

第 X 章 補強工法參考圖說

X.3 超高性能混凝土(UHPC)應用於 RC 牆之場鑄包覆補強工法

X.3.1 補強工法與簡介

1. 工法特性：

RC 構架之 RC 牆可有效提升整體構架之側向強度與勁度，避免 RC 構架於強震下發生倒塌。本工法的特色是使用簡易之 UHPC 補強工法，提升 RC 牆或其它牆式結構之耐震與抗倒塌之能力。包覆施工方式可分為灌漿、手鏟、噴漿、以及預鑄版接合。前三種屬於濕式施工，後者屬於半濕式施工。其中，手鏟為採用鏟刀，直接鏟切 UHPC 鏟料於補強面上，而噴漿則為將拌合完成的 UHPC 漿體送入泵送設備，透過噴漿系統將漿體均勻噴塗在施作面上。本文後續內容主要針對手鏟與噴漿施作工法。

2. 適用時機：

- (1) 補強目標：提昇牆體結構面內之剪力強度以及面內外之變形韌性，以有效提升牆體結構之抗震與抗倒塌能力。
- (2) 補強方向：牆之側向強度。
- (3) 材料特性：為增加新舊介面間之接合強度，必須配合牆體厚度與實際狀況使用適合的螺栓元件。針對表面狀況不佳的 RC 牆(例如裂損較多等)，則應調整螺栓安裝位置或方式。

3. 使用特性：

- (1) 手鏟、噴漿以及預鑄版接合之施作方法毋須組立模板，可有效減少假設工程。
- (2) 手鏟與噴漿補強之施工效率佳。
- (3) 節省施工時間。
- (4) 與一般混凝土包覆補強工法比較下，採 UHPC 可有效減小補強厚度。

X.3.2 設計流程

1. 設計流程：

(1) 補強層強度

本工法建議採用 Kyriakides 與 Billington (2014) 所提出的經驗公式對補強

層強度貢獻進行預測。該文獻將補強層貢獻的強度分為兩部分，分別為漿體貢獻與鋼線網貢獻，其計算方法如式(1)所示。

$$V_f = 0.6[f'_t A_c + f_y(\rho_l A_{gh} + \rho_t A_{gv})] \quad (1)$$

其中

f'_t ：漿體抗拉強度(MPa)

A_c ：補強層對角截面積(mm²)

f_y ：鋼線網降伏強度(MPa)

ρ_l ：縱向鋼筋比為縱向鋼筋斷面積與垂直於該鋼筋之補強層混凝土總斷面積之比，意指牆之垂直鋼筋比。

ρ_t ：橫向鋼筋比為橫向鋼筋斷面積與垂直於該鋼筋之補強層混凝土總斷面積之比，本章指牆水平鋼筋比。

A_{gh} ：與縱向鋼筋垂直之補強層截面積(mm²)

A_{gv} ：與橫向鋼筋垂直之補強層截面積(mm²)

(2) 剪力連結筋設計

為提升新舊介面間剪力強度，應在補強層與上下梁以及補強層與原牆之介面施作連接元件。補強層與上下梁之連接可採植筋的方法，埋入剪力連結筋。

剪力連結筋的摩擦剪力強度以 ACI 318-19 中的式 17.7.1.2b 進行評估，如式(2)所示。

$$V_{sa} = 0.6 A_{se,v} f_{uta} \quad (2)$$

其中

V_{sa} ：剪力連結筋標稱剪力強度(N)

$A_{se,v}$ ：鋼筋斷面積(mm²)

f_{uta} ：鋼筋極限強度(MPa)

另外 ACI318-19 中的 17.7.1.2.1 對於使用注漿施工法安裝之錨栓，規定式(2)內的標稱摩擦剪力強度須再折減 20%。後續則可利用補強層之貢獻強度，計算上梁與下梁分別所需之剪力連結筋數量，如式(3)：

$$N_{d, \text{required}} \geq \frac{V_f}{V_{sa}} \quad (3)$$

剪力連結筋安裝時，如梁底植筋不易，則可採梁側植筋，但需注意植筋彎折需至補強層內，埋置深度可參考廠商建議進行設計與安裝。

牆體與補強層間亦須進行錨定。可以使用市面販售之螺絲錨栓或穿牆螺桿或植筋，依據廠商提供之施工規範，進行施作。另外，依據廠商所提供之螺栓強度，可沿用上述剪力連結筋數量之計算方法，決定牆體與補強層間之螺栓數量與間距。

