

# 超高性能混凝土(UHPC)應用於磚牆結構之場鑄包覆補強工法

## 補強工法與簡介

### 1. 工法特性：

RC 構架之內填磚牆可有效提升整體構架之側向強度與勁度，然而磚牆之變形韌性差，在強烈地震作用下可能發生脆性破壞，造成人員傷亡與結構坍塌。本工法目的為使用簡易之 UHPC 補強工法，透過墁砌、噴漿、或灌漿等適宜現地之施作方式，將漿體均勻披覆於牆面上，以有效提升磚牆結構之耐震與抗倒塌能力(Hung 等人(2024))。

### 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：為增加其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磚牆（例如破損較多等），則應調整螺栓安裝位置或方式。

### 3. 使用特性：

- (1) 若使用墁砌或噴漿之施作方式，則不需組立模版，可減少假設工程。
- (2) 補強施工效率佳。
- (3) 節省施工時間與物料成本。

## 設計流程

### 1. 設計流程：

#### (1) 補強層強度

本工法可採用王昱棋(2021)與 Kyriakides 與 Billington (2014) 所提出之計算公式，評估補強層之強度。該文獻將補強層強度分為兩部分，分別為漿體貢獻與鋼網貢獻，其計算方法如式(1)所示。

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

其中

$A_c$ ：補強層對角截面積(mm<sup>2</sup>)

$f'_t$ ：補強層 UHPC 材料之抗拉強度(MPa)

$f_y$ ：鋼網降伏強度(MPa)

$\rho_l$ ：補強層之縱向鋼筋比。

$\rho_t$ ：補強層之橫向鋼筋比。

$A_{gh}$ ：補強層之水平截面積(mm<sup>2</sup>)

$A_{gv}$ ：補強層之垂直截面積(mm<sup>2</sup>)

## (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。其中，補強層與上下梁之連接可採植筋，埋入剪力連結筋。剪力連結筋安裝時，先埋入梁內再彎折至磚牆表面，埋置深度可參考混凝土設計規範。剪力連結筋的摩擦剪力強度以 ACI 318-19 之式 17.7.1.2 進行評估，如式(2)所示。

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

其中

$V_{sa}$ ：剪力連結筋之標稱剪力強度(N)

$A_{se,v}$ ：剪力連結筋之斷面積(mm<sup>2</sup>)

$f_{uta}$ ：剪力連結筋之極限強度(MPa)

另外 ACI318-19 之 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%。後續則可根據補強層之設計強度，計算上梁與下梁分別所需之剪力連結筋數量，如式(3)：

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

既有牆體與補強層間亦須強化介面強度，可以使用市面販售之自攻螺絲或穿牆螺桿，依據廠商提供之施作資訊，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) 剪力連結筋之搭接長度

剪力連接筋應採用#5 號或#5 號以下竹節鋼筋，搭接長度 $l_s$ 可依照 AASHTO 建議，5 號(或以下)鋼筋之搭接長度建議為：

$$l_s \geq 10d_b$$

其中，搭接可採非接觸式搭接，但須滿足以下條件

甲、搭接鋼筋之淨間距不得大於 4 倍鋼筋直徑或 50mm，若超過則 $l_s$ 需增加等同淨間距之長度。

乙、兩相鄰搭接之淨間距須大於 2 倍鋼筋直徑或 20mm

## (4) 保護層與鋼筋淨間距

參考 Eurocode 2 之 UHPC 相關規定(2016)，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)

$L_f$ ：纖維最大長度(mm)

$\emptyset$ ：鋼筋直徑(mm)

參考 Eurocode 2 之 UHPC 相關規定(2016)，適當之淨保護層為下列取最大值：

$$\max [\emptyset, (D_{sup} + 5mm), 1.5L_f, 25mm]$$

## 2. 設計注意事項：

- (1) 此補強工法於牆體表面新增補強層，因此應審慎評估與施作新舊介面之接合，以確保力量傳遞。此外，施作前應對原結構之配置與設計進行調查，以作為補強設計與施作之參考依據。
- (2) 補強層施作前應對既有牆體表面進行打毛與清潔，以確保新舊介面之接合品質。另外，若採噴漿工法，需使用較多機具，對於場地大小、供水與供電需求等條件，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，此外，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 1000kgf/cm<sup>2</sup>
  - 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<sup>2</sup>
  - 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<sup>3</sup>
  - 墻砌與噴漿工法所採 UHPC 材料之坍度應小於 10 公分(CNS 1176 或 CNS 14842)

