



後置鋼筋指南



1.0 什麼是後置鋼筋？	1
1.1 後置鋼筋及其在營造中的應用	1
1.2 應用範圍	2
1.3 後置鋼筋與場鑄鋼筋之相容性	2
2.0 如何設計？	6
2.1 設計要求	6
2.2 施工現場限制	6
2.3 所需之握裹長度	6
2.4 連接詳細資訊	6
2.5 系統規格	6
2.6 設計範例	6
2.6.1 設計範例—剪力綴縫筋(Shear Dowel)	6
2.6.2 設計範例—搭接	8
2.6.3 設計範例—特殊抗彎矩構架中之伸展長度	10
2.6.4 設計範例—柱結構接合處之伸展長度	11
2.6.5 設計範例—特殊結構牆中結構接合處之伸展長度	12
3.0 如何安裝？	13
3.1 現有鋼筋及其他埋置物之位置	13
3.2 現有混凝土表面粗化	13
3.3 安裝具有小保護層之後置鋼筋	14
3.4 鑽孔方法	14
3.5 清孔	16
3.6 選擇黏著劑系統	17
3.7 注射黏著劑	18
3.8 安裝鋼筋	18
4.0 如何決定要使用何種系統？	19
4.1 選擇系統時的考量	19
5.0 制定設計資料	20
5.1 背景	20
5.2 建立所需之系統性能（合格條件）	20
6.0 背後的故事為何？	23
6.1 建立所需之鋼筋埋置長度	23
6.2 ACI 318-14直條鋼筋伸展長度規定總覽	23
6.3 ACI 318-14中其他的直條鋼筋規定	23
6.4 以伸展長度概念為基礎之後置鋼筋設計	24
6.5 建立鋼筋埋置長度之替代方式	25
6.5.1 使用錨栓設計概念之後置鋼筋設計	26
6.5.2 使用圍束提高握裹效率	28
6.6 剪力綴縫筋之設計	29
7.0 我還需要知道什麼？	31
7.1 持續荷載等	31
7.2 疲勞	31
7.3 耐火性	31
7.4 腐蝕	31
8.0 可進一步閱讀的參考資料及建議	32

1.0 什麼是後置鋼筋？

1.1 後置鋼筋及其在營造中的應用

自1970年代中期以來，黏結式錨栓(adhesive anchors)已廣泛地用於營造中。在美國及加拿大，其受到各種規範及標準的監管，包括ACI 318、ACI 355.4，以及ICC Evaluation Service發布的驗收標準。用於混凝土的黏結式錨栓系統通常以具有螺紋的鋼條作為錨定元件（參見圖1），並採用針對擴頭式錨栓及後置機械錨栓¹之延伸的混凝土容量設計法（CCD法）進行設計。



圖1、黏結式錨栓安裝（使用針對低溫情況的Hilti HIT-ICE，瑞士森蒂斯峰(Säntis)）。

在此設計環境中，（就拉伸荷載而言）重點在於握裹破壞／拔出破壞以及混凝土拉破。由於對混凝土邊緣距離、混凝土厚度及錨栓間距等方面的限制，故將混凝土劈裂視為不相關。借助錨栓本體及CCD法定義之相關混凝土破壞模式來抵抗剪力荷載。就設計的角度而言，通常以與其他結構元件相同的方式來處理黏結式錨栓，即依照方程式1所示來決定所需強度：

$$\phi R_n \geq U \quad (\text{Eq. 1})$$

其中， U 為因數化荷載， ϕ 為強度衰減因數， R_n 為標稱阻力（通常取5%分位數）。

另一個常見且由來已久的錨栓黏著劑應用，是在混凝土的鑽孔中安裝竹節鋼筋(deformed reinforcing bar)，以模擬場鑄鋼筋的行為（圖2）。這些通常稱為後置鋼筋。直到2013年在美國幾乎都未加以規範²的此等應用具有以下特點：

- a. **後置鋼筋**埋入介面一側現有混凝土鑽孔內的黏著劑中，並於介面的另一側澆注新的混凝土。（圖3）在預置端的鋼筋可配備彎鉤或錨栓頭，但在後置端必須為筆直的；
- b. 相較於黏結式錨栓，通常是以最小的邊緣距離來安裝**後置鋼筋**。在此情況下，後置鋼筋連接在拉伸荷載下的強度通常會受到混凝土劈裂強度的限制（其特徵為沿鋼筋長度形成劈開的裂縫）；
- c. **後置鋼筋**在設計上通常並非以錨栓的方式來抵抗直接剪力荷載（即完全透過插筋作用(dowel action)³）；
- d. 通常會視需要埋置**後置鋼筋**，以利用規範的伸展及劈裂長度規定來「發展」其降伏強度。



圖2、使用喜利得HDE 500-A12電動注射器將HIT-RE黏著劑注入鑽孔中，以利後置鋼筋的安裝。

1) ACI 318-14，「委員會318：結構混凝土建築規範(ACI 318-14)及解說(Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary)」，美國混凝土學會，Farmington Hills, MI [2]。

2) 應依據2018年3月的ICC Evaluation Service驗收標準AC308 [9] 或同等標準來驗證針對後置鋼筋安裝應用之注射式黏著劑的合適性。

3) 在某些情況下，單獨使用插筋作用或許適合用來抵抗剪力，但應注意的是，此等抵抗力通常涉及較大的位移。在鋼筋接近邊緣之處，插筋作用亦可能導致過早的邊緣破壞。

鋼筋伸展的假設可能是後置鋼筋與黏結式錨栓之間最根本的區別。儘管確實會出現將後置鋼筋設計用於如方程式1所述之作用力的情況，但典型情況符合鋼筋伸展的假設。

本指南提供與後置鋼筋之設計、細部設計及安裝有關的資訊。本指南未涉及受ACI黏結式錨栓合格條件及錨定至混凝土規定之約束的設計。

1.2 應用範圍

如上所述，後置鋼筋通常用來促進新的與現有的混凝土元件或結構之間的連接。後置鋼筋可用於改裝及新建工程，適合鋼筋伸展情況之外的各種應用（即可作為黏結式錨栓）。

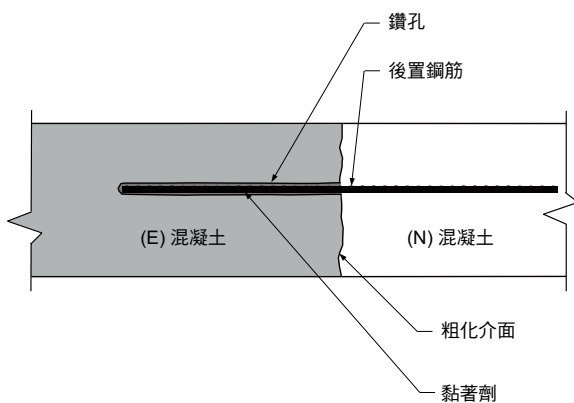


圖3、後置鋼筋。

後置鋼筋最常見的應用類別或許是**現有鋼筋混凝土(R/C)結構件的延伸**，例如樓板、牆壁及柱（圖4），用來擴大樓面空間或是解決結構使用時其他功能上的變化。此等應用通常涉及以緊密的間距放置大量鋼筋。在某些情況下，後置鋼筋會安裝在靠近混凝土表面之處（例如，接近最小保護層距離之處），因此必須將該處現有的鋼筋納入考量。在柱或延伸部分等適用情況下，通常最好將後置鋼筋置於現有的鋼筋籠內，以將鑽孔過程中的混凝土剝落降至最低並確保足夠的保護層。使用Hilti PS 300或Hilti PS 1000掃描系統等鋼筋探測設備協助避開現有鋼筋（圖5）。

另一類應用涉及**現有混凝土結構的加固**，通常是為了提升在地震荷載下的性能（圖6）。由於鋼筋通常不承受重力荷載、不需考慮消防設計，且通常涉及在沒有緊密邊緣距離的情況下在混凝土元件中插筋(doweling)，因此會將這些應用簡化。另一方面，承受地震荷載之鋼筋的伸展及接續所需之埋置長度可能大於僅設計用於靜態或風力荷載之鋼筋的埋置長度。

第三個具有獨特要求之應用類別為**現有混凝土橋梁**及其他土木工程結構的**延伸、修復及加固**（圖7）。這些應用的不同之處通常在於需要更高的耐腐蝕性與極端溫度耐受力。喜利得開發出適用於橋面加鋪的獨特剪力摩擦解決方案⁴，並提供混合型黏著劑（例：Hilti HIT-HY 200 V3），其具有優異的耐高溫性。

由於滿足建築規範中伸展長度規定所需的埋置長度（一般為25至40個鋼筋直徑）通常會超過典型的錨定埋置長度（通常限制為20個鋼筋直徑⁵），因此可能需要採取特殊的措施，以確保鑽孔筆直且鑽孔程序不會導致混凝土、現有鋼筋或其他埋置元件受損。這些措施可能包括使用專門的工具，例如喜利得鑽孔對心系統及喜利得以鐵及GPR為基礎的探測系統。

1.3 後置鋼筋與場鑄鋼筋之相容性

後置鋼筋僅設計用於傳遞拉伸荷載。為驗證使用喜利得黏著劑系統(HIT-HY、HIT-RE)安裝的後置鋼筋，已在歐洲及美國的實驗室進行詳盡的研究計畫，證明荷載傳遞及荷載與位移行為與場鑄鋼筋相容。

當安裝在遠離邊緣之處（即劈裂不會限制強度之處）時，後置鋼筋一般會展現出比同等鋼筋直徑及埋置長度之場鑄鋼筋更高的拔出強度。

4) 請聯絡喜利得以取得更多資訊。

5) 參閱ACI 318-14 17.3.2.3。

6) 參閱「可進一步閱讀的參考資料及建議」：[8]、[10]、[11]、[12]、[17]、[18]、[19]、[20]。



圖4、使用Hilti HIT-RE 500及Hilti HIT-HY 200 V3以新元件延伸現有結構之應用。



圖5、使用Hilti GPR掃描儀掃描鋼筋及其他埋置元件。



圖6、使用HILTI HIT-RE 500 V3之結構加固應用。

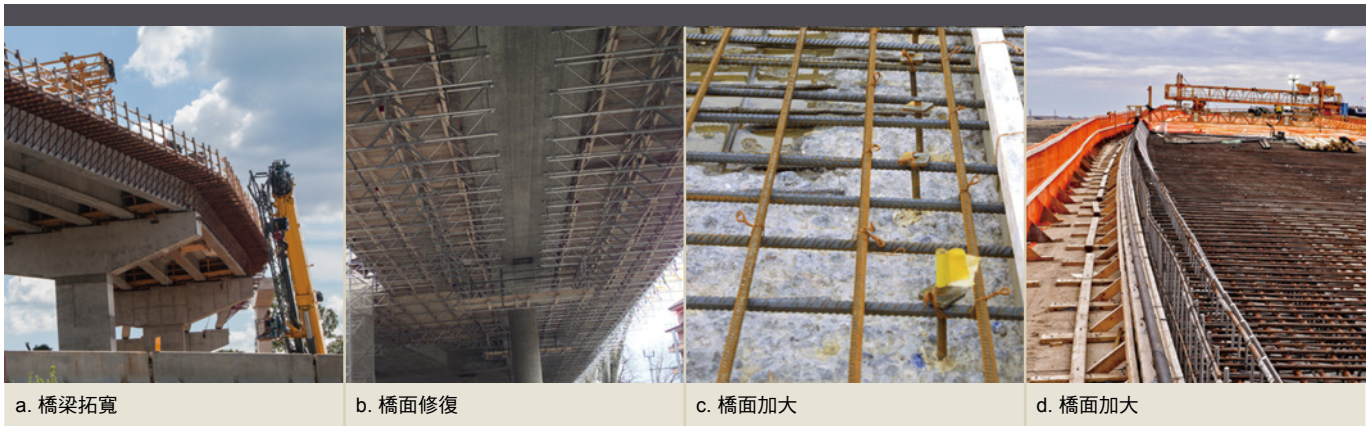


圖7、以後置鋼筋進行橋梁修復之應用。

針對承受拉伸荷載的近邊緣鋼筋（參見下方圖8a），極限狀態行為的特徵為混凝土沿鋼筋劈裂或因在鋼筋周圍發展的環向應力而接續。但前提是所使用的黏著劑能以與場鑄鋼筋類似方式，適應沿鋼筋長度之應力重新分布，後置鋼筋展現出與場鑄鋼筋相當的極限強度。圖8說明後置鋼筋的典型應用。其中有些應用已經由實驗加以驗證，而另一些應用則是使用先進的模擬技術(FEM)進行調查。

這些應用可分為以下幾類：

a.非接觸式搭接或延伸，在此情況下，透過斜撐(compression strut)及直接包圍接續鋼筋之混凝土中的環向應力，在相鄰鋼筋之間傳遞拉伸荷載（參見圖8a）。

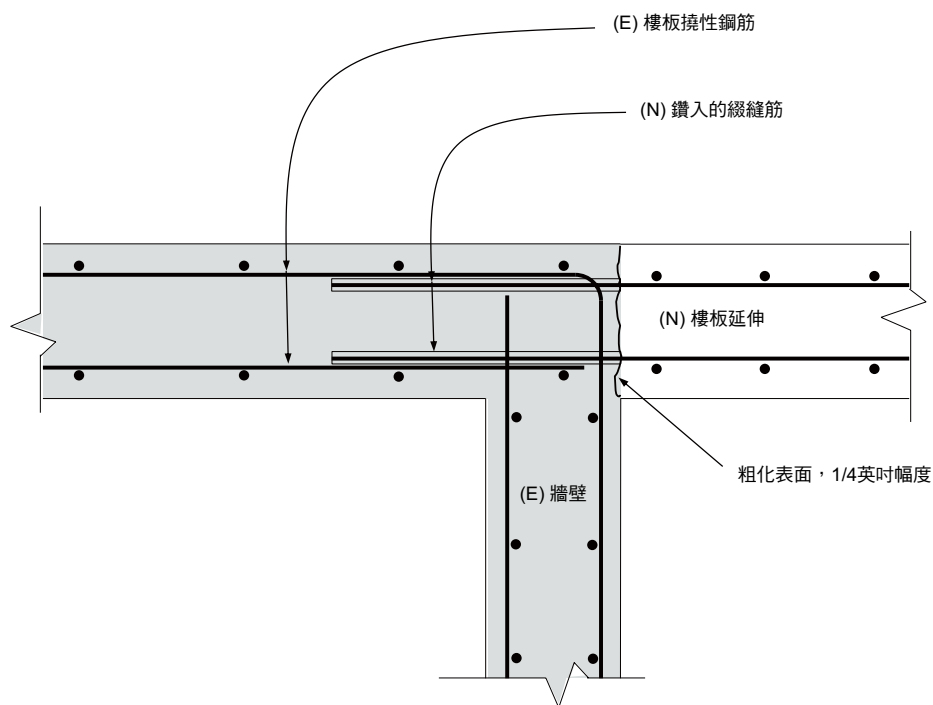
b.剪力綴縫筋(Shear Dowel)，用來抵抗橫跨剪力平面的介面剪力，通常是現有混凝土與新混凝土之間的粗化介面（參見圖8b）。藉由將表面保持在一起的鋼筋（剪力綴縫筋）實現主要剪力機制，即橫跨整個表面的摩擦，因此，如ACI所使用之剪力摩擦概念等一般設計假設為當不規則的剪力平面橫向移動時，剪力綴縫筋會處於直接張力之下。在更輕的程度上或若為平滑介面，亦可藉由插筋作用來傳遞剪力，即鋼筋上混凝土的支撐。

c.結構接合，此通常用來抵抗橫梁至柱接合及柱至基礎接合的張力與剪力。結構接合與其所安裝之現有混凝土構件的主鋼筋垂直。在場鑄結構中，結構接合的植筋通常會採用彎鉤形狀。結構接合的後置植筋為直條形狀，因其設計必須以直條鋼筋的伸展長度規定為基礎（參見圖8c）。