(3) 剪力連結筋搭接

剪力連結筋應採用#5 號或#5 號以下竹節鋼筋，鋼筋強度需小於 4900kgf/cm²，

搭接長度 l_s 參考 AASHTO 建議，5 號(或以下)鋼筋之搭接長度建議為：

- i. 當淨保護層 ≥ 2 倍鋼筋直徑時：

$$l_s \geq 10d_b$$

- ii. 其他：

$$l_s = 0.29d_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} (\lambda_{cf} \times \lambda_{rc} \times \lambda_{er})$$

其中：

d_b ：鋼筋直徑(cm)

f_y ：鋼筋降伏強度(kgf/cm²)

f'_c ：UHPC 抗壓強度，代入值不得超過 1050kgf/cm²

λ_{cf} ：鋼筋塗布修正因數

(a) 當保護層小於 $3d_b$ 或淨間距小於 $6d_b$ 者，取 1.5

(b) 其他取 1.2

λ_{rc} ：鋼筋圍束修正因數

$$0.4 \leq \frac{d_b}{c_b + k_{tr}} \leq 1.0$$

$$k_{tr} = 40A_{tr}/(sn)$$

c_b 為鋼筋中心至最近混凝土表面之距離與鋼筋中心間距之半，
兩者取最小者(cm)

s 為在搭接長度內最大橫向鋼筋中心間距(cm)

A_{tr} 為在 s 間距內垂直於待伸展或續接鋼筋之握裹劈裂面的橫向
鋼筋總斷面積(cm²)

n 為握裹劈裂面上的鋼筋根數

λ_{er} ：超額鋼筋修正因數

$$\lambda_{er} = \frac{\text{需要量}}{\text{使用量}}$$

其中，搭接可採非接觸式搭接，但間距須取以下條件最小值

甲、 五分之二的搭接長度

乙、 15 公分

(4) 保護層與鋼筋淨間距

參考 AASHTO 之 UHPC 相關規定(2024)，鋼筋淨間距須滿足下式：

$$\max[1.5L_f, 20mm]$$

其中：

L_f ：纖維最大長度(mm)

2. 設計注意事項：

- (1) 包覆工法是在牆體表面新增補強層，因此有關新舊介面間的接合方式應審慎進行評估與施作，以利力量傳遞。施作前應該對原結構包含鋼筋設

計與牆體材料品質情況，進行調查以作為補強設計與施作之參考依據。

- (2) 包覆施作前應對牆體表面進行打毛與清潔，以確保新舊介面接合品質。另外，幾種不同包覆工法中，噴塗工法需要配合較多的機具，因此對於場地大小、供水與供電需求，在施工前必須進行詳細評估。
- (3) 鋼筋網搭接可參考營建署建築工程施工規範第 03220 章採用重疊搭接方式，若考量保護層可將鋼筋網置於同平面並額外增加等效強度之鋼筋 ($A_s f_y$) 進行焊接搭接，搭接長度建議為 10 倍鋼筋直徑以上。
- (4) 相關材料試驗項目與要求
 - 根據 CNS1010 試驗方法，UHPC 28 天抗壓強度需大於 1000 kgf/cm^2
 - 根據 CNS1233 或 ASTM C1856 與 ASTM C1609 試驗方法，UHPC 28 天抗彎強度需大於 120 kgf/cm^2
 - 根據 CNS 14703 硬固水泥砂漿及混凝土中水溶性氯離子含量試驗法，UHPC 之水溶性氯離子含量須小於或等於 0.15 kg/m^3