## 3. 設計範例：

磚牆高度與長度分別為 2950 mm 與 4000 mm。UHPC 拉力強度為 6 MPa，UHPC 補強層厚度則為兩側各 40 mm。鋼筋網降伏強度為 550 MPa，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 550 MPa。自攻螺絲則使用市售之錨栓，型號為六角頭螺栓直徑 10 mm，說明書要求埋置深度為 75 mm，每支螺栓能夠提供的剪力強度為 18.7 kN。

步驟一：使用公式(1)，計算補強層貢獻。

$$\begin{aligned} V_f &= \emptyset V_c + \emptyset V_s = 0.6f'_t A_c + 0.6f_y A_s \\ &= \left[ 0.6 \times 6 \times \sqrt{2950^2 + 4000^2} \times 80 + 0.6 \times 550 \times \left( \frac{2950}{100} + \frac{4000}{100} \right) \times \frac{\pi}{4} \times 6^2 \right] \\ &\quad \times 10^{-3} = 2080 \text{ kN} \end{aligned}$$

步驟二：使用公式(2)與(3)，決定剪力連結筋數量。

單根剪力連結筋剪力強度為

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

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

$$N_{d, required} \geq \frac{V_f}{V_{sa}} = \frac{2080}{52.42} = 39.67 \text{ 支}$$

間距設定為 200mm，於上下梁各設置 40 支，則單面補強層之上下側分別為 20 支。

步驟三：設計自攻螺絲數量。

$$N_{d, required} \geq \frac{V_f}{V_{sa}} = \frac{2080}{18.7} = 111.23 \text{ 支}$$

設定間距為 400mm，兩側共計為 160 支。

若待補強之磚牆具有開口，可採開口折減係數，對原補強層計算強度進行折減，折減係數如式(4)

$$\rho = 0.55e^{-3.5\left(\frac{A_0}{l_m h_m}\right)} + 0.55e^{-2.5\left(\frac{l_0}{l_m}\right)} \quad (4)$$

其中：

$\rho$ ：開口折減係數

$A_0$ ：開口面積(mm<sup>2</sup>)

$l_0$ ：開口長度(mm)

$l_m$ ：牆長(mm)

$h_m$ ：牆高(mm)

延續原案例，並假設牆中央具開口，開口高 2950 mm、開口寬 900 mm。則開否補強層之設計強度為：

$$\rho = 0.55e^{-3.5\left(\frac{900 \times 2950}{4000 \times 2950}\right)} + 0.55e^{-2.5\left(\frac{900}{4000}\right)} = 0.5$$

