROFIS

7.3.4 Вибір сталевого профілю

Сталевий профіль, який з'єднується з опорною пластиною, задається відповідно до національних стандартів, доступних у PROFIS. Клас сталі для профілю визначається так само, як і для опорної пластини, розглянутої в попередньому розділі. Додатково можна задати ребра жорсткості, а положення профілю визначається за допомогою ексцентриситетів у напрямках X та Y (рис. 7.7).

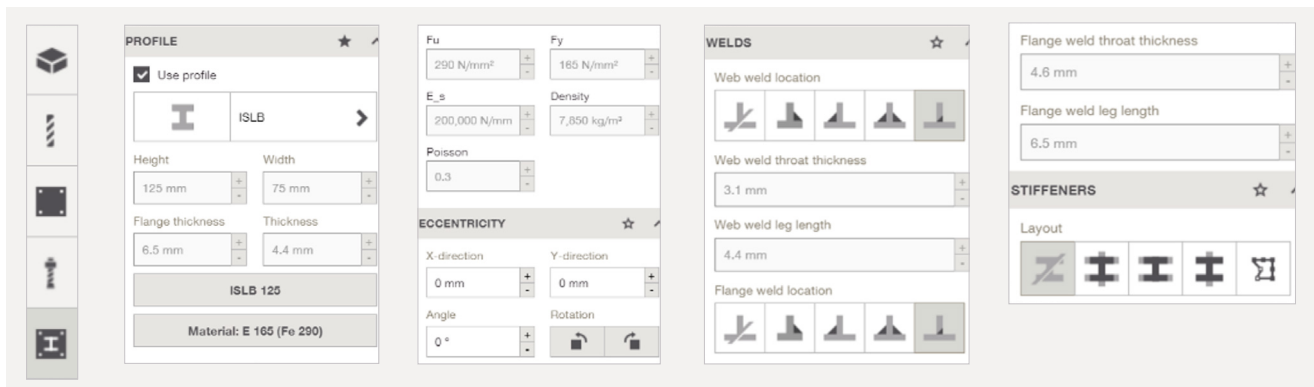


Рис. 7.7 — Визначення сталевих профілів і ребер жорсткості в PROFIS

7.3.5 Типи розрахунку, доступні в PROFIS: жорстка та гнучка опорна пластина

За замовчуванням розрахунок пост-встановлених анкерів у PROFIS виконується згідно з EC2-4 [1], приймаючи **опорну пластину як жорстку** (див. розділ 6.1). Хоча така пластина розглядається як ідеально жорстка, **у реальних умовах повна відсутність деформацій неможлива**. PROFIS дозволяє оцінити, наскільки припущення про жорстку пластину відрізняється від реальної поведінки конструкції. На рис. 7.8 наведено приклад, який демонструє різницю у зусиллях в анкерах при розрахунку з урахуванням жорсткої та гнучкої пластини.

Для прикладу було вибрано з'єднання, на яке діє сила розтягу 10 кН і зсувне зусилля 10 кН у напрямку X. Товщина опорної пластини становить 20 мм, а група містить 4 анкери.

Максимальна деформація гнучкого з'єднання становить 0,1 мм, і навіть за такої малої деформації зусилля в анкерах може збільшуватись до 48 %, що може бути важливим для проектувальника. Для визначення фактичних зусиль в анкерах і розрахунку опорної пластини застосовується **аналіз методом компонентно-складових скінченних елементів (CBFEM)**, який забезпечує числові та графічні нелінійні результати. Детальнішу інформацію наведено в [52] і [53].

Еквівалентна жорстка опорна пластина (CBFEM)		Опорна пластина, розрахована методом (CBFEM)
Напруження анкерів		
Анкер 1	2.5 kN	3.7 kN (48%)
Анкер 2	2.5 kN	3.7 kN (48%)
Анкер 3	2.5 kN	3.7 kN (48%)
Анкер 4	2.5 kN	3.7 kN (48%)

Рис. 7.8: Зусилля розтягу в анкерах (жорстка та гнучка опорна пластина)

Метод CBFEM визначає гнучкий розрахунок опорної пластини, а також дозволяє перевіряти деформації та напруження з використанням цього аналізу (див. розділ 6.3). CBFEM — це поєднання методу компонентів і методу скінченних елементів [54]. Він забезпечує детальний та точний аналіз елементів із урахуванням таких факторів, як тріщиноутворення, нелінійність і перерозподіл навантаження. У розділі Advanced settings користувач може задавати параметри сітки (кількість елементів, максимальний розмір елемента, кількість ітерацій) і результати (ULS, деформації тощо). Оскільки CBFEM розділяє компонент на окремі елементи, можливо отримати точні результати, орієнтовані на аналіз методом скінченних елементів, і моделювати реальну поведінку конструкції. Сталева пластина розбивається на дрібні елементи, анкери моделюються як нелінійні пружини розтягу, а бетон — як пружина стиску. Ребра жорсткості зварного з'єднання також можуть бути враховані, що дозволяє розподіляти напруження з більшою точністю (рис. 7.9 і 7.10). Girmе et al. [54] виконали розширене дослідження анкерів Hilti, розрахованих у PROFIS, для аналізу результатів за моделями жорсткої та гнучкої опорної пластини.

Примітка: CBFEM може враховувати будь-які комбінації навантаження та ексцентриситет профілю, на відміну від жорсткої системи.

Примітка: Єдиної моделі жорсткої системи не існує — вона залежить від того, яку величину деформації дозволено для конкретного з'єднання.

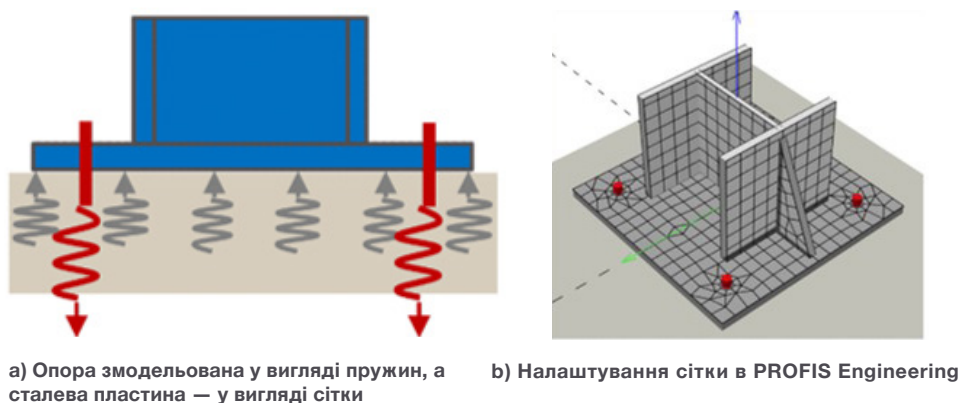
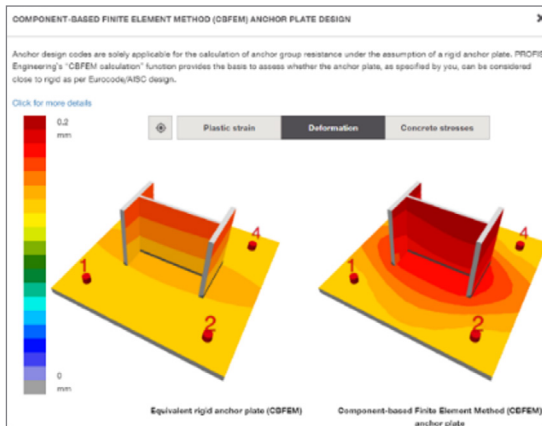


Рис. 7.9: Вихідні дані та моделювання в CBFEM



а) Результати аналізу CBFEM у PROFIS

б) Кроки, які можна виконати для забезпечення жорсткості

Fig. 7.10: PROFIS helps make detail calculations for CBFEM

7.3.6 Підбір відповідного анкера для конкретного застосування в PROFIS

Дизайнер може обирати типові анкерні рішення в PROFIS, задаючи кілька ключових параметрів. «Тип застосування», «умова навантаження» та «умови встановлення» відіграють важливу роль у виборі найдоречнішої анкерної системи. На рис. 7.11 показано, як PROFIS може допомогти проектувальнику обирати серед типових типів анкерів для конкретних застосувань. Додатково PROFIS пропонує фільтр для вибору типів анкерів за товщиною кріплюваного елемента, діаметром отвору, корозійною стійкістю, методом свердління та очищення тощо.

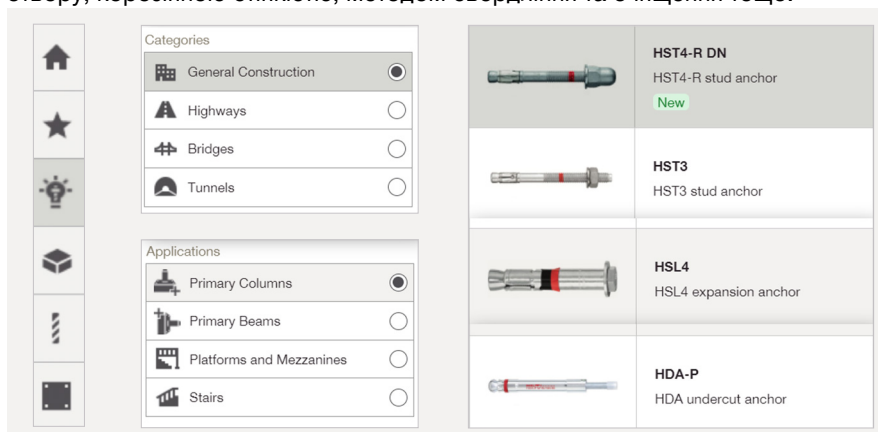


Рис. 7.11: Вибір анкерів — основні параметри в PROFIS

Вибір анкера включає визначення діаметра та глибини закладення. Схему розташування анкерів у групі можна задати за допомогою стандартних конфігурацій у PROFIS (див. рис. 7.12) або створити індивідуальне розташування з кількістю анкерів до 99. Користувач також може визначити, чи є отвори круглими або подовженими, а також чи заповнений кільцевий зазор, чи ні.

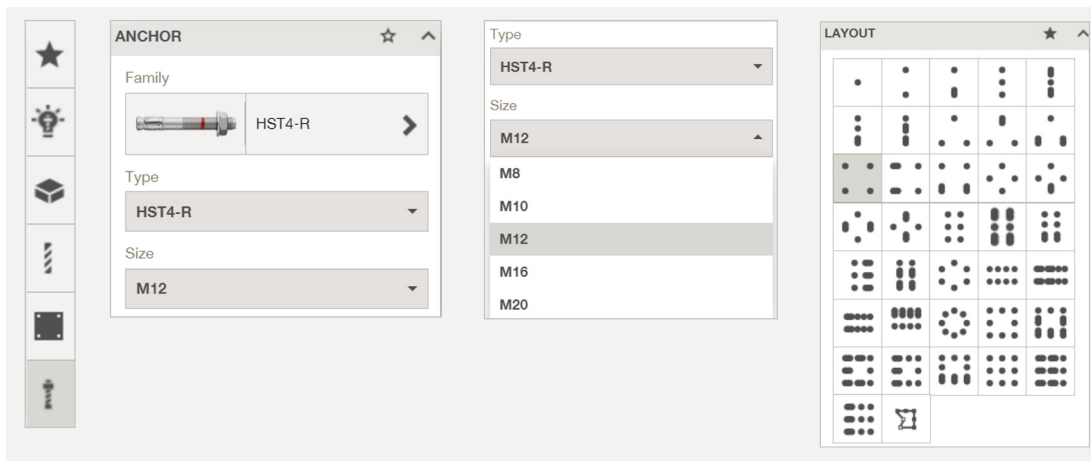


Рис. 7.12: Тип анкера, його властивості та схема розташування в PROFIS

Примітка: PROFIS містить усі оновлені технічні дані з відповідних ETA або тих, що видані Hilti. Користувач може завантажити ETA для ознайомлення.