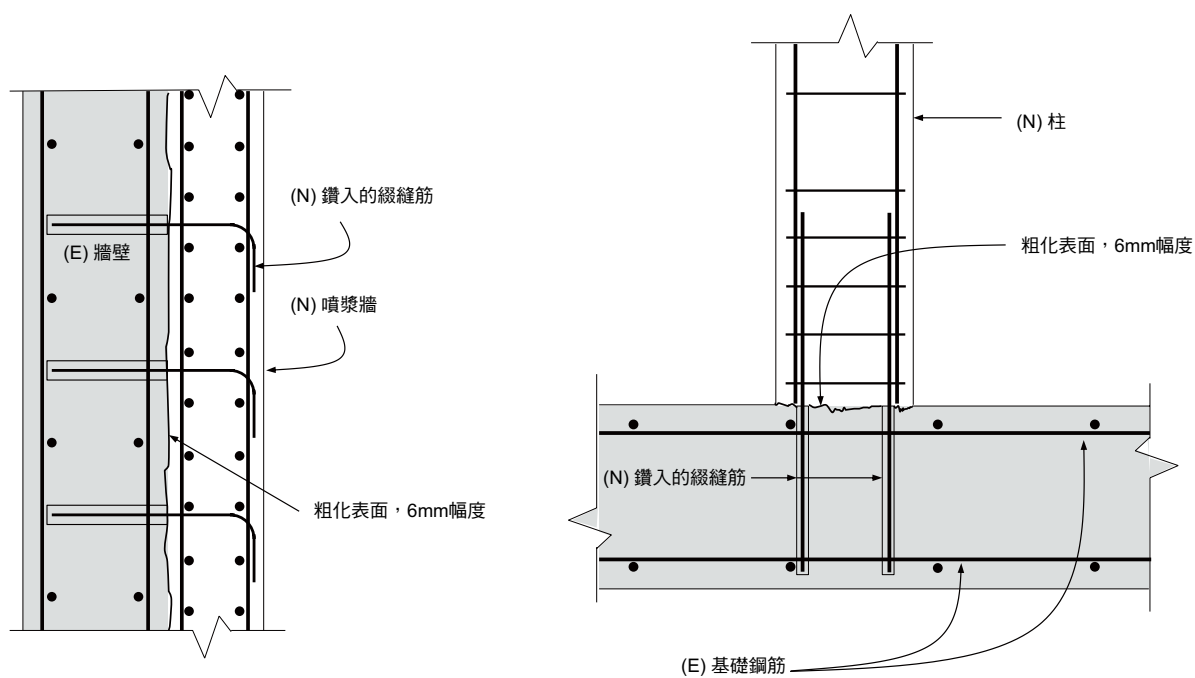
應注意的是，除上方(b)所述之插筋作用外，後置鋼筋與其將錨定於其中之混凝土間的荷載傳遞方法為其周圍之黏著劑上鋼筋變形物（突出物）的支撐。這些支撐應力反過來透過附著及微摩擦經由黏著劑傳遞至周圍的混凝土，而黏著劑層因支撐應力而產生的橫向膨脹又強化了摩擦機制。混凝土因此會在鋼筋周圍發展圓周（環向）應力，導致在一定荷載等級下的劈裂裂縫。此等反應與在承受張力之場鑄鋼筋中觀察到的反應相同。

備註：在透過適當的合格試驗（按照AC308或類似程序⁷）進行驗證顯示給定的後置鋼筋系統能產生與場鑄鋼筋類似的握裹強度及位移行為之情況下，可以使用場鑄鋼筋的規定來設計使用該系統之後置鋼筋的連接。

⁷ 已透過詳盡的研究及試驗對Hilti HIT-RE及HIT-HY黏著劑進行驗證，確認適合用於後置鋼筋應用。



a. 與現有撓性鋼筋的張力搭接



b. 新外置剪力牆之剪力綴縫筋的伸展

c. 柱綴縫筋之張力伸展

圖8、後置鋼筋結構細部範例。

2.0 如何設計？

2.1 設計要求

設計後置鋼筋的連接時，需要決定該連接的類型、大小，間距及數量。此通常可由截面力(section force)直接計算或以與現有鋼筋相符的要求為基礎。可能會依據其他的考量，決定用來在現有結構元件（例如樓板及牆壁）上的新加鋪層間傳遞剪力之縱縫筋的密度及尺寸。

其他的設計考量可能包括：

- 荷載類型（持續、地震、衝擊）
- 消防要求
- 耐腐蝕性
- 以元件類型為基礎之細部要求（加強完整性等）

2.2 施工現場限制

在設計後置鋼筋連接之前，確認施工現場的限制至關重要。設計時應考慮的關鍵參數可能包括：

- 圖紙中所示之現有鋼筋布局，並在現場使用探測設備加以確認（參閱第3.1節）。
- 應滿足之要求的新鋼筋與現有鋼筋的接近性
- 非接觸式搭接等之情況
- 鑽孔方法（鎚鑽、洗孔、喜利得空心鑽頭）
- 連接的方向（下鑽，倒吊(overhead)等）
- 安裝時周圍空氣及混凝土的溫度
- 混凝土的類型及狀態，例如開裂、碳化
- 可達性（如施工、檢修、設備進出的限制等）及幾何限制

2.3 所需之握裹長度

一般來說，所需之鋼筋埋置長度係以規範⁸的伸展長度及接續規定為基礎。若有幾何或其他實務限制的要求，替代的程序可能適合用來決定握裹長度。

鋼筋尺寸及所需之握裹長度亦可為應使用之黏著劑系統的類型提供指引。工作時間較長的黏著劑（例：Hilti HIT-RE 500 V3）通常更適合與深孔搭配的大直徑鋼筋，若為中小型鋼筋直徑及較短的鑽孔，則固化速度快的系統（例：喜利得混合型黏著劑HIT-HY 200 V3）可提高效率。這些考量因素可能會受到預期之施工現場情況（例：接觸方式及周圍空氣與混凝土之溫度）的影響。

2.4 連接詳細資訊

於專案文件中應明確規定後置鋼筋相對於現有鋼筋的位置。此外，規格及詳細資訊可能包括：

- 黏著劑系統
- 鋼筋類型及大小
- 所需之鋼筋埋置長度
- 孔徑及鑽孔方法
- 現有混凝土表面的準備／粗化要求
- 視需要提供對現有鋼筋及埋置物之不可侵犯性的說明
- 視需要提供與安裝人員訓練／認證有關之要求
- 檢驗／驗證荷載要求

2.5 系統規格

規格應與專案文件中所述之設計假設及具體施工現場要求相關聯。單純以握裹應力規格為基礎的替代方式可能不足以確保工作的正確執行。

2.6 設計範例

以下設計範例以ACI 318-14規定為基礎，僅供參考。

2.6.1 設計範例—剪力縱縫筋

要求：設計用於將新的、250 mm厚之未曝露噴漿混凝土（氣動澆置）剪力牆與現有混凝土牆連接的縱縫筋（圖9）。

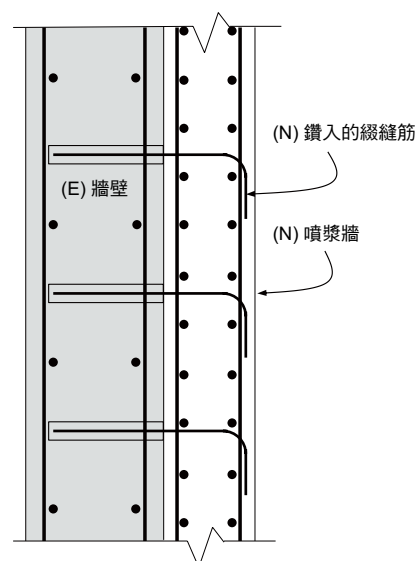


圖9、牆壁剖面。

8) 參閱ACI 318-14 25.4 及 25.5。

步驟1：決定需要綴縫鋼筋的面積。

現有結構：

(E) 剪力牆，405mm厚，27N/mm²常重混凝土

以使用剪力摩擦所需之剪力傳遞為基礎的加固要求。

$$V_u = 431 \text{ kN/m}^2$$

依據ACI 318-14第22.9.4.2節方程式(R22.9.4.2)所需之加固面積。

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\Phi f_y \mu} = \frac{431}{0.75 \times 0.4 \times 1.0} = 1437 \text{ mm}^2/\text{m}^2$$

提供的加固面積。 D16，牆面上405mm x 300mm之範圍內。

步驟2：設定設計情況。

- 鑽孔方法：旋轉鎚鑽
- 連接方向：水平／牆壁位置
- 安裝及使用溫度：21°C
- 混凝土類型：常重，27 N/mm²
- 混凝土狀態：乾燥
- 依情況選擇之黏著劑：HIT-RE 500 V3
- 綴縫筋類型及位置：鉤形鋼筋，置於現有牆壁的牆面中，均勻的垂直與水平間距

步驟3：計算所需之埋置長度（伸展長度）。

ACI 318-14伸展長度方程式(25.4.2.3a)：

$$\ell_d = \left[\frac{f_y}{1.1 \lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right] d_b$$

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0 \sqrt{27}} \frac{0.8}{2.5} \right] 15.9 = 356 \text{ mm} > \text{最小 } \ell_d = 300 \text{ mm}$$

可用的末端保護層 = 400 - 356 = 44mm。外牆曝露，所需之保護層 = 40mm ok

綴縫筋長度 = 356 + (250 - 20)，即距離標準彎鉤外側586mm

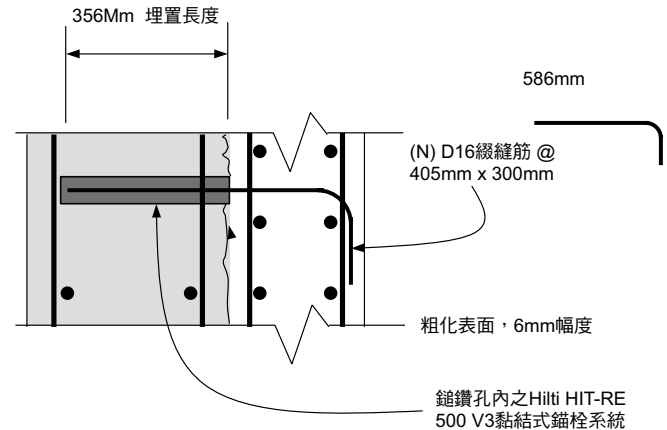


圖10、綴縫筋細部（未按比例）。

步驟4：規格

按照施工文件所示之尺寸、間距及埋置長度提供後置綴縫筋（參見圖10）。

綴縫筋：KS SD400

錨定系統：Hilti HIT-RE 500 V3環氧樹脂，按照製造商的印製安裝說明書(Printed Installation Instruction, MPII)安裝，除非MPII中另有規定，否則在綴縫筋安裝期間混凝土應保持乾燥。使用旋轉鎚鑽及碳化鎢鑽頭進行鑽孔。在鑽孔之前先確定現有鋼筋的位置—未事先取得EOR授權，不得損壞(E)鋼筋。

2.6.2 設計範例—搭接

要求：提供用於在現有混凝土結構上延伸新陽台的後置鋼筋，如圖11所示。

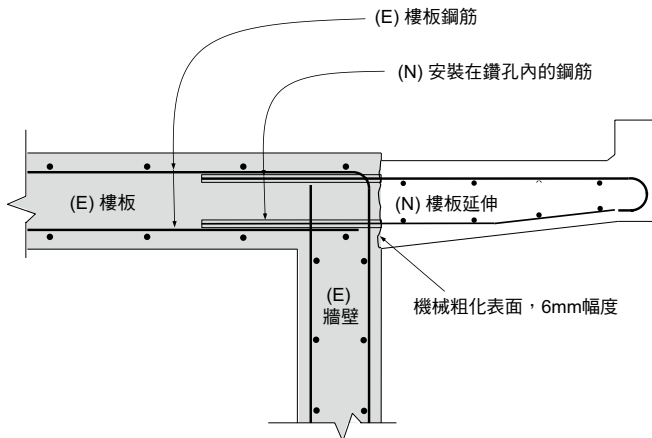


圖11、陽台剖面。

步驟1：決定懸臂力矩之撓性鋼筋區域。

現有結構：(E) 樓板，250mm厚，27N/mm²常重混凝土，頂部鋼筋D29@200mm（中心處），底部鋼筋D25@300mm（中心處），橫向鋼筋D16@400（頂部及底部中心處）

新結構：(N)如圖所示之漸細樓板，35N/mm²砂料輕質混凝土，KS SD400鋼筋

懸臂面處的因數化彎矩及剪力：

$$M_u = 110 \text{ kNm/m}$$

$$V_u = 85 \text{ kN/m}$$

$$d = 200 \text{ mm (圖12)}$$

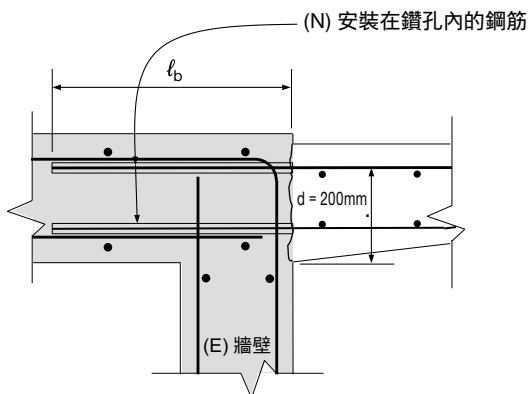


圖12、澆置新的正彎矩鋼筋。

正彎矩鋼筋：嘗試D25@300mm o.c。

$$\rho = \frac{1689}{1000 \times 2000} = 0.0084$$

$$K_n = \left[1 - \frac{\rho f_y}{1.7 \lambda f_c} \right] \rho f_y = \left[1 - \frac{0.0084 (400)}{1.7 (0.85) (35)} \right] 0.0084 (400) = 3.14 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi M_n = \phi b \cdot d^2 K_n = 0.9 \frac{1000 (200)^2 \times 3.14}{1000 \times 1000} = 112.9 \text{ kNm/m} > 110 \text{ kNm/m} \text{ ok}$$

