

超高性能混凝土(UHPC)於 RC 柱之包覆補強工法

補強工法簡介

1. 工法特性：

使用 UHPC 材料對既有 RC 柱斷面進行包覆補強，以提升柱體軸向、撓曲及剪力強度，並強化韌性，可全面提升構件耐震性能。相較於傳統混凝土包覆補強工法，使用 UHPC 為補強材料時，可有效縮減補強層厚度，甚至可維持既有柱斷面尺寸，達成最小程度影響可使用空間。UHPC 包覆補強施作可選擇類似傳統澆置，於現場綁紮鋼筋，架設模板後，澆置 UHPC 包覆層，此外，亦可採以墁砌或預鑄方式施作(Hung 等人(2024))，可免除模板與相關之假設工程。

2. 適用時機：

- (1) 補強目標：有效提升軸向、撓曲與剪力強度、以及勁度與韌性需求。
- (2) 補強方向：柱構件之雙向彎矩與軸向強度。
- (3) 材料特性：可大幅提升既有構件之強度與耐久性。
- (4) 空間需求：影響既有使用空間甚小。

使用特性與注意事項：

- (1) 對採光與通風影響輕微或不影響。
- (2) UHPC 擴柱可在有限度增加斷面下，有效達成補強目的。
- (3) UHPC 可以減少新置補強鋼筋之握裹與搭接長度，可適用於梁或基礎深度不足之補強條件。
- (4) 因 UHPC 具有高流動特性，澆置工法可適用於鋼筋緊密區，並避免蜂窩等澆置不良之缺點。

設計流程與範例

採用 ACI 318-19 提供之經驗公式計算補強層 UHPC 以及鋼筋之貢獻，並檢核補強前後 $\frac{V_m}{V_n}$ 所代表之破壞模式是否有改變，其中 V_m 為柱達撓曲強度所對應之剪力需求， V_n 則為柱之剪力強度。可使用 Response 2000 或考量 UHPC 材料組成律之斷面分析軟體(如 NewRC-Mocur2022)，計算斷面彎矩強度 M_n ，以推算 V_m 。補強計算以雙曲率變形之柱構件為例：

1. 設計流程：

根據 ACI318-19，補強前柱構件之相關設計公式整理如下：

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = \left(0.17 \times \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6 \times A_g} \right) \times b_w \times d \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_{yt} \times d}{s} \quad (3)$$

$$V_m = \frac{2 \times M_n}{h} \quad (4)$$

柱構件之預期破壞模式可採下面公式判斷：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_m}{V_n} < 0.7 \dots \text{撓曲破壞} \\ 0.7 \leq \frac{V_m}{V_n} < 1.0 \dots \text{撓剪破壞} \\ 1.0 \leq \frac{V_m}{V_n} \dots \text{剪力破壞} \end{array} \right. \quad (5)$$

使用 UHPC 包覆補強後，柱構件之剪力強度計算可參考 Hung 等人(2021)與 Shao 等人(2021)之建議：

$$V_n = V_{core} + V_{UHPC} + V_{s/UHPC} \quad (6)$$

$$V_{core} = \left(0.17 \sqrt{f'_{c,CON}} + \frac{N_u}{6A_g'} \right) b_{w,core} d_{core} + \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (7)$$

$$V_{UHPC} = 0.51 \sqrt{f'_{c,UHPC}} b_w \bar{t} \quad (8)$$

$$V_{s/UHPC} = \frac{2A_{vw} f_{yw} d_w}{s_w} \quad (9)$$

$$E_{UHPC} = 3850 \sqrt{f'_{c,UHPC}} \times 10^{-3} \quad (10)$$

其中式(8)為 UHPC 剪力強度貢獻，式中 \bar{t} 為剪力方向上 UHPC 之總厚度。例如：三面補強情況下，若補強厚度為 t ，則強與弱軸方向之 \bar{t} 分別為 $2t$ 與 t 。

使用 UHPC 包覆補強後，補強層之軸向強度計算公式如下：

$$P_0 = \chi f'_{c,UHPC} (A_{g,UHPC} - A_{st}) + A_{st} f_y \quad (11)$$

$$\chi = \begin{cases} 0.85 - 0.0022(f'_c - 55), & f'_c \leq 124 \text{ MPa} \\ 0.7, & f'_c > 124 \text{ MPa} \end{cases} \quad (12)$$

鋼筋於 UHPC 內之錨定長度 l_{bd} 整理如下，參考 Eurocode 2 關於 UHPC 之規定 (2016)：

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} + l_{tol} \geq l_{b,min} + l_{tol} \quad (13)$$

$$l_{tol} = \max(\emptyset, 10\text{mm}) \quad (14)$$

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\emptyset}{4} \right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \right) \quad (15)$$

$$f_{bd} = \frac{2.258 f_{ctk,el}}{1.5} \quad (16)$$

$$l_{b,min} = \begin{cases} \max(0.3l_{b,rqd}, 10\left(\frac{1}{\delta} - 0.15\right)\phi, 100\left(\frac{1}{\delta} - 0.15\right) \text{ 拉力} \\ \max(0.7l_{b,rqd}, 10\left(\frac{1}{\delta} - 0.15\right)\phi, 100\left(\frac{1}{\delta} - 0.15\right) \text{ 壓力} \end{cases} \quad (17)$$

$$\delta = 1 + 0.4\left(\frac{f_{ctfm}}{K'_{global} \times f_{ctm,el}}\right) \leq 1.5 \quad (18)$$