7.3.7 Типи навантажень у PROFIS

У цьому розділі наведено параметри для типів навантажень, їхніх значень, стандартів розрахунку та настанов, необхідних для виконання проєктування й проведення аналізу. Тип навантаження (рис. 7.13) можна вибрати як статичне / сейсмічне / вогневе / втомне (див. розділи 6.6, 6.10, 6.11, 6.12). Значення зусиль розтягу, зсуву або моментів можуть бути імпортовані з наявного файлу, іншого інтегрованого програмного забезпечення або введені вручну користувачем. Значення навантажень, задані користувачем, ураховуються як розрахункові. Стандарт розрахунку вибирається з випадаючого меню: EC2-4 [1], EOTA TR 061 [24], EOTA TR 082 [46], метод Hilti (SOFA) або інші місцеві стандарти (див. розділ 6.5). Усі значення навантажень також можуть бути введені безпосередньо у визначені поля 3D-редактора. PROFIS дає змогу одночасно перевіряти кілька комбінацій навантажень.

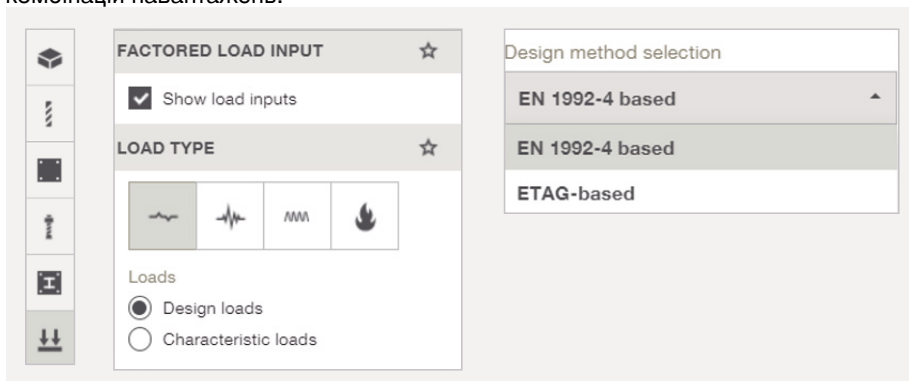
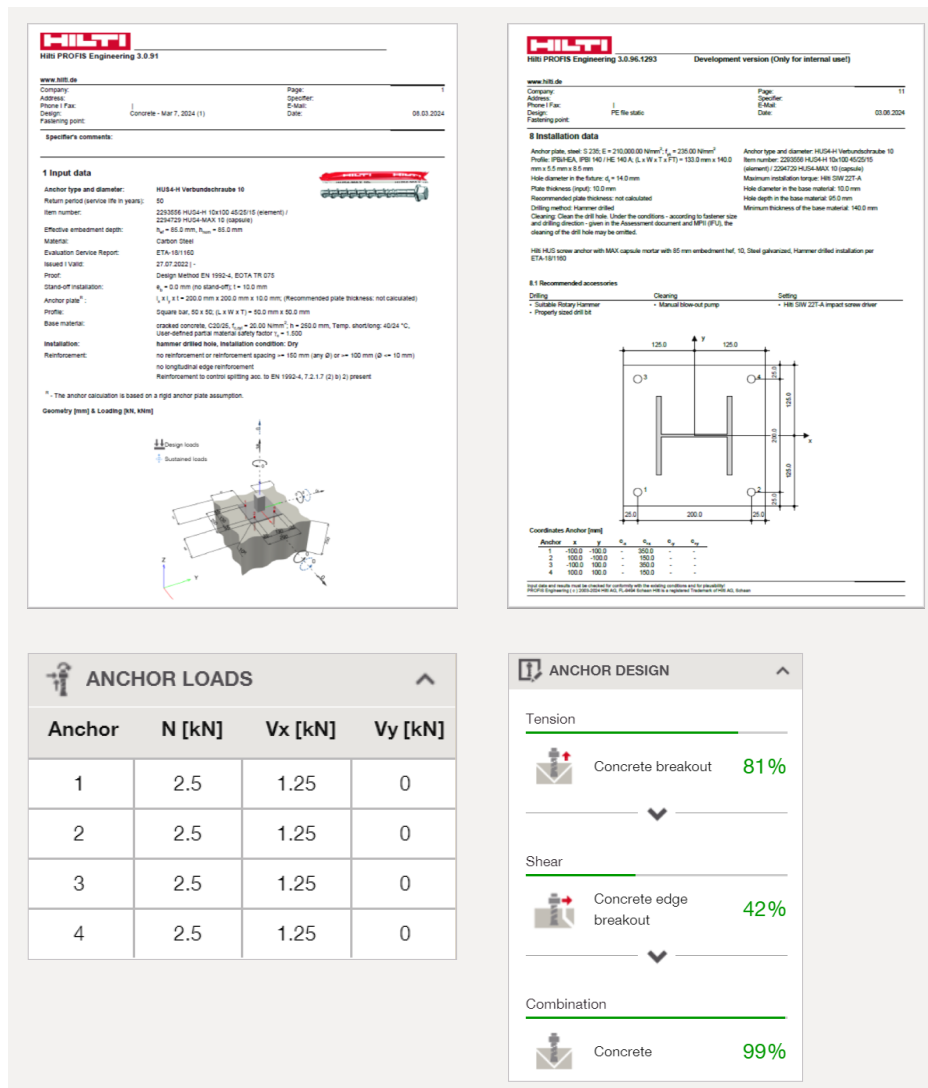


Рис. 7.13: Вибір умов навантаження в PROFIS

7.3.8 Результати розрахунку, звіти та креслення

Після того як користувач знаходить оптимальне проєктне рішення, повний звіт можна згенерувати одним натисканням кнопки. Цей звіт містить усі вхідні дані (геометрію, матеріали, навантаження тощо), навантаження на кожен анкер (розтяг / стиск) і детальні розрахунки для всіх перевірок. У звіті також відображаються 3D- та 2D-перерізи з глибинами закладення, які можна використовувати для проєктної документації. Крім того, у звіт включено попередження та настанови щодо монтажу. PROFIS також дозволяє переглядати результати без формування звіту, відображаючи відсоток використання для кожного типу руйнування у правій частині інтерфейсу користувача (див. рис. 7.14).

Примітка: Усі приклади розрахунків, наведені в цьому посібнику, можуть бути відтворені в PROFIS.



ANCHOR LOADS

Anchor	N [kN]	Vx [kN]	Vy [kN]
1	2.5	1.25	0
2	2.5	1.25	0
3	2.5	1.25	0
4	2.5	1.25	0

ANCHOR DESIGN

Tension

Concrete breakout **81%**

Shear

Concrete edge breakout **42%**

Combination

Concrete **99%**

Рис. 7.14: Вихідні дані розрахунку та файл звіту з PROFIS

8. Монтаж і огляд

8.1 Вступ

Монтаж є практичним результатом етапів проєктування та планування. На рис. 8.1 наведено основні ключові аспекти, які забезпечують якісне виконання монтажу, що вимагає дотримання кількох важливих принципів.



Рис. 8.1: Основні етапи, яких слід дотримуватись для правильного монтажу

Вибір правильного продукту має вирішальне значення. Однак навіть найкращий анкер може втратити свою ефективність через неправильний монтаж. Помилки, як-от недостатня глибина свердління, неякісне очищення отвору, неправильний момент затягування тощо, можуть призвести до серйозних наслідків — навіть якщо анкер був обраний відповідно до проєкту конструктора. Згідно з EC2-4 [1], проєктувальник повинен вказувати всі параметри монтажу разом з анкером, щоб уникнути неправильного встановлення на об'єкті. Інструкції виробника слід уважно перевіряти та дотримуватись їх, оскільки ці документи містять процедури монтажу для конкретного продукту та враховують будь-які додаткові спеціальні вимоги. Це також допомагає у виборі сертифікованого продукту, що відповідає стандартам і придатний для конкретного застосування. Детальний опис процедур оцінки та кваліфікації продукції наведено в розділі 4.2, а перелік сертифікованих продуктів Hilti — у розділі 5.

Інспекція пост-встановлених анкерів є важливим етапом контролю безпеки, який забезпечує якість монтажу. Деталі виконання інспекції після встановлення розглянуто далі в цьому розділі.

8.2 Вимоги Єврокоду щодо правильної специфікації

Спосіб монтажу анкера, тип матеріалу основи та його розташування можуть впливати на несучу здатність і деформаційну поведінку з'єднання. Будь-які відхилення від процедури, рекомендованої виробником, можуть негативно вплинути на роботу анкера. Цей вплив залежить від типу анкера та конкретного продукту.

EC2-4 [1] встановлює, що креслення або додаткові розрахункові документи, які надає конструктор, повинні містити:

- **Розташування анкерів, включно з допусками:** координати базових пластин із зазначенням відстані до кромки.

- **Кількість і тип анкерів:** різні типи кріплень мають відмінні принципи роботи, що може впливати на їхню ефективність.
- **Відстань між анкерами та відстань до краю, включно з допусками:** кожен анкер має визначені значення кроку та відстані до краю для тріщинуватого й нетріщинуватого бетону.
- **Товщина елемента кріплення та діаметр монтажних отворів:** товщина опорної пластини є важливим параметром при перевірці жорсткості. Навантаження на анкер може змінюватись залежно від жорсткості елемента, що впливає і на загальну необхідну довжину анкера.
- **Положення елемента кріплення, включно з допусками:** ребра жорсткості та профілі також впливають на жорсткість елемента, тому проєктувальник має вказувати всі приєднані частини конструкції в деталях.
- **Максимальна товщина шару розчину між основним матеріалом і бетоном:** висота відступу має бути зазначена разом із відомостями про матеріал заповнення (наприклад, розчин або теплоізоляційний шар), оскільки це впливає на роботу анкера під час згину.
- **Інструкції з монтажу:** документи ETA містять конкретні вимоги до процесу монтажу — свердління, очищення, затягування тощо. Недотримання методики, зазначеної в ETA, може призвести до різкого зниження ефективності анкера або навіть катастрофічних наслідків.

Умови експлуатації — такі як середовище, температура, тип навантаження, тріщинуватий чи нетріщинуватий бетон — були детально розглянуті в попередніх розділах.

8.3 Які етапи монтажу має виконати підрядник?

Монтаж опорної пластини для з'єднання сталевих елементів із бетонною основою може відрізнятися залежно від вимог конкретного застосування. Однак основні етапи процесу залишаються незмінними. На рис. 8.2 подано огляд повного циклу робіт — від проєктування до встановлення й перевірки.

Компанія Hilti пропонує широкий комплекс рішень, які забезпечують безперервну підтримку на всіх етапах процесу — від проєктування до експлуатації.



Рис. 8.2: Схема процесу встановлення пост-встановлених анкерів

Під час проєктування слід враховувати обмеження, пов'язані з умовами монтажного майданчика. Рішення з пост-встановленими анкерами забезпечують максимальну гнучкість і ефективність виконання робіт. Однак занадто загальні вимоги без урахування реальних умов на об'єкті можуть призвести до ризиків, наприклад, до зменшення міцності зчеплення хімічних анкерів у разі зміни методу буріння чи очищення.

У наступних підрозділах наведено огляд основних етапів монтажу.