頂部鋼筋使用D25@300mm（中心處）

依據ACI 318-14第22.9.4.2節方程式(R22.9.4.2)所需之加固面積。

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu} = \frac{V_u}{\phi f_y 1.0 \lambda} = \frac{85 \times 1000}{0.75 \times 400 \times 1.0 \times 0.75} = 377.8 \text{ mm}^2/\text{m}$$

備註：雖然此為砂料輕質混凝土，但在缺乏可支撐更高數值之資訊的情況下，剪力摩擦方程式中的 λ 值採用保守的0.75—參閱ACI 318-14表19.2.4.2。

剪力鋼筋：底部鋼筋使用D16@400mm（中心處）

步驟2：設定設計情況。

- 鑽孔方法：旋轉鉋鑽
- 連接方向：水平／牆壁位置
- 安裝及使用溫度：21°C
- 混凝土類型：常重，27 N/mm²
- 混凝土狀態：乾燥
- 依情況選擇之黏著劑：HIT-RE 500 V3
- 鋼筋類型及位置：如圖所示，位置應避開現有鋼筋，但與現有撓性鋼筋的距離不得超過100 mm。

步驟3：計算新的頂部及底部鋼筋所需之埋置長度（搭接長度）。

頂部鋼筋：

備註：由於新的D25將與現有的D29鋼筋接續，因此依據ACI 318-14 25.5.2.2，所需之接續長度為較大鋼筋(D29)之伸展長度與較小鋼筋(D25)之張力搭接長度中的較大者。

依據方程式 (25.4.2.3a及b)，D29現有鋼筋的發展長度：

D29鋼筋具有40mm的保護層，橫向鋼筋為D16@400（中心處）（參見圖13）

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{s \cdot n} = \frac{40 \times 198.6}{400 \times 1} = 19.86$$

$$\frac{C_b + K_{tr}}{d_b} = \frac{\left(\frac{28.6}{2} + 40 \right) + 19.86}{28.6} = 2.59 \text{ .. 使用 } 2.5$$

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_s}{c_b + K_{tr}} \right] d_b$$

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0\sqrt{27}} \frac{1.0}{2.5} \right] 28.6 = 801\text{mm}$$

依據表25.5.2.1，D25新鋼筋的張力搭接長度(Class B)為：

$$1.3\ell_d = \left[\frac{1.3}{1.1} \frac{400}{1.0\sqrt{27}} \frac{1.0}{2.5} \right] 25.4 = 924\text{mm} > 801 \text{ .. 使用 } 924\text{mm}$$

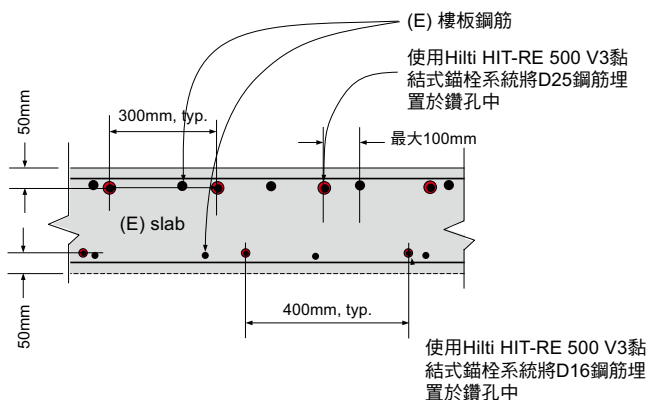


圖13、新鋼筋的位置（未按比例）。

頂部鋼筋：

具有40mm保護層之D16鋼筋的伸展長度

假設 $K_{tr} = 0$ （保守）

$$\frac{C_b + K_{tr}}{d_b} = \frac{\left(\frac{15.9}{2} + 40 \right) + 0}{15.9} = 3.0 \text{ .. 使用 } 2.5$$

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_s}{c_b + K_{tr}} \right] d_b$$

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0\sqrt{27}} \frac{0.8}{2.5} \right] 15.9 = 356\text{mm}$$

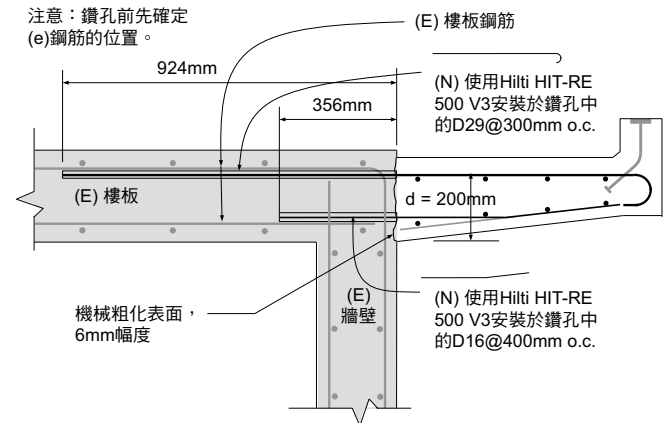


圖14、懸臂陽台細部（未按比例）。

步驟4：規格

按照施工文件所示之尺寸、間距及埋置長度提供後置綴縫筋（參見圖14）。

綴縫筋：KS SD400

錨定系統：Hilti HIT-RE 500 V3環氧樹脂，按照製造商的印製安裝說明書(Printed Installation Instruction, MPII)安裝，安裝的允許混凝土溫度範圍為：-5°C - 40°C，綴縫筋安裝期間混凝土應保持乾燥。

使用旋轉鉋鑽及碳化鎢鑽頭進行鑽孔。在鑽孔之前先確定現有鋼筋的位置—未事先取得EOR授權，不得損壞(E)鋼筋。

2.6.3 設計範例—特殊抗彎矩構架中之伸展長度

要求：提供在指定為抗震設計類別D（高地震）結構（圖11）中之特殊抗彎矩構架的後置鋼筋。

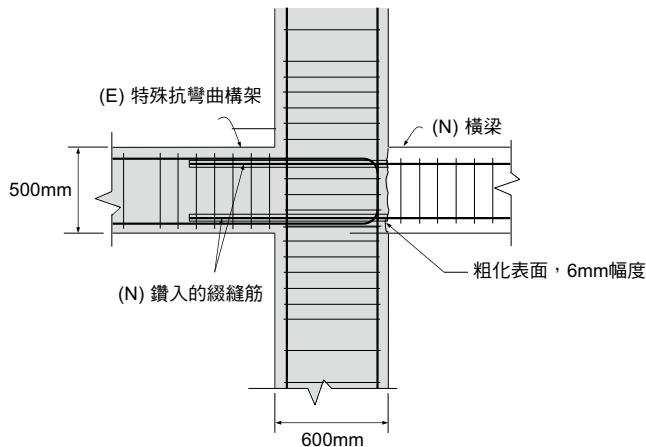


圖15、增設特殊抗彎矩構架。

步驟1：決定新鋼筋的要求。

現有結構：具有450 x 600mm柱、350 x 500mm橫梁、6m跨距之特殊抗彎矩構架，27N/mm²常重混凝土，KS SD400鋼筋，4 - D29頂部鋼筋，2 - D29底部鋼筋，接面處典型的D10彎鉤及橫向繫桿@ 90mm（中心處）。因數化 $w_u = D + L = 52.5\text{kN/m}$ 。

新結構：(N) 350 x 500mm橫梁，如圖所示，27N/mm²

常重混凝土，KS SD400鋼筋，4 - D29頂部鋼筋，2 - D29底部鋼筋，90mm處之D10彎鉤及橫向繫桿（中心處）

依據ACI 318-14第18.6.5.1節及第18.8.2.1節決定與橫梁兩端塑鉸有關之剪力

鋼筋在橫梁中的有效深度：

$$d = 500 - 40 - 9.53 - 28.6/2 = 436\text{mm}$$

針對4 - D29頂部鋼筋，可能的彎矩強度為：

$$\rho^+ = \frac{4(642.4)}{350 \times 436} = 0.0168$$

$$K_{pr}^+ = 1.25\rho^+ f_y \left(1 - 0.735 \rho^+ \frac{f_y}{f_c} \right)$$

$$= 1.25 \times 0.0168 \times 400 \left(1 - 0.735 \times 0.0168 \frac{400}{27} \right) = 6.88 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{pr}^+ = \frac{K_{pr}^+ b \cdot d^2}{1000 \times 1000} = \frac{6.88 \times 350 \times (436)^2}{1000 \times 1000} = 457.5 \text{ kNm}$$

針對2 - D29頂部鋼筋：

$$\rho^+ = \frac{2(642.4)}{350 \times 436} = 0.0084$$

$$K_{pr}^+ = 1.25 \times 0.0084 \times 400 \left(1 - 0.735 \times 0.0084 \frac{400}{27} \right) = 3.82 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{pr}^+ = \frac{K_{pr}^+ b \cdot d^2}{1000 \times 1000} = \frac{3.82 \times 350 \times (436)^2}{1000 \times 1000} = 254.4 \text{ kNm}$$

與形成塑鉸有關之剪力：

$$V_c = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{\ell_n} \pm \frac{W_n \ell_n}{2} = \frac{457.5 + 254.4}{6} \pm \frac{52.5(6)}{2} = 276.15 \text{ kN}$$

步驟2：檢查底部鋼筋在接面處承受剪力之能力：

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu} = \frac{V_u}{\phi f_y 1.0\lambda} = \frac{276150}{0.75 \times 400 \times 1.0} = 920 \text{ mm}^2 \quad 2\text{-D29} = 1284.8 \text{ .. ok}$$

步驟3：使用ACI 318-14方程式(18.8.5.1)及(18.8.5.3(a))計算新頂部及底部鋼筋所需之埋置長度：

$$\ell_d = \frac{f_y d_b}{5.4 \sqrt{f_c}} = 2.5 \times \frac{400 \times 28.6}{5.4 \sqrt{27}} = 1019 \text{ mm}$$

依據18.8.5.4，不在圍束核心(confined core)內之伸展長度的部分 = 1019 - 600 = 419 mm

$$\ell_d = 600 + 1.6 \times 419 = 1271 \text{ mm}$$

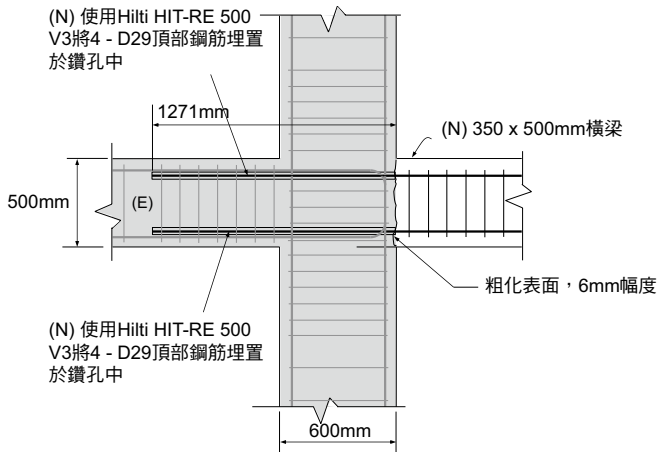


圖16、梁柱細部（未按比例）。

步驟4：規格

按照施工文件所示之尺寸、間距及埋置長度提供後置鋼筋（圖16）。

綴縫筋：KS SD400

錨定系統：Hilti HIT-RE 500 V3環氧樹脂，按照製造商的印製安裝說明書(Printed Installation Instruction, MPII)安裝，安裝的允許混凝土溫度範圍為：-5°C-40°C，綴縫筋安裝期間混凝土應保持乾燥。

使用旋轉鉋鑽及碳化鎢鑽頭進行鑽孔。在鑽孔之前先確定現有鋼筋的位置—未事先取得EOR授權，不得損壞(E)鋼筋。

2.6.4 設計範例—柱結構接合處之伸展長度

要求：提供用於現有基礎上新柱的後置結構接合。

步驟1：決定新鋼筋的要求。

現有結構：基礎地梁600 x 900mm，27 N/mm²混凝土，KS SD400鋼筋。

新結構：(N) 450 x 450 mm柱，如圖所示，27 N/mm²常重混凝土，ASTM KS SD400鋼筋，4 - D22柱鋼筋。

柱抵抗風力荷載引起之彎矩及剪力。

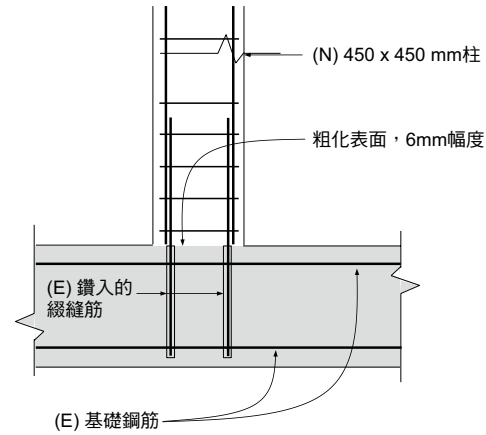


圖17、現有基礎上的新柱。

步驟2：決定柱鋼筋的伸展長度。

注意，在給定邊緣距離及圍束條件的情況下，可將圍束項取最大值2.5。

方程式(25.4.2.3a.)：

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_s \psi_t \psi_e}{\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}} \right] d_b = \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0 \sqrt{27}} \frac{1.0}{2.5} \right] 22.2 = 621 \text{ mm}$$

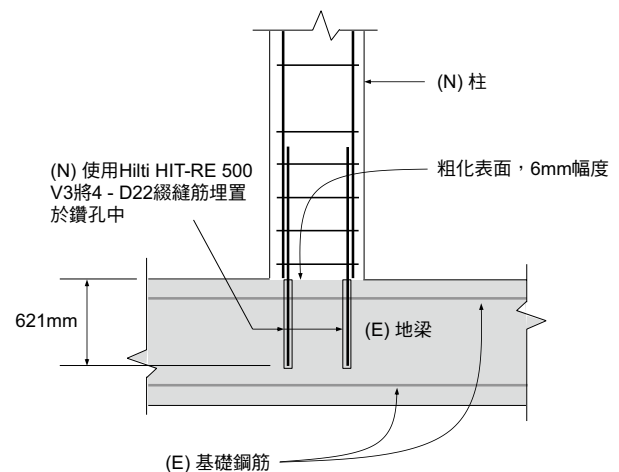


圖18、柱與地梁連接細部（未按比例）。

步驟3：規格

按照施工文件所示之尺寸、間距及埋置長度提供後置鋼筋（圖18）。

綴縫筋：KS SD400

錨定系統：Hilti HIT-RE 500 V3環氧樹脂，按照製造商的印製安裝說明書(Printed Installation Instruction, MPII)安裝，安裝的允許混凝土溫度範圍為：-5°C-40°C，綴縫筋安裝期間混凝土應保持乾燥。

