

超高性能混凝土(UHPC): 結構修繕與補強

洪崇展

成功大學土木工程學系所
成功大學地震暨防振研究中心

特聘教授
主任

超高性能混凝土: 一種新型纖維混凝土 Ultra-High Performance Concrete(UHPC)

纖維強化



減水劑



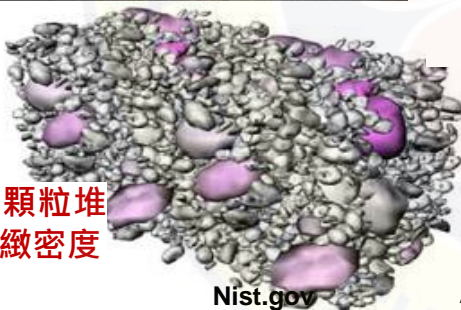
2% 鋼纖維



卜作嵐材料



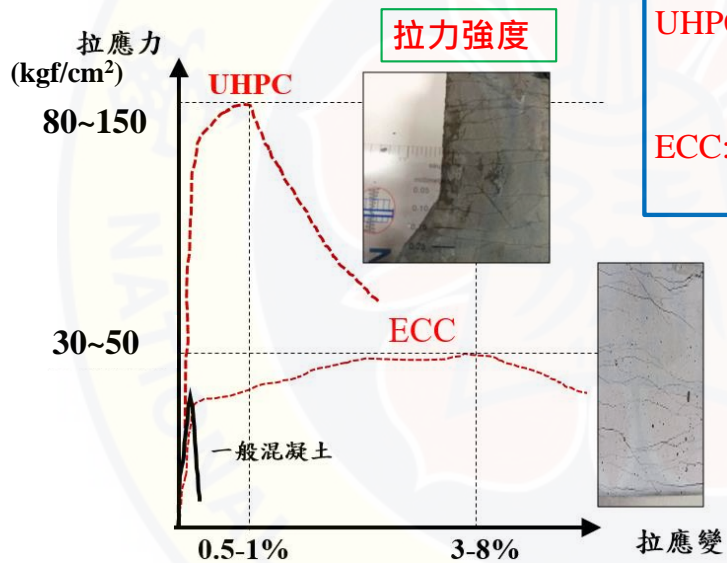
高顆粒堆
積緻密度



Nist.gov

American Coal Ash Association

超高性能混凝土(UHPC) - 抗拉性質

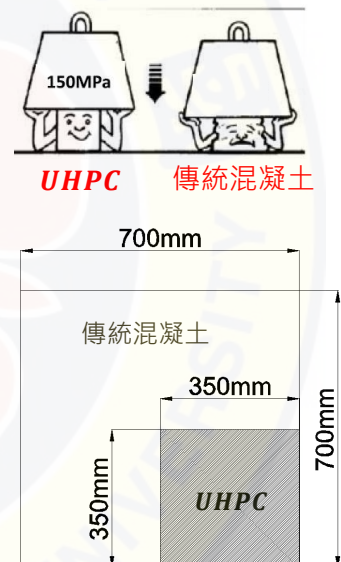
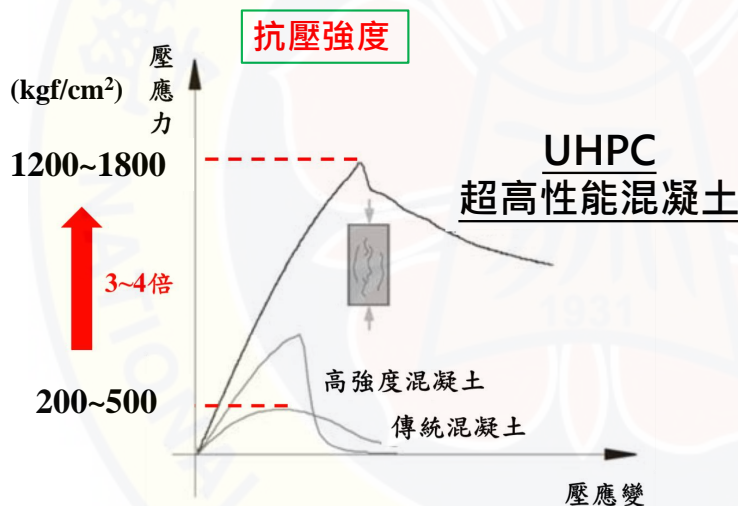