3. 設計範例：

RC 牆高度與寬度分別為 2950 mm 與 4000 mm。UHPC 拉力強度設定為 6MPa，包覆厚度則為兩側各 40mm。鋼筋網降伏強度設定為 550MPa，直徑為 6 mm 網目間距為 100 mm。

剪力連結筋使用 D16 鋼筋，鋼材極限強度為 550MPa。螺絲錨栓則可使用例如六角頭螺栓直徑 10mm，要求埋置深度為 75mm，每支螺絲能夠提供的剪力強度為 18.7kN。

1. 第一步：利用(1)計算補強層貢獻。

$$V_f = \phi V_c + \phi V_s = 0.6 f_t' A_c + 0.6 f_y A_s$$
$$= \left[0.6 \times 6 \times \sqrt{2950^2 + 4000^2} \times 80 + 0.6 \times 550 \times 2 \times \left(\frac{2950}{100} + \frac{4000}{100} \right) \times \frac{\pi}{4} \times 6^2 \right] \times 10^{-3} = 2728 \text{ kN}$$

2. 第二步：利用式(2)與式(3)設計剪力連結筋數量。

單根剪力連結筋剪力強度為

$$V_{sa} = 0.6 A_{se,v} f_{uta} = \left[0.6 \times \frac{\pi}{4} \times 15.9^2 \times 550 \right] \times 10^{-3} = 65.52 \text{ kN}$$

因為剪力連結筋採注漿工法需再折減 20% 強度，

$$V_{sa} = 0.8 \times 65.52 = 52.42 \text{ kN}$$

計算所需數量為

$$N_{d, \text{required}} \geq \frac{V_f}{V_{sa}} = \frac{2728}{52.42} = 52 \text{ 支}$$