使用旋轉鉋鑽及碳化鎢鑽頭進行鑽孔。在鑽孔之前先確定現有鋼筋的位置—未事先取得EOR授權，不得損壞(E)鋼筋。

2.6.5 設計範例—特殊結構牆中結構接合處之伸展長度

要求：提供用於SDC D中新特殊結構（剪力）牆的結構接合。

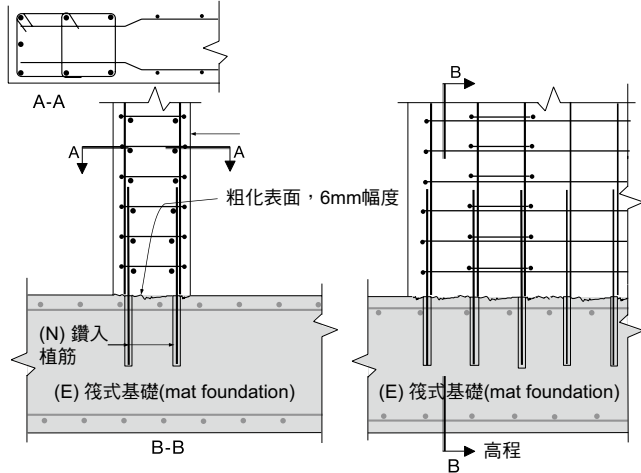


圖19、新的特殊結構牆。

步驟1：決定新鋼筋的要求。

現有結構：筏式基礎120mm厚，35 N/mm²混凝土，KS SD400鋼筋。

新結構：(N) 450mm厚之牆壁，依據ACI 318-14的18.10進行細部設計及施工，雙層鋼筋配置，邊界構件鋼筋依據18.10.6，40 N/mm²常重混凝土，KS SD400鋼筋，邊界構件鋼筋7 - D32鋼筋，腹板鋼筋(web reinforcing)為D25 @ 300mm（垂直中心處）、D19 @ 250mm（水平中心處）（參見圖19）。

步驟2：決定D32邊緣鋼筋(chord bar)的伸展長度。

如先前範例(2.6.3)所示，在給定邊緣距離及圍束條件的情況下，可將圍束項取最大值2.5。此外，依據ACI 318-14的18.10.2.3 (b)，為考量鋼筋可能的超強度，伸展長度必須增加25%。

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\Psi_s}{c_b + K_{tr}} \frac{\Psi_s}{d_b} \right] d_b = 1.25 \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0\sqrt{35}} \frac{1.0}{2.5} \right] 31.8 = 977\text{mm}$$

步驟3：決定D25垂直牆壁鋼筋的伸展長度，假設其不受18.10.2.3 (b)中1.25增加係數的約束。

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \frac{400}{1.0\sqrt{35}} \frac{1.0}{2.5} \right] 2.54 = 624\text{mm}$$

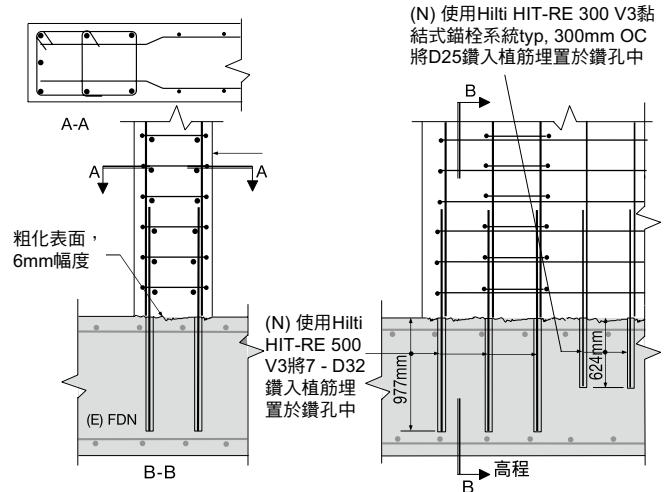


圖20、牆壁與基礎連接細部（未按比例）。

步驟4：規格

按照施工文件所示之尺寸、間距及埋置長度提供後置鋼筋（圖20）。

綴縫筋：KS SD400

錨定系統：Hilti HIT-RE 500 V3環氧樹脂，按照製造商的印製安裝說明書(Printed Installation Instruction, MPII)安裝，安裝的允許混凝土溫度範圍為：

-5°C - 40°C，綴縫筋安裝期間混凝土應保持乾燥。

使用旋轉鉗鑽及碳化鎢鑽頭進行鑽孔。在鑽孔之前先確定現有鋼筋的位置—未事先取得EOR授權，不得損壞(E)鋼筋。

備註：喜利得擁有一個合格的工程師團隊，可回答與後置鋼筋連接之設計及安裝相關的問題。

3.0 如何安裝？

在設計及安裝後置鋼筋時，應考慮施工現場的限制。

備註：除最新的黏結式錨定系統外，喜利得亦提供一流的探測及鑽孔設備，以利各種鋼筋直徑及埋置長度之後置鋼筋的安裝。

3.1 現有鋼筋及其他埋置物之位置

通常使用一種或多種掃描方法來進行現有鋼筋的定位。這些通常可歸類為：

- 使用磁場定位鐵質材料之掃描儀（金屬探測器／鐵質掃描儀 ferrous scanners，參見圖21），
- 使用GPR（透地雷達技術）之掃描儀，以及
- X光掃描設備。

針對距離混凝土表面200~250mm內的鋼筋，鐵質掃描儀可提供鋼筋位置及尺寸。GPR型式的掃描儀適合鐵質及非鐵質埋置物（例：鉛導管）的定位。若為嚴重堵塞或現有鋼筋對鐵質或GPR系統而言太深的區域，則可能需要X光掃描法。若可能，通常最好將竣工文件或原始設計文件與掃描結果搭配使用。



圖21、使用Hilti PS 300手持式鋼筋探測儀在開始鑽孔之前探測並繪製現有鋼筋的位置。

3.2 現有混凝土表面粗化

在澆鑄新混凝土之前對現有混凝土進行表面粗化不僅可增加附著力，還能提高界面透過剪力摩擦傳遞剪力的能力。若是要將新混凝土用在現有混凝土的表面上，通常會規定要對現有混凝土表面進行粗化10。若現有混凝土的表層已碳化，則應去除接受後置鋼筋區域內的碳化層。經驗法則顯示應去除鋼筋直徑加2.5 in.（約6mm）所形成之圓形區域上的碳化混凝土。

ACI 318-14表22.9.4.2要求粗化「…至大約6mm的全幅度」。此可透過機械方式（例：使用Hilti TE 70 ATC搭配粗化工具，參見圖22）、噴砂或噴水加以實現。在澆鑄新混凝土之前，應確認處理後的表面沒有任何鬆散材料。



圖22、使用喜利得TE 70-ATC兩用電鎚鑽將混凝土表面粗化。

3.3 安裝具有小保護層之後置鋼筋

與場鑄鋼筋一樣，後置鋼筋必須提供足夠的混凝土保護層以防止腐蝕。若鋼筋已正確安裝且整個鋼筋長度都被黏著劑包圍，則黏著劑可提供額外的腐蝕防護。依據ICC-ES混凝土元件中後置黏結式錨栓驗收標準(AC308)，後置鋼筋系統的合格條件包括驗證（經由加速老化試驗）黏著劑是否具有足夠的耐腐蝕性。

此外，為避免在鑽孔時使既有混凝土產生劈裂與／或剝落，特別是在使用電鎚或岩鑽設備時，必須在混凝土表面預留足夠的距離以利鑽孔作業。

Hilti的鑽孔導正輔具可與Hilti手持式電鎚鑽搭配使用，以提升鑽孔準確度（見圖23）。

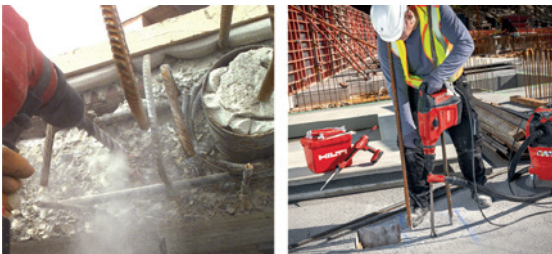


圖23、使用與未使用鑽孔導正輔具之鑽孔方式。

洗孔的淨距要求依所用之洗孔鑽頭的類型、直徑及長度而有所不同。

不論使用何種鑽孔方法，埋置物都可能導致鑽頭偏離預期的路徑。

從實務角度而言，相鄰的後置植筋之間的間距一般應維持為鋼筋直徑的4倍以上。

在適用的情況下，也應遵循ACI關於保護層與鋼筋間距的相關規定。

3.4 鑽孔方法

為滿足伸展長度要求，後置鋼筋通常具有更深的埋置長度，因此需要比黏結式錨栓更長的鑽孔。如前所述，通常採用以下三種鑽孔方法之一：

- 配備標準或十字形碳化鎢鑽頭或喜利得空心鑽頭(HDB)的旋轉式衝擊鑽（鎚鑽）⁹
- 衝擊式鑿岩機(percussive rock drills)
- 利用濕式或乾式法取芯技術之鑽石洗孔機（圖24）。



圖24、使用喜利得鑽孔機支架進行斜面洗孔。

9) 作為HIT-HY 200 V3 SafeSet™系統的一部分，喜利得空心鑽頭會在鑽孔時自動清除混凝土粉塵。

每種方法都有各自的優缺點。鉋鑽取得容易，且因為方便攜帶且容易使用，是大多數應用的首選方式。喜利得鉋鑽會產生不均勻的開孔表面，特別適合用於加強握裹（惟應採取正確的清孔程序）。若為較長的開孔，鉋鑽可能不實用，而且也不一定適合用於需要鑽穿埋置之鋼材之處。

Hilti SafeSet™ 系統由與喜利得吸塵器（VC 40-U或VC 20-U）搭配使用的空心鑽頭(HDB)組成。Hilti HDB採用與Hilti TE-CX及Hilti TE-YX鑽頭相同的最新碳化鎢鑽孔技術，且符合ANSI B212.15碳化鎢鑽頭尺寸標準。Hilti SafeSet系統在乾燥及潮濕的混凝土中表現同樣優異。

鑿岩機提供速度及效率，並會產生適合握裹的粗糙開孔表面，但鑿岩機較大的衝擊能量可能容易導致混凝土構件受損，特別是在邊緣距離較小或背面保護層較小的應用中使用時。鑿岩機通常需要較大的邊緣距離／構件厚度。與岩石鑽孔有關之應用請與喜利得聯絡。若為較長的埋置深度，一般最好使用洗孔機（圖25及圖26）。



圖25、使用喜利得濕式手持洗孔機與集水技術進行洗孔。



圖26、使用配備Hilti SafeSet™技術之喜利得旋轉衝擊鑽進行鑽孔。

相較於衝擊能量會導致混凝土破碎的鉋鑽，空心鑽頭利用含有鑽石碎片的犧牲基材來磨除混凝土。具有雷射銲接段的喜利得鑽石取芯鑽頭使用壽命長，而且鑽孔效率高。使用延長桿，洗孔機可鑽出很長又筆直的開孔。岩芯管的剛度能以較小的預期路徑偏差進行鑽孔，且能毫不費力地鑽穿埋置之鋼材。另一方面，在必須保護現有鋼筋的情況下（例：預力鋼腱之情況），洗孔的此一特性可能會帶來麻煩。更重要的是，洗孔機一般會產生非常平滑的開孔，此等開孔通常覆有一層不利於握裹的薄膜。因此，在注入黏著劑之前必須徹底清潔以取芯方式鑽出的開孔。另應注意的是，有些黏結系統不適合用於以取芯方式鑽出的開孔。若為合格的系統，已制定明確的清孔程序來優化在這些情況下的握裹，並在喜利得使用說明書中提供詳細的說明（這些說明書一般稱為「製造商的印製安裝說明書」或MPII）。

備註：一般來說，在諮詢負責工程師或其他具有管轄權的機構之前，不應鑽穿現有的鋼筋或其他埋置物體。

備註：正確的鑽孔及清潔對後置鋼筋的性能而言至關重要。所有喜利得錨定產品均隨附詳細的說明，喜利得將其稱為「使用說明書」。關於正確安裝的問題，喜利得透過現場代表、全國喜利得中心、喜利得客戶服務及線上方式（網址為www.hilti.com.kr）提供專家諮詢。

圖27說明鑽孔方法對淺埋置長度之後置鋼筋的荷載一位移行為的潛在影響。若未事先決定好要使用的鑽孔方法，則建議使用適合所有鑽孔方法的黏著劑（例：Hilti HIT-RE 500 V3）。

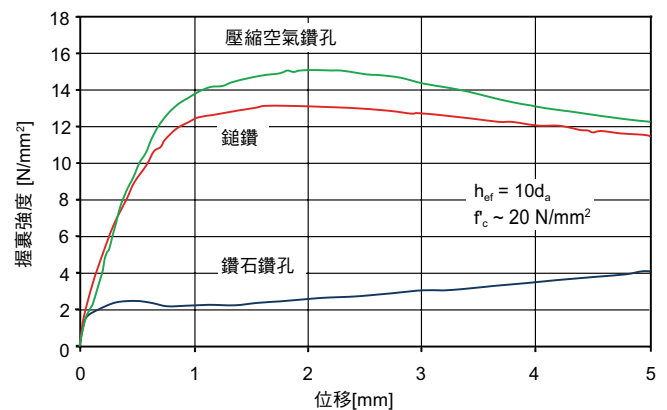


圖27、鑽孔方法對使用不適合鑽石鑽孔之黏著劑安裝之後置鋼筋的握裹一位移行為影響範例。

3.5 清孔

黏著劑與混凝土之間的握裹直接受到黏著劑注入時之孔壁狀況的影響。將要安裝後置鋼筋的混凝土在安裝時可能是處於乾燥狀態、飽和狀態甚至部分浸沒或水下狀態。

備註：如需在水飽和或水下的混凝土中進行安裝，應檢查欲使用的黏著劑系統是否適用於這些情況。

濕式鑽石洗孔必然會導致鑽孔中潮濕的環境。清孔通常包含水洗程序，接著以壓縮空氣吹洗開孔（圖28及圖32）去除碎屑及水，然後使用鋼刷（圖29）以機械方式刷洗孔壁。



圖28、以壓縮空氣進行（部分）清孔作業的喜利得配件。



圖29、用於清孔的喜利得延長桿及與Hilti HIT-RB公差匹配的鋼絲刷。

所有清潔程序的最後一步都是使用壓縮空氣。

（重要的是應注意，使用壓縮空氣可能導致碎屑揚起—必須全程佩戴護目鏡。）

圖31顯示喜利得「使用說明書」中規定之清孔對後置鋼筋性能的重要性。在可能無法遵守多步驟清孔程序的情況下，建議將Hilti SafeSet™技術與喜利得空心鑽頭(HDB)搭配使用。