8.3.1 Розміщення опорної пластини / отворів

Точне розташування опорної пластини має вирішальне значення, оскільки навіть незначне зміщення може призвести до серйозних проблем зі структурною безпекою — розрахункові навантаження можуть виявитися некоректними через виникнення небажаних ексцентриситетів. Значне відхилення отвору від вертикальної осі впливає на передачу навантажень через анкер (допускається відхилення до $\pm 5^\circ$ згідно з EAD 330232 [21]). Найзручніше визначати положення опорної пластини за допомогою вимірювальних інструментів Hilti, щоб точно позначити її місце та розташування анкерів на бетонній поверхні. Альтернативно можна використовувати лазери, наприклад обертові або мультипроменеві лазери Hilti. Для точного розташування опорної пластини також важливі вертикальне вирівнювання та горизонтальне нівелювання.

Крім того, перед свердлінням необхідно перевірити основу на відсутність арматури, труб або пустот, а також точно розмітити місця майбутніх отворів під анкери. Hilti пропонує широкий асортимент вимірювальних інструментів і сканерів для ефективної роботи на будівельному майданчику. Деякі з них показано на рис. 8.3. Також Hilti має роботизований тахеометр із великим радіусом дії, який дозволяє працювати одній людині, забезпечуючи високу точність вимірювання кутів (рис. 8.4).



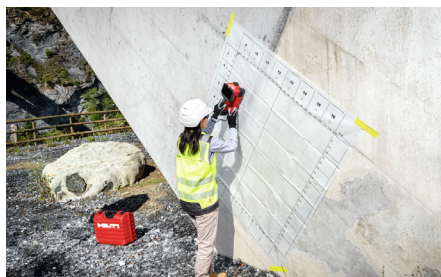
Рис. 8.3 — Вимірювальні інструменти та сканери для визначення положення отворів



Рис. 8.4 — Використання лазера на будівельному майданчику під час розмітки отворів

Розташування існуючої арматури та інших вбудованих елементів зазвичай визначають за допомогою методів сканування, які поділяються на такі категорії:

- (a) Сканери, що виявляють феромагнітні матеріали за допомогою технології електромагнітної індукції (EMI), наприклад Hilti PS 300 (див. рис. 8.5 а, b). Для арматури, розташованої на глибині до 200 мм від поверхні бетону, такі сканери визначають місце розташування стрижнів і можуть оцінити товщину захисного шару бетону та діаметр арматури.
- (b) Сканери, що використовують імпульсну радарну технологію (PRT) для виявлення як феромагнітних, так і немагнітних вбудованих елементів, наприклад металів, попередньо напружених тросів, неметалевих об'єктів (деревина, проводка тощо) та пустот. Прикладом є Hilti PS 1000-X (див. рис. 8.5 с, d).



а) Сканування феромагнітних об'єктів



б) Hilti PS 300 Ferrosan



с) Сканування феромагнітних і немагнітних об'єктів



д) Hilti PS 1000 із планшетом

Рис. 8.5 — Обладнання для сканування феромагнітних і немагнітних об'єктів для структурної перевірки

8.3.2 Свердління отворів у бетоні

Після завершення розмітки можна переходити до свердління отворів у бетоні. Важливо, щоб проєктувальник визначив метод свердління ще на етапі проєктування, оскільки правильний вибір технології є критичним для забезпечення надійності роботи пост-встановлених анкерів. Деталі наведено на рис. 8.6.

Інструкції з монтажу додаються до всіх анкерних виробів Hilti. Крім того, свердління через існуючу арматуру або інші вбудовані елементи, як правило, не слід виконувати без попереднього погодження зі структурним інженером або відповідним компетентним органом.

Точне розташування

Дозволяє точно встановити анкери в бетоні, забезпечуючи правильне вирівнювання та точне розташування анкерів відносно конструкції.

Очищення отворів

За правильного методу очищення можна висвердлити отвір абсолютно без пилу. Якщо анкер встановлюється без свердління, отвір не може бути очищений від сміття, що впливає на надійність кріплення.

Сумісність

Забезпечує відповідність типу анкера діаметру та глибини отвору. Під час свердління потрібно враховувати вимоги виробника для кожного типу анкера.



Контроль глибини

Дає змогу точно контролювати глибину заглиблення, тобто відстань між головкою та нижньою частиною анкера. Це суттєво впливає на ефективність його роботи.

Зменшення ризику утворення тріщин

Ймовірність пошкодження або розтріскування навколишнього бетону значно нижча, ніж при інших методах свердління. Це важливо як для конструкційної міцності, так і для естетичного вигляду.

Ефективність монтажу

Застосування правильного обладнання та техніки робить процес монтажу швидким і ефективним, що пришвидшує виконання робіт на будівельному майданчику.

Рис. 8.6 — Важливість правильного свердління отворів

8.3.2.1 Ударно-обертальні дрилі (перформатори / HD), оснащені стандартними або хрестовими твердосплавними буровими насадками

Перфоратори Hilti спеціально розроблені для роботи з твердими матеріалами, такими як бетон. Вони поєднують обертальний рух і ударну дію для ефективного проникнення в бетон. Перфоратори з бурами типів TE-CX, TE-CY або двоканальними спіральними бурами TE-C є доступними та широко використовуються залежно від вимог застосування (рис. 8.7 а). Існують певні обмеження щодо діаметра та глибини свердління для кожного типу перфоратора, тому в деяких випадках цей метод може бути не найкращим рішенням. Перфоратори також застосовуються для розпушування або ущільнення матеріалу у вузьких місцях.

8.3.2.2 Алмазне свердління з використанням технології вологого або сухого буріння (DD)

Цей метод було розроблено для створення точних отворів у бетоні за допомогою спеціальних алмазних коронок. Алмазна коронка має сегменти з алмазним напиленням на ріжучій поверхні, що забезпечує виняткову твердість і зносостійкість, дозволяючи ефективно прорізати бетон (рис. 8.7 б)). Для анкерів великої довжини або значного діаметра алмазне свердління є кращим рішенням. Такі установки утворюють гладкі отвори, на стінках яких залишається тонкий пиловий шар, що може негативно впливати на адгезію. Для сертифікованих систем Hilti розроблено спеціальні процедури очищення отворів, які наведено в ETA та інструкціях з монтажу (IFU). Буріння алмазною коронкою використовує технологію сухого або мокрого буріння,

Примітка: Існують різні типи бурильного обладнання, які відрізняються вагою, енергією удару, швидкістю обертання та частотою ударів. Hilti рекомендує обирати найвідповідніший інструмент залежно від діаметра отворів, щоб досягти максимальної ефективності роботи.



а) Свердління отворів перфатором



б) Алмазні свердлильні системи

Рис. 8.7. Свердлильні машини

8.3.3 Очищення отворів

Залежно від методу свердління та типу анкерів, отвір необхідно очищати згідно з інструкціями виробника, які містяться в технічному схваленні або в інструкції з монтажу (IFU). Правильне очищення отвору є важливою умовою для забезпечення несучої здатності анкера та запобігання можливим відмовам. Можна виділити п'ять основних методів очищення для механічних і хімічних анкерних систем:

- Без очищення;
- Автоматичне очищення порожнистим буром;
- Ручне очищення за допомогою насоса для продування та щітки (див. IFU щодо кількості повторень);
- Ручне очищення стисненим повітрям і щіткою (див. IFU щодо кількості повторень);
- Очищення водою, промивання та щіткою для отворів, просвердлених алмазною коронкою (див. IFU щодо кількості повторень).

Деяке обладнання Hilti, розроблене для монтажу анкерів і очищення отворів, показано на рис. 8.8.



Стиснене повітря

Використовується для видування пилу та сміття з отворів за допомогою насоса для продування. У сопло вставляється шланг, через який повітря під тиском видаляє пил. Простий і ефективний метод.



Щітка

Жорстка щітка використовується для ручного очищення внутрішньої поверхні отвору від пилу та залишків матеріалу. Процес є більш трудомістким, але забезпечує ретельне очищення.



Пилосос

Вакуумне обладнання використовується для висмоктування пилу з отворів. Ідеально підходить для очищення у важкодоступних місцях або коли потрібне сильніше всмоктування.



Насос для продування

Призначений для швидкого та ефективного видування пилу й сміття з отворів за допомогою стисненого повітря.



Повітродувка

Компактний пристрій для очищення робочої зони від пилу та дрібного сміття. Зручний і портативний варіант для використання на відкритих майданчиках.



Система подачі води

Єдиний блок, що забезпечує подачу охолоджувальної води, а також збір і фільтрацію стічної води під час алмазного свердління.

Рис. 8.8. Основні системи очищення отворів

Примітка: У випадках, коли неможливо забезпечити дотримання багатоступеневої процедури очищення отворів, рекомендується використовувати продукцію Hilti, сертифіковану для безочисного або автоматичного очищення з використанням порожнистих бурів Hilti (HDB).

8.3.4 Встановлення анкера (механічні анкери)

Спосіб встановлення механічних анкерів залежить від їх типу, оскільки існують різні методи монтажу. Анкери можуть встановлюватися втисканням, загвинчуванням або забиванням у отвір — залежно від конструкції анкера (див. рис. 8.9).

Після встановлення анкера в отвір його затягування виконується за допомогою каліброваного динамометричного ключа або модуля з регульованим крутним моментом (АТ). Детальні інструкції щодо монтажу конкретних типів анкерів наведено в інструкції з монтажу (IFU). Деякі анкерні системи з розпірним механізмом можуть затягуватися машинним способом.

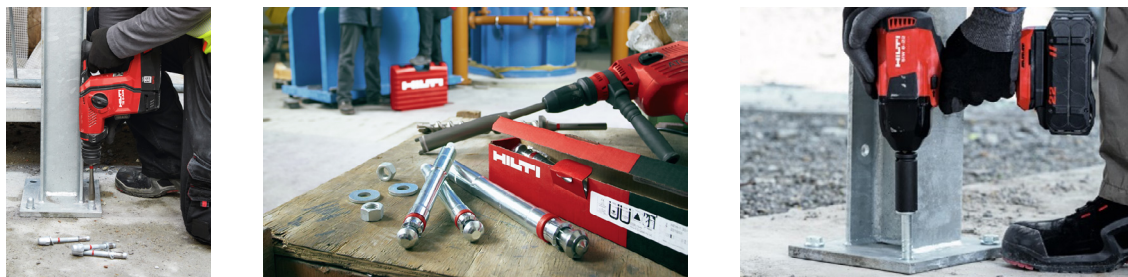


Рис. 8.9. Монтаж механічних анкерів із використанням інструментів та ударних гайковертів

Модуль з регульованим крутним моментом (АТ) — це пристрій, що забезпечує зворотний зв'язок у режимі реального часу та контроль моменту затягування під час монтажу механічних анкерів. Він дозволяє досягти точного й стабільного крутного моменту, зменшуючи ризик надмірного або недостатнього затягування. Зручне та ефективне налаштування підвищує продуктивність і точність виконання робіт. Крім того, система фіксує параметри затягування, що забезпечує прозорість і звітність процесу монтажу. На рис. 8.10 наведено приклад використання модуля АТ з ударним гайковертом Hilti.

Примітка: Використання машинного затягування з модулем з регульованим крутним моментом (АТ) підвищує продуктивність робіт на об'єкті та забезпечує високу точність монтажу.



Рис. 8.10. Система модуля з регульованим крутним моментом (АТ) для ударного гайковерта Hilti

Примітка: Hilti пропонує різні типи ударних гайковертів та приводів — автоматичні, напівавтоматичні або ручні, які забезпечують необхідну енергію удару та момент затягування для різних типів і розмірів механічних анкерів.

8.3.5 Ін'єктування розчину (лише для хімічних анкерів)

Основні аспекти, пов'язані з ін'єктуванням розчину для хімічних анкерів, включають:

- Чи використовується відповідне обладнання для введення розчину, з усіма необхідними аксесуарами, щоб забезпечити правильне дозування та змішування?