$$\rho V_f = 0.5 \times 2080 = 1040 \text{ kN}$$

## 參考圖說及解說

### 1. 參考圖說：

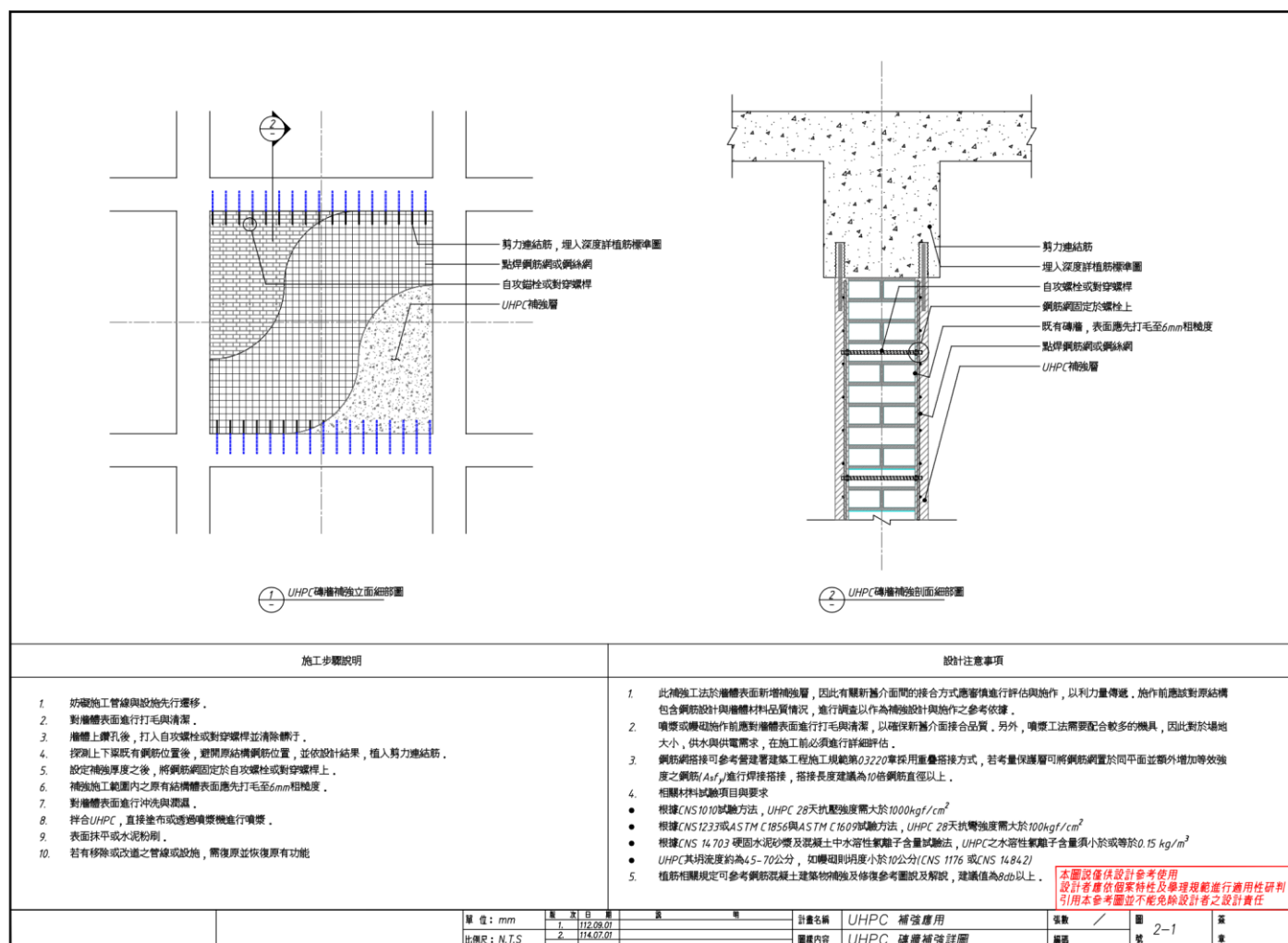


圖 1. 磚牆補強立面詳圖、斷面詳圖及施工步驟

### 2. 詳圖解說：

UHPC 磚牆補強場鑄工法設計圖組成應至少包含三部分：

- (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。
- (3) 螺栓與鋼線網之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，與梁相鄰處應預留搭接鋼筋，搭接鋼筋建議採#5 或#5 以下之竹節鋼筋。若搭接鋼筋強度小於 4900 kgf/cm<sup>2</sup>，則最小搭接長度可採 10 倍鋼筋直徑。
- (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角區，因此建議進一步考量

柱之補強需求，避免柱塑角過早產生破壞。

- (5) 埋置剪力連結筋前，可參考既有梁之施工或設計圖說，避免鋼筋衝突。此外，亦可使用鋼筋掃瞄儀器，確認原梁鋼筋之實際位置後，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剪力補強，以強化既有柱於地震下之韌性與強度。
- (7) 補強層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。