表 1. 錨定長度計算參數

影響因子	錨定型式	鋼筋	
		受拉	受壓
鋼筋形狀	直線型	$\alpha_1 = 1.0$	$\alpha_1 = 1.0$
	其他	$\alpha_1 = \begin{cases} 0.7, & c_d > 3\phi \\ 1.0, & \text{其他} \end{cases}$	$\alpha_1 = 1.0$
混凝土保護層	直線型	$0.8 \leq \alpha_2 = 1.6 - 0.4\left(\frac{c}{\phi} - 1\right) \leq 1.6$	$\alpha_2 = 1.0$
	其他		
由非焊接橫向鋼筋圍束之鋼筋	所有型式	$0.7 \leq \alpha_3 = 1 - K\lambda \leq 1.0$ $\lambda = (\sum A_{st} - \sum A_{st,min}) / A_s$	$\alpha_3 = 1.0$
由焊接橫向鋼筋圍束之鋼筋	所有型式	$\alpha_4 = 0.7$	$\alpha_4 = 0.7$
橫向圍束壓力	所有型式	$0.7 \leq \alpha_5 = 1 - 0.04p \leq 1.0$	-
備註： $\alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \geq 0.7$			
其中： α_1 為在適度保護層下鋼筋型式影響因子； α_2 為混凝土保護層影響因子； α_3 為非焊接橫向鋼筋圍束影響因子； α_4 為在 l_{bd} 內焊接橫向鋼筋圍束影響因子； α_5 為沿著潛在劈裂面上的橫向壓力影響因子。			

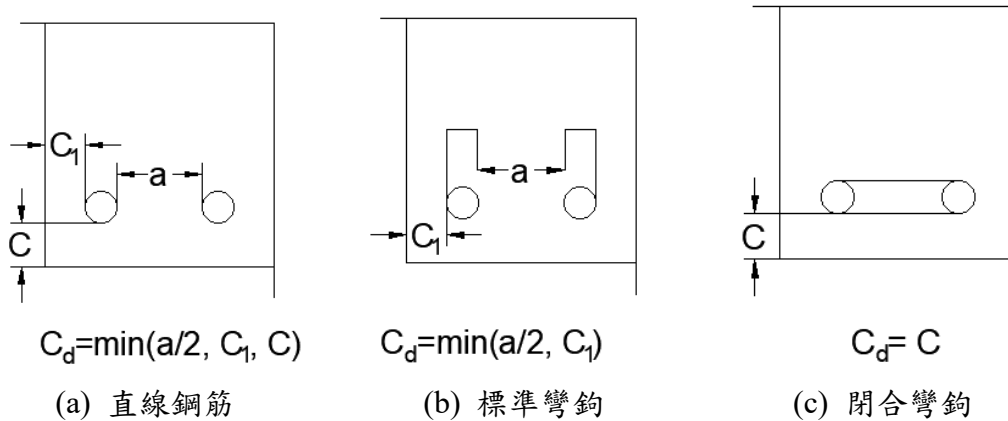


圖 1. c_d 值

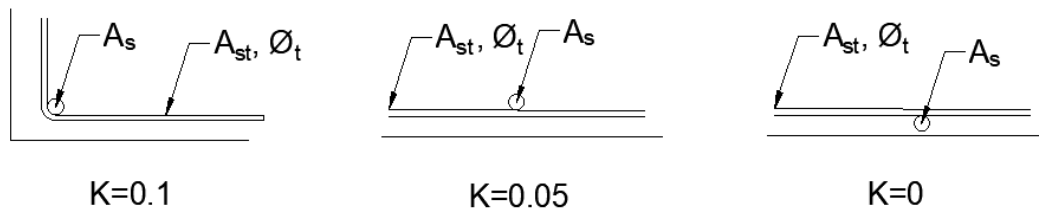


圖 2. K 值

鋼筋淨間距須滿足：

$$\max [\emptyset, (D_{sup} + 5mm), 1.5L_f, 20mm]$$

其中：

D_{sup} ：粒料最大粒徑(mm)

K'_{global} ：橫向纖維方向係數=1.25

K：參照圖 2

L_f ：纖維最大長度(mm)

V_n ：標稱剪力強度(N)

V_m ：柱構件達撓曲強度時所對應之剪力需求 (N)

V_c ：混凝土提供之剪力(N)

V_s ：鋼筋提供之剪力(N)

V_{core} ：原柱核心之剪力強度(N)

V_{UHPC} ：補強層中 UHPC 之剪力強度貢獻(N)

$V_{s/UHPC}$ ：補強層中新設鋼筋之剪力強度貢獻(N)

A_s ：錨定鋼筋斷面積(mm²)

A_g ：原柱之總橫斷面積(mm²)

A'_g ：補強柱內原柱剩餘之總橫斷面積(mm²)

$A_{g,UHPC}$ ：補強柱內 UHPC 之總橫斷面積(mm²)

A_v ：原柱內剪力鋼筋之總斷面積(mm²)

A_{vw} ：補強橫向鋼筋斷面積(mm²)

A_{st} ：沿 l_{bd} 內橫向鋼筋斷面積(mm²)

$\sum A_{st,min}$ ：最小橫向鋼筋總斷面積(mm²)

b_w ：補強後之柱斷面寬(mm)

$b_{w,core}$ ：補強柱內原核心混凝土之寬度(mm)

c ：混凝土淨保護層(mm)

c_d ：參照圖 1

d ：補強後柱斷面之有效深度(mm)

d_w ：補強後斷面內鋼筋深度(mm)

d_{core} ：補強柱內原核心混凝土之深度(mm)

E_{CON} ：原柱內混凝土之彈性模數(GPa)

E_{UHPC} ：補強層 UHPC 之彈性模數(GPa)

$f'_{c,CON}$ ：原柱內混凝土抗壓強度(MPa)

$f'_{c,UHPC}$ ：補強層 UHPC 抗壓強度(MPa)
 f_{yt} ：原柱內剪力鋼筋降伏強度(MPa)
 f_{yw} ：補強橫向鋼筋之降伏強度(MPa)
 f_y ：補強縱向鋼筋之降伏強度(MPa)
 f_{ctfm} ：開裂後拉力強度平均值(MPa)
 $f_{ctm,el}$ ：彈性限度下拉力強度平均值(MPa)
 $f_{ctk,el}$ ：彈性限度下拉力強度值(MPa)
 h ：柱淨高(mm)
 M_n ：斷面彎矩強度(N-mm)
 N_u ：設計軸壓(N)
 p ：極限狀態沿 l_{bd} 的橫向圍束壓力(MPa)
 R_{axial} ：UHPC 補強層所受軸力與總軸力之比值
 s ：原柱內箍筋間距(mm)
 s_w ：補強橫向鋼筋之間距 (mm)
 t ：UHPC 補強層厚度(mm)
 \bar{t} ：剪力方向上 UHPC 補強層之總厚度(mm)
 σ_{sd} ：錨定位置之鋼筋設計應力(MPa)
 \emptyset ：鋼筋直徑(mm)