Слід використовувати відповідний дозатор, рекомендований виробником. Невідповідний пристрій може спричинити неправильне співвідношення між компонентами (наприклад, смолою та пластифікатором). Для прикладу, картриджі HIT-HY 200 відрізняються від інших хімічних анкерів Hilti через інше співвідношення компонентів при змішуванні. Крім того, забруднений дозатор може спричинити неконтрольований викид розчину під час натискання на спусковий важіль.

- Які зусилля або інструменти потрібні для введення клею та встановлення анкера у заповнений розчином отвір?

Особливо для серійних застосувань, таких як шумозахисні екрани, важливо забезпечити швидкий та зручний монтаж. Монтажники можуть витрачати додатковий час на натискання курка пістолета, що ускладнює точне дозування клею в кожен отвір. Це збільшує трудомісткість і, відповідно, загальну вартість робіт. Тому Hilti рекомендує використовувати **аккумуляторний дозатор HDE 500 у** поєднанні з додатком Hilti Volume Calculation App (див. рис. 8.11 a), b), d)) — для зменшення витрат матеріалу та підвищення продуктивності монтажу.

Метою введення клею є забезпечення монтажу без утворення повітряних порожнин, оскільки це безпосередньо впливає на ефективність, надійність і безпеку анкера. Важливо вводити **достатню кількість клею** в отвір, щоб уникнути будь-яких пустот. Hilti також рекомендує використовувати **поршневі вкладиші** з точним допуском (див. рис. 8.11 c)). Поршневі вкладиші забезпечують оператору зворотний зв'язок під час ін'єкції через тиск клею на вкладиш. Доведено, що це суттєво покращує якість і ефективність ін'єкції, усуваючи повітряні порожнини (див., наприклад, [55]).

- **Чи можна ввести розчин і встановити анкер до завершення часу твердіння?**

Це залежить від **температури монтажу**. Гібридні мінеральні розчини можуть затвердіти раніше, ніж буде вставлений анкерний стрижень. У спекотному кліматі зазвичай віддають перевагу епоксидним складам, щоб уникнути передчасного твердіння, тоді як гібридні розчини частіше використовують у холодних умовах для прискорення процесу встановлення.

- **Чи підходить розчин для умов вологості бетону, орієнтації отворів і обраного методу свердління?**

Сумісність клею з **сухими, вологими або заповненими водою отворами** також зазначена в цьому документі. **Монтаж над головою або горизонтальний монтаж** може бути ускладненим, а при надто низькій в'язкості розчину за високої температури монтажу можливе його витікання. Проєктувальнику слід звернутися до виробника, щоб підібрати найбільш відповідний варіант для конкретного застосування.



a) Введення клейового розчину



b) Акумуляторні та пневматичні дозатори



c) Поршневий вкладиш



d) Калькулятор об'єму розчину

Рис. 8.11 — Введення клейового розчину з використанням автоматичного дозатора, поршневого вкладиша та застосунку для розрахунку об'єму

- **На що слід звернути увагу під час установлення анкерних стрижнів?**

Після введення розчину анкерні стрижні необхідно вставити в отвір протягом часу твердіння. Це важливо для того, щоб центрувати стрижень у отворі та забезпечити його рівномірне оточення клеєм.

Важливо використовувати анкерний стрижень, схвалений ETA. Часто анкер замінюють місцевими аналогами, які не сумісні з хімічним розчином. Також існує хибне уявлення, що тип анкерного стрижня не впливає на ефективність кріплення, якщо використовується правильний клей. Насправді **геометрія стрижня, якість сталі та тип покриття мають суттєвий вплив на ефективність хімічних анкерів.**

Анкерні стрижні малого діаметра можна встановлювати у вертикальному напрямку вниз із відносно невеликим зусиллям. Однак для стрижнів великого діаметра, особливо при горизонтальних або похилих установках, може знадобитися значне зусилля для їх вставлення у заповнені клеєм отвори (див. рис. 8.12).

Примітка: Після свердління отвору рекомендується перевірити, чи підходить діаметр стрижня, перш ніж вводити розчин.



а) Монтаж анкерів у вертикальному напрямку вниз

б) Свердління для горизонтального застосування

Рис. 8.12 — Монтаж хімічних анкерів у різних напрямках

• Як утримати анкерний стрижень на місці під час твердіння клею?

Важливо відцентрувати стрижень у отворі, щоб він був рівномірно оточений клеєм.

Для горизонтального або надголовного монтажу виробники можуть рекомендувати встановлення клинів з чотирьох боків стрижня під час монтажу.

8.3.6 Покращення практик на об'єкті за допомогою рішень spec2SITE

Пропозиція Hilti spec2SITE включає комплексні та інноваційні рішення, які допомагають підрядникам удосконалити ключові етапи монтажних процесів, роблячи роботу на об'єкті швидшою, простішою, безпечнішою та більш ефективною.

Поєднання цих рішень із підтримкою Hilti безпосередньо на будмайданчику спрямоване на кращу інтеграцію проектних вимог із фактичним виконанням робіт. На рис. 8.13 наведено спрощену схему основних етапів робочого процесу.



Рис. 8.13 — Основні етапи процесу застосування

Пропозиція Hilti spec2SITE включає наступні рішення:

- 1. Свердління та очищення. Майже повністю безпилоче свердління та очищення** забезпечується системою, що поєднує порожнисті бурі HDB та пиłosоси VC. Це дозволяє проводити чисте та безпечне свердління, одночасно видаляючи пил і залишки з отвору. Система підходить для сухого та вологого бетону й усуває найкритичніший етап — очищення після свердління перед введенням розчину або монтажем анкера. Пил і частинки постійно всмоктуються у пиłosос протягом усього процесу свердління (див. рис. 8.14). Hilti також пропонує анкери з технологією без очищення, яка повністю виключає цей етап із процесу встановлення.



Рис. 8.14 — Система Hilti для безпилочового свердління отворів з HDB, VC та анкерами з технологією без очищення

2. Підготовка:

Хімічні анкери: Використовуючи акумуляторний дозатор HDE 500-22 у поєднанні з мобільним застосунком для розрахунку потрібного об'єму розчину, користувач може заздалегідь задати точну кількість суміші. Це допомагає уникнути недозаповнення або переповнення отвору, підвищуючи якість і безпеку монтажу, а також зменшує перевитрати матеріалу (див. рис. 8.15).

Механічні анкери: Використання монтажних інструментів для встановлення анкерів підвищує продуктивність і безпечність робіт на майданчику. Технологія також сприяє захисту від корозії, покращує естетику вузлів та дозволяє використовувати гібридні гвинтові анкери (наприклад, HUS4-MAX), які мають переваги технології без очищення, зменшення відходів і можливість негайного навантаження.



Fig. 8.15: : Controlled injection of adhesive mortar and setting tools for mechanical anchors to limit waste

- 3. Затягування за допомогою акумуляторного гайковерта:** затягування анкерів є важливим етапом, що гарантує їх безпечне встановлення. Акумуляторні гайковерти Hilti SIW забезпечують оптимальне співвідношення потужності й зручності роботи. У поєднанні з модулем з **регульованим крутним моментом (АТ)** система допомагає уникнути як надмірного, так і недостатнього затягування. Принцип роботи полягає у скануванні QR-коду анкера на упаковці. Коли досягнуто правильні параметри встановлення, світловий індикатор (зелений LED) підтверджує успішне завершення монтажу (див. рис. 8.16). Крім того, для подальшого контролю або обслуговування система Hilti AT дозволяє документувати встановлені анкери за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке підключається до модуля AT і зчитує дані застосування.

Примітка: Надмірне затягування може призвести до пошкодження анкера під час встановлення. Недостатнє затягування може знизити його несучу здатність.



Рис. 8.16 — Система SIW з гайковертом і модулем AT

Підсумовуючи, рішення Hilti spec2SITE забезпечує такі переваги (див. рис. 8.17):

Економія часу	Підвищення ефективності	Економічність	Робота за будь-яких погодних умов	Підвищення безпеки	Актуальна інформація
Система оптимізує процес завдяки очищенню отворів одразу після свердління. Час монтажу скорочується до 36 хвилин на годину роботи (тобто на 60%).	Свердління бетону й встановлення анкерів відбувається практично без пилу, що підвищує продуктивність і гарантує проєктну надійність.	Розумний дозатор забезпечує точне змішування, мінімальні втрати розчину та зменшує загальні витрати на анкери.	Єдина система видалення пилу, що працює у вологому бетоні без зниження адгезії. Погодні умови практично не впливають на результат.	Технологія забезпечує правильний крутний момент, запобігає надмірному чи недостатньому затягуванню, зменшує ризик відмов і підвищує безпеку на об'єкті.	Hilti проводить індивідуальні тренінги на будівельному майданчику, забезпечуючи правильний монтаж анкерів. Рішення spec2SITE допомагає втілювати проєктні вимоги в реальність.

Рис. 8.17 — Переваги та можливості Hilti spec2SITE

8.3.7 Технологія Hilti TraceFast

Технологія Hilti TraceFast пропонує рішення для надійної ідентифікації анкерів у бетоні. Завдяки унікальному ідентифікаційному коду (ID), нанесеному на кожен анкер, перевірка відповідності проєкту відбувається так само швидко, як зйомка фото на смартфон. Раніше процес ідентифікації та документування анкерів вимагав значних зусиль і паперової роботи. Hilti пропонує швидшу та надійнішу альтернативу — систему TraceFast (див. рис. 8.18).

Кожен анкер стає відстежуваним
Data Matrix Code (DMC) робить кожен анкер унікальним і дозволяє його відстежувати. DMC-код містить усю необхідну інформацію: інструкції з використання, сертифікати, технічні дані. 25-значний код навіть включає номер партії та артикул, що дає змогу відстежити анкер до виробництва. Для отримання даних достатньо відсканувати DMC-код на анкері за допомогою смартфона.

Ідентифікація встановлених анкерів
Зазвичай важко визначити, чи встановлено саме той анкер, який передбачено проєктом. Додаток Hilti ON!Track App спрощує цей процес, дозволяючи швидко перевірити правильність встановлення. Це швидкий і зручний спосіб документування якості монтажу та отримання доступу до технічної інформації для оперативної перевірки.

Стандартизація документації
Документування ходу робіт і ключових даних проєкту часто потребує багато часу та ресурсів. Використання ідентифікованих анкерів дозволяє оцифрувати ручний процес фіксації даних, що економить час і зменшує складність проєктної звітності.

Рис. 8.18 — Можливості технології Hilti TraceFast

8.4 Огляд, випробування та контроль якості

Огляд і контроль якості є двома важливими елементами під час встановлення пост-встановлених анкерів у будівельних застосуваннях. Вони допомагають переконатися, що виконані роботи відповідають вимогам і специфікаціям проєкту. Процес включає оцінку продукції з метою виявлення дефектів, відхилень або невідповідностей. Перевірка здійснюється шляхом лабораторних випробувань відповідно до критеріїв ефективності, а також тестування на місці, наприклад, тестів на виривання (див. рис. 8.19). Це забезпечує стабільну якість і надійність, підвищуючи впевненість замовника у правильності виконаних робіт ще до введення виробу в експлуатацію. Тестування на місці може проводитися як у вільному стані (для розтягувальних навантажень), так і у закріпленій конфігурації (для навантажень на зсув).

Примітка: Тестування на місці, яке пропонує Hilti:

- 1) База для ефективного проєктування на основі даних випробувань;
- 2) Сучасна документація з підтвердженням навантажувальної здатності.