UHPC: Ultra-high Performance Concrete
“超”高性能混凝土

ECC: Engineered Cementitious Composites
高韌性混凝土

強化可變形與抗裂能力

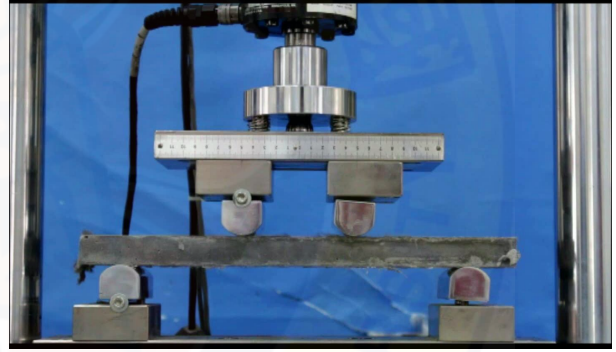
超高性能混凝土(UHPC) - 抗壓力學性質



UHPC-變形與抗開裂能力



Conventional Concrete
傳統混凝土

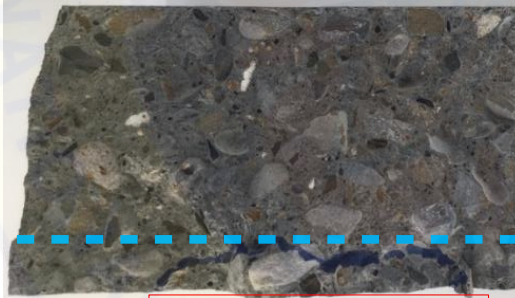


UHPC
超高性能混凝土

UHPC具優異防水特性: 5倍強化

透水試驗

市售水密性混凝土



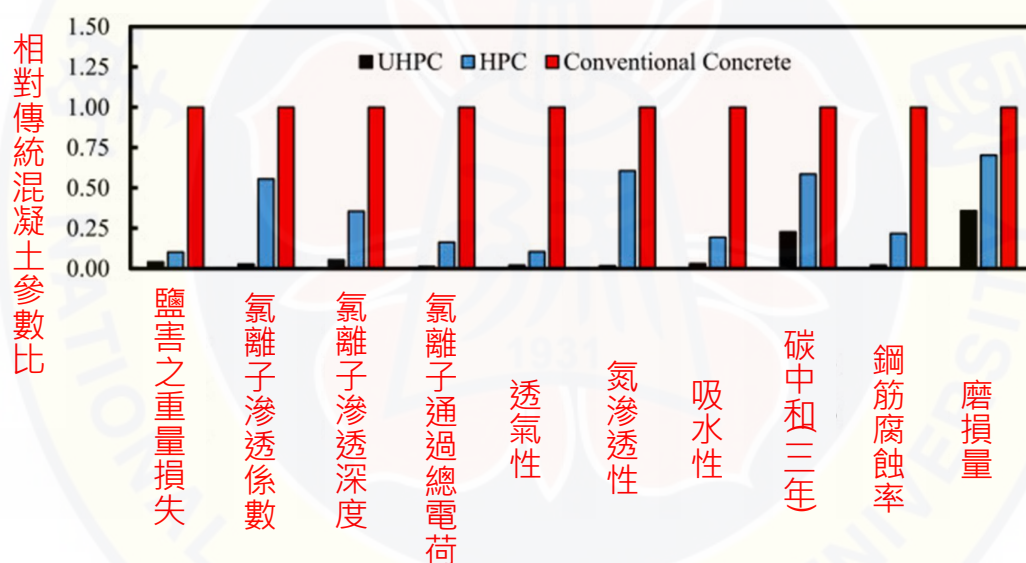
透水深度2.4cm

UHPC防水層3公分

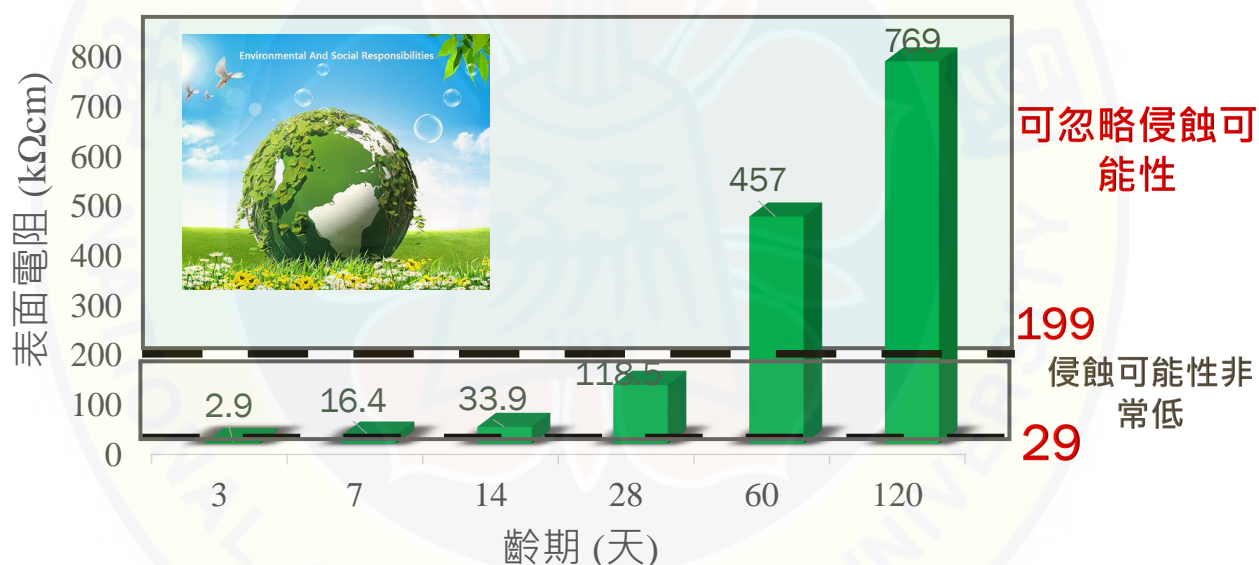


透水深度0.5cm

UHPC防水、耐腐蝕、耐磨與耐久性質

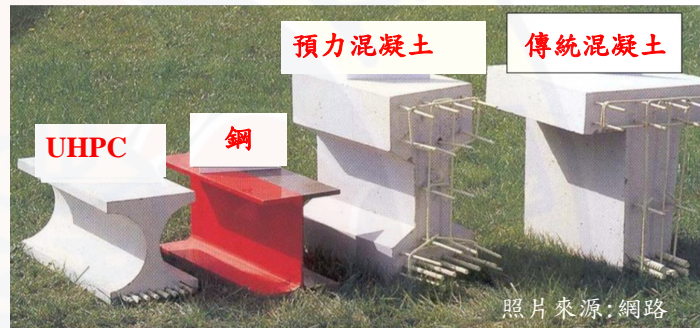


UHPC之耐久性質指標(電阻抗試驗)



UHPC之高永續性

- 結構斷面減小
- 設計自由度大
- 永續發展



加拿大Sherbrook人行橋設計案例比較: 傳統混凝土與UHPC

	傳統混凝土	UHPC
等效截面厚度(mm)	500	150
混凝土體積(m ³)	126	33
膠結材總用量(kg)	44100	23265
CO ₂ 排放量(t)	44	23

可減少環境衝擊
為永續建築材料

超高性能混凝土(UHPC)性質總表

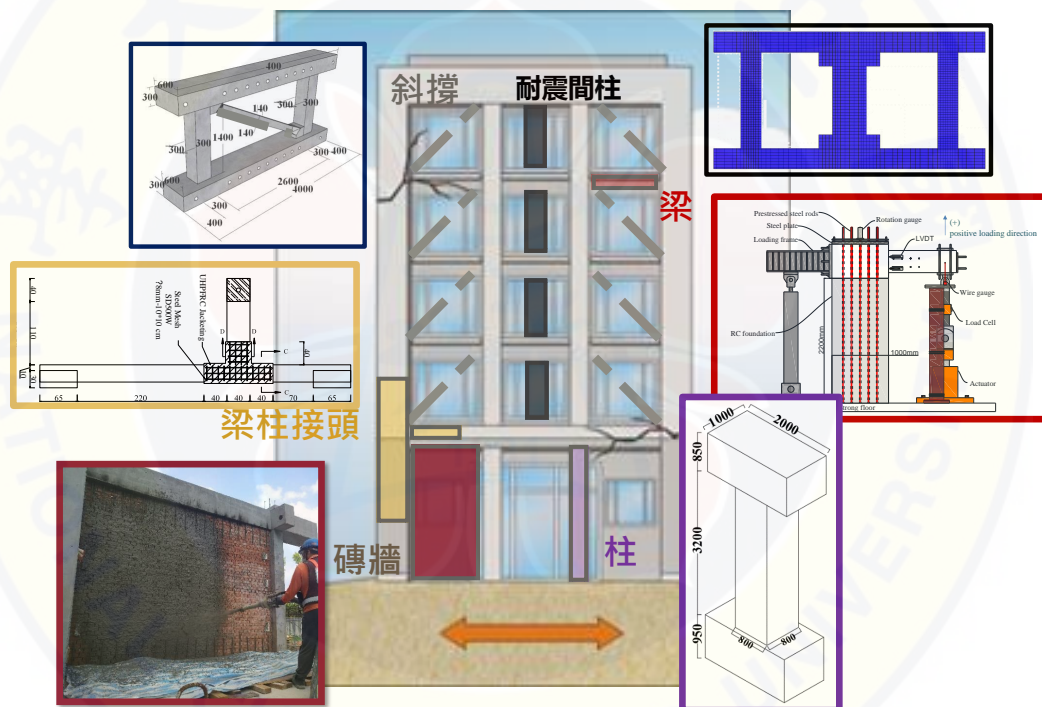
	項目	傳統混凝土	UHPC	UHPC/傳統混凝土
力學性質	抗壓強度(kgf/cm ²)	200-500	1000-1800	4
	抗拉強度(kgf/cm ²)	10-30	60-120	4
	撓曲強度(kgf/cm ²)	20-100	250-400	5
	彈性模數(10 ⁵ kgf/cm ²)	2-3	3-6	2
	單位密度(kg/m ³)	2300	2500	1.1
耐久性指標	孔隙率(%)	14-20	1.5-5	1/5
	吸水率(kg/m ³)	2.4-2.7	0.1-0.2	1/25
	透氣性(m ²)	10 ⁻¹⁶	<10 ⁻¹⁹	1/1000
	氯離子滲透係數(m ² /s)	2x10 ⁻¹¹	2x10 ⁻¹⁴	1/1000

第三種土木工程材料 &

超高性能混凝土

-力學性質界於”傳統混凝土”與”鋼材”

UHPC於建築之修復與補強工法



UHPC工法:

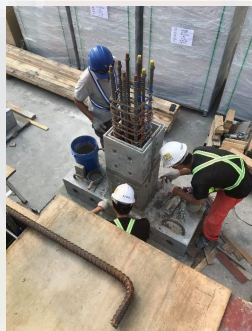
□ 提升強度、勁度、韌性、抗裂、耐久與防水

乾式貼片工法



Fast and Easy
施工快速簡易

耐震外殼預鑄工法



No formwork
免除模版工程的施作

手鏟工法



Aesthetics
滿足力學與美學

空心柱預鑄工法

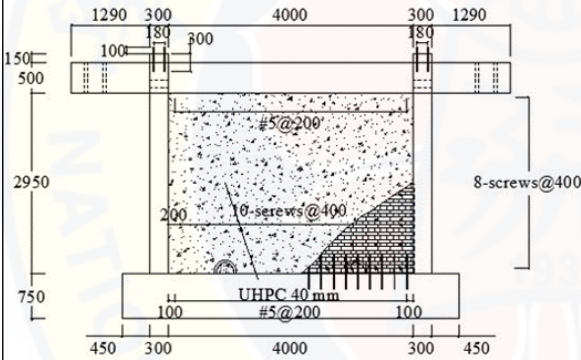
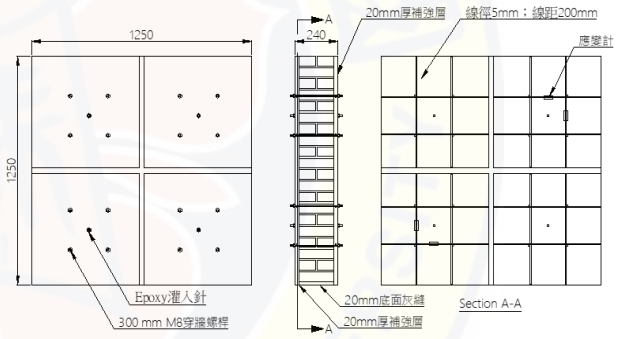


噴漿工法



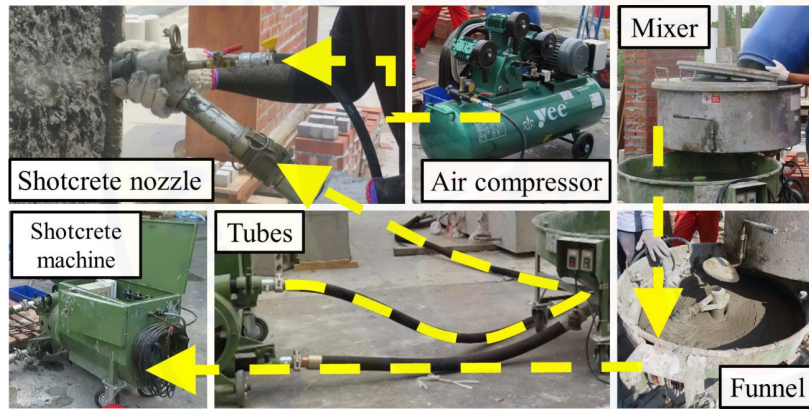
UHPC於
磚牆與其它牆體之
耐震提升與抗倒塌補強工法

工法 項目	UHPC濕式工法	UHPC乾式工法
簡介	<p><u>手鏟施工</u>: 將拌合完成的UHPC漿體，直接以傳統手鏟方式，塗佈於牆面上。</p> <p><u>噴漿施工</u>: 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。</p>	<p><u>預鑄版貼附工法</u>: 將預先製作之UHPC薄版，以螺栓錨錠方式，將其貼覆於牆體表面，屬於半乾式施工方式。</p>
特性	<ul style="list-style-type: none"> 透過在牆體表面施作一層補強層，提升牆體結構<u>面內之剪力強度</u>以及<u>面內外之變形韌性</u>，以有效提升牆體結構之<u>抗震與抗倒塌能力</u>。 <u>毋須組立模版</u>，可有效減少假設工程，即可完成補強施作。此外，噴漿補強之施工效率佳，可以大幅節省施工時間與物料成本。 預鑄版補強優點則在於事先製作的預鑄版可具有較佳的漿體與施工管控品質，並可配合現地需求，製作成不同幾何尺寸。現地施工時可大幅減少所需之機具與人力，此外，由於屬半乾式工法，於工地現場可有效維持清潔整齊，並可於<u>短時間內完成施工補強</u>。 	
補強 施工照片	 <p>UHPC噴漿施工 塹平修飾</p>	 <p>安裝預鑄版 安裝後 Epoxy灌注</p>

工法 項目	UHPC噴漿與手鏟工法	UHPC乾式預鑄版工法
圖說	 <p>Diagram illustrating the UHPC spray and hand trowel method. Key dimensions and details include: overall width 4000mm, height 2950mm, UHPC thickness 40mm, #5@200 reinforcement, 10-screws@400, 8-screws@400, and various edge dimensions (1290, 300, 180, 100, 450, 750, 150, 500, 200).</p>	 <p>Diagram illustrating the UHPC dry pre-cast panel method. Key dimensions and details include: panel width 1250mm, height 1250mm, 20mm thick UHPC panel, 20mm bottom concrete, 300mm M8 anchor bolts, Epoxy injection points, and Section A-A showing 20mm thick UHPC panel and 20mm bottom concrete.</p>

UHPC噴漿補強機具

□傳統營建工地噴漿機即可適用



UHPC噴漿系統示意圖



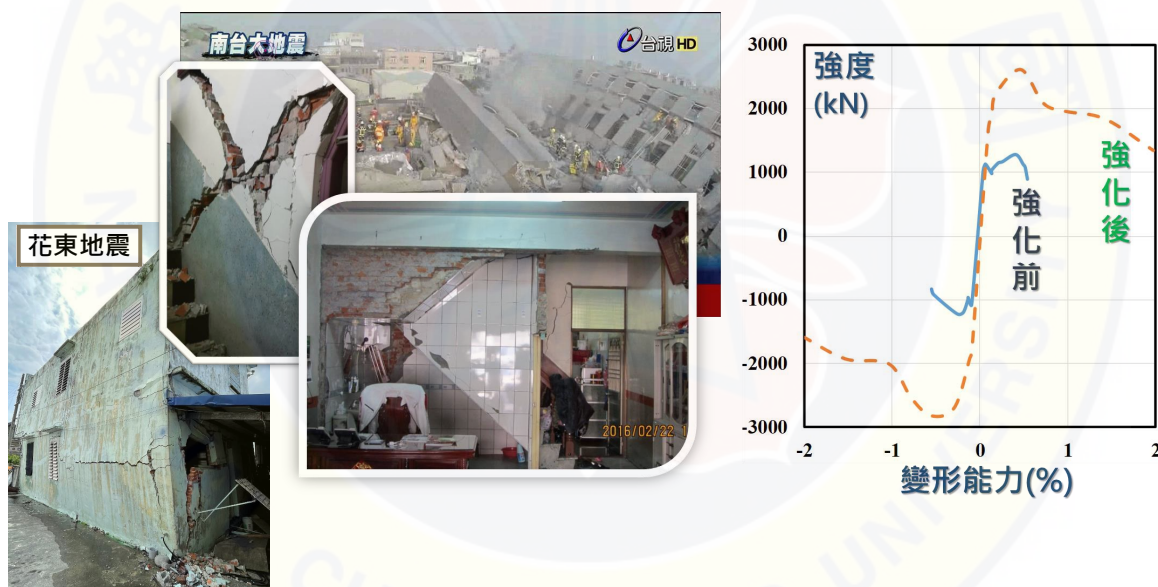
UHPC噴漿補強施工

補強效能於國家地震工程研究中心完成驗證

工法 項目	UHPC場鑄工法	UHPC預鑄版貼附工法
試驗 結果	<ul style="list-style-type: none"> UHPC噴漿大幅提升<u>兩倍以上</u>之磚牆極限變形量 UHPC噴漿較加強磚造側向強度提升<u>121%</u> 試驗結果表明可避免磚牆嚴重剝落與坍塌 初始勁度較加強磚造提升<u>20%</u> UHPC噴漿可有效控制磚牆開裂情況 破壞模式屬於具韌性之撓剪破壞 在較高之位移比仍保持側向強度 	<ul style="list-style-type: none"> 預鑄版貼附補強後，磚牆產生對角拉力破壞 相較為補強試體，對角外力提升<u>119%</u> 補強後韌性提升<u>110%</u> 補強後剪力強度提升<u>83%</u>
試驗 圖型		