間距設定為 150mm，於上下梁各設置 52 支，雙面單側各 26 支。

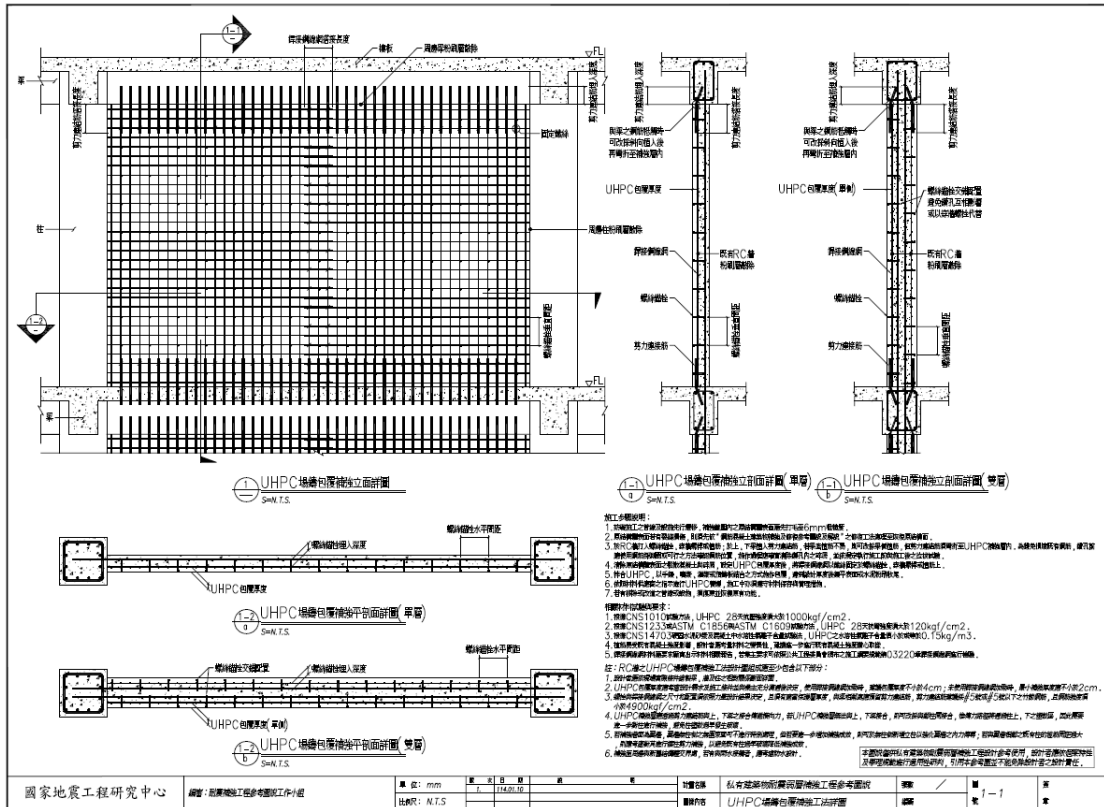
第三步：設計螺絲錨栓數量。

$$N_{d, \text{required}} \geq \frac{V_f}{V_{sa}} = \frac{2728}{18.7} = 146 \text{ 支}$$

設定間距為 400mm，兩側共計為 160 支。

X.3.3 參考圖說及解說

1. 參考圖說：



2. 詳圖解說：

UHPC 之 RC 牆補強場鑄包覆工法設計圖組成應至少包含以下部分：

- (1) 設計者應依現場實際條件繪製梁與牆相對關係斷面詳圖。
- (2) UHPC 厚度應考慮設計需求及施工條件並與業主充分溝通後決定，有使用鋼筋網加勁時，建議包覆厚度不小於 4 公分，若無使用鋼筋網，最小補強厚度應不小於 2cm。
- (3) 螺栓、鋼線網尺寸與配置可依照力量設計結果決定之，但需要有適度保護層厚度，與梁相鄰處應預留剪力連結筋，剪力連結筋建議採 #5 號或 #5 號以下之竹節鋼筋，且鋼筋強度需小於 4900kgf/cm^2 ，搭接長度參照 X.3.2 計算。
- (4) UHPC 補強層應透過剪力連結筋與上下梁之接合，傳遞橫向力。若 UHPC 補強層無法與上下梁接合，則可改採與鄰柱間進行植筋接合，惟傳力路徑將通過柱上下之塑鉸區，因此需要進一步對柱進行補強，避免柱塑鉸過早產生破壞。

- (5) 剪力連結筋數量需由設計者計算，植筋前可參考既有梁之施工或設計圖說，避免鋼筋衝突，此外，可進一步使用鋼筋掃描儀器，確認梁鋼筋實際位置後進行植筋。
- (6) 若補強牆面為翼牆，翼牆無柱側之無圍束面可不進行特別處理，然而，若要進一步增加翼牆之補強成效，可於翼牆之無柱側新增立柱，可強化翼牆之內力傳導；若與翼牆相鄰之既有柱的箍筋間距過大，則應考量對既有柱進行擴柱剪力補強，增加其橫向鋼筋量，以避免翼牆於 UHPC 補強後，所受之橫向力造成既有柱的過早破壞。
- (7) 補強面周邊與新舊結構體交界處，若有與雨水接觸者，應考量防水設計。

X.3.4 施工步驟說明及施工照片

UHPC 之 RC 牆補強場鑄包覆工法之施工步驟主要如下：

- (1) 妨礙施工管線與設施先行遷移。
- (2) 補強施工範圍內之原有結構體表面應先打毛至 6mm 粗糙度。
- (3) 裂縫處理：使用鋼刷清除裂縫中碎屑，並使用吸塵器或工業用吹氣機清灰塵和顆粒；對於較嚴重的裂縫，需使用強度較高之修補材，對於較深或較寬之裂縫，需以砂漿、環氧樹脂或 UHPC 進行修補，表面鏟平時須使用抹刀鏟平表面，確保修補處與周圍平齊。
- (4) 牆體上鑽孔後，打入螺絲錨栓或對穿螺桿並清除髒汙。
- (5) 探測上下梁既有鋼筋位置後，避開原結構鋼筋位置，並依設計結果，植入剪力連結筋。
- (6) 設定包覆厚度之後，將鋼筋網固定於螺絲錨栓或對穿螺桿上。
- (7) 拌合 UHPC，施作包覆。
- (8) 表面鏟平或水泥粉刷。
- (9) UHPC 養護：須遵循材料廠商對養護需求之指示，且須保持濕潤，對於較大面積之修補，保持修補區域濕潤有助於 UHPC 強度發展，可覆蓋濕布或塑膠薄膜以保持濕度，施工中須遵守材料保存與管理措施。
- (10) 若有移除或改道之管線或設施，需復原並恢復原有功能