Рис. 8.19: Тестування на місці від Hilti

- **Перевірка навантаження:** тестування на виривання або зсув пост-встановлених анкерів на місці передбачає прикладання зусилля для оцінки несучої здатності та якості монтажу. Це допомагає підтвердити якість встановлення. Правильний монтаж зазвичай досягається лише тоді, коли інструкції з монтажу (IFU) виконуються навченими та кваліфікованими фахівцями. Коректна процедура випробування є важливою для забезпечення конструктивної безпеки та цілісності. Такі випробування зазвичай є неруйнівними.
- **Визначення розрахункового опору:** тестування на місці може допомогти проєктувальнику або інженеру визначити розрахункові значення для системи пост-встановлених анкерів, якщо для конкретного матеріалу основи відсутній стандартний метод або схвалення. Дані про залежність «навантаження – переміщення», отримані під час випробувань, дозволяють ефективно виконати розрахунок, зберігаючи цілісність конструкції. Під час тестування на місці інженер може скористатися отриманими даними для підбору відповідного розрахункового значення, що забезпечить оптимальне, економічно доцільне та нормативно сумісне рішення навіть за відсутності готових розрахункових даних. Такі випробування можуть виконуватись як:
 - a) Такі випробування можуть виконуватись як:
 - b) неруйнівні — до заданого навантаження.

В обох випадках (a і b) можливо проводити та оцінювати випробування анкерів на розтяг і/або зсув.

Примітка: Тестування на місці не слід застосовувати для оцінки зчеплення, якщо його значення перевищує межі, зазначені в ETA для умов, охоплених цим ETA (наприклад, анкер у звичайному бетоні класів C20/25–C50/60). Оцінка опору на виривання для умов, що виходять за межі дії ETA, має враховувати чинники, які неможливо перевірити експериментально (наприклад, підвищену температуру чи тривале навантаження).

Для інженерних висновків у нестандартних випадках розрахунку опору анкерів у невідомих умовах матеріалу основи звертайтеся до Hilti.

Контроль якості: контроль якості пост-встановлених анкерів включає низку етапів, таких як візуальний огляд, випробування навантаженням, перевірка крутного моменту та дотримання галузевих стандартів. Контроль якості — це сукупність процедур, спрямованих на забезпечення відповідності пост-встановлених анкерів визначеним критеріям якості. Це передбачає активне управління процесом монтажу та впровадження коригувальних дій у разі необхідності. Належна документація та ведення записів є важливою умовою для відстеження процесу монтажу й перевірки якості. Приклад контрольного списку якості з основними діями, необхідними для ефективного та правильного монтажу пост-встановлених анкерів, наведено в таблиці 8.1.

Примітка: наведені в наступному контрольному списку пункти не є вичерпними та не прив'язані до конкретного проекту, тому за необхідності проєктна команда повинна адаптувати його перед використанням.

Таблиця 8.1 — Контрольний список основних вимірювань / етапів монтажу

КОНТРОЛЬНИЙ СПИСОК АНКЕРІВ

Інформація про застосування		
Тип анкера		Специфікація анкера / хімічного складу та анкерного стрижня (Hilti або еквівалент)
Діаметр анкера		Діаметр і глибина отвору
Метод / Процес	Відмітка	Значення / Коментарі
Перевірка креслень, специфікацій і підготовка		
Статус креслень і остання редакція	☐	
Проєктні специфікації та загальні примітки	☐	
Перевірка перед монтажем		
Сканування основного матеріалу на наявність арматури/інших об'єктів	☐	
Перевірка методу встановлення		
Вибір методу свердління, правильного бура, інструментів	☐	
Шорсткування / очищення отвору згідно з IFU	☐	
Перевірка клею (адгезивного розчину)		
Використано затверджений клейовий (адгезивний) розчин	☐	
Правильний інструмент і аксесуари для введення розчину	☐	
Час твердіння розчину	☐	
Затягування анкерів		
Використано правильний монтажний інструмент	☐	
Застосовано правильне значення крутного моменту	☐	
Вкручування / вставлення анкерів, вирівнювання та затягування	☐	
Система Hilti для розумного введення розчину		
Температура та стан поверхні перед ін'єкцією	☐	
Правильний об'єм розчину (додаток Hilti Volume Calculator)	☐	
Правильні аксесуари для введення клею	☐	
Загальна перевірка для всіх анкерів (безпека та вимірювання)		
Правильне вирівнювання та позиціонування	☐	
Анкерний стрижень очищено від іржі, клею, мастила, оливи, бруду тощо	☐	
Проведено тестування на виривання на місці	☐	
Інші перевірки, фото, документи, записи відповідно до обсягу	☐	

8.5 Construction specifications

Будівельні специфікації — це детальні письмові документи, у яких визначаються матеріали, методи та стандарти якості, необхідні для виконання будівельного проєкту. Вони містять інструкції для будівельних команд щодо виконання робіт, забезпечуючи узгодженість, точність і відповідність проєктним вимогам. Специфікації охоплюють різні аспекти, зокрема перелік сертифікованих продуктів, процеси монтажу, вимоги до випробувань тощо. У контексті пост-встановлених з'єднань типу S2C вони включають такі положення:

- Деталі пост-встановлених анкерів, включно з діаметром, глибиною встановлення та інформацією про кваліфікацію — див. розділ 4.
- Вихідні дані для проєктування: тип навантаження, величини навантажень, розрахунковий термін служби, умови застосування та методи розрахунку, наприклад EC2-4 [1] / EOTA TR 082 [46] / EOTA TR 061 [24] тощо.
- Вимоги до підготовчих робіт: сканування бетону, методи свердління тощо — див. розділ 8.3.
- Опис вимог до монтажу (інструменти, аксесуари, зокрема поршневі пробки, подовжувальні шланги, динамометричні ключі тощо) — див. розділ 8.3.
- Додаткові вимоги (наприклад, тестування на місці за потреби) — див. розділ 8.4.

Зразок креслення будівельної специфікації для пост-встановлених анкерів наведено на рис. 8.20.

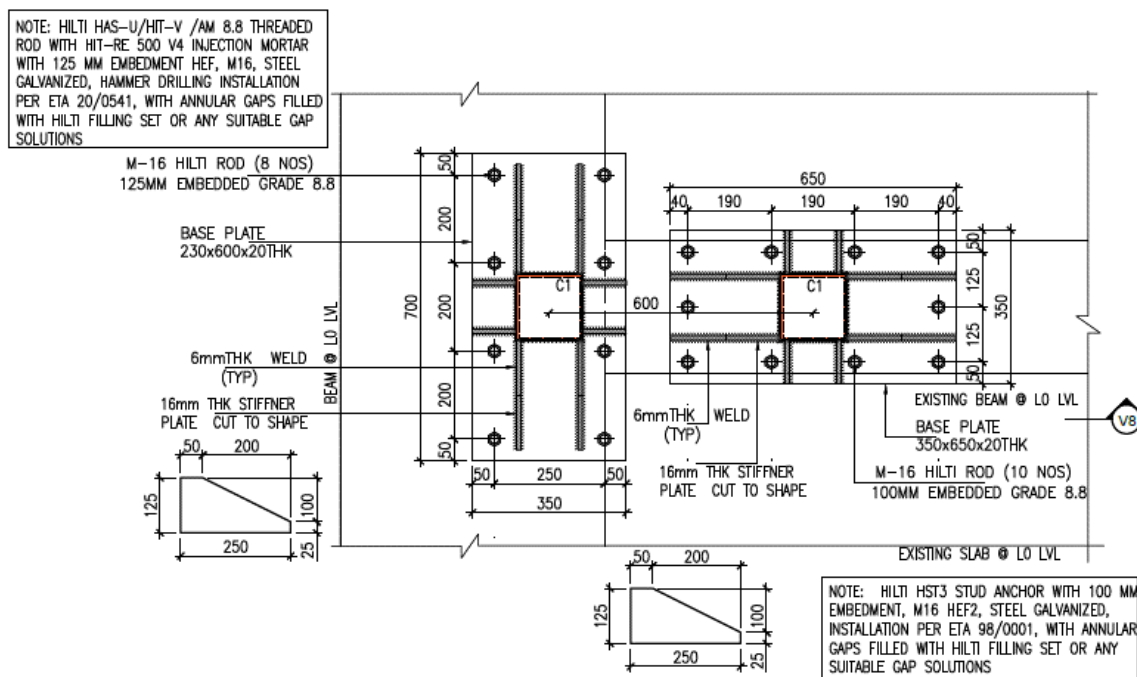


Рис. 8.20 — Приклад специфікації для рішення з пост-встановленими анкерами

8.6 Підтримка інженерних рішень від Hilti

Інженерне рішення — це процес прийняття обґрунтованих технічних рішень, який інженери здійснюють на основі знань, досвіду та професійної експертизи. Воно передбачає оцінювання різних варіантів, врахування компромісів і вибір оптимального рішення, що найкраще відповідає вимогам проєкту, критеріям безпеки, здійсненності та етичним нормам. Інженерні рішення мають ключове значення для розв'язання складних технічних задач, проєктування систем і забезпечення якості та надійності результатів проєкту. Компанія Hilti пропонує інженерам і проєктувальникам різноманітну технічну підтримку, яка допомагає ефективно реалізовувати проєкти у випадках, коли необхідне професійне інженерне судження.

Ask Hilti

Ask Hilti — це онлайн-спільнота інженерів, створена для обміну досвідом і надання професійних технічних консультацій для інженерів і архітекторів. Платформа є безкоштовною та відкритою для всіх користувачів. Зареєстровані учасники можуть ставити запитання, брати участь у технічних обговореннях і переглядати вебіари ON-DEMAND, що дають кредити підвищення кваліфікації. Також на платформі доступні поради від провідних інженерних експертів Hilti.

Hilti Backoffice

Hilti Backoffice надає підтримку у розробці технічних рішень для складних або нестандартних задач і ситуацій. За будь-якою інженерною консультацією можна звернутися до Hilti — допомога доступна як онлайн, так і офлайн. Крім того, Hilti надає спеціалізовану експертну підтримку з технічних питань за запитом.

Hilti Assets

Hilti Assets — це база знань компанії Hilti, що включає технічні публікації, зокрема аналітичні звіти, довідники, онлайн-курси, навчальні матеріали, програмне забезпечення для проектування, академічні статті тощо, присвячені актуальним темам для інженерної та проектної спільноти. Hilti активно поширює найновіші технології та найкращі практики у сфері будівництва по всьому світу.



9. РЕФЕРЕНСНІ ПРОЄКТИ

9.1 Міст 231, Брно, Чеська Республіка

Міст 231 розташований на ключовій чеській автомагістралі D1 і проходить над головною залізничною лінією поблизу міста Брно. Проект завершено у 2023 році.

Проблематика та мета

Залізобетонні мости зазвичай проєктуються з розрахунковим терміном служби 100 років. Однак крайові частини мостів є особливо вразливими через вплив агресивних зовнішніх чинників — протиожеледних реагентів, солей, опадів і циклів заморожування-відтавання. Крім того, окремі допоміжні елементи, закріплені до краю мосту (наприклад, бар'єри безпеки або шумозахисні екрани), мають значно коротший термін служби — приблизно 20–30 років. Для усунення цієї вразливості край мосту виконано як окремий бетонний елемент — **крайову балку** (див. рис. 9.1 а) і b). Між проїзною частиною мосту та крайовою балкою передбачено гідроізоляційний шар, який забезпечує захист від проникнення вологи. При цьому обидва елементи мають бути конструктивно з'єднані через цей шар.

Таке конструктивне рішення створює унікальну проєктну ситуацію: з'єднання двох бетонних елементів виконується за допомогою пост-встановленого анкерного кріплення — нижня частина анкера розташована в плиті проїзної частини, а верхня — у сталевій консолі крайової балки або виконується як анкер із головкою та гайкою зверху. Таке кріплення забезпечує проходження через гідроізоляційний шар без втрати герметичності, завдяки використанню спеціального пластикового диска та епоксидного розчину, що виступає назовні при заповненні.