磚牆建築之修繕或補強

□毋須鋼筋網・4公分薄UHPC的抗震強化能力



成大土木系-洪崇展特聘教授

19

國外補強實驗案例: 避免空心磚牆之面外倒塌



資料來源:https://www.youtube.com/watch?v=bQXOVpJzSE&feature=emb_title

成大土木系-洪崇展特聘教授

20

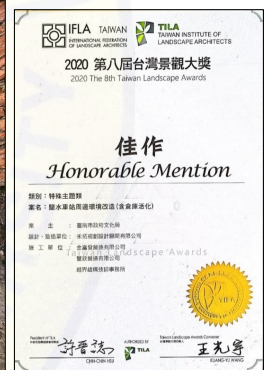
國內UHPC工程案例

成大土木系-洪崇展特聘教授

21

台南鹽水樹屋群老倉庫: 取代鋼版

- ❑ 越界結構技師事務所(彭光聰結構技師)
- ❑ UHPC協力廠商: 萬固科技實業
- ❑ 2019完工



成大土木系-洪崇展特聘教授

22

台南市神農街老屋補強:UHPC噴漿&手鏟施工

- 打開聯合文化創意有限公司(劉國滄建築師)
- 原型結構工程顧問有限公司(陳冠帆結構技師)/UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2020完工

- UHPC噴漿施工(單面4cm)
- 未修補面
- 修補完成面



台南市神農街老屋補強:UHPC噴漿&手鏟施工

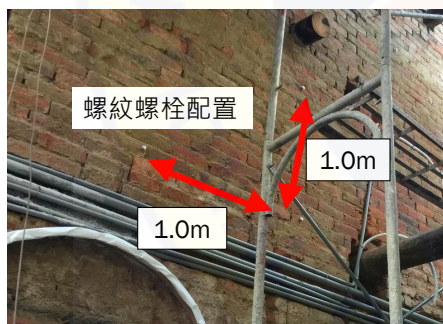
鋼筋網：無

螺紋螺栓：

螺栓直徑: M10
螺栓長度: 70 mm
埋入深度: 55mm
螺栓間距: 1.0m



UHPC手鏟施工
(單面4cm)



螺紋螺栓配置

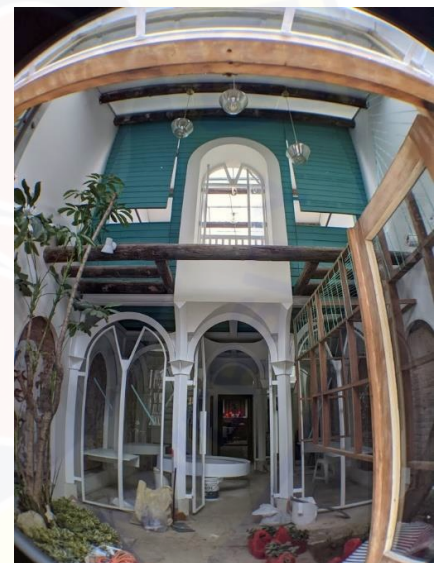
1.0m

1.0m



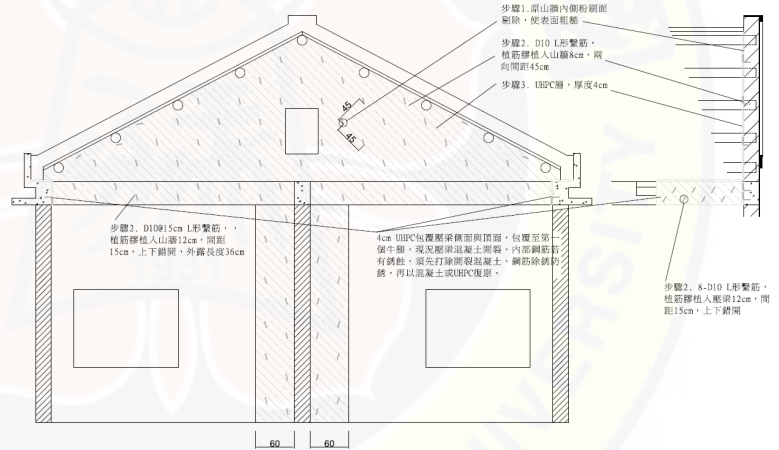
粉光完成面
(1.5cm)

老屋改造完成樣



台南市公園路老屋補強

- 施忠賢結構技師事務所/UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2022年完工



成大土木系-洪崇展特聘教授

25

台南市公園路老屋補強:UHPC手鏟施工

- 施忠賢結構技師事務所/UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2022年完工

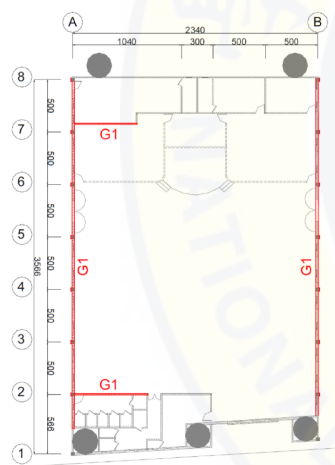


成大土木系-洪崇展特聘教授

26

台南市北區活動中心補強: UHPC手鏟施工

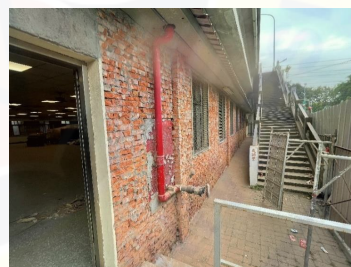
- 萬豐工程顧問有限公司，丁英哲結構技師/UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2022完工



中華北路二段

成大土木系-洪崇展特聘教授

名稱	尺寸
G1	單面 UHPC 補強至牆頂 牆高約 3m
螺絲錨栓	M10 @1000 mm
鋼筋網	φ 6*6 /100*100 mm



27

台南市北區活動中心補強: UHPC手鏟施工

- 萬豐工程顧問有限公司，丁英哲結構技師/UHPC協力廠商:萬固科技實業

• UHPC手鏟施工(單面4cm)

• 粉光完成面



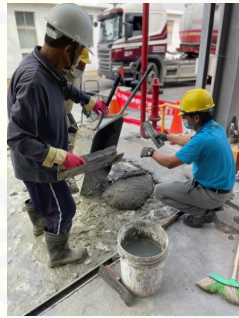
成大土木系-洪崇展特聘教授

28

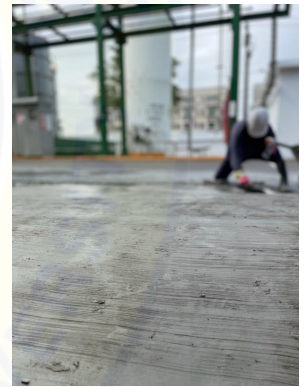
上市公司化工廠-地坪補強

□ 避免重機具輾壓造成破碎與裂縫

• UHPC灌製與施工



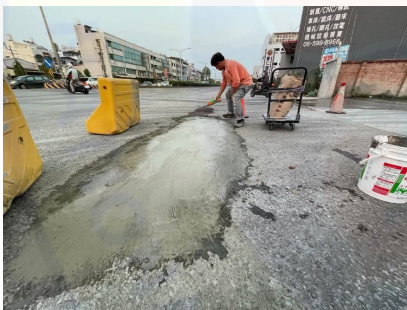
• UHPC完成樣



預拌混凝土廠-地坪修復

□ 避免重機具輾壓造成破碎與裂縫

• UHPC灌製與施工



• UHPC完成樣

快速道路橋柱之UHPC包覆補強(公路總局)