2. 設計注意事項：

- (1) 設計流程乃基於強度設計法，所採用之 UHPC 補強厚度應使得補強後之構件具充分之彎矩與剪力強度。彎矩強度分析程序可使用國內自主開發之電腦輔助分析開放軟體 NewRC Mocur2022、UHPC_Jacket、UltraRetro (Ultra High Performance Concrete Retrofitting Design Studio)或其他合理之斷面分析軟體。
- (2) 在 UHPC 補強層內不需新設鋼筋提供彎矩強度之情況下，若補強層厚度大於 6 公分，則需配置縱向防裂鋼筋，建議最少配置#3@20 cm。若僅需補強軸力或剪力強度時，剪力強度計算參照公式(6)至(10)，軸力強度計算參照公式(11)至(12)。
- (3) 敲除既有保護層，並至少打除至既有柱主筋外緣後，建議補強厚度為單面包覆 4 公分以上之 UHPC，並使得新增之鋼筋有適當之保護層，最小保護層為下列取最大值：
 1. 1.5 倍纖維長度
 2. 縱向鋼筋直徑
 3. 20mm
 4. 粒料最大粒徑+5mm
- (4) 擴柱主筋續接範圍設定為樓層淨高 H_n 中段($H_n/2$)，主筋續接建議採用第三類(SA 級)鋼筋機械式續接。
- (5) 擴柱工法補強主筋置於四個角隅直通上下樓層，其餘柱面防裂鋼筋不直通上

下樓層，並無受力需求，遇梁或版可截斷。

- (6) 若擴柱工法柱主筋採貫穿樓版設計，則需使柱主筋具足夠錨定長度，錨定長度參考公式(13)至(18)，且建議保留既有版筋。
- (7) 若屋頂防水層不易處理，補強柱頂可採不貫穿屋頂層樓版處理。
- (8) 擴柱工法柱主筋頂部及混凝土澆築頂面亦可設置於梁底，版下空隙可採裝修方式自行設計，惟應注意避免裝修材墜落。
- (9) 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 100kgf/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 。
 - 若使用澆置工法，UHPC 坍流度建議為 45-70 公分(CNS 1176 或 CNS 14842)，若使用堰砌工法，UHPC 坍度應小於 10 公分。

3. 計算範例：

採用郭家維(2021)於國家地震工程研究中心所測試之縮尺試體為例，柱淨高為 1.2 m，受軸力 377.3 kN ，受橫向力作用時為雙曲率變形。補強前斷面如圖 3(a)，原斷面 40mm 厚保護層敲除後，採 UHPC 四面補強，每面均使用 #3 點焊鋼筋網，網格 100 mm。補強斷面如圖 3(b)， $f_c'=28\text{ MPa}$ ， $f'_{c,UHPC}=120\text{ MPa}$ ， $f_{yw}=500\text{ MPa}$ 。

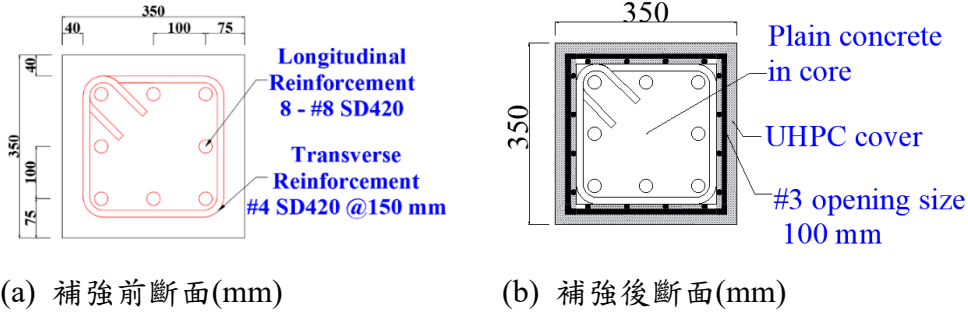


圖 3. UHPC 補強示意圖

計算補強前 $\frac{V_m}{V_n}$:

$$V_s = \frac{A_v \times f_{yt} \times d}{s} = \frac{2 \times 126.7 \times 420 \times 284.6}{150} \times 10^{-3} = 201.9 (kN)$$

$$V_c = \left(0.17 \times \sqrt{f_c'} + \frac{Nu}{6 \times Ag} \right) \times b_w \times d$$

$$= \left(0.17 \times \sqrt{28} + \frac{377300}{6 \times 350^2} \right) \times 350 \times 284.6 \times 10^{-3} = 140.7 (kN)$$

$$V_n = V_s + V_c = 201.9 + 140.7 = 342.6 (kN)$$

$$V_m = \frac{2 \times M_n}{h} = \frac{2 \times 272}{1.2} = 453 (kN)$$

$$\frac{V_m}{V_n} = \frac{453}{342.6} = 1.32$$

由 $\frac{V_m}{V_n} = 1.32$ 可知，未補強前，破壞模式為剪力破壞。

計算補強後 $\frac{V_m}{V_n}$:

$$V_{core} = \left(0.17 \sqrt{f_{c,CON}'} + \frac{Nu}{6A_g'} \right) b_{w,core} d_{core} + \frac{A_v f_{yt} d}{s}$$

$$= \left[\left(0.17 \times \sqrt{28} + \frac{377300}{6 \times 270^2} \right) \times 270 \times 270 + \frac{2 \times 126.7 \times 420 \times (248.6)}{150} \right] \times 10^{-3} = 305 (kN)$$

$$V_{UHPC} = 0.51 \sqrt{f_{c,UHPC}'} b_w \bar{t}$$

$$= 0.51 \times \sqrt{120} \times 350 \times 80 \times 10^{-3} = 156 (kN)$$

$$V_{s/UHPC} = \frac{2A_{vw} f_{yw} d_w}{s_w}$$

$$= \frac{2 \times 71.33 \times 500 \times 330}{100} \times 10^{-3} = 235.4 (kN)$$

$$\begin{aligned}
 V_n &= V_{core} + V_{UHPC} + V_{s/UHPC} \\
 &= 305 + 156 + 235.4 = 696.4(kN) \\
 V_m &= \frac{2 \times M_n}{h} = \frac{2 \times 336}{1.2} = 560(kN) \\
 \frac{V_m}{V_n} &= \frac{560}{696.4} = 0.80
 \end{aligned}$$