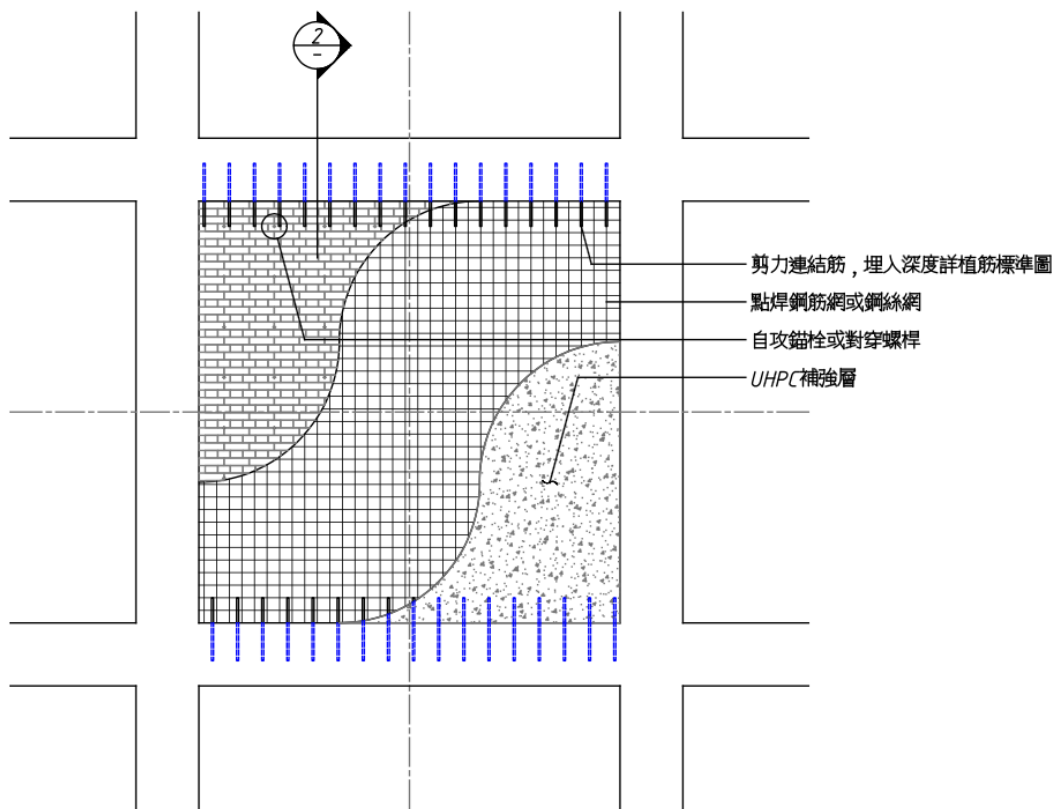


圖 2. 立面詳圖

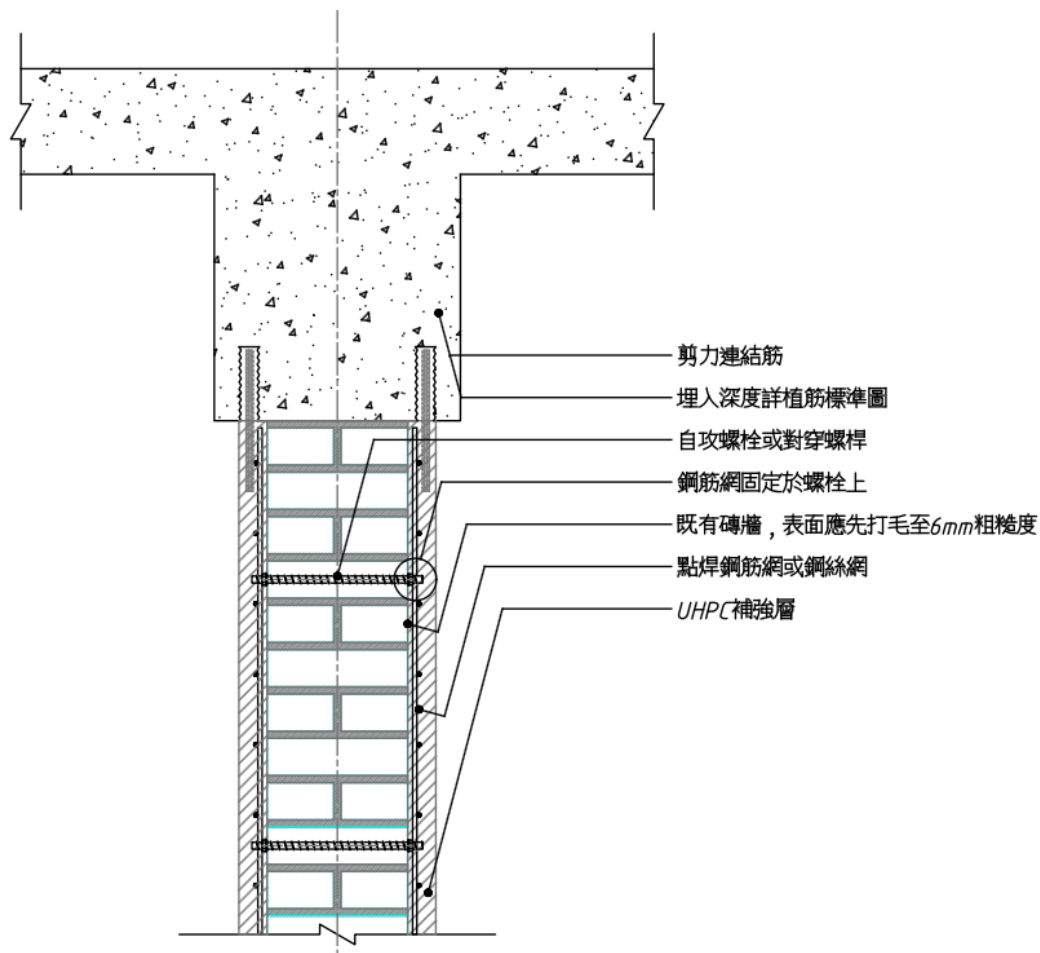


圖 3. 斷面詳圖

### 施工步驟說明及施工照片

UHPC 磚牆補強工法，實際施工照片如圖 4 所示。

- (1) 遷移妨礙施工之管線與設施。
- (2) 對牆體表面進行打毛與清潔。
- (3) 於牆體鑽孔後，埋植自攻螺栓或對穿螺桿，並清除髒汙。
- (4) 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。
- (5) 設定補強厚度之後，將鋼筋網固定於自攻螺栓或對穿螺桿上。
- (6) 待補強之既有牆體表面應打毛至 6 mm 粗糙度。
- (7) 對牆體表面進行沖洗與潤濕。
- (8) 拌合 UHPC，並以墁砌、噴漿或灌漿工法進行施作。
- (9) 表面抹平或水泥粉刷。
- (10) 若有移除或改道之管線或設施，需復原並恢復原有功能





(a)基礎與頂梁鑽孔



(b)埋入鋼筋



(c)彎折剪力連結筋



(d)設定補強層厚度



(e)固定鋼筋網



(f)清洗並潤濕磚牆表面



(g)施作 UHPC



(h)表面鏟平

圖 4. 補強施作流程



## 審查要項

1. 相關材料試驗項目要求
  - 根據 CNS1010 試驗方法，UHPC 28 天抗壓強度需大於  $1000 \text{ kgf/cm}^2$ 。
  - 根據 CNS1233 或 ASTM C1856 與 ASTM C1609 試驗方法，UHPC 28 天抗彎強度需大於  $100 \text{ kgf/cm}^2$
  - 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  $0.15 \text{ kg/m}^3$ 。
  - 植筋有效性受既有混凝土強度影響，若有需要，應對既有構件之混凝土進行鑽心取樣測試。
  - 鋼網材料應要求廠商出示材料相關報告，鋼網檢驗可依照公共工程委員會頒布之第 03220 章。
2. 鋼網尺寸應依照強度分析結果而決定，並需有適當之保護層。
3. 實際所採之介面連接件，其性質、埋置長度及搭接長度應符合設計值。