а) Сталеві консолі, закріплені за допомогою анкерів Hilti та клею RE 500 V4



с) Стержень із ущільнювальною кришкою HIW-SD для гідроізоляції



б) Анкери, встановлені в арматурний каркас до бетонування

Рис. 9.1. Рішення Hilti / застосовані продукти у мосту 231, Чехія

Підхід (проєктування та рішення)

Традиційно для мостів застосовували арматурні стрижні, що створювало труднощі з гідроізоляцією. Hilti запропонувала інноваційне рішення під назвою Hilti Plinth Anchoring (HPA). Це рішення було адаптовано під вимоги замовника — Hilti розробила локальні рекомендації для проєктування системи HPA з використанням наявних модулів PROFIS Engineering. Система HPA складається з пост-встановлених анкерів, герметизувальних елементів і спеціальних компонентів, що забезпечують довговічне та водонепроникне з'єднання між крайовою балкою і проїзною частиною мосту.

Стержень з різьбленням доступний у варіантах із вуглецевої сталі з гарячим цинкуванням (HDG) або з нержавіючої сталі A4. Для з'єднання використовується хімічний розчин HIT-RE 500 V4. Щоб забезпечити оптимальне заповнення і герметичність, застосовується ущільнювальна шайба HIW-SD (як показано на рис. 9.1 с).

Ефективність водонепроникного з'єднання, утвореного після затвердіння HIT-RE 500 V4 під ущільнювальним диском HIW-SD, була підтверджена під час випробувань, проведених в Австрійському інституті дорожніх досліджень. У той час як традиційне проектування бетон-до-бетонних з'єднань базується на теорії арматури згідно з EC2-1-1 [27], у цьому випадку вимога надійного кріплення пластикового ущільнювального диска HIW-SD зумовила використання стержнів із різьбленням. Тому розрахунок виконувався за теорією анкерів відповідно до EC2-4 [1]. Випробування Hilti підтвердили, що водонепроникний шар створює мінімальний важіль дії та, відповідно, незначне моментне навантаження.

Виходячи з цього, проектування нижньої та верхньої частин розглядалося окремо: нижній сегмент — це пост-встановлений хімічний анкер, розрахований згідно з EC2-4 [1] у PROFIS Engineering; верхній сегмент — це попередньо встановлений анкер із головкою, також розрахований у PROFIS Engineering відповідно до EC2-4 [1]. Варто зазначити, що в цій конструкції компонування виконане дзеркально порівняно з традиційними базовими пластинами.

Використані стандарти розрахунку

Пост-встановлене анкерування в плиті мосту — розрахунок згідно з EC2-4 [1].

Перевірка водонепроникності – RVS 15.04.12 — австрійський метод перевірки водонепроникності під навантаженням. Сертифіковані діаметри M12–M24.

Попередньо виготовлений елемент у крайовій балці — розрахунок згідно з EC2-4 [1] із гайкою у верхній частині різьбового стрижня, яка діє як попередньо виготовлений анкер із головкою.

Комплексне рішення та переваги

Програмне забезпечення: для розрахунку використовувалося програмне забезпечення PROFIS Engineering.

Обладнання: комбінація Hilti RE 500 V4 із порожнистими буровими коронками спростила процес монтажу. Акумуляторний дозатор HDE 500 додатково оптимізував процес, забезпечуючи точне дозування розчину.

Послуги: компанія Hilti співпрацювала з державними регуляторами для сприяння прийняттю німецької та австрійської нормативної документації на місцевому рівні. Крім того, Hilti розробила власний комплексний документ, який описує повний підхід до розрахунку (див. розділ 7). Цей документ слугує дорожньою картою для майбутніх проєктів і сприяє прийняттю рішень НРА у спільноті чеських інженерів, підкреслюючи ефективність, відповідність і безпеку при кріпленні крайових балок.

Навчання: Hilti провела навчання для монтажників і надала консультації керівникам робіт щодо контролю якості встановлення.

9.2 Проект Prestige Mahalaxmi у Мумбаї, Індія

Проект Prestige Mumbai передбачає будівництво чотирьох веж, із яких дві матимуть висоту 250 м і 300 м. Це робить вежу С найвищою комерційною вежею в Індії (див. рис. 9.2 а). Верхній рівень вежі С також слугуватиме регіональним офісом Prestige Group. Це житловий комплекс преміумкласу, що забезпечує всі необхідні умови з сучасними зручностями та оздоровчою інфраструктурою.

Постановка задачі та мета

Цей проект є унікальним завдяки ексцентричній конструкції ядра вежі С: розташування колон (2,4 м × 2,4 м) між прольотами 10 м і 39,5 м потенційно призводить до високої базової зсувної сили. Це зумовило потребу в дуже щільному армуванні, що обмежує глибину свердління для всіх пост-встановлених анкерів. Ще однією вимогою проєктувальників було виконання розрахунку всіх пост-встановлених систем кріплення на сейсмічні дії. Крім того, під час виконання робіт на майданчику частину закладних анкерів було встановлено з помилками, тому проєктувальник вирішив застосувати рішення з пост-встановленими хімічними анкерами. Для підвішеної сталеві колони, що підтримує антресоль на кожному поверсі вежі D (160 м загальної висоти), було передбачено наскрізне болтове з'єднання анкерів, які забезпечують підтримку антресолі в кутових і середніх ділянках. Для кріплення напрямних шахти ліфта також застосовано інше наскрізне болтове рішення. На завершальному етапі проєкт вимагав використання лише пост-встановлених рішень, схвалених незалежною сертифікаційною організацією (див. рис. 9.2 б).



а) Огляд проєкту Prestige Mahalaxmi



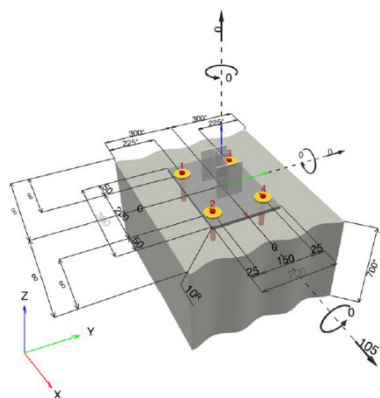
б) Застосування пост-встановленого анкерування для з'єднання з опорною пластиною

Рис. 9.2 — Проєкт Prestige Mahalaxmi у Мумбаї

Підхід (розрахунок і рішення)

Від самого початку цифрове проєктування та інженерний аналіз були невід'ємною частиною процесу для досягнення найбільш ефективного рішення з пост-встановленими анкерами. Програмне забезпечення PROFIS Engineering використовувалося проєктувальниками для отримання оптимізованих рішень для всіх пост-встановлених з'єднань (див. рис. 9.3 а). Команди з продажів та інженерії Hilti спільно проводили поглиблені технічні семінари в офісах консультанта, замовника та підрядника безпосередньо на будівельному майданчику (рис. 9.3 б).

Регулярні консультації з польовими конструкторами, координаторами проєкту та замовником підтвердили довіру до команди Hilti, яка продемонструвала інженерно орієнтований підхід — не лише як виробник анкерів, а як технічний партнер у проєкті. Разом із PROFIS Engineering до розробки критичних вузлів також було залучено бек-офіс Hilti (Engineering Competence Center).



а) Ескіз опорної пластини та анкерів у PROFIS



б) Проведення воркшопу PROFIS в офісі проєктувальника

Рис. 9.3 — Специфікація, затверджена в проєкті

Використані стандарти розрахунку

Пост-встановлені анкери — гнучка опорна пластина для всіх з'єднань «сталь-бетон» згідно з EC2-4 [1].

Комплексне рішення та переваги:

Програмне забезпечення: PROFIS Engineering із модулем CBFEM (див. розділ 7.3.5).

Обладнання: Пост-встановлені механічні анкери Hilti HST3 розміру M20 із глибиною закладення 170 мм і HSL4 розміру M20 із глибиною закладення 170 мм. Пост-встановлені хімічні анкери Hilti HIT-RE 500 V4 із стрижнями HIT V 5.8 M16×150 використовувалися як заміна неправильно встановлених закладних анкерів. Для наскрізного болтового з'єднання застосовувалися стрижні АМ класу 8.8.

Навчання: Hilti провела серію практичних воркшопів із командою на об'єкті.

9.3 Проект реконструкції УОВ, Таїланд

United Overseas Bank у Таїланді проводить реконструкцію будівлі віком близько 30 років. Споруда має 20 поверхів, і роботи з підсилення вже завершено.

Постановка задачі та мета

Опорна пластина застосовувалася у вузлах «балка–колона» для забезпечення з'єднання (див. рис. 9.4). Деякі з'єднання зазнавали дуже великих зсувних навантажень, а в окремих випадках — переважно розтягувальної дії. Проектувальник вимагав використання пост-встановлених анкерних систем із відповідним сертифікатом на вогневий тип навантаження. Через обмежену глибину закладення хімічні анкери не застосовувалися. Через умови на будівельному майданчику не було можливості забезпечити ретельне очищення отворів, що підвищувало ризик похибок під час свердління на задану глибину. Перевірка механічних анкерів була простішою, оскільки її можна було виконати шляхом контролю моменту затягування. Таким чином, проектувальник обрав пост-встановлені механічні анкери, які й були використані в цьому проекті.



а) Команда Hilti з замовником на об'єкті УОВ



б) Сталеві рами з'єднані з армованою бетонною конструкцією за допомогою анкерів

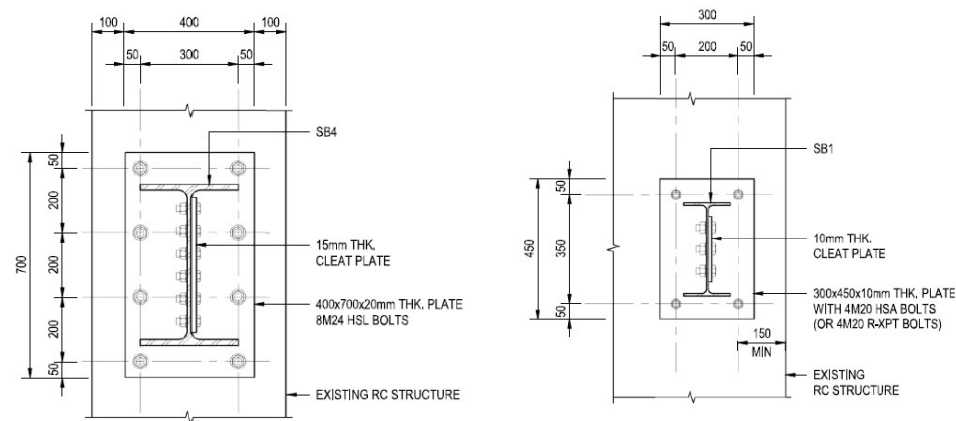


в) Деталь з'єднання «сталь–бетон»

Рис. 9.4 — Проект реконструкції УОВ

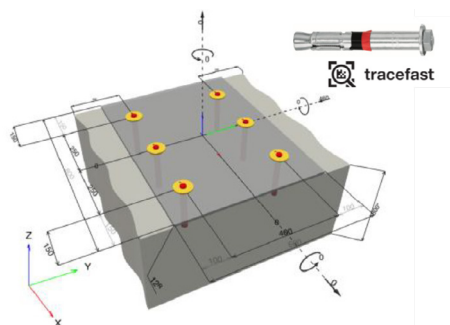
Підхід (розрахунок і рішення)

Компанія Hilti брала участь у консультаціях з основними учасниками проекту — замовником, підрядником і проектувальником — для розроблення оптимальних рішень із пост-встановленими анкерними з'єднаннями. Представники Hilti неодноразово відвідували проектувальника, щоб уточнити вимоги та прискорити процес підготовки специфікації. Розрахунок і специфікацію було підготовлено за короткий час у PROFIS Engineering, після чого вони були затверджені проектувальником (див. рис. 9.5 а і 9.5 с). На об'єкті було проведено демонстраційні та навчальні сесії з монтажу з акцентом на застосування механічних анкерів (див. рис. 9.5 d). Вимоги проектувальника були виконані завдяки використанню відповідної монтажною системи та сертифікованого рішення, що відповідає вимогам норм і забезпечує сприйняття великих зсувних навантажень у межах заданих умов.