補強後 $\frac{V_m}{V_n}$ 比值下降為 0.8，破壞模式轉變為撓曲控制。

參考圖說及解說

UHPC 擴柱補強設計圖之組成應至少包含四部份：(1)立面詳圖；(2)斷面詳圖；(3)基礎詳圖；(4)施工步驟說明。參考圖說如下：

1. 參考圖說：

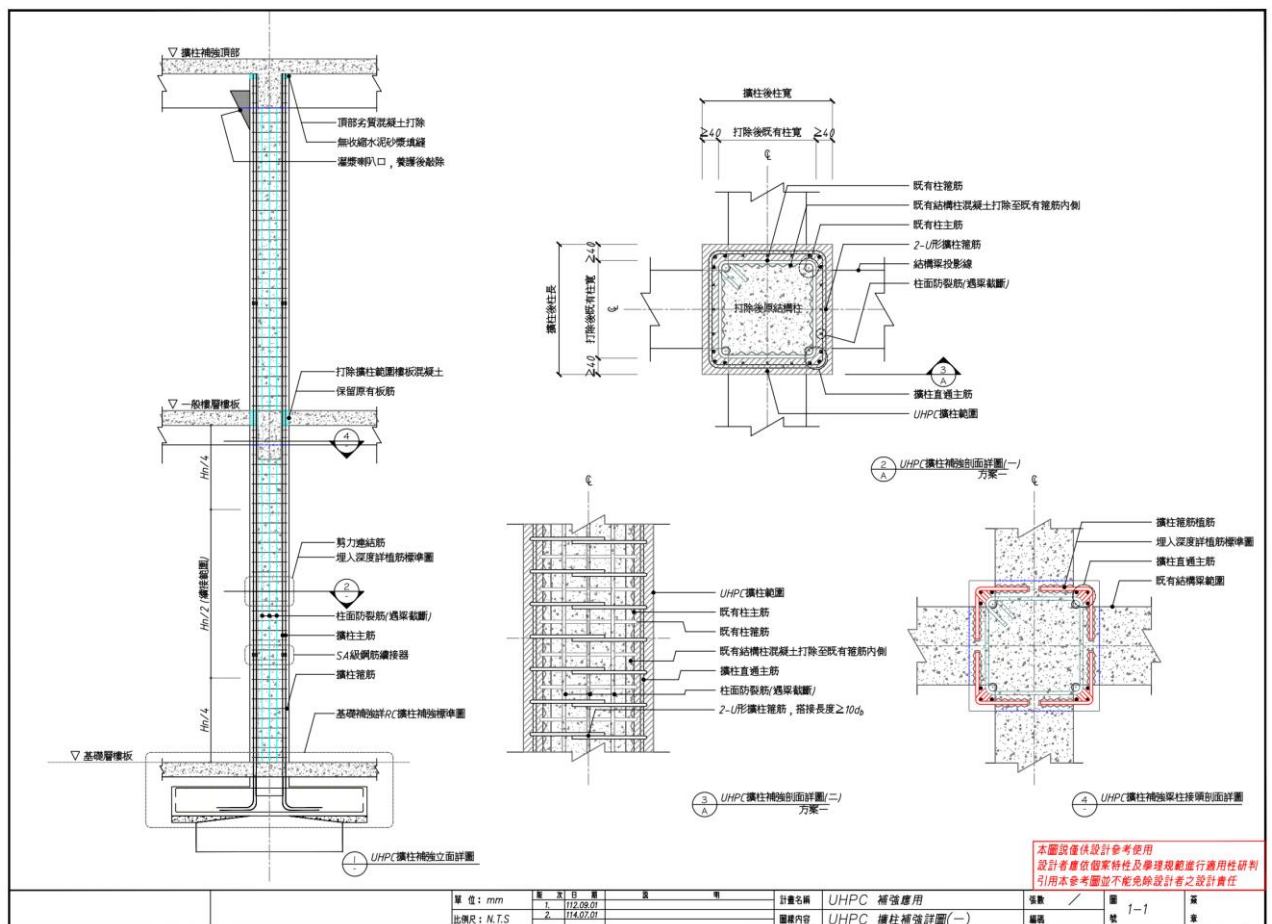
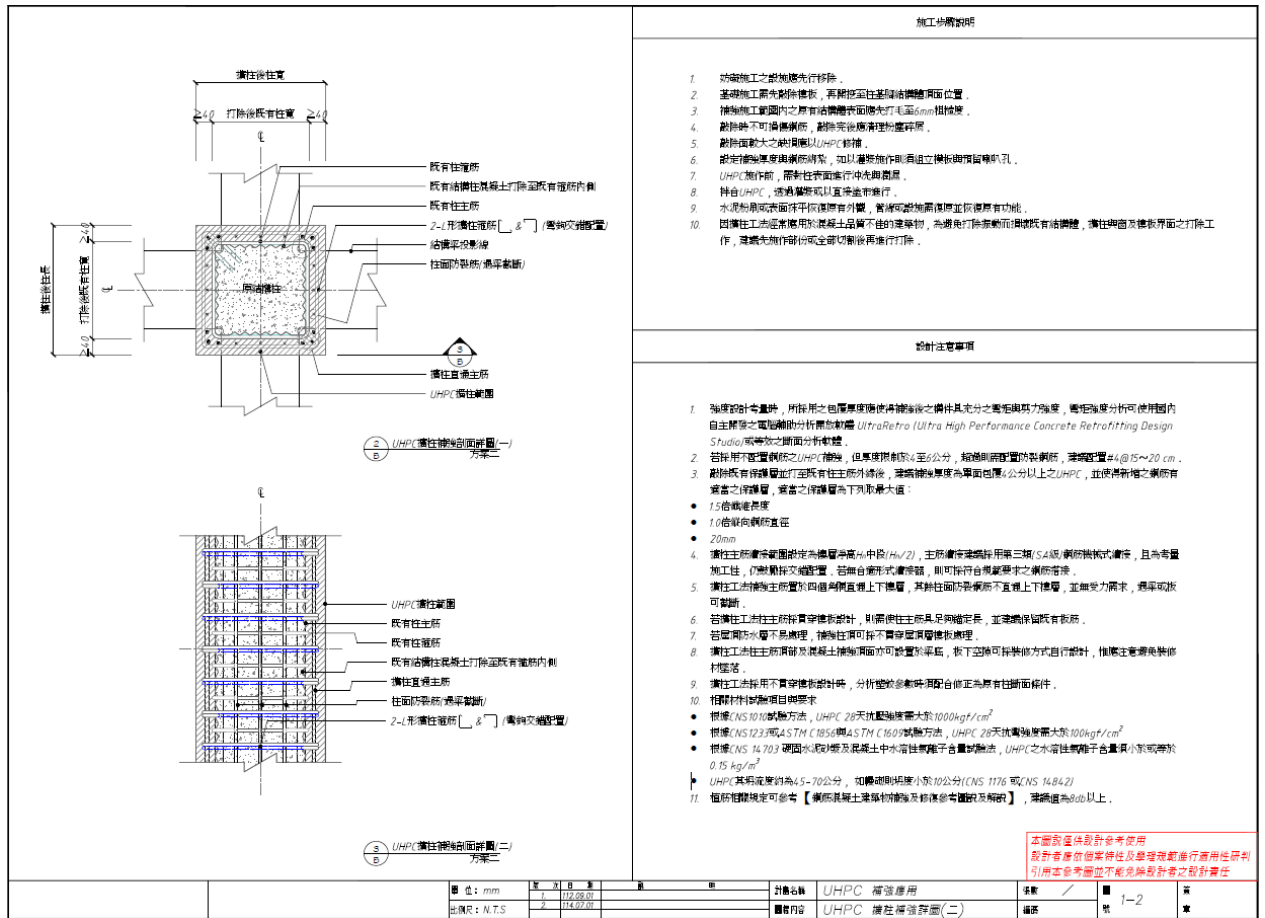