圖30、Hilti SafeSet™系統搭配空心鑽頭(HDB)及吸塵器。

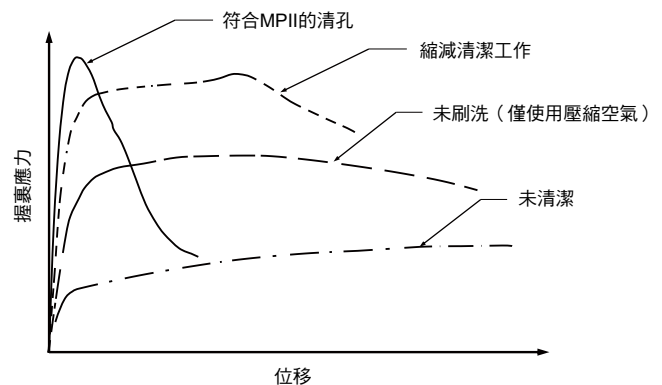


圖31、清孔程序對在承受拉伸荷載之後置鋼筋上測得之握裹及位移的潛在影響示意圖。



圖32、使用壓縮空氣吹洗工具清潔孔。

喜利得提供多種配件，以按照「使用說明書」進行深鑽孔的清
潔。包括公差匹配的鋼刷、用於長孔的刷具延長桿、方便進行
電動刷洗的附件、空氣槍、延長軟管、接頭及空氣噴嘴。喜利
得黏結式錨栓安裝套件（圖30）在單一套件中提供安裝後置
鋼筋所需之其他元件。

3.6 選擇黏著劑系統

已針對各種施工現場參數，就喜利得黏著劑系統對後置鋼筋應
用的適用性進行驗證。儘管如此，為後置鋼筋安裝選擇合適的
喜利得黏著劑系統（圖33）及注射設備（圖34）在一定程度
上取決於施工現場的參數；參見第4.1節。



圖33、適合後置鋼筋連接的喜利得錨定黏著劑。

備註：不得將未針對後置鋼筋應用進行適當驗證的黏著劑
用於結構或安全相關應用。

例如，若規定大型及深埋鋼筋應使用快速固化型黏著劑，則注
入黏著劑所需的時間可能會超過聚合物的工作時間。在此情況
下，可能無法將鋼筋完全插入鑽孔中及／或黏著劑可能無法達
到完整的強度。其中，當將黏著劑大量注入大型鑽孔中時，與
聚合相關的放熱反應會導致溫度過度上升，反而會加速固化，
進而使鋼筋的安裝變得更為複雜。



圖34、針對較小的鋼筋直徑，將Hilti HIT-RE 500 A22充電式黏著劑
注射器與Hilti HIT-RE 500 V3／Hilti HIT-HY 200 V3搭配使用。

反之，在零度以下時注入黏著劑會導致黏度升高，同樣會造成
以手動方式注射黏著劑及鋼筋的安裝變得困難或無法進行。

與黏著劑選擇有關的基本考量應包括：

- 能否在黏著劑的膠化時間(gel time)內完成黏著劑注射及鋼筋
的安裝？
- 是否有適當的注射設備以及所有必要的配件，以確保正確的
注射及混合？
- 黏著劑是否適合混凝土的溫度及濕度情況、開孔的方向及鑽
孔方法？
- 注入黏著劑並將鋼筋安裝到充滿黏著劑的開孔中時需要哪些
機械工作或設備？
- 在黏著劑固化期間鋼筋能否保持定位？

3.7 注射黏著劑

注射黏著劑旨在實現無孔隙的安裝。除會降低握裹面積並抑制固化外，注入之黏著劑中的氣孔可能會導致與鋼筋安裝有關的工作量增加，且可能導致鋼筋安裝過程中因為空氣被擠出黏著劑基材，而造成黏著劑不受控制地從鑽孔中噴出。

備註：在注射喜利得黏著劑時，務必穿戴適當的皮膚及眼睛防護裝備。

為在鑽孔中注入含有最少量氣孔的黏著劑，喜利得注射系統使用公差匹配的注射活塞(piston plug) (圖35)。喜利得注射活塞系統通過塞頭上的黏著劑壓力，為操作員提供明確的反饋以控制注射程序，已證明能大幅改善注射品質及效率。



圖35、Hilti HIT-SZ注射活塞，提供適合#3至#18鋼筋的直徑。

通常會依據鋼筋的尺寸及方向、環境溫度情況及可觸性來選擇注射設備 (圖36)。



圖36、Hilti HIT-P8000D氣動注射器，適用於大體積安裝及大鋼筋直徑。

3.8 安裝鋼筋

能以（相對）最小的出力沿垂直向下插入較小的鋼筋直徑。水平及向上傾斜方向的大直徑鋼筋可能需要一定的力氣才能抬起鋼筋並將其插入已注入黏著劑的鑽孔中 (圖37)。不論是何種情況，均建議在注入黏著劑之前先測試鋼筋與鑽孔的配合度。

若為倒吊安裝，特別是直徑較大的鋼筋，必須採取措施以在黏著劑固化期間固定鋼筋。此外，對於安裝要承受持續拉伸荷載之鋼筋的安裝人員，可能有適用之認證要求，另外可能有額外的特殊檢驗要求。

備註：喜利得注射器可在所有方向、孔徑及深度以及溫度情況下提供高效率且無孔隙的黏著劑注射。

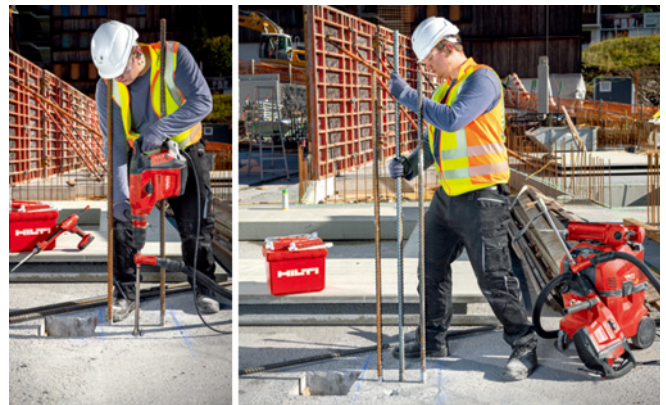


圖37、安裝大直徑鋼筋。

4.0 如何決定要使用何種系統

後置鋼筋的安裝方式選擇包括膠結性水泥漿、聚合物黏著劑及結合膠結成分與聚合物的混合系統。膠結性（例如底板）水泥漿的使用通常僅限於井下(down-hole)應用，本指南不做詳細的討論。黏著劑（有時稱為觸變性黏著劑(thixotropic adhesives)）具有正確的黏度，可在鋼筋與混凝土之間的環形空間中提供無孔隙的黏合層，同時仍能抵抗不受限制的流動，係專為錨定及鋼筋埋置所開發。這些系統可在各種方向、各種使用情況下進行安裝，且具有優異的握裹強度。系統的正确選擇取決於許多與該項工作有關的參數。

4.1 選擇系統時的考量

施工現場的限制會影響設計值（握裹強度）以及安裝效果。喜利得黏著劑系統的典型參數如下所示：

施工現場限制	HIT-HY 200-R V3 ¹	HIT-RE 500 V3
典型的鋼筋直徑範圍	D10至D25 (#3 - #8)	D10至#11 ² (#3 - #11)
埋置範圍	最多600mm	最多2100mm
基礎材料的溫度（安裝）	10°C至40°C	-5°C至40°C
工作時間 ³	6分鐘至3小時	12分鐘至4小時
固化時間 ³	1小時至20小時	4小時至72小時
在乾燥及水飽和的混凝土中鑽孔	是	是
注水的鑽孔及水下應用	否	是
鎚鑽孔	是	是
洗孔	否	是
使用Hilti HDB及VC吸塵器之Hilti SafeSet™技術	是	是 ⁴
地震／動態荷載	是	是

1 提供HIT-HY 200-A V3（加速固化）。因膠化時間短，不適合較大的鋼筋直徑。

2 若鋼筋尺寸較大，請聯絡喜利得。

3 與溫度有關。

4 聯絡喜利得。

因此，系統的選擇取決於設計要求及施工現場限制兩者之組合。另應注意，每種系統都提供多種注射方式可供選擇，包括套筒尺寸及注射設備（手動、電池或氣動驅動）。此外，喜利得亦提供專門的鑽孔系統，可大幅降低清孔要求。選擇系統時有時會被忽略的一個面向就是必須放入孔中之黏著劑的絕對體積。大直徑且非常深的孔可能需要比使用氣動設備才能合理放置還要大體積的黏著劑。此外，由於聚合反應的放熱性質，注入大量的黏著劑會產生過多的熱量。若為超出後置鋼筋正常應用範圍之情況，應謹慎考慮這些問題。

備註：喜利得技術人員可就獨特的應用或非標準應用提供協助。

5.0 制定設計資料

5.1 背景

在鋼筋—黏著劑介面處，荷載經由附著力及機械互鎖作用傳遞。在黏著劑混凝土介面處，荷載經由附著力及微機械互鎖作用傳遞。握裹強度通常定義為在鋼筋埋置長度上的最大平均握裹力。

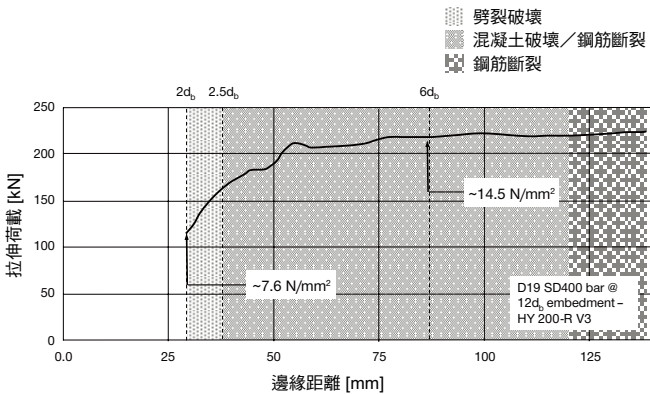


圖38、無圍束拉伸破壞荷載與邊緣距離的關係。

在過去二十年間已進行詳盡的調查，以評估承受各種荷載條件的後置鋼筋連接。大部分的工作是在歐洲及美國的知名研究機構進行¹⁰。試驗一致顯示，使用合格系統安裝的後置鋼筋能展現出至少與在類似條件下之場鑄鋼筋相當的性能。

圖38繪製在喜利得混合黏著劑中埋置深度為12個鋼筋直徑之D19鋼筋隨著邊緣距離的增加而產生之拉伸破壞荷載。近邊緣處的握裹強度受到混凝土劈裂強度的限制，約為7.6 N/mm²。在邊緣距離較大之處，平均極限握裹強度增加至約為14.5 N/mm²。

2006年，歐洲技術認可組織(European Organization for Technical Approvals, EOTA)發布了「TR023後置鋼筋連接評估(Assessment of Post-installed Reinforcing Bar Connections)」[7]。此文件提供一種途徑，用來驗證使用特定系統進行之後置鋼筋連接在荷載及位移行為兩方面能展現出與場鑄鋼筋連接相當的行為。

2013年，ICC-ES修改其驗收標準¹¹，納入用於後置鋼筋應用之黏結性錨栓系統的驗證試驗。這些合格規定包括針對TR023制定的程序，並新增額外的試驗以檢查循環拉伸性能（地震）以及深埋置深度時的近邊緣性能。

5.2 建立所需之系統性能（合格條件）

用於後置鋼筋應用之黏著劑系統的合適性取決於許多因素。可能適合錨定應用的系統未必能滿足安全可靠之鋼筋安裝的要求。

設計用於後置鋼筋之黏著劑系統的一個關鍵面向在於系統配置為受劈裂控制時的行為。圖39顯示置於柱角落且埋置深度為35個鋼筋直徑之D25鋼筋的拉伸試驗。這些專門針對AC308後置鋼筋系統之鑑定所開發的試驗，直接比較在劈裂為極限破壞模式之情況下，預埋及後置鋼筋的行為。若黏著劑太硬，過度的剪切遲滯效應會導致近邊緣鋼筋出現類似拉鍊型式的破壞。若黏著劑太「軟」，後置鋼筋的鬆弛可能會使新舊混凝土間接頭的開度過大，導致失去剪力傳遞或腐蝕。

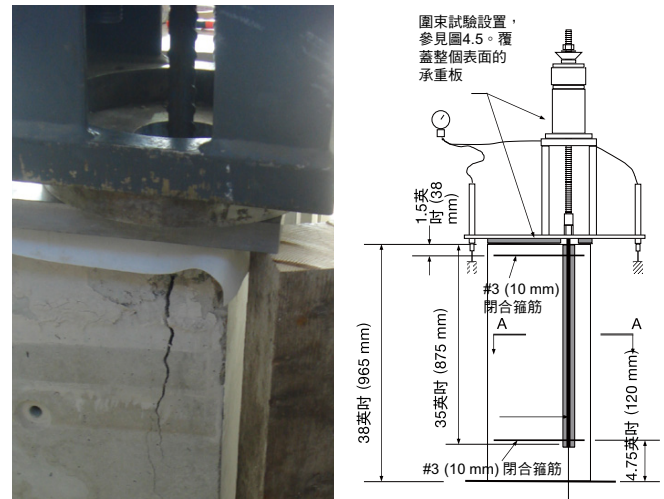


圖39、依據AC308 [9]進行握裹／劈裂行為試驗。

圖40列出AC308表3.8提供之鑑定用於後置鋼筋應用之黏結式錨栓系統所需的所有試驗。

10) 參閱「可進一步閱讀的參考資料及建議」：[8]、[10]、[11]、[12]、[17]、[18]、[19]、[20]。

11) AC308—混凝土元件中後置黏結式錨栓驗收標準(Acceptance Criteria for Post-installed Adhesive Anchors in Concrete Elements)，2017年10月核准（2018年3月進行編輯修訂），ICC Evaluation Service, LLC[9]。