а) Специфікація для великих зсувних навантажень

б) Специфікація для малих зсувних навантажень



в) Розрахунок анкерів у PROFIS та пропозиція Tracefast



г) Демонстрація на будівельному майданчику

Рис. 9.5 — Специфікація, затверджена в проєкті

Використані стандарти розрахунку

Пост-встановлені анкери між опорною пластиною колони та бетоном — розрахунок виконано згідно з ACI 318-19 [56] і стандартом Engineering Institute of Thailand (EIT011008-21 [57]).

Програмне забезпечення: використовувалося PROFIS Engineering.

Обладнання: застосовано пост-встановлені механічні анкери Hilti HSL4 діаметром M20–M24 та Hilti HSA діаметром M16–M20.

Монтаж: технологія AT Module була використана для забезпечення безпечнішого та продуктивнішого встановлення.

Послуги: компанія Hilti забезпечила повну взаємодію з усією командою проєкту, оперативно реагуючи на запити та технічні потреби, що сприяло успішному завершенню робіт. Демонстрація застосування рішень Hilti проводилася безпосередньо на об'єкті в присутності всіх учасників проєкту.

Навчання: Hilti організувала навчання для монтажників і надала консультації керівникам робіт щодо контролю якості встановлення.

9.4 Пакет робіт на колії MAHSR, штат Гуджарат, Індія

Коридор високошвидкісної залізниці Мумбаї–Ахмедабад (MAHSR) — це лінія, що перебуває на стадії будівництва та з'єднає економічний і фінансовий центри Індії з найбільшим містом штату Гуджарат — Ахмедабадом (див. рис. 9.6 а). Цей високошвидкісний поїзд курсуватиме зі швидкістю понад 300 км/год і охоплюватиме 500 км із 12 станціями.

Постановка задачі та мета

Цей проєкт є унікальним завдяки найдовшій у своєму класі прольотній ділянці в умовах «greenfield»-будівництва. Замовник прагнув мінімізувати витрати під час виконання робіт із встановлення опалубки залізобетонної основи колії на протяжності 150 км. Основною вимогою була висока швидкість монтажу опалубних форм (23 000 шт.). Форми встановлювалися вздовж усієї ділянки, що слугувала основою головної траси високошвидкісної залізниці. Пост-встановлені анкери з можливістю повторного використання були необхідною умовою для цієї задачі. Замовник вимагав рішення від міжнародного виробника з сертифікованими та схваленими продуктами. Ефективність і оптимізація витрат були додатковими критеріями, за якими було обрано пост-встановлені анкери.



а) Ділянка естакади MAHSR



б) Анкер Hilti із багаторазовим калібром

Рис. 9.6 — Загальний огляд проєкту MAHSR та анкери, використані для відповідного застосування

Підхід (розрахунок і рішення)

Керівник проєкту шукав рішення, яке дозволило б знизити загальну вартість анкерів для 23 000 залізобетонних основ, одночасно підвищивши продуктивність у порівнянні з традиційними методами (див. рис. 9.7 б). На будівельному майданчику монтаж анкерів був ускладнений обмеженою глибиною свердління через наявність попередньо напружених канатів. Через обмежене енергопостачання в умовах «greenfield»-проєкту з мінімальною інфраструктурою компанія Hilti запропонувала використання інструментів Nuron на єдиній акумуляторній платформі (див. рис. 9.7 а). Hilti не лише надала підтримку на початкових етапах, а й провела навчання для команди замовника, забезпечивши правильне застосування рішень на місці.

Компанія Hilti провела серію демонстрацій із впровадженням комплексного рішення безпосередньо на будівельному майданчику. Навчання з монтажу та практичні демонстрації виконувалися із застосуванням анкерів Hilti HUS4-H з багаторазовим калібром (до 50 циклів повторного використання у бетоні підвищеної міцності, див. рис. 9.6 б) із використанням бурів та інструментів Hilti. Окрім встановлення анкерів, фінішне оброблення бетонної поверхні виконувалося з використанням легкого обладнання Hilti TE 500X та відповідних насадок. Тісна співпраця з усією командою проекту сприяла успішному впровадженню рішення, забезпечивши безпечний і більш ефективний монтаж анкерів на будівельному майданчику згідно з затвердженою методологією та в установлений термін.



а) Монтаж опорної пластини / фіксація рам опалубки під час будівництва



б) Підготовка бетонної основи колії перед завершальним бетонуванням

Рис. 9.7 — Встановлення пост-встановлених анкерів і завершальне бетонування

Використані стандарти розрахунку

Пост-встановлені анкери — розрахунок виконано згідно з Z-21.8-2137 [38].

Комплексне рішення та переваги

Програмне забезпечення: для всіх розрахунків використовувалося PROFIS Engineering.

Обладнання: застосовано пост-встановлені механічні анкери Hilti HUS4-H M8×65. Свердління виконувалося за допомогою Hilti TE-30 + TE CX M8, а затягування та повторне використання анкерів (до 50 разів) — за допомогою інструмента SIW 4 Nuron.

Послуги: на об'єкті проведено тестування на місці в присутності всіх учасників проекту.

Навчання: Hilti провела навчання для монтажників і надала консультації керівникам робіт щодо контролю якості встановлення.

9.5 Спортивний парк Kai Tak, Гонконг

Kai Tak Sports Park (KTSP) у Гонконзі — це спортивний комплекс світового рівня, зведений на місці колишнього аеропорту Kai Tak. До складу об'єкта входять: головний стадіон на 50 000 місць із розсувним дахом, критий спорткомплекс на 10 000 місць, відкритий спортивний майданчик на 5 000 місць і низка громадських спортивних споруд.

Постановка задачі та мета

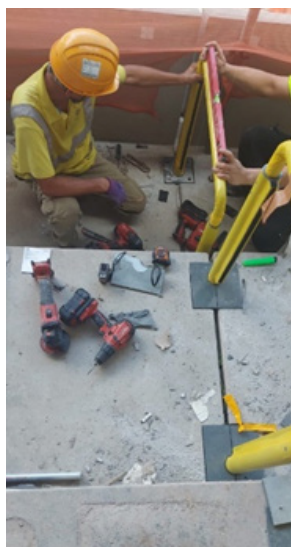
Огорожа була одним із ключових застосувань у зоні сталевих і металевих конструкцій (див. рис. 9.8 а). Оскільки балюстради зазвичай встановлюються близько до краю бетонної конструкції, відстань до краю є одним із критичних чинників, що впливають на вибір анкера та його ефективність. Хімічні анкери є менш чутливими до відстані до краю, однак не є найкращим рішенням для металевих і сталевих з'єднань. Крім технічних вимог, існували й умови безпеки — особливо для огорожень. Більшість конструкцій балюстрад потребують естетичного вигляду, а виступаючі шпильки або різьбові стрижні в місцях кріплення можуть бути небезпечними, оскільки люди можуть випадково зачепити їх. Таким чином, було висунуто вимогу застосувати механічне анкерне рішення з потайною головкою (див. рис. 9.8 b, c і d).



а) Конструкція на будівельному майданчику



б) Монтаж опорної пластини під час будівництва



б) Триває монтаж опорної пластини



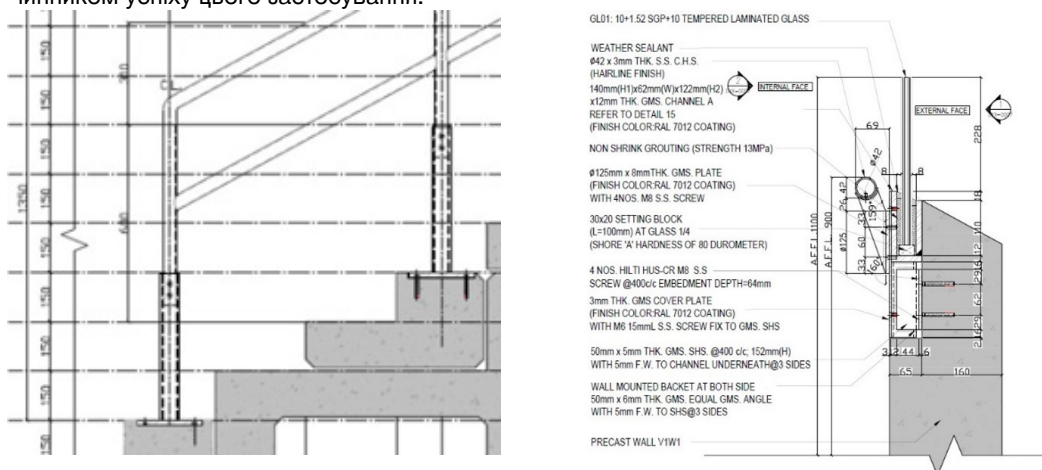
с) Установлення сталевого профілю

Рис. 9.8 — Балюстрада та деталі з'єднання

Підхід (розрахунок і рішення)

Спочатку було запропоновано механічний анкер Hilti HST3, однак відстань до краю виявилася недостатньою для сприйняття розрахункових навантажень після перевірки в PROFIS Engineering.

Альтернативним рішенням розглядали каналний анкер Hilti HSC-I, проте його використання виявилось неможливим через необхідність попереднього планування під закладне рішення. З огляду на обмежену відстань до краю та вимоги до естетичного вигляду, найоптимальнішим рішенням став гвинтовий анкер Hilti HUS4 із потайною головкою. Завдяки меншій мінімальній відстані до краю це рішення відповідало розрахунковим обмеженням, а потайна головка забезпечила безпечне та акуратне виконання кріплення. Крім того, Hilti HUS4 повністю відповідав очікуванням замовника й за співвідношенням ціни та ефективності. Тісна співпраця між Hilti та замовником відіграла ключову роль у правильному виборі анкера та виконанні розрахунків. Поєднання технічної експертизи та комерційних знань стало визначальним чинником успіху цього застосування.



а) Деталі балюстради

б) Пост-встановлений анкер, застосований у проєкті

Рис. 9.9 — Специфікація, затверджена для цього проєкту

Використані стандарти розрахунку

Пост-встановлені анкери — розрахунок виконано згідно з ETAG 001 [18], Додаток С.

Комплексне рішення та переваги

Програмне забезпечення: для розрахунку анкерів використовувалося PROFIS Engineering.

Обладнання: застосовано гвинтовий анкер Hilti HUS4, потайна головка якого забезпечила естетичний зовнішній вигляд відповідно до вимог проєкту.

Послуги: компанія Hilti забезпечила повну технічну підтримку та постійну співпрацю з усією командою проєкту, оперативно реагуючи на запити, що сприяло успішній реалізації рішення.

АВТОРИ

Agamoni Das



Agamoni Das здобула ступінь магістра з інженерії з відновлення та ремонту конструкцій у Джадавпурському університеті (Індія). Її магістерська робота була присвячена перевагам базової ізоляції як антисейсмічного рішення для зменшення наслідків стихійних лих. Вона також навчається в аспірантурі зі спеціальності сейсмостійке будівництво та є автором або співавтором наукових публікацій із цієї теми. Вона брала участь у розробленні рішень, зокрема для сейсмічної ізоляції та демпфувальних пристроїв для низки мостових і будівельних конструкцій. Наразі обіймає посаду технічного менеджера з інженерного контенту в Hilti. Її сфера інтересів охоплює сейсмічне підсилення та технології кріплення сталь-бетон.

Giovacchino Genesio



Giovacchino Genesio закінчив факультет будівельної інженерії Університету Флоренції (Італія) та здобув ступінь PhD в Університеті Штутгарта (Німеччина), де займався дослідженнями з оцінки сейсмостійкості та підсилення залізобетонних конструкцій. П'ять років працював консультантом, займаючись кваліфікацією, проектуванням, навчанням і контролем якості систем кріплення. Наразі є керівником групи з інженерного контенту в Hilti. Його професійні інтереси включають з'єднання бетон-бетон, сейсмічне підсилення та технології анкерного кріплення. Є автором і співавтором кількох наукових публікацій із цих тем.

ПОДЯКА

Автори висловлюють вдячність наступним фахівцям компанії Hilti, які зробили внесок у створення цього довідника зі з'єднань сталь-бетон. Наведений нижче список не є і не може бути повним, оскільки в підготовці матеріалу взяли участь багато людей у різний спосіб.

Зміст

Pratyansh Achariya, Marien Adema, Kaushal Agarwal, Sumit Aryan, Giorgio Barone, Daniele Casucci, Jessica Dierker, Arne Echterbruch, Mariia Gavrilina, Robbi Gian-Fadri, Philipp Grosser, Aleksandr Gubskii, Priyanka Kothari, Vivek Krishnan, Jakob Kunz, Shounak Mitra, Xavi Moix-Vallribera, Ralf Neuerburg, Kresimir Ninsevic, Roberto Piccinin, Jens Pofahl, Chiara Ridolfo, Daphne Rocha, Sergio-Miguel Saraiva-Rodrigues, Kumaraguru, S, Deepesh Seth, Abu Shibily, Kushal Shroff, Amol Singh, Lars Taenzer, Fritz Wall, Georg Welz.

Референсні проекти та зображення

Amir Adil, Milind Bhavsar, Raymond Chong, Adam Hrbacek, Worapong Kerdnikom, Fean Lee, Nikoonj Panchal, Julian Rebelo, Chanodom Ruttanachotmetha, Gosavi Sammed, Divyansh Sharma, Soni Sourabh.

ПОДЯКИ

- [1] EN 1992-4-Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete, Brussels: CEN, 2018.
- [2] R. Eligehausen, M. R and F. J. Silva, *Anchorage in Concrete Construction*, Berlin: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2006.
- [3] R. A. Cook, J. Kunz, W. Fuchs and R. C. Konz, "Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile load in Uncracked Concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 95, no. 1, pp. 9-26, January-February, 1998.
- [4] M. S. Hoehler, *Behavior and Testing of Fastenings to Concrete for use in Seismic Applications*. PhD Thesis, California, August, 2006.
- [5] G. Faraone, T. Hutchinson, R. Piccinin and J. Silva, "Anchor Performance in Cyclically Loaded Shear Walls," *ACI Structural Journal*, vol. 119, no. 6, pp. 35-51, 2022.
- [6] D. A. Watkins, T. C. Hutchinson and M. S. Hoehler, "Cyclic Crack and Inertial Loading System for Investigating Anchor Seismic Behavior," *ACI Structural Journal*, pp. 457-466, July-August, 2012.
- [7] R. L. Wood and T. C. Hutchinson, "Crack Protocols for Anchored Components and Systems," *ACI Structural Journal*, vol. 110, pp. 391-401, May-June, 2013.
- [8] T. Guillet, "Behavior of Metal Anchors under Combined Tension and Shear Cycling Loads," *ACI Structural Journal*, vol. 108, no. 3, pp. 315-323, May-June, 2011.
- [9] D. L. Thilo Fröhlich, T. Fröhlich and D. Lotze, "Fatigue of fastenings-investigations on the effect of static load level," *Otto-Graf-Journal*, vol. 18, 2019.
- [10] K. Block, F. Dreier and D. Bigalke, "Fatigue Bearing Capacity of Anchors exposed to Shear Loading," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 102, no. S1, pp. 38-45, 2007.
- [11] J. Kunz, "Chemical Fastenings for Fatigue Loads," in *Joining Techniques in the Building Construction Industry*, Munich, 2023.
- [12] M. Tóth, J. Ožbolt, F. Werner and J. Hofmann, "Fatigue Behaviour of Fasteners in case of Concrete Failure: Numerical and Experimental Investigations," in *fib Symposium on Performance-based Approaches for Concrete Structures*, 2016.
- [13] ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, Switzerland: ISO/TC 92/SC 2, 1999.
- [14] M. Reick, *Brandverhalten von besfestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischen Zugbeanspruchung* (Fire behavior of fixings remote from an edge in concrete under axial tension). PhD Thesis, Universität Stuttgart, 2002.
- [15] M. Robson, O. Al-Mansouri, N. Pinoteau, D. Hoxha, M. Abate, K. McBride, R. Piccinin and S. Rémond, "Experimental Investigation of the Concrete Cone Failure of Bonded Anchors at Room and High Temperature," *Applied Sciences*, 2022.

- [16] R. Mege, N. Pinateau, T. Guillet, K. McBride, O. Al-Mansouri, R. Piccinin and S. Rémond, "Numerical Investigation of Parameters Influencing Fire Evaluation Tests of Chemically Bonded Anchors in Uncracked Concrete," *Engineering Structures*, vol. 209, April, 2020.
- [17] K. Bergmeister and A. Rieder, "Behaviour of Post-installed anchors in case of fire," Institute of Structural Engineering, Vienna.
- [18] ETAG 001: GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE, Brussels: EOTA, 2013.
- [19] EOTA TR 029: Design of bonded anchors, Brussels: EOTA, September, 2010.
- [20] EN 1993-1-8 Eurocode 3 - Design of Steel structures-Part 1-8: Design of joints, Brussels: CEN, 2005.
- [21] EOTA EAD 330232-01-0601: Mechanical fasteners for use in concrete, Brussels: EOTA, 2021.
- [22] EOTA EAD 330499-02-0601: Bonded fasteners and bonded expansion anchors for use in concrete, Brussels: EOTA, 2024.
- [23] EOTA EAD 332795-01-0601: Bonded screw fasteners for use in concrete, Brussels: EOTA, (in preparation).
- [24] EOTA TR 061: Design method for fasteners in concrete under fatigue cyclic loading, Brussels: EOTA, February, 2024.
- [25] EOTA EAD 330250-00-0601: Post installed fasteners in concrete under fatigue cyclic loading, Brussels: EOTA, 2018.
- [26] EN 206:2013+A1:2016: Concrete - Specification, performance, production and conformity, Brussels: CEN, 2013.
- [27] EN 1992-1-1:2004-12: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [28] Corrosion Handbook, Hilti Corporation, 2021.
- [29] Fastening Technology Manual; Version 2023, Hilti Corporation, 2023.
- [30] fib bulletin 58: Design of anchorages in concrete, Lausanne: IFSC, 2011.
- [31] P. Grosser, Load-bearing behavior and design of anchorages subjected to shear and torsion loading in uncracked concrete. PhD Thesis, Universität Stuttgart, 2012.
- [32] K. McBride, Steel strength of anchor bolts in stand-off base plate connections. PhD Thesis, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2004.
- [33] K. McBride, D. Rocha and R. Figoli, Hilti Method for Anchor design in Grouted Stand-off connections, Hilti Corporation, July, 2023.
- [34] K. McBride, D. Rocha and R. Figoli, Hilti Method for Anchor design in UngROUTED Stand-off connections, Hilti Corporation, July, 2023.

- [35] EOTA TR 075: Design of bonded screw fasteners for use in concrete, Brussels: EOTA (in preparation).
- [36] ETA-21/0878: HST4-R Torque-controlled expansion anchor, made of stainless steel for use in concrete: sizes M8, M10, M12, M16 and M20, Marne-la-Vallée: CSTB, 31.10.2024.
- [37] ETA-20/0867: Hilti screw anchor HUS4, Mechanical fastener for use in concrete, Berlin: DIBt, 14.04.2022.
- [38] z-21.8-2137: Hilti HUS4 concrete screw for temporary fastenings in concrete, Germany: General construction technique permit, 21st December, 2023.
- [39] ETA-18/1160: HUS4 Bonded screw, Bonded screw fastener for use in concrete, Berlin: DIBt, 16th January, 2025.
- [40] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [41] ETA-19/0601: Bonded fastener and bonded expansion fasteners for use in concrete, Berlin: DIBt, 29.01.2024.
- [42] Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels: CEN, 2004.
- [43] EN 13501-2: Fire Classification of Construction Products and Building Elements - Part 2: Classification Using Data From Fire Resistance Tests, Excluding Ventilation, DIN, 2016.
- [44] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) / Additional technical contractual conditions and guidelines for civil engineering works; Fire Curve in Part 7, Germany: BASt, December, 2023.
- [45] Eisenbahnspezifische Liste Technischer Baubestimmungen/ Railway-specific list of technical building regulations, Germany: EBA, 2016.
- [46] EOTA TR 082: Design of bonded fasteners in concrete under fire conditions, Brussels: EOTA, April, 2024.
- [47] ETA-20/0541: Bonded fastener with threaded rods, rebar, internally threaded sleeve HIS-(R)N and Hilti Tension anchor HZA(-R) for use in concrete for a working life of 50 and 100 years, Marne-la-Vallée: CSTB, 09.06.2023.
- [48] EN 1990:2002+A1: Basis of structural design, Brussels: CEN, 2005.
- [49] M. A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 13, no. 2, pp. 159-164, 1945.
- [50] ETA-23/0277: Post-installed fasteners in concrete under fatigue cyclic loading; Hilti injection system HIT-HY 200-A V3, HIT-HY 200-R V3, HIT RE 500 V4 and mortar capsule HVU2 with HAS-U, Berlin: CSTB, 08.02.2024.

- [51] CEN/TR 17079: Design of fastenings for use in concrete- Redundant non-structural systems, Brussels: CEN, September, 2018.
- [52] F. Wald, M. Kuřiková, M. Vild, L. Šabatka, J. Kabeláč and D. Kojala, Connection design by Component Based Finite Element Method, Prague: Czech Technical University in Prague.
- [53] M. Fitz and J. Appl, "Wirklichkeitsnahe und vollständige Bemessung von Ankerplatten einschließlich der Befestigungsmittel - neue Bemessungssoftware auf Basis wirklichkeitsbaher Annahmen (Design of fixtures and its anchorages based on realistic assumptions) (in German)," *Beton und Stahlbetonbau*, vol. 87, no. 12, pp. 1179-1186, 2018.
- [54] B. P. Girme, S. P. Patil and P. D. Sathe, "Anchor Forces Under CBFEM And Rigid Base Plate Assumption Methods," *International Journal of Scientific and Technology*, vol. 08, no. 09, September, 2019.
- [55] J. F. Silva, "Overhead Installation of Injection-Type Adhesive Anchors - An evaluation of two available methods and recommendations for ACI's installer," *Concrete International*, vol. 38, no. 7, pp. 40-49, July, 2016.
- [56] ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete, Farmington Hills: ACI, 2019.
- [57] Building Code Requirements for Reinforced Concrete Building by strength Method, Bangkok: Engineering Institute of Thailand, 2021.
- [58] A. Rieder and K. Bergmeister, "Simulated and tested seismic response of post-installed metal anchors in concrete," in *Proceedings of 3rd fib International Congress*, Washington DC, USA, 2010.
- [59] EN 14889-1: Fibres for concrete - Part 1: Steel fibres - Definitions, specifications and conformity, Brussels: EOTA, 2006.

NOTES

NOTES



Hilti Aktiengesellschaft
9494 Schaan, Liechtenstein
P +423-234 2965

www.facebook.com/hiltigroup
www.hilti.group