- 刨除原保護層後，添加橫向鋼筋
- 包覆補強後維持原斷面大小

補強前



UHPC灌漿

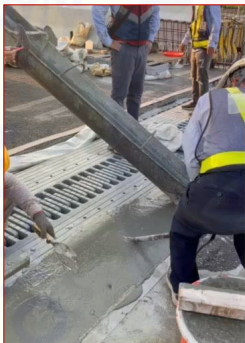


UHPC包覆補強



快速道路之UHPC伸縮縫(營建署)

- UHPC灌漿、施工、養護

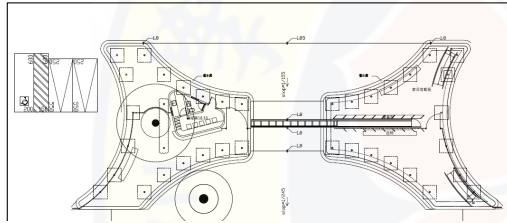


• UHPC完成樣



UHPC戶外薄殼平台

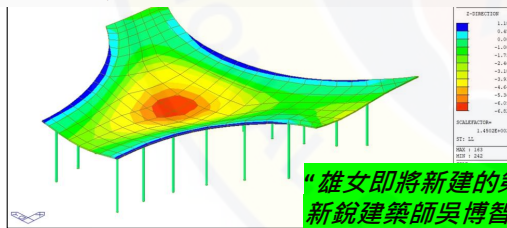
- 吳博智建築師/施忠賢結構技師事務所
- UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2022/9 完工



即時 要聞 娛樂 運動 全球 社會 地方 產經 股市 房市 生活 健康 橋世代 文教 評論 兩岸

影／雄女大門拆除新建倒數 新設計有種紅叫「雄女紅」

2022-01-26 15:28 聯合報 / 記者徐如宜 / 高雄即時報導



“雄女即將新建的第4代校門，是由設計監造台南美術館的造究建築師事務所新銳建築師吳博智設計，將打破「門」的概念，進行整體區域改造。”

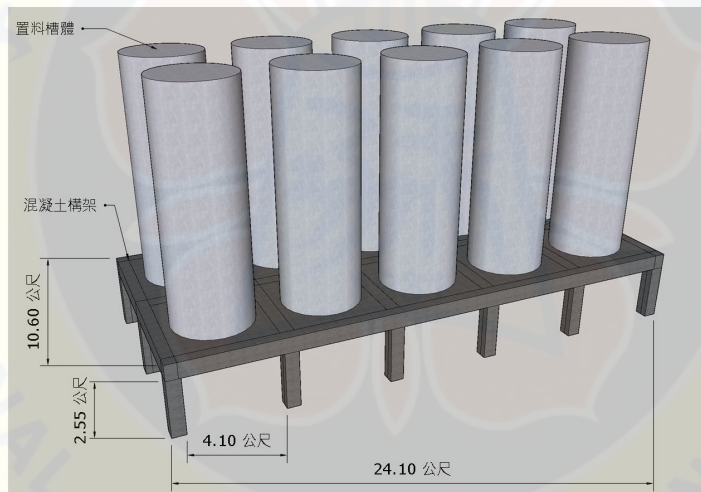
成大土木系-洪崇展特聘教授



33

上市化工廠之廠區補強評估

- 施忠賢結構技師事務所/UHPC協力廠商:萬固科技實業



梁受損情形

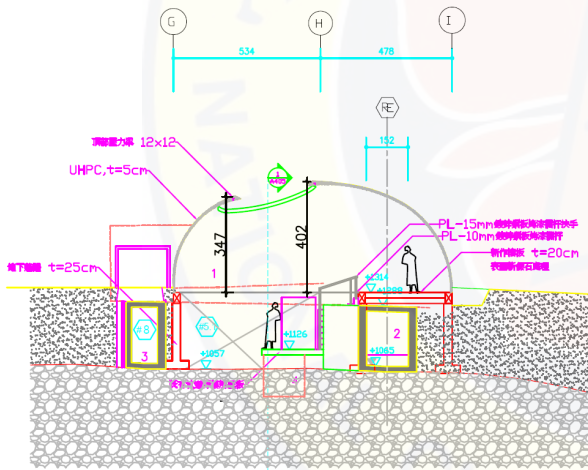


成大土木系-洪崇展特聘教授

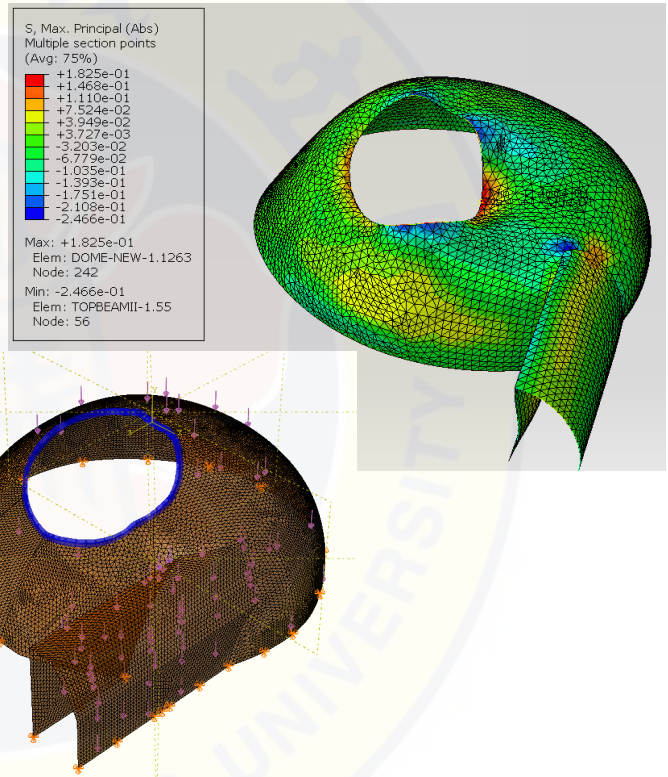
34

UHPC-曲面薄殼圓頂

- 何黛雯建築師事務所
- 施忠賢結構技師事務所
- UHPC協力廠商:萬固科技實業
- 2023年



成大土木系-洪崇展特聘教授



高架箱型梁剪力強度修復工法之比較

方案一:樹酯灌注+高強度砂漿+鋼版補強

- 三種工法 => 三種工序 =>時間冗長、介面複雜
- 鋼版補強:
 - 1) 新舊材料勁度差異大
 - 2) 需使用化學錨栓，位置易與原鋼筋衝突。
 - 3) 此方法成功需倚賴基材混凝土之健全性，然而目前對混凝土強度與品質有疑慮。
 - 4) 外置鋼版於箱梁外，容易使民眾觀感不佳
 - 5) 鋼版有鏽蝕問題
 - 6) 外加鋼版後，日後鋼板內混凝土狀況即未知，不利檢視維護

方案二:UHPC噴漿工法

工序:

- 1) 刨除不良之混凝土
- 2) 吊掛鋼筋網
- 3) 進行UHPC噴漿

優點:

- 1) 工序與介面簡單
- 2) 可同時修復剪力強度、握裹、與裂縫
- 3) 初終凝時間短，UHPC與內部鋼筋網即可快速提供抗剪能力
- 4) 不需模版
- 5) 施工快速
- 6) 完工後表面為混凝土，不易察覺曾經補強

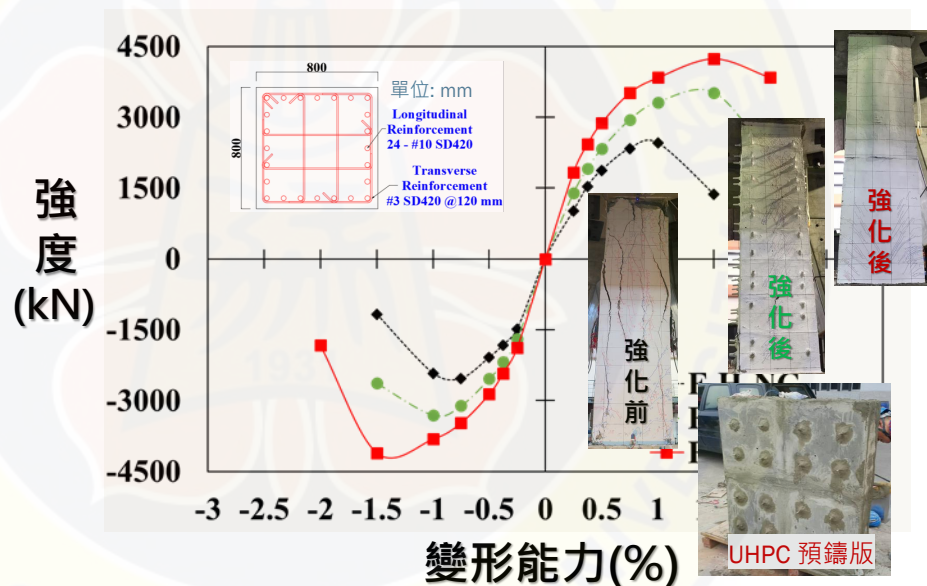
UHPC多元產製步驟



成大土木系-洪崇展特聘教授

37

國震中心測試： 大樓柱之UHPC耐震盔甲 - 4公分薄的強化能力

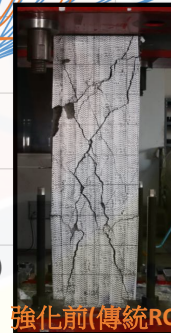
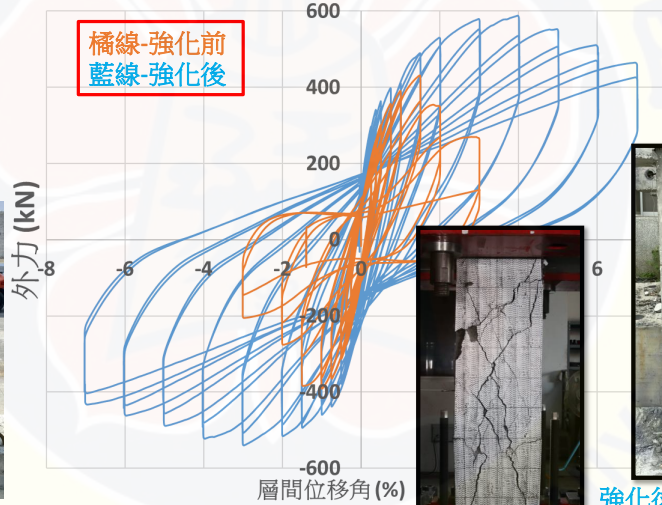


成大土木系-洪崇展特聘教授

38

UHPC抗裂與抗震盔甲

- ◆ 預鑄薄殼 & 現場快速組立
- ◆ 新建與補強工程均適用



強化後(傳統柱+UHPC耐震盔甲)

強化前(傳統RC柱)

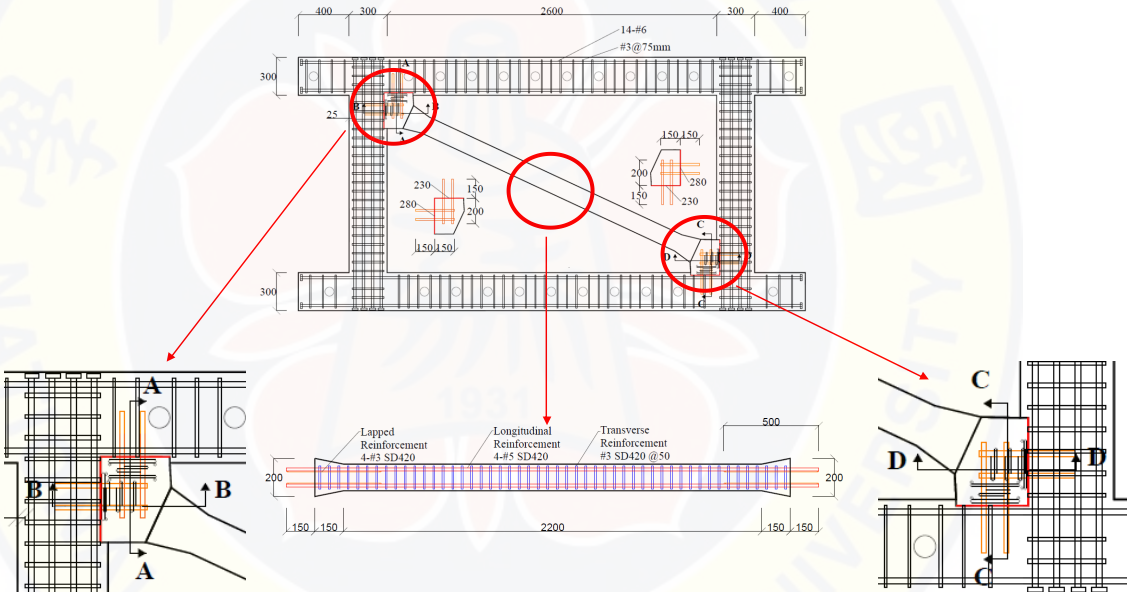
UHPC抗裂與抗震盔甲

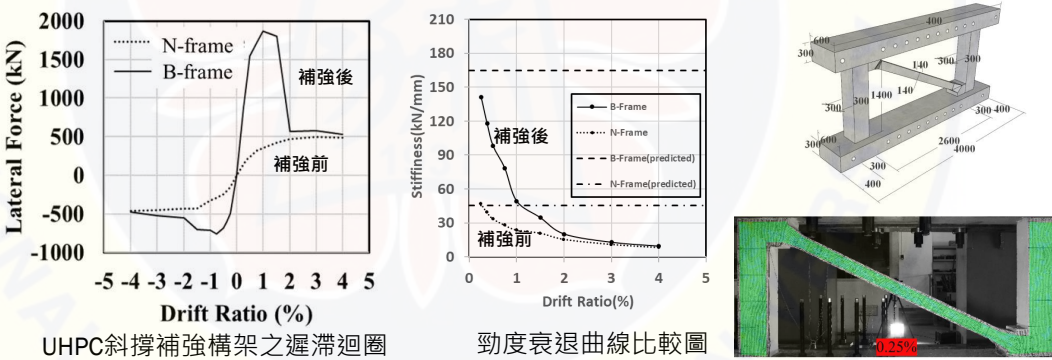
工法 項目	UHPC場鑄工法	UHPC預鑄版之貼覆補強
簡介	類似傳統濕式工法，於現場綁紮鋼筋或鋼筋網並架設模版，澆置UHPC包覆層之包覆補強。	使用預先製成之預鑄版(U型或單片型)，以單片為單位，於現場貼覆組裝，間隙澆置UHPC，工法屬半乾式施工。
特性	<ul style="list-style-type: none"> 適用需有效提升軸向、撓曲與剪力強度、以及勁度與韌性需求者 適用於既有混凝土品質或耐久性須提升者 UHPC包覆補強可在有限度增加斷面下，即可提高補強效用 UHPC可以減少新置補強鋼筋之握裹長度，可使用於梁或基礎深部不足之補強條件 UHPC預鑄版補強能有效縮短工期，免除模版工程，降低時間成本，半乾式施工可使施工環境簡潔 	
補強 施工照片	 鋼筋網架設  UHPC灌漿  喇叭口打除  單片型預鑄版  U型預鑄版	