圖 4. 擴柱立面與斷面詳圖



2. 立面詳圖解說

- (1) 擴柱主筋續接範圍設定為樓層淨高 H_n 中段($H_n/2$)，主筋續接建議採用第三類(SA級)鋼筋機械式續接。
- (2) 施工時，擴柱穿越樓版後會與其下層柱一同封模灌注 UHPC，且打除樓版時，僅打除混凝土，並保留鋼筋。
- (3) 若採不貫穿屋頂樓版之方案，可利用模板釘漏斗灌漿，拆模後再補填灌無收縮水泥漿或 UHPC。

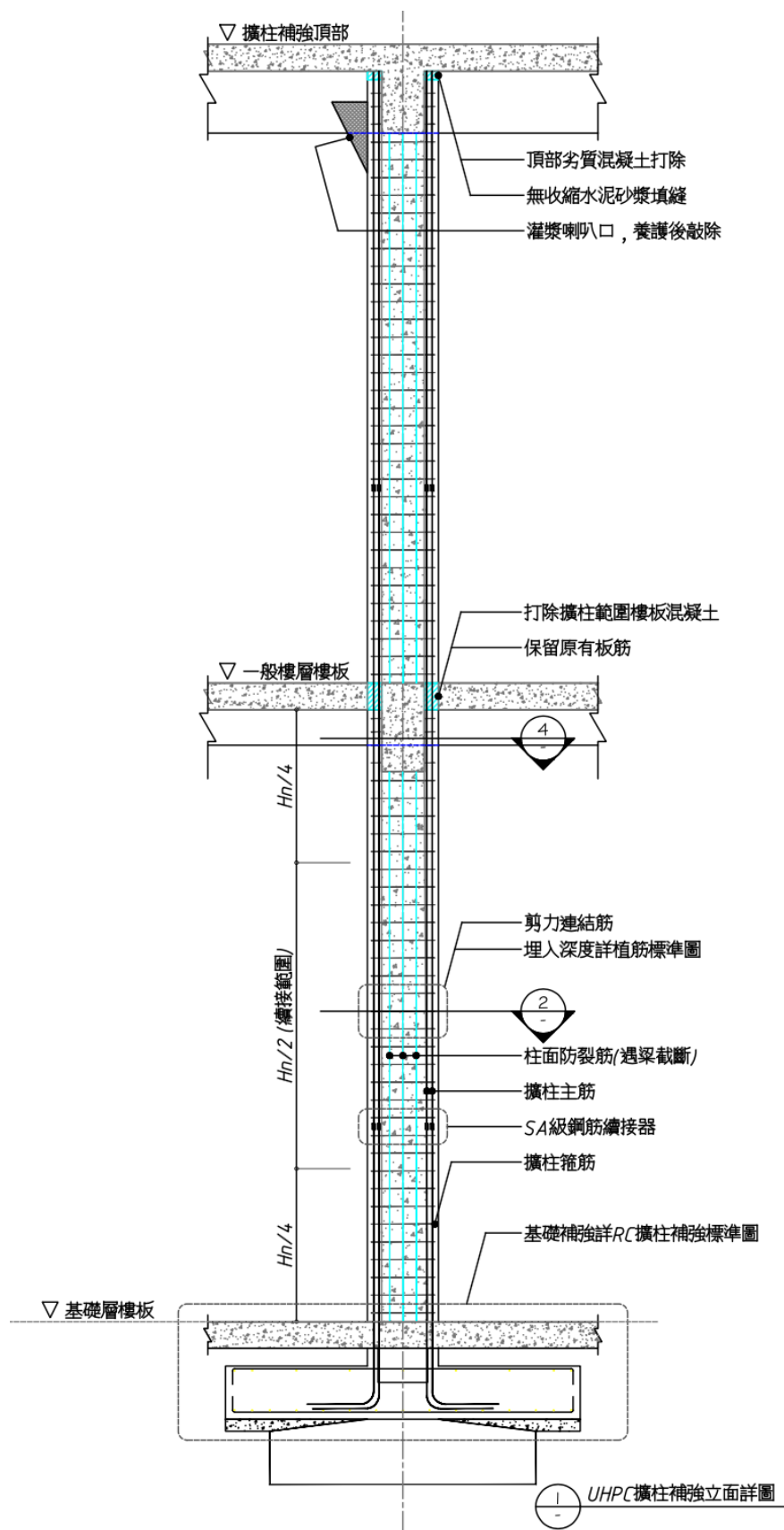


圖 6. UHPC 柱包覆補強立面詳圖

3. 斷面詳圖解說

- (1) 設計者應依現場實際狀況，詳細繪製梁、柱、接頭及牆等構件及其鋼筋之平面與立面配置詳圖。
- (2) 柱每側擴大範圍，應由設計者依設計力需求、施工條件、通道寬度等條件綜合評估後決定。
- (3) 擴柱所新設之垂直直通主筋，應於分析時考量其於柱撓曲強度之貢獻。若柱新設之垂直鋼筋屬防裂筋，則遇梁可截斷，且分析時不應考量其對柱之撓曲強度貢獻。
- (4) 柱外箍筋可為組合式閉合箍筋，如圖 7(a)中，兩 L 型鋼筋(兩端為 135 度耐震彎鉤)所組成之閉合箍筋；或如圖 7(b)中，兩 U 型箍筋組成閉合箍筋，U 型箍筋利用焊接進行搭接，搭接長度應至少為 10 倍橫向鋼筋直徑；或如圖 7(c)中，裝設鋼筋網於四面，並於四角隅處設置 L 型鋼筋搭接鋼筋網，其中，搭接長度應至少為 10 倍橫向鋼筋直徑，確保鋼筋網於橫向之連續性。
- (5) 接頭處橫向鋼筋為一端為 135 度彎鉤，另一端植筋於梁內之型式，如圖 7(d)。
- (6) 原有柱之面飾層須剔除打毛，以利新舊混凝土界面應力傳遞。
- (7) 所提之參考圖說(圖 4)僅供參考，實際配筋應由設計者視需求決定。
- (8) 接觸雨水面窗台外牆應考量防水設計。