UHPC 進行 RC 牆補強施工步驟之實際施工案例照片如下所示：

1.既有混凝土打毛 6mm



（中興顧問社提供）

2.牆面與上下梁植筋，鋪上鋼筋網



（中興顧問社提供）

3.事前與事後植筋拉拔測試



拉拔前（中興顧問社提供）



拉拔後（中興顧問社提供）

4.UHPC 墻砌補強，補強厚度 4 公分以上(厚度需根據計算)



（中興顧問社提供）

5. 灑水養護



(中興顧問社提供)

6. 牆面補強完成



(中興顧問社提供)

X.3.5 審查要項

1. 相關材料試驗項目與要求
 - 根據 CNS1010 試驗方法，UHPC 28 天抗壓強度需大於 1000kgf/cm^2 。
 - 根據 CNS1233 或 ASTM C1856 與 ASTM C1609 試驗方法，UHPC 28 天抗彎強度需大於 120kgf/cm^2
 - 根據 CNS 14703 硬固水泥砂漿及混凝土中水溶性氯離子含量試驗法，UHPC 之水溶性氯離子含量須小於或等於 0.15kg/m^3 。
 - 植筋易受既有混凝土強度影響，設計者應考量材料之變異性，建議進一步進行既有混凝土強度鑽心取樣。
 - 鋼筋網材料應要求廠商出示材料相關報告，若業主要求可依照公共工程委員會頒布之第 03220 章銲接鋼線網進行檢驗。
2. 鋼筋網或鋼筋尺寸選擇應依照分析後結果配置，需有適當之保護層
3. 接合開口位置應依照所設計的螺絲錨栓孔位進行開口設計，惟其螺栓或螺桿數量應足以傳遞 UHPC 補強層之剪力，可依照 X.3.2 決定之。

X.3.6 參考文獻

1. ACI Committee 318.(2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard ; Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19): American Concrete Institute.
2. ASTM International. (2015). E519/E519M-15 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages.
3. Graybeal, B.A.: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, FHWA, U.S. Department of Transportation, Publication No: FHWA-HRT-19-011 (2019)
4. Kyriakides, M. A., & Billington, S. L. (2014). Cyclic response of nonductile reinforced concrete frames with unreinforced masonry infills retrofitted with engineered cementitious composites. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013046.
5. Lin, Y. W., Wotherspoon, L., Scott, A., & Ingham, J. M. (2014). In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallettes using ECC shotcrete. *Engineering Structures*, 66, 57-65.
6. Qiu, H., Chin, R., Ingham, J., & Dizhur, D. (2016, April). Experimental shear testing of unreinforced masonry wall panels. In *2016 New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) Annual Technical Conference*. New Zealand Society for Earthquake Engineering.
7. 邱聰智(2015)，低矮型鋼筋混凝土住宅結構耐震快速評估法之開發與驗證.，

國立臺灣大學土木工程學研究所博士論文

8. 余沛涵(2022)，超高性能混凝土於耐震補強詳細評估之輔助分析程式，成功大學土木工程學系碩士學位論文
9. 王昱棋(2021)，超高性能混凝土(UHPC)噴塗工法於含磚牆 RC 構架之耐震補強，成功大學土木工程學系學位論文
10. French Standardization Association. (2016). National Addition to Eurocode 2—Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC). AFNOR, France.
11. Haber, Z. B., Foden, A., McDonagh, M., Ocel, J. M., Zmetra, K., & Graybeal, B. A. (2022). *Design and Construction of UHPC-Based Bridge Preservation and Repair Solutions* (No. FHWA-HRT-22-065). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
12. The American Association of State Highway and Transportation .Guide Specifications for Structural Design with Ultra-High Performance Concrete, 2024