工法 項目	UHPC場鑄包覆工法	UHPC預鑄版之貼覆補強
圖說	<p>UHPC Cover #3 SD420 with embedding length 100 mm #3 SD420@100mm U-shaped with splice length of 100mm 400 300 100 400 300 50 Longitudinal Reinforcement 8-#8 SD420 Transverse Reinforcement #4 SD280@120mm Loading Direction</p>	<p>UHPC Cover M10 Screw Anchor with embedding length 100 mm UHPC #3 WWM (100*100) 400 300 100 400 300 50 Longitudinal Reinforcement 8-#8 SD420 embedding length 50 mm Transverse Reinforcement #4 SD420@120mm Loading Direction</p> <p>50mm 1300mm</p>

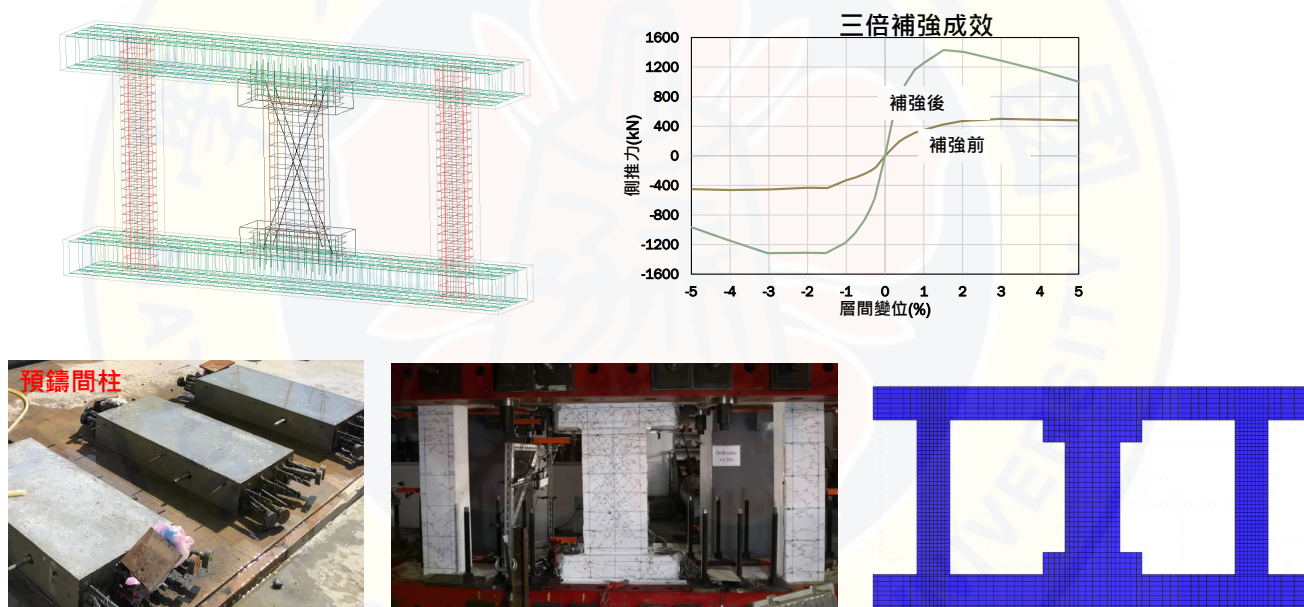
工法 項目	UHPC場鑄工法	UHPC預鑄版之貼覆補強
試驗結果	<ul style="list-style-type: none"> 在不擴大既有柱斷面尺寸條件下，可提升柱構件側向強度達<u>50%</u> 極限層間位移角可由補強前之1.5%·大幅提升至<u>大於4%</u> 殘餘勁度與位移提升<u>約50%</u> 破壞模式從剪力破壞轉變為<u>撓剪破壞或撓曲破壞</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 可提升極限側向強度<u>約40%以上</u> 極限層間位移角可由2%大幅<u>提升到5%</u> 破壞模式從剪力破壞轉變為<u>撓剪破壞或撓曲破壞</u> 韌性可提升<u>約54%</u> 初始勁度約提升<u>20%以上</u>
試驗圖型	<div>場鑄補強搭配補強鋼筋網</div> <div>場鑄補強搭配現場鋼筋綁紮</div> <p>紅線為補強後 黑線為未補強</p>	<div>單片式預鑄版補強</div> <div>U型預鑄版補強</div> <p>紅線為補強後 黑線為未補強</p>

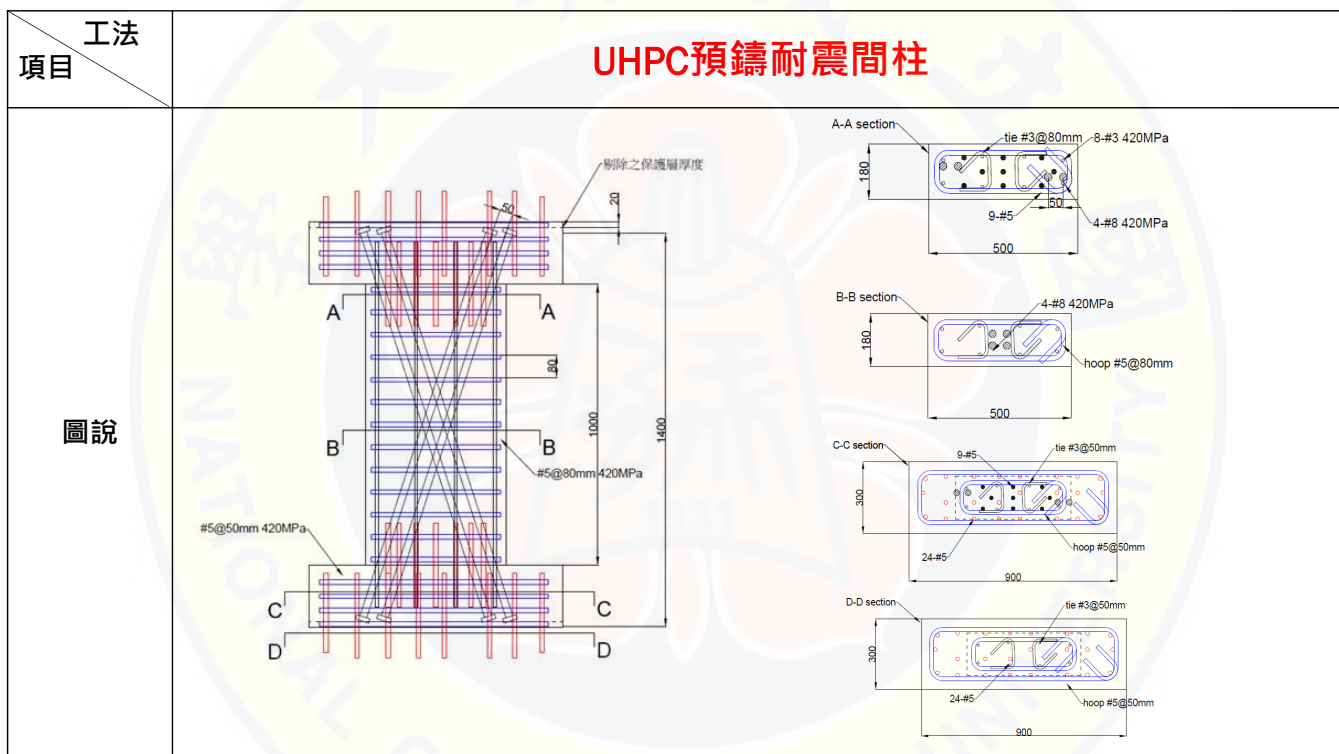
工法 項目	UHPC斜撐於門形構架之補強工法	
簡介	斜撐補強是在構架間添增斜向構件，以提升構架的側向強度與勁度，此補強方式不需將柱間填滿，所以同時可以保持原有的通風採光。超高性能混凝土不僅具有 高抗壓及高抗拉 的特性，亦 具有良好之變形韌性 ，藉由內部纖維的橋連效應，能抑制裂縫發展，並有效減緩或避免混凝土剝落與壓碎，因此適合使用於構架斜撐，達到良好之耐震提升效果。	
特性	<ul style="list-style-type: none"> 提升建築物側向強度與勁度 UHPC斜撐可適現場施工條件，可採用現場澆製作或預鑄並於現場安裝。 對採光與通風影響較輕微 UHPC斜撐可有效減緩或避免混凝土剝落與壓碎 適用於柱間無結構性承重牆體，可置入斜撐於柱間 	
補強 施工照片	 <p>補強示意圖</p>	 <p>預鑄斜撐假固定</p>  <p>接合處UHPC灌漿</p>  <p>補強完成</p>