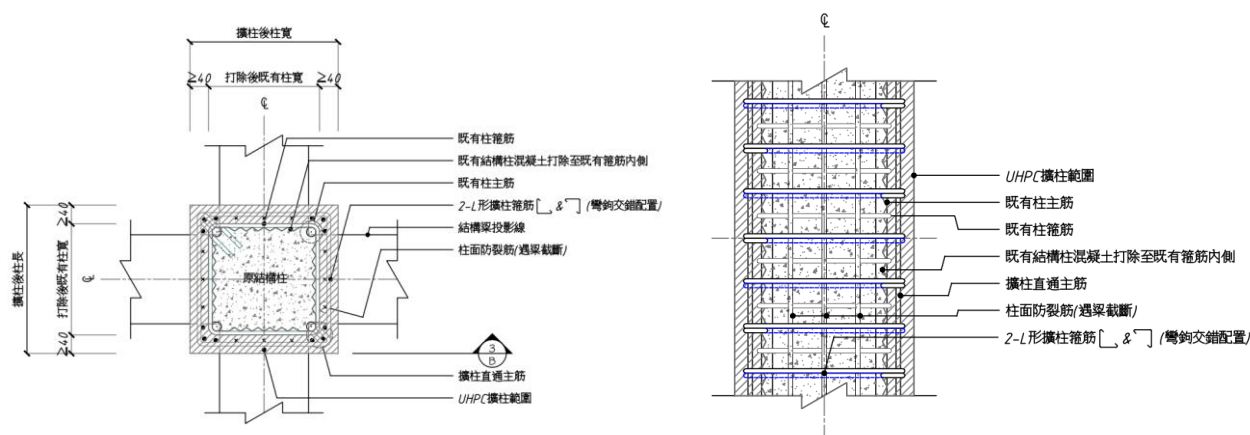


圖 7(a) 2-L 型鋼筋組合之閉合箍筋

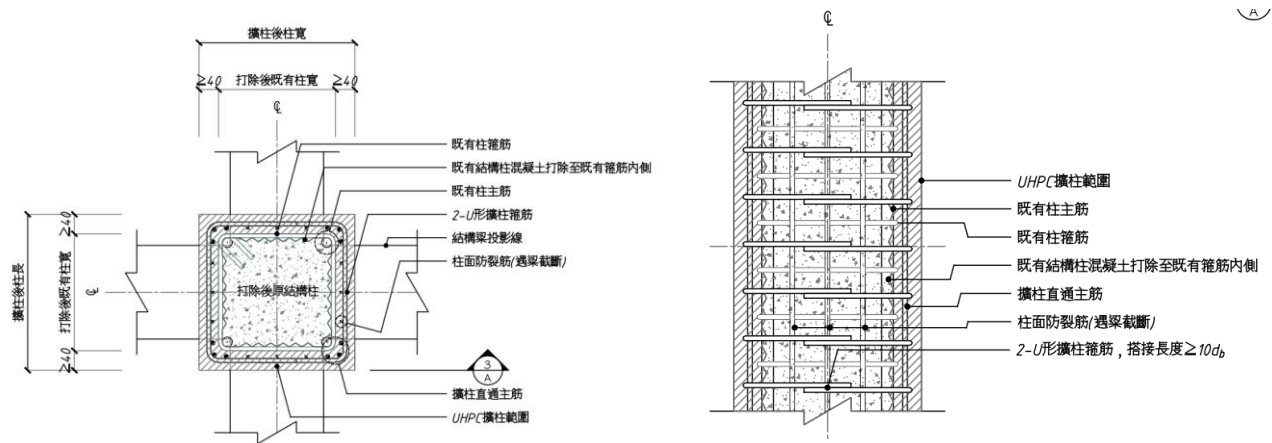


圖 7(b) 2-U 型鋼筋組合之閉合箍筋

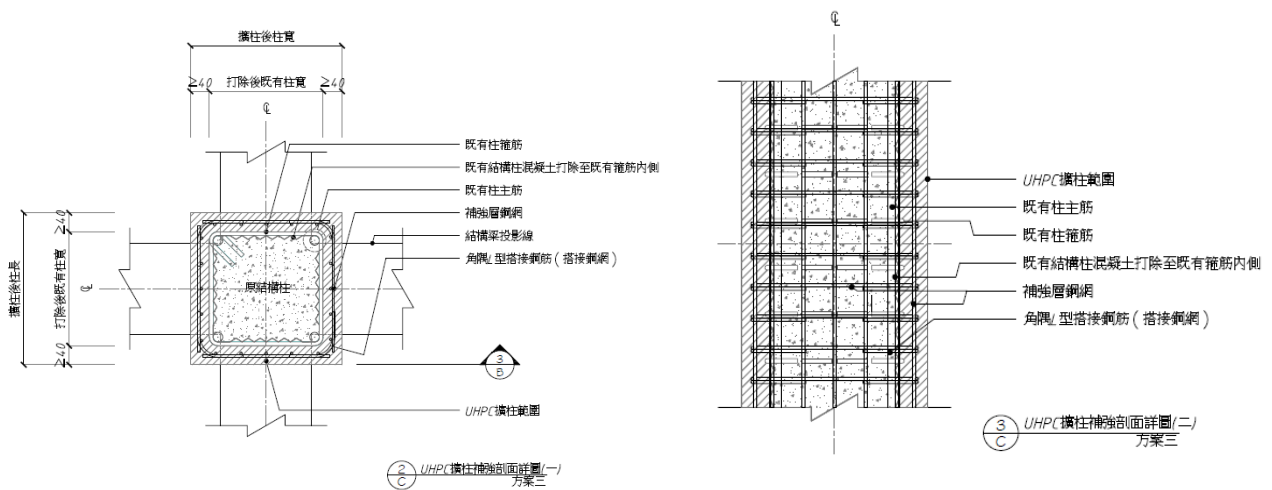


圖 7(c) 四面鋼筋網組合之閉合箍筋

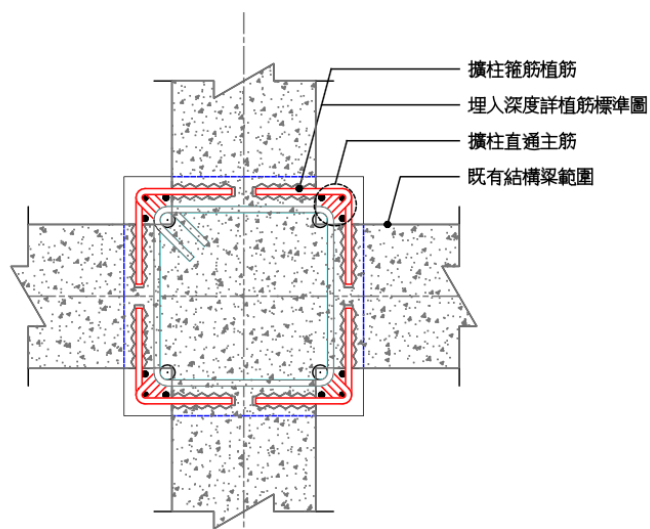


圖 7(d) 植筋斷面詳圖

圖 7. 橫向鋼筋配置之參考圖說

4. 擴柱新設補強基礎詳圖解說

- (1) 新設補強基礎可直接置放於原有基礎上方，參見圖 4。
- (2) 補強柱之撓曲鋼筋應向下連續至新設補強基礎。
- (3) 原基礎小於新設補強基腳尺寸時，以 140 kgf/cm^2 混凝土填充整平至新設補強基礎底面。
- (4) 補強新設基礎之配筋應依個案特性分析設計。
- (5) 補強新設基礎之最小鋼筋量可採溫度鋼筋之標準配置。
- (6) 基礎開挖後之回填材料與地坪作法，設計者應依個案特性繪製相關圖說。

5. 有地下室(非外牆處)之擴柱新設補強基礎詳圖解說