圖40、AC308表3.8：評估用於後置鋼筋連接之竹節鋼筋的試驗計畫

試驗				鋼筋尺寸	評估			鋼筋埋置 長度 ℓ_b	最小 樣品數 n_{min}
試驗 編號	試驗參照 章節	目的	試驗參數	US/M ^{§,II}	α_{reg}	荷載及 位移	f_c^*		
服務條件試驗									
1a	9.6.3.1	握裹阻力	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#4/12	-	10.25.2 10.25.3	低	$7d_b$	五件
1b	9.6.3.1	握裹阻力	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#8/25	-	10.25.2 10.25.3	低	$7d_b$	五件
1c	9.6.3.1	握裹阻力	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	$d_{b,max}$	-	10.25.2 10.25.3	低	$7d_b$	五件
1d	9.6.3.1	握裹阻力 ^{§§}	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	$d_{b,max}$	-	10.25.2 10.25.3	高	$7d_b$	五件
1e ^{††}	9.6.3.1	握裹阻力 ^{§§}	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#4/12	-	10.25.2 10.25.3	高	$7d_b$	五件
2	9.6.3.2	握裹／劈裂行為	拉伸、圍束、鋼筋置於角落 之情況	#8/25	-	10.25.6	低	$35d_b$	六件 [‡]
可靠度試驗									
3	9.6.4.1	對清孔之敏感度， 乾燥基材 ^{#,**}	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	$d_{b,max}$	≥ 0.8	10.25.7	低	$7d_b$	五件
4	9.6.4.2	對清孔之敏感度， 飽和混凝土 ^{#,**}	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	$d_{b,max}$	≥ 0.8	10.25.7	低	$7d_b$	五件
5	9.6.4.3	對凍結／ 解凍條件之敏感度	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#4/12	≥ 0.9	10.25.7	高	$7d_b$	五件
6	9.6.4.4	在最大長期溫度下對持續 荷載之敏感度 [#]	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#4/12	≥ 0.9	10.25.7	低	$7d_b$	五件
7	9.6.4.5	安裝溫度下降 [#]	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	#4/12	≥ 0.9	10.25.7	低	$7d_b$	五件
8	9.6.4.6	對安裝方向之敏感度 [#]	拉伸、圍束、單根鋼筋 [†]	$d_{b,max}$	≥ 0.9	10.25.7	低	$7d_b$	五件
確認安裝程序									
9	9.6.5.1	深埋之安裝	已注射孔之鋼筋安裝，水平	$d_{b,max}$	-	10.25.8	-	$60d_b$	三件
10	9.6.5.2	確認注射	在透明管中注射	$d_{b,max}$	-	10.25.8	-	$60d_b$	三件
耐用性									
11a	9.6.6.1.1	耐鹼性	切片試驗	#4/12	-	10.25.10	低	-	十件
11b	9.6.6.1.2	耐疏性	切片試驗	#4/12	-	10.25.10	低	-	十件
12	9.6.7	耐腐蝕性	電流及電位試驗	#4/12	-	10.25.9	低	2 3/4"	三件
特殊情況									
13	9.6.8	鋼筋連接之耐震鑑定 [*]	循環拉伸、圍束、單根鋼筋	$d_{b,max}$	-	10.25.11	低	$7d_b$	五件
14	9.6.8	鋼筋連接之耐震鑑定 [*]	循環拉伸、圍束、單根鋼筋	$d_{b,max}$	-	10.25.11	高	$7d_b$	五件

* 高／低強度混凝土之定義參見4.3.4。

† 依據圖4.5對試件進行之試驗，且最小長度／厚度為 ℓ_b+2 英吋(ℓ_b+50 mm)。

§ 尺寸為美制及歐洲公制單位， $d_{b,max}$ 為尋求認可的最大尺寸。

II 以符合9.6.3.2.1機械要求之竹節鋼筋進行試驗。

若已按照表3.1、3.2或3.3進行相應的試驗，則不需要進行試驗。

‡ 在三個試件中測試鋼筋，總共進行六次使用場鑄鋼筋之試驗及六次使用後置鋼筋之試驗。

** 若清孔設備及技術與表3.1、3.2或3.3中用於試驗的不同，則必須進行測試。

§§ 選擇性試驗。若未執行此項試驗，則評估報告中應註明用於依據ACI 318決定伸展及接續長度的 f_c' 值不得超過2500 psi (17.2 MPa)。

選擇性試驗。

†† 僅當系統尚未按照表3.2進行鑑定時才需要進行試驗。此外，根據表3.2，試驗編號1b及1d應使用埋入 $7d_b$ 的#4 (12 mm)鋼筋進行。參見10.25.1.2。

除上述的握裹／劈裂試驗外，另進行試驗以判定系統在後置鋼筋應用中的合適性，包括以下項目：

1. 黏著劑發展所需之握裹阻力的能力。
2. 握裹阻力對清孔、凍結及解凍情況、使用時混凝土的極端溫度、安裝方向及鹼度／硫分暴露的敏感度。
3. 系統能夠成功完成長鋼筋（高達60個鋼筋直徑）安裝且後置鋼筋周圍的黏著劑沒有明顯孔隙之能力。
4. 後置鋼筋的耐腐蝕性。
5. 當劈裂作用主導構件行為時，黏著劑在錨定長度內發展黏結抗力的能力。
6. 依據文獻記載，比較後置式鋼筋與場鑄鋼筋在循環拉力作用下的受力行為。

雖然現代的結構級黏著劑通常能形成遠超過圖45所示之握裹阻力，但施工現場安裝情況、溫度及評估中包含的其他因素之影響都可能導致握裹阻力大幅下降。因此，就合格性鑑定而言，系統性能至關重要，而非僅是在最佳情況下所決定的握裹強度。

6.0 背後的故事為何？

6.1 建立所需之鋼筋埋置長度

依據AC308標準進行合格性鑑定的系統需要證明其握裹阻力及剛度特性與場鑄鋼筋相容。因此，可以使用與直條場鑄鋼筋伸展規定相同的規定，來設計及詳細規劃利用合格系統安裝的後置鋼筋。

6.2 ACI 318-14¹²直條鋼筋伸展長度規定總覽

ACI的伸展長度概念係以在鋼筋埋置長度上可達到的平均握裹應為基礎。伸展長度可定義為鋼筋應力從零增加至標稱降伏強度之最短長度。此定義結合兩個非常重要的概念——鋼筋應力及標稱降伏強度。鋼筋應力為鋼筋橫截面每單位面積的受力。標稱降伏強度為發生永久（無彈性）變形時的最小鋼筋應力。進行結構鋼筋混凝土設計時，假設鋼筋會在因握裹不足而發生過早破壞之前先發展其降伏強度。伸展長度旨在確保鋼筋可在結構荷載下發展標稱降伏強度。

ACI 318-14第25.4.2.3節顯示直條竹節鋼筋在張力下的伸展長度，如方程式2所示：

$$\ell_d = \left[\frac{1}{1.1} \times \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \times \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{c_b + K_{tr}} \right] d_b \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 2})$$

式中，

$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{s \cdot n}$ s 為鋼筋間距， n 為在劈裂面上待伸展或接續之鋼筋之總根數

$\psi_t = 1.3$ ，若為在鋼筋下方具有超過300mm新澆混凝土之水平鋼筋

= 1.0，若為其他情況（適用於後置鋼筋）

$\psi_e = 1.5$ ，若為保護層小於 $3d_b$ 或淨間距小於 $6d_b$ 之環氧樹脂塗層鋼筋、鋅與環氧樹脂雙塗層鋼筋

= 1.2，針對所有其他環氧樹脂塗層鋼筋、鋅與環氧樹脂雙塗層鋼筋

= 1.0，若為無塗層鋼筋及鍍鋅之鋼筋（通常適用於後置鋼筋）

$\psi_s = 0.8$ ，針對D19及更小的鋼筋

= 1.0，針對D22及更大的鋼筋

$$\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \leq 2.5$$

λ = 輕質混凝土的改正係數

6.3 ACI 318-14中其他的直條鋼筋規定[2]

ACI 318-14包含許多對直條鋼筋錨定而言至關重要的規定。部分條款說明如下。如需更多資訊，請查閱規範。

第25.4.1.1節要求應將計算出之給定區段上鋼筋中的張力（或壓縮力）發展至該區段的每一側，意即，將鋼筋延伸至「...超出鋼筋中的所有峰值應力點。」

第25.4.10節（過量鋼筋）允許縮減伸展長度，縮減量與超出分析所需之過量鋼筋數成正比。在非連續支撐、需要針對 f_y 進行錨定或伸展之處、需要連續鋼筋之處、在指定為SDC C、D、E或F結構的抗地震力系統中，以及在指定為SDC C、D、E或F結構中將混凝土基樁及裝填混凝土的管樁錨定至樁帽的情況下，不允許縮減伸展長度。

第25.4.9節承受壓縮力直條鋼筋的伸展長度要求如方程式3所示：

$$\ell_d = \text{MAX} \left[\left[\frac{0.28 f_y \psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b; 0.043 f_y \psi_r d_b; 200 \text{mm} \right] \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 3})$$

第7.7.3.3及9.7.3.3節指出，鋼筋應延伸至不再需要抵抗撓曲的點之後，距離至少為 d 與 $12d_b$ 中的較大者，但簡單支撐跨距的支撐處及懸臂的自由端除外。

第7.7.3.4及9.7.3.4節要求在撓曲構件中的連續鋼筋，埋置距離至少要超過不再需要彎曲或終止張力鋼筋來抵抗撓曲之處加上 ℓ_d 。

第7.7.3.5及9.7.3.5節禁止撓曲鋼筋終止於張力區，除非a）鋼筋截斷處的因數化剪力不超過 $2/3 \phi V_n$ ，或b）連續鋼筋在鋼筋截斷處提供雙倍的抗彎面積（#11及更小）且因數化剪力不超過 $3/4 \phi V_n$ ，或c）從截斷點到 $3/4d$ 距離處沿每根終止鋼筋提供符合諸如9.7.3.5(c)之要求的箍筋或彎鉤。

第9.7.3.8.2節要求將「屬於主要抗側向荷載系統一部分」之橫梁中的正彎矩鋼筋錨定，以在張力下於支撐面處發展 f_y 。

第9.9.4.5節要求，除非使用附錄A中的支柱及繫桿規定進行設計，否則應將深梁中的正彎矩鋼筋錨定，以在簡單支撐處發展 f_y 。

¹² 美國混凝土學會，「結構混凝土建築規範(ACI 318-14)及解說(Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary)」，Farmington Hills，MI，2011 [2]。

第25.5.1.3節要求在撓性構件中以非接觸式搭接而接續的鋼筋，其間距不得超過所需接續長度的1/5與150mm中的較小者。

表25.5.2.1提供Class A及Class B張力搭接的要求。若至少提供所需鋼筋的兩倍，且總鋼筋中有一半或以下是在要求的搭接長度內接續，則允許Class A接續(ℓ_d)。在所有其他情況中皆允許Class B接續($1.3 \ell_d$)。

第25.5.2.2節要求不同尺寸的鋼筋應在不小於較大鋼筋的 ℓ_d 或較小鋼筋的張力搭接長度($1.3 \ell_d$)的長度上進行接續。

第18.6.3.3節要求在特殊抗彎曲構架中之撓曲鋼筋的搭接長度上，提供彎鉤或螺旋鋼筋。接頭內、距離接頭面兩倍構件深度的範圍內，以及「…因超出線性行為範圍之橫向位移，而可能發生鋼筋撓曲降伏之處」，不允許接續。

第18.8.5.1節要求特殊抗彎曲構架中承受張力之D10至D36直條鋼筋的伸展長度如方程式4所示：

第18.8.5.4節要求直條鋼筋在穿過柱之圍束核心或邊界元件的接合處終止，且不在核心內的任何 ℓ_d 部分應增加1.6倍。

第18.10.2.3 (b)節規定伸展長度 ℓ_d 應增加1.25倍，在特殊結構牆及連接梁中「…因橫向位移而可能發生縱向鋼筋降伏之處…」。

第18.10.6.4 (k)節允許將牆壁腹板中的水平鋼筋錨定，以在張力下於邊界元件之圍束核心內發展 f_y ，惟所需的腹筋面積不得超過與腹筋平行之邊界元件橫向鋼筋所需的面積。

備註：此方程式（即適用於鉤形鋼筋之值的2.5倍）適用於低舉升結構(low-lift construction)，故能合理地延伸至後置鋼筋上。

第18.12.7.3節要求所有「用來抵抗集力構件作用力(collector force)、橫隔板剪力或撓曲張力之鋼筋…應發展或接續以因應張力下之 f_y 。」

$$\ell_d = \frac{f_y d_b}{(5.4 \lambda \sqrt{f'_c})} \quad (\text{Eq. 4})$$

6.4 以伸展長度概念為基礎之後置鋼筋設計

圖41提供在斯圖加特大學(University of Stuttgart)進行之拉伸試驗中後置鋼筋與場鑄鋼筋的性能比較。若為小型混凝土保護層（約2英吋），顯示之後置鋼筋及場鑄鋼筋的破壞荷載幾乎相同，證實就劈裂破壞而言，合格的後置鋼筋具有與場鑄鋼筋相同的行為。在較大的混凝土保護層處，行為不再受劈裂之控制，且鋼筋會因拔出而破壞。在此情況下，後置鋼筋的握裹強度可能明顯高於場鑄鋼筋的握裹強度，視使用的黏著劑而定。

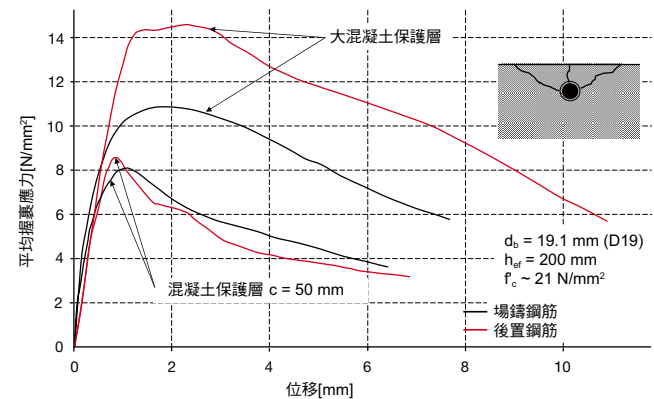


圖41、以邊緣距離為函數比較握裹應力¹³

此外，採用合格系統安裝之後置鋼筋的荷載-滑移性能與場鑄鋼筋類似。因此，承受張力之場鑄鋼筋的設計規定亦可延伸至合格的後置鋼筋。

可利用等效握裹應力改寫用於承受張力之竹節鋼筋的ACI 318-14方程式(25.4.2.4a)，如方程式5所示：

$$A_s f_y = \tau_{bond} \pi d_b \ell_d \quad (\text{Eq. 5})$$

式中

τ_{bond} 為等效握裹應力

代入 $A_s = \pi d_b^2 / 4$ ，可利用第25.4.2.4節所示之伸展長度方程推導出以下的握裹表達式，如方程式6所示：

$$\tau_{bond} = 0.275 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right) \left(\frac{1}{\psi_t \psi_e \psi_s} \right) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{Eq. 6})$$

13) Spieth, H., 「握裹鋼筋的結構行為及設計(Structural Behavior and Design of Bonded Reinforcing Bars)」，博士論文，University of Stuttgart [20]。

就後置鋼筋而言，可將與混凝土澆置有關之缺陷納入考慮的「頂部鋼筋」修正係數 ψ 視為等於1。

應注意，ACI規範藉由對第25.4.2.3節伸展長度方程式中的 $(c_b + K_{tr})/d_b$ 商數設置一個等於2.5的限值，來限制混凝土中握裹應力的利用程度。圖42為此限制的示意圖，其中若為遠離邊緣的鋼筋，假設在極限荷載下其行為不再受到劈裂的控制。喜利得錨定黏著劑可產生遠超過此限制的握裹應力，但應變相容性及可服務性(serviceability)等方面的考量通常會要求使用與規範有關但更為保守的埋置長度。