## 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. 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.
4. Graybeal, B.A.: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, FHWA, U.S. Department of Transportation, Publication No: FHWA-HRT-19-011 (2019)
5. Graybeal, B. A., & El-Helou, R. G. (2019, June). Development of an AASHTO Guide Specification for UHPC. In International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete (Vol. 2, No. 1). Iowa State University Digital Press.
6. 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.
7. Hung, C. C., Dai, Y. X., Yen, C. H., & Mosalam, K. M. (2024). Comparative studies on in-plane shear behavior of masonry wallettes retrofitted with mortar, UHPC, and ECC ferrocement: Shotcrete and prefabricated panels. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03801.

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 王昱棋(2021)，超高性能混凝土(UHPC)噴漿工法於含磚牆 RC 構架之耐震補強，成功大學土木工程學系學位論文。洪崇展教授指導。
12. 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。黃世建教授指導。
13. 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。洪崇展教授與李宏仁教授指導。
14. 戴佑軒. (2020). 超高性能混凝土噴漿工法於磚牆補強效用之評估. 成功大學土木工程學系學位論文, 1-119。洪崇展教授指導。
15. 戴吟純(2020)，使用高韌性纖維混凝土補強 RC 構架含填充磚牆：耐震分析模型，成功大學土木工程學系學位論文 (2020)。洪崇展教授指導。