- (1) 振動基面位於 1FL 樓版面時，且 1FL 橫隔版可將地震力傳遞至四周外牆情況下，地下室柱底柱筋可無須錨定，撓曲塑鉸設定須根據原有柱之鋼筋。若非上述情況，柱筋應設計充足錨定。
- (2) 典型一字型校舍若長向長度過大，1FL 橫隔版可能無法將地面以上地震力傳遞至四周外牆，設計者應考慮分析基面之適當性，並考慮增設 RC 牆體傳遞 1FL 橫隔版地震力或採降低一層樓層之分析模式，地下室柱底柱筋是否需要錨定應視實際行為決定。
- (3) 立面與斷面詳圖與地面上詳圖相同，參見圖 4。

6. 有地下室(外牆處)之擴柱新設補強基礎詳圖解說

- (1) 振動基面位於 1FL 樓版面時，且 1FL 橫隔版可將地震力傳遞至四周外牆情況下，地下室外牆外側柱主筋可自 1FL 樓版面下延伸一段錨定長度，參見圖 6。
- (2) 地下室外牆外側錨定長度應考量：(1)柱筋錨定長度；(2)新舊混凝土應力傳遞需求之植筋；(3)柱彎矩應力檢核。
- (3) 典型一字型校舍若長向長度過大，1FL 橫隔版可能無法將地面以上地震力傳遞至四周外牆，設計者應考慮分析基面之適當性，並考慮增設 RC 牆體傳遞 1FL 橫隔版地震力或採降低一層樓層之分析模式，地下室柱底柱筋是否需要錨定，應視實際行為決定。

施工步驟說明及施工照片

1. UHPC 場鑄補強：

- (1) 遷移妨礙施工之管線與設施。
- (2) 基礎施工需先敲除樓版，再開挖至柱基腳結構體頂面位置。
- (3) 補強施工範圍內之原有結構體表面應打毛至 6mm 粗糙度。
- (4) 敲除時不可損傷鋼筋，敲除完後應清理粉塵碎屑。
- (5) 敲除面較大之缺損應以 UHPC 修補。
- (6) 模板組立後，上方預留喇叭孔以利灌漿。
- (7) 澆置 UHPC。

- (8) 澆置完成後清除頂面混凝土殘渣，敲除喇叭孔附近混凝土。
- (9) 水泥粉刷恢復原有外觀，管線或設施需復原，並恢復原有功能。
- (10) 因擴柱工法經常應用於混凝土品質不佳之建築物，為避免打除振動而損壞既有結構體，擴柱與窗台及樓版界面之打除工作，建議先施作部份或全部切割後再進行打除。

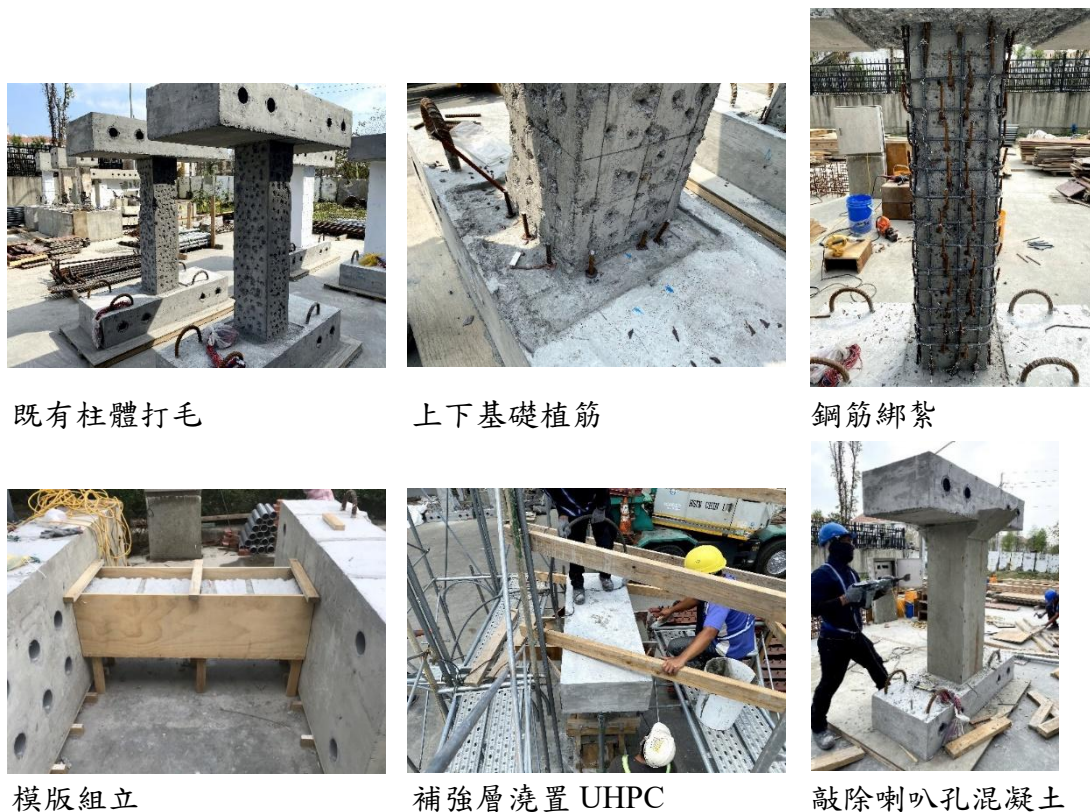


圖 8. UHPC 場鑄補強搭配現場鋼筋綁紮

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 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 100 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 。
 - 若使用澆置工法，新拌 UHPC 之坍流度應為 45-70 公分(CNS 1176 或 CNS 14842)，若使用墁砌工法，UHPC 坍度應小於 10 公分。
2. 鋼筋網或鋼筋型號尺寸的適切性
 - 鋼筋網或鋼筋尺寸選擇應依照分析後結果配置，並須有適當之保護層。
3. 基礎相關補強細節
 - 基礎補強可直接參考傳統鋼筋混凝土擴柱設計與施工方式。
4. 與樓版接合方式

- 擴柱施工時，穿越樓版後會與下層柱子一起封模灌注 UHPC，且打除樓版時，應保留鋼筋，僅打除混凝土。
- 若採不貫穿屋頂層樓版之方式，可利用模板釘漏斗灌漿，拆模後再補填灌無收縮水泥漿或 UHPC，塑鉸模擬則以補強前原斷面及配筋模擬，柱頂不考慮擴柱補強之塑鉸。

參考文獻

1. ELWOOD, Kenneth J., et al. Update to ASCE/SEI 41 concrete provisions. *Earthquake Spectra*, 2007, 23.3: 493-523.
2. 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.
3. Hung, C. C., KUO, C. W., SHAO, Y. Cast-in-place and Prefabricated UHPC Jackets for Retrofitting Shear-deficient RC Columns with Different Axial Load Levels. *Journal of Building Engineering*, 2021.
4. Hung, C. C., Lin, C. C., & Do, T. D. D. (2024). Seismic rehabilitation of RC frames with innovative precast U-shaped UHPC jackets: Experimental evaluation and computational simulation. *Engineering Structures*, 318, 118746.
5. Hung, C. C., SHAO, Y., KUO, C.W.; Seismic performance of full-scale UHPC-jacket-strengthened RC columns under high axial loads. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112657.
6. KIM, C. S., et al. Cyclic Loading Test for Cast-in-Place Concrete-Filled Hollow Precast Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 2016, 113.2.
7. 洪崇展；郭家維；黃丞毅. 超高性能纖維混凝土於非韌性柱包覆補強工法之有效性. *中國土木水利工程學刊*, 2020, 32.8: 693-699.
8. 郭家維. 超高性能纖維混凝土於 RC 柱之耐震補強效用. 國立成功大學土木工程學系學位論文, 2020。洪崇展教授指導。