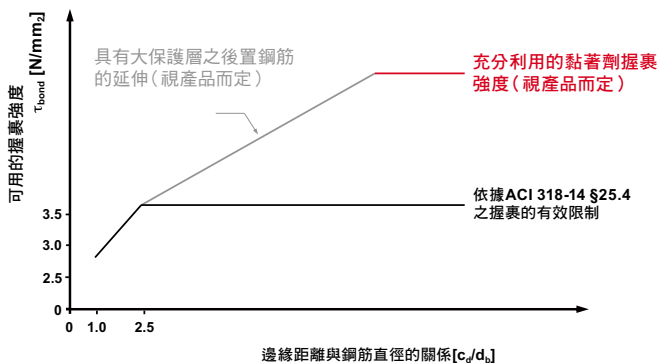


圖42、握裹應力的有效限制。

依據ACI 318-14決定之與伸展長度相應的等效（均勻）握裹應力如圖43所示：

鋼筋尺寸	混凝土壓縮強度(N/mm ²)					
	21	24	27	30	35	40
≤ D19	3.9	4.2	4.5	4.7	5.1	5.4
≤ D22	3.2	3.4	3.6	3.8	4.1	4.3

圖43、依據ACI 318-14第25.4.2.4節發展之無塗層鋼筋在常重混凝土中且 $(c_b + K_{tr})/d_b = 2.5$ 時的等效握裹強度(N/mm²)。

在沒有圍束鋼筋的情況下，當 c_b 與 d_b 之比等於2.5時，圍束項達到極限值。理論上，保護層大於或等於 $2.5d_b$ 之鋼筋的伸展長度不再受到劈裂之控制。由於實務考量上通常會規定後置鋼筋的邊緣距離要大於 $2.5d_b$ ，因此橫向鋼筋的存在通常不是決定伸展長度的因素。

6.5 建立鋼筋埋置長度之替代方式

ACI規範的伸展長度規定係以鋼筋的間隔可能很近且可能置於與混凝土表面之距離為保護層深度之處的假設為基礎。

針對置於距離邊緣等於或大於 $2.5d_b$ 處的鋼筋，伸展長度的縮減有限，因為假設這些鋼筋應為受拔出之控制（相對於劈裂而言）。增加邊緣距離應允許伸展長度的進一步縮減，但承受較高握裹應力且間隔緊密的鋼筋可能會導致混凝土的拉破破壞，這是一種在形成伸展長度時沒有預料到的破壞模式。

但當後置鋼筋未與現有鋼筋搭接且安裝時與距離的邊緣夠遠時，採用以下章節所述之其他設計方式或許是適當的做法。

6.5.1 使用錨栓設計概念之後置鋼筋設計¹⁴

文獻中曾就使用錨栓設計概念來決定後置鋼筋的埋置進行討論，且適用於亦已依據錨栓合格規定（例：ACI 355.4、AC308）判定為合格的系統。錨栓設計概念的使用相對簡單，但需要針對埋置進行適當的假設。例如，是否需要達到鋼筋的降伏？若需要，則是否應在標稱鋼筋降伏應力上施加超過的強度？這些及其他問題的答案取決於具體情況。

此方式可以細分為兩類：

第1類—安裝在牆面、樓板面及基礎面中且遠離邊緣之處的鋼筋。在此情況下，假設後置鋼筋距離任何邊緣都夠遠，可防止劈裂破壞。同樣假設混凝土拉破及握裹阻力不會受到邊緣條件的影響。

第2類—遠離邊緣安裝但在決定混凝土拉破強度時仍可能受到邊緣距離影響的鋼筋。在此情況下仍可使用錨栓設計概念，但會因為邊緣鄰近性而變得複雜，且需要疊代才能找出最佳的解決方案。

ACI 318-14規定，承受張力之黏結式錨栓的設計強度應取在給定鋼筋直徑及錨定長度（埋置深度）時所決定之鋼筋、混凝土拉破強度及握裹強度的最小值，且包含適當的強度衰減因數，並將作為設計規定基礎的均勻握裹強度模型限制為埋置深度介於4到20個錨栓直徑之間。超過20個直徑後，握裹應力的非線性分布可能導致破壞時可用的握裹應力下降，此必須透過工程判斷進行評估。

依據ACI 318-14方程式(17.4.1.2)，決定單一錨栓元件（例：螺紋螺桿或綴縫筋）在張力下的標稱鋼材強度 N_{sa} ，其為錨栓元件拉伸應力面積與錨栓元件標稱極限強度的乘積。ACI 318指出使用極限強度是因為許多錨栓元件未展現出明確的降伏平台(yield plateaus)。因此，在可在方程式(17.4.1.2)中使用之標稱極限應力值上設置 $1.9f_t$ 的限制，以免錨栓元件在服務荷載等級下降伏。就鋼筋而言，標稱降伏強度通常未得到良好的控制。一般來說，降伏強度可能超過規定值的25%。測試的極限不能低於實際降伏的125%。

依據ACI 318-14第17.4.2.1節，一組錨栓在張力下的標稱混凝土拉破強度如方程式7所示：

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ed,N} \psi_{ec,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} \left[k_c \lambda_a \sqrt{f'_c} (h_{ef})^{1.5} \right] \quad (N) \quad (Eq. 7)$$

式中，

f'_c 為混凝土的抗壓強度，單位為psi

$$A_{Nco} = 9(h_{ef})^2$$

A_{Nc} 以 $3h_{ef}$ 的臨界錨栓間距及 $1.5h_{ef}$ 的錨栓邊緣距離為基礎之理論拉破主體(breakout body)的預測面積

$\psi_{ed,N}$ 近邊緣錨栓應考慮的因數，反映出因邊緣的存在而引起之受干擾的應力狀態

$\psi_{ec,N}$ 承受偏心荷載之群組應考慮的因數

$\psi_{c,N}$ 未開裂混凝土應考慮的增加因數

$\psi_{cp,N}$ 環向應力應考慮的因數

λ_a 輕質混凝土調整因數

k_c 混凝土拉破的效率因數（特徵值，開裂混凝土），若為黏結式錨栓，按照ACI 355.4進行試驗以決定此值。

h_{ef} 有效埋置深度(in)

同樣的，依據ACI 318-14第17.4.5.1節，決定開裂混凝土中握裹錨栓的特徵握裹強度 N_{ag} ，如方程式8所示：

$$N_{ag} = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \psi_{ed,Na} \psi_{ec,Na} \psi_{cp,Na} \left[\tau_{cr} \lambda_a \pi d_a h_{ef} \right] \quad (N) \quad (Eq. 8)$$

式中，

$$A_{Nca} = (2c_{Na})^2$$

A_{Na} 以臨界錨栓邊緣距離為基礎之預測的影響面積， c_{Na}

$$c_{Na} = 10d_a \sqrt{\frac{\tau_{uncr}}{1100}} \quad (in)$$

τ_{cr} 依據ACI 355.4評估開裂混凝土的特徵握裹應力

τ_{uncr} 依據ACI 355.4評估未開裂混凝土的特徵握裹應力

d_a 錨栓元件（螺紋螺桿、鋼筋）的直徑

14) Charney, F., et al., 「混凝土結構中後置握裹鋼筋之伸展及接續的建議程序(Recommended Procedures for Development and Splicing of Post-installed Bonded Reinforcing Bars in Concrete Structures)」，ACI Structural Journal [4]。

其他項與混凝土拉破的表達式類似。

將ACI 318-14第17.3.3節所示之強度衰減因數(ϕ)應用於標稱鋼材、混凝土拉破強度及握裹強度，並將最小值與因數化的設計荷載 N_{ua} 做比較。依據ACI 318-14第17.3.1.2節對承受持續拉伸荷載的黏結式錨栓進行額外的設計檢查。在指定為耐震設計類別(Seismic Design Categories) C、D、E或F的結構中使用錨栓時，依據ACI 318-14第17.2.3節設置與錨栓行為有關的額外要求。

依據ACI 318-14 R25.4.2.3，劈裂主導置於最小保護層且沒有橫向或其他圍束鋼筋之鋼筋的行為。具有增加保護層及／或提供橫向鋼筋的鋼筋則由拔出破壞所主導，但值得注意的是，「增加保護層或橫向鋼筋（超出為確保拔出行為時的假設）不太可能增加錨定能力。」應注意，不論置於特定體積混凝土中的鋼筋密度為何，都不預期會發生混凝土拉破之情況。此假設可能是以與伸展長度方程有關之相對較低的握裹應力（參見圖43）為基礎。但針對依據錨栓理論設計的后置鋼筋，會用到測試之黏著劑的完整握裹強度，因此需要依據ACI 318評估握裹力及拉破能力。

可藉由將ACI 318中的混凝土拉破及握裹強度表達式改寫為伸展長度方程式，來設計後置鋼筋，意即藉由將與混凝土破壞或握裹破壞相關的強度等同於埋置鋼筋的降伏強度，來求解埋置情況。這在保護層（邊緣距離）很大但埋置深度有限的情況下可能特別有用，例如將鋼筋伸展至牆面中。

備註：如需關於此方式的更多資訊，請參閱Charney, et al., 「混凝土結構中後置握裹鋼筋之伸展及接續的建議程序(Recommended Procedures for Development and Splicing of Post-installed Bonded Reinforcing Bars in Concrete Structures)」, ACI Structural Journal, Vol.110, No.3, May-June 2013 [4]。

依據Charney et al.，當單一後置鋼筋安裝在常重混凝土中且遠離邊緣時，混凝土的拉破強度不會受到邊緣距離的影響，在埋置鋼筋中達到降伏所需之與混凝土拉破有關的埋置長度或許能以方程式9表示：

$$\ell_{d,breakout} = 1.2 \left(\frac{A_b f_y}{K_c \sqrt{f'_c}} \right)^{2/3} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 9})$$

同樣的，當單一後置鋼筋安裝在遠離任何邊緣之處時，在埋置鋼筋中達到降伏所需之由握裹力控制的埋置長度能以方程式10表示：

$$\ell_{d,bond} = \frac{0.3 d_b f_y}{\tau_{cr}} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 10})$$

在此特殊情況下的設計伸展長度可取 $\ell_{d,breakout}$ 與 $\ell_{d,bond}$ 中的較大者，如方程式11所示：

$$\ell_{d,bond} = \max | \ell_{d,breakout} ; \ell_{d,bond} | \quad (\text{mm}) \quad (\text{Eq. 11})$$

備註：方程式亦可使用CSA來定推導出方程式9及方程式10，其中阻力修正因數的比值可以取保守值，即1.0。

將錨栓理論應用於鋼筋伸展（即鋼筋的降伏及握裹強度值）的特殊假設將取決於該設計的具體情況。若為鋼筋組及靠近邊緣的鋼筋，此方法明顯會變得更複雜，但亦可藉由納入ACI 318-14第17章的必要邊緣距離及間距調整加以解決。

備註：ACI 318-14第17.3.2.3節指出：「針對埋置深度 $4d_a \leq h_{ef} \leq 20d_a$ 的黏結式錨栓，應視為17.4.5的設計程序滿足握裹強度要求。」此要求意識到ACI採用之均勻握裹模型的限制。在某些情況下，為確保所需的安全餘裕，規定超過20個鋼筋直徑的埋置長度可能是合理做法。請聯絡喜利得以取得更多資訊。

範例：剪力綴縫筋（與2.6.1提供的範例做比較）要求：決定用來將新的250 mm厚之噴漿混凝土（氣動澆置）剪力牆連接至現有混凝土牆(9)的後置鋼筋埋置要求。牆面上600mm x 600mm之範圍內的鋼筋為D16。現有剪力牆厚度為300mm，且為27 N/mm²的常重混凝土。依據按照AC308所做的評估，黏著劑的握裹強度 τ_{cr} 為7.5 N/mm²， k_c 值為7。在未開裂混凝土中，黏著劑的握裹強度 τ_{uncr} 為10.7 N/mm²。

假設間距足夠，能依據Charney, et al.應用錨栓理論使用簡化的鋼筋伸展表達式。

$$\ell_{d,breakout} = 1.2 \left(\frac{198.6 \times 400}{7\sqrt{27}} \right)^{2/3} = 202 \text{ mm}$$

$$\ell_{d,bond} = \frac{0.3 \times 15.9 \times 400}{7.5} = 254 \text{ mm}$$

檢查混凝土拉破的間距假設：

$$3 \times 200 = 600 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm} \dots \text{ok}$$

檢查握裹破壞的間距假設：

$$2c_{Na} = 20 \times 15.9 \sqrt{\frac{10.7}{7.5}} = 380 \text{ mm} \leq 600 \text{ mm} \dots \text{ok}$$

使用D16鉤形綴縫筋，埋置長度260mm=16.4個鋼筋直徑<20（依據ACI 318-14第17.3.2.3節的均勻握裹模型限制）。

6.5.2 使用圍束提高握裹效率

如圖43所示，相對於使用後置黏著劑可達到的握裹強度而言，與典型伸展長度有關的握裹應力較低（例如與圖38做比較）。ACI 318-14方程式25.4.2.3a中與圍束有關的項次如方程式12所示：

$$\frac{c_b + \left(\frac{40A_{tr}}{s \cdot n} \right)}{d_b} \leq 2.5 \quad (\text{Eq. 12})$$

式中，

c_b 為以下兩者中的較小者：(a)從一根鋼筋或鋼索的中心到最近之混凝土表面的距離以及(b)伸展之鋼筋或鋼索中心至中心間距的一半(mm)

A_{tr} 有效防止劈裂之橫向鋼筋的面積(mm²)

s 橫向鋼筋的間距(mm)

n 沿劈裂線接續或伸展之鋼筋數量

第25.4.2.3節對圍束項設置的2.5之限制反映出相對保守的假設，即圍束在抑制劈裂及拔出破壞方面的有效性。喜利得贊助的研究[17]顯示，就特定的黏著劑而言，可將對此項的限制增加近一倍，達到4.5。文獻中指出可進行此等調整的具體情況。此外，對於以後置鋼筋錨定之承受側向力的柱所做的試驗顯示，柱的受壓端部提供的圍束作用可有效地用來降低這些情況下所需的伸展長度[12]。

6.6 剪力綴縫筋之設計

依據ACI 318採用的剪力摩擦理論，穿過剪力平面之鋼筋的作用為將剪力介面的兩個面夾持在一起，透過作用在介面表面區域上的摩擦實現剪力傳遞。雖然通常被稱為綴縫筋，但不認為穿過剪力介面的鋼筋能透過插筋作用來抵抗剪力，剪力摩擦假設鋼筋僅會在張力下發揮作用。

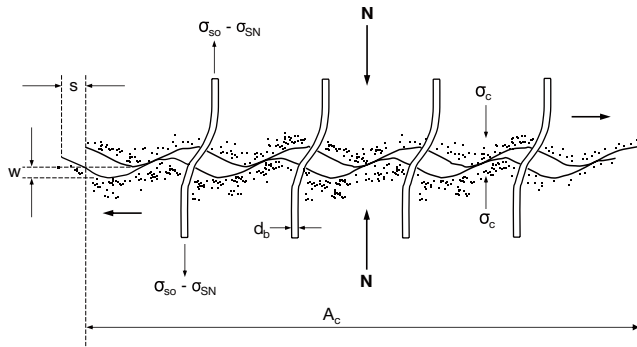


圖44、沿鋼筋混凝土介面之剪力傳遞的主要機制：插筋作用及粒料互鎖作用(aggregate interlock)，依據[21]。

但Palieraki, et al.最近的研究[16]證明，可利用摩擦與插筋作用機制的總和來準確地描述剪力摩擦介面的靜態及動態強度。此方式亦能決定縮減綴縫筋埋置深度時的剪力傳遞。

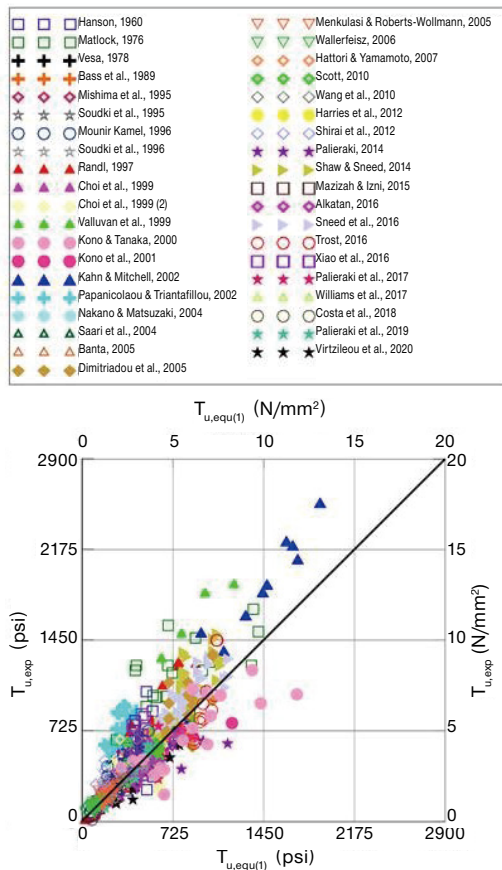


圖45、依據試驗結果繪製的靜態介面剪力預測。

以下由Palieraki [14]提出之介面剪力設計法的公式為以保守假設為基礎的簡化表示。由摩擦力及插筋作用效應的總和（參見方程式(13)）及修正項組成，這些修正項將表面粗糙度、鋼筋數量與等級、鋼筋埋置與握裹強度以及荷載類型（即靜態與動態）納入考慮。如圖45所示，Palieraki提出的方式與詳盡的試驗結果資料庫高度吻合。

$$V_n = A_c (\beta_f \cdot \tau_f + \beta_d \cdot \tau_d) \quad (\text{Eq.13})$$

式中，

V_n = 標稱介面剪力強度(kN)

τ = 摩擦造成的標稱介面剪力(N/mm²)

τ_d = 插筋作用造成的標稱介面剪力(N/mm²)

β_f = 摩擦的貢獻因子

β_d = 插筋作用的貢獻因子

A_c = 介面的表面積(mm²)

可利用方程式14計算摩擦的剪力貢獻：

$$\tau_f = 0.33 [(f'_c)^2 \cdot (f_{c,vf} + f_{ext})]^{1/3} \quad (\text{psi}) \quad (\text{Eq. 14})$$

式中，

$f_{c,vf}$ = 因綴縫筋作用造成之介面上的壓縮應力，等於以下方程式中的較小值。

$$\begin{aligned} &= \frac{f_y \cdot A_{vf}}{A_c} \quad (\text{N/mm}^2) \\ &= \frac{5 \cdot f_{bu} \cdot \ell_e \cdot A_{vf}}{d_b \cdot A_c} \quad (\text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

f_{ext} = 因外部施加之法向力而在介面上產生的均勻應力（壓力為正，拉力為負）(N/mm²)

f_{bu} = 與後置鋼筋有關的握裹強度(N/mm²)

ℓ_e = 綴縫筋的埋置長度(mm)

A_{vf} = 介面綴縫筋的面積(N/mm²)

f_y = 介面綴縫筋的降伏應力(N/mm²)

f'_c = 混凝土單軸壓縮強度(N/mm²)

可利用方程式15計算插筋作用的剪力貢獻：

$$\tau_d = \frac{1.3 \cdot n \cdot d_b^2 \sqrt{f'_c \cdot f_y}}{A_c} \text{ MPA} \quad (\text{Eq. 15})$$

式中，

d_b = 介面綴縫筋的直徑(mm)

n = 穿過介面的綴縫筋數量

A_c = 被 n 個綴縫筋橫切的介面面積(mm²)

已透過實驗方式制定出貢獻因子，如下所示：

介面上靜態及地震剪力荷載的摩擦貢獻因子 β_f ：

表面粗糙度—摩擦係數		β_f	
		靜態	地震
剪力樁或 $f_{ext} \geq +0.1 f'_c$ 之處		0.8	0.4
藉由外部施加的壓縮應力進行粗化		0.8	0.4
以機械方式粗化	正常混凝土 < 8,000 psi (55 MPa)	0.6	0.2
	高強度混凝土 $\geq 8,000$ psi (55 MPa)	0.4	0.1
未粗化	施加外部壓縮應力	0.5	0.2
	沒有外部壓縮應力	0.4	0.1
未粗化，鋼材成型表面（非常平滑）		0.2	n/a*

*不建議

介面上靜態及地震剪力荷載的插筋作用貢獻因子 β_d ：若為動態剪力，使用 $e \geq 10d_b$ 且 $\beta_d = 0.75$ 。

綴縫筋埋置長度	β_f	
	靜態	地震
$\ell_e \geq 8d_b$	0.7	0.35

範例：剪力綴縫筋（與2.6.1及6.5.1提供的範例做比較）

要求：決定用來將新的200 mm厚之噴漿混凝土（氣動澆置）剪力牆連接至現有混凝土牆（圖9）的後置鋼筋埋置要求。牆面上300mm x 400mm之範圍內的鋼筋為D16。現有剪力牆厚度為405 mm，且為27 N/mm²的常重混凝土。嘗試埋置長度最少為12個直徑（靜態剪力）的綴縫筋。

$$V_u = 431 \text{ kN/m}^2$$

$$A_c = 300\text{mm} \times 400\text{mm} = 120,000 \text{ mm}^2$$

$f_{bu} = 10.27 \text{ N/mm}^2$ （依據ACI 355.4之開裂混凝土的特徵握裹強度）

$$V_n = A_c (\beta_f \cdot \tau_f + \beta_d \cdot \tau_d)$$

$$f_{c,vf} = \frac{5 \cdot f_{bu} \cdot \ell_e \cdot A_{vf}}{d_b \cdot A_c} = \frac{5 \cdot 10.27 \cdot 357 \cdot 166.7}{16 \cdot 120,000} = 1.6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,vf} = \frac{f_y \times A_{vf}}{A_c} = \frac{400 \times 166.7}{120000} = 0.6 \text{ N/mm}^2 \leftarrow \text{控制項}$$

$$\tau_f = 0.33 [(f'_c)^2 \cdot (f_{c,vf} + f_{ext})]^{1/3} = 0.33 [(27)^2 \cdot (0.6 + 0)]^{1/3} = 2.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_d = \frac{1.3 \cdot n \cdot d_b^2 \sqrt{f'_c \cdot f_y}}{A_c} = \frac{1.3 \cdot 1 \cdot (16)^2 \sqrt{27 \cdot 400}}{120000} = 0.3 \text{ N/mm}^2$$

$$V_n = A_c (\beta_f \cdot \tau_f + \beta_d \cdot \tau_d) = 120,000 (0.6 \cdot 2.5 + 0.75 \cdot 0.3) = 207\text{kN}$$

$$\phi V_n = \frac{0.75 \cdot 207,000}{120000} = 1.3 \text{ N/mm}^2 > 0.431 \dots \text{ok}$$

使用埋置長度為192 mm ($12d_b$)的D16鉤形綴縫筋。

7.0 我還需要知道什麼？

7.1 持續荷載等

在某些錨栓應用中，黏結式錨栓的持續張力荷載與過度潛變有關。就後置鋼筋應用而言，需要進行工程判斷以決定是否需要針對持續張力荷載應用採取額外的預防措施。在特定情況下，例如少量鋼筋因靜載重(dead load)而承受直接張力，使用ACI 318-14第17.5.2.2節要求的縮減握裹應力或許是適當的方式。此外，應酌情依據混凝土溫度、水的存在（例如，飽和混凝土）及安裝在輕質混凝土中等情況降低握裹強度。

7.2 疲勞

AC308所含的合格條件要求中，並未就高週期性疲勞荷載進行具體的說明。若高週期性疲勞荷載對要進行之後置鋼筋的連接而言至關重要，請聯絡喜利得技術人員以取得更多的指引。

7.3 耐火性

有機黏著劑會受到高溫的影響。針對作為消防組件（地板、屋頂等）一部分之後置鋼筋連接，重要的是應使用試驗資料評估連接的耐火性，利用典型的幾何形狀及時間—溫度加載程序，來了解握裹強度隨時間下降之情況。請聯絡喜利得技術人員以取得有關此主題的更多指引。

7.4 腐蝕

混凝土是一種天然鹼性材料，在正常情況下，可藉由鋼筋表面的鈍化(passivation)來防止埋置鋼筋的腐蝕。但當混凝土發生碳化時，pH值下降會導致開始腐蝕。此外，若混凝土被氯化物污染，則會觀察到更快的腐蝕速率（孔蝕(pitting corrosion)）。

用於後置鋼筋應用之黏著劑系統的合格條件包含系統對長期鋼筋腐蝕敏感性的具體試驗。使用合格系統安裝的鋼筋應展現出與相同混凝土中場鑄鋼筋類似的腐蝕速率。重要的是，鋼筋周圍的黏著劑應相對無孔隙，以將腐蝕降至最低。因此，安裝品質對於耐腐蝕性及高握裹強度而言非常重要。請聯絡喜利得技術人員以取得有關此主題的更多指引。

8.0 可進一步閱讀的參考資料及建議

- [1] ACI (2003). "Committee 408: Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)". ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [2] ACI (2019). "Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [3] Appl, J. (2008). "Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung", (Structural Behavior of Bonded Anchors under Tensile Load), doctoral thesis, University of Stuttgart (in German).
- [4] Charney, F., Pal, K., and Silva, J. (2013). "Recommended Procedures for Development and Splicing of Postinstalled Bonded Reinforcing Bars in Concrete Structures", ACI Structural Journal, Vol. 110, No. 3, pp. 437-447.
- [5] Cook, R., Douglas, E., and Davis, T. (2009). "NCHRP Report 639: Adhesive Anchors in Concrete under Sustained Loading Conditions", Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 139 pp.
- [6] Eligehausen, R., Mallée, R., and Silva, J. (2006). Anchorage in Concrete Construction, Ernst & Sohn (A Wiley Company), Berlin, pp.181-210.
- [7] EOTA (2006). "TR023: Assessment of Post-Installed Reinforcing Bar Connections", ETA-Technical Report, European Organization for Technical Approvals, 20 pp.
- [8] Hamad, B., Hammoud, R., and Kunz, J. (2006). "Evaluation of Bond Strength of Bonded-In or Post-Installed Reinforcement", ACI Structural Journal V.103, No.2, pp.207-218.
- [9] ICC-ES (2018). "AC308: Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements - approved October 2017 (Editorially revised March 2018)", ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA.
- [10] Kunz, J. (2005). "Splitting Design for Anchorages and Splices with Post-Installed Reinforcement", Proceedings, ICF XI - 11th International Conference on Fracture.
- [11] Kupfer, H., Münger, F., Kunz, J., and Jähling, A. (2003). "Nachträglich Verankerte Gerade Bewehrungsstäbe bei Rahmenknoten", (Post-installed Straight Reinforcing Bars in Frame Joints), Bauingenieur, Band 78, 15 pp. (in German).
- [12] Mahrenholtz, C. and Eligehausen, R. (2014). "Numerical Simulation of Column-to-Foundation Connections with Reduced Anchorage Lengths Loaded Monotonically and Cyclically", Proceedings of the Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK.
- [13] Orangun, C., Jirsa, J., and Breen, J. (1975). "The Strength of Anchored Bars: A Re-evaluation of Test Data on Development Length and Splices", Center for Highway Research, University of Texas, Austin, TX, 94 pp.
- [14] Palieraki, V. (2014). "Seismic behavior of reinforced interfaces in repaired/strengthened reinforced concrete elements", doctoral thesis, National Technical University of Athens, Greece, 578 pp. (in Greek).
- [15] Palieraki, V., Vintzileou, E., Silva, J. (2013). Discussion 109-S73/from the November-December 2012 ACI Structural Journal paper "Towards an Improved Understanding of Shear-Friction Behavior", ACI Structural Journal Sept.-Oct. 2013, pp. 887-888.
- [16] Palieraki, V., Vintzileou, E., Trezos, K. (2014). "Shear Transfer Along Interfaces: Constitutive Laws", Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey (electronic source).
- [17] Randl, N. and Kunz, J. (2012). "Concrete Splitting for Rebars Post-Installed with High Bond Adhesives", Proceedings of the 4th International Symposium on Bond in Concrete, Cairns, J., et al., eds., Manerbio, Brescia, Italy, pp. 521-526.
- [18] Simons, I. (2007). "Verbundverhalten von Bewehrungsstahl Stäbe unter Zyklischer Belastung", (Bond Behavior of Reinforcing bar Rods under Cyclic Loading), doctoral thesis, University of Stuttgart (in German).
- [19] Speith, H., Ozbolt, J., Eligehausen, R., and Appl, J. (2001). "Numerical and Experimental Analysis of Post-Installed Reinforcing Bars Spliced with Cast-In- Place Reinforcing Bars", Proceedings, International Symposium on Connections between Steel and Concrete, RILEM Publications, Stuttgart, pp.889-898.
- [20] Spieth, H. (2002). "Tragverhalten und Bemessung von Eingemörtelten Bewehrungsstäben", (Structural Behavior and Design of Bonded Reinforcing Bars), doctoral thesis, University of Stuttgart (in German).
- [21] Tassios, T.P. and Vassilopoulou, I. (2003). "Shear transfer capacity along a RC crack, under cyclic sliding", Proceedings of fib Symposium "Concrete Structures in Seismic Regions", (electronic source, 12pp.), Athens.



喜利得股份有限公司
www.hilti.com.tw
twtechnical@hilti.com

客服專線：0800-221036
傳真：02-6630-0347