工法 項目	超高性能混凝土斜撐於門形構架之補強工法	
圖說		

工法 項目	UHPC斜撐於門形構架之補強工法	
試驗 結果	<ul style="list-style-type: none"> 構架於UHPC斜撐補強後之側向強度於斜撐受壓與受拉方向分別大幅提升至空構架的<u>3.6與1.6倍</u>。 當UHPC斜撐破壞後，柱構件仍保有與空構架尖峰強度相同之性能。 UHPC斜撐補強可有效提升構架之正反向側向勁度約<u>3.1與4.8倍</u>。 	
試驗 圖型	 <p>UHPC斜撐補強構架之遲滯迴圈</p> <p>勁度衰退曲線比較圖</p>	

UHPC耐震間柱





UHPC補強成效之評估

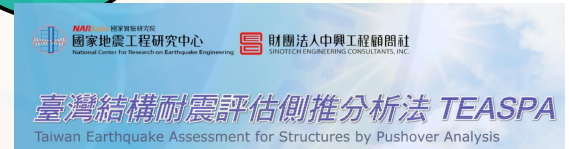
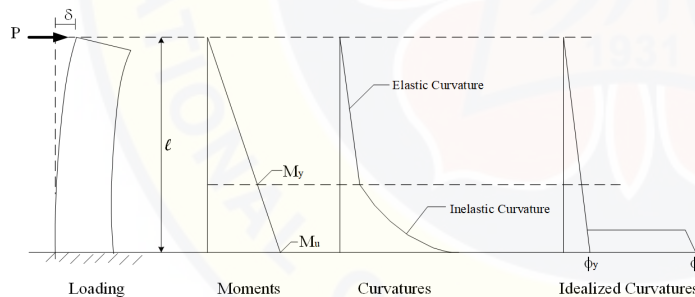
快速計算公式



詳細評估軟體



UHPC補強詳細評估: 軟體分析



ETABS®

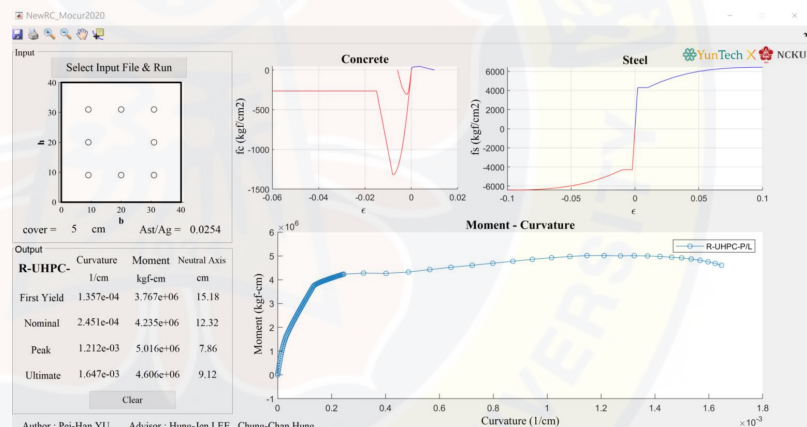
成大土木系-洪崇展特聘教授

49



➤NewRC-Mocur2020

- 提供使用者進行UHPC包覆柱複合斷面之彎矩曲率分析
- 方便使用者進行柱構件補強之初步斷面設計。



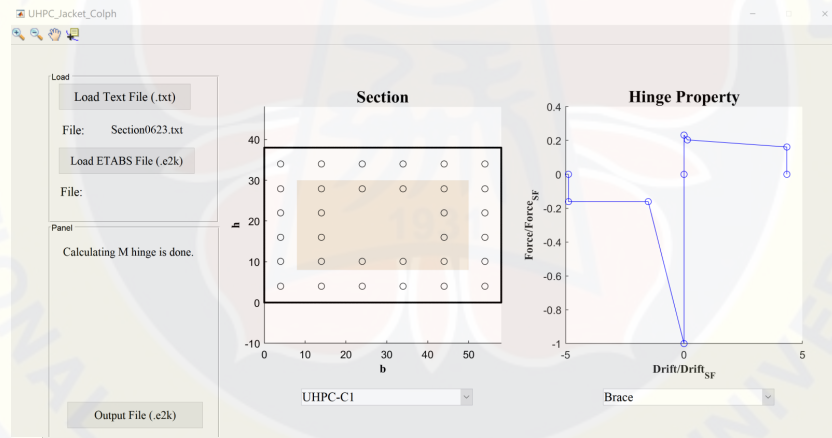
NewRC-Mocur2020 (斷面分析)

成大土木系-洪崇展特聘教授

50

執業技師進行UHPC補強工法之設計與分析

- UHPC耐震補強詳細評估之輔助分析軟體(UHPC_Jacket_Coloph)。
- 可計算UHPC包覆柱、UHPC噴漿磚牆、以及UHPC預鑄斜撐之非線性塑角。
- 可自動匯入於使用者所輸入之ETABS模型中，透過ETABS側推分析，可得UHPC補強後之結構容量曲線。



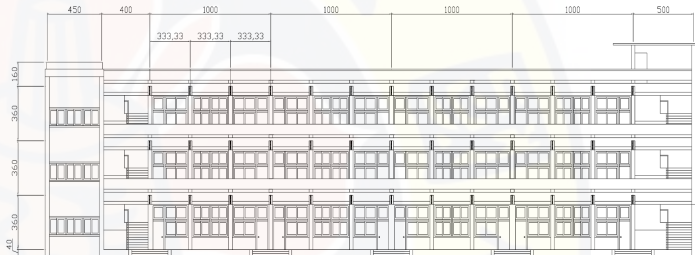
UHPC_Jacket_Coloph (塑鉸分析)

示範案例 — 台南市後甲國中校舍補強

- ❑ 地上3層鋼筋混凝土造之校舍
- ❑ 平行街道(長向)尺寸為53.5公尺
- ❑ 垂直街道(短向)尺寸為10.2公尺
- ❑ 樓層高度為3.6公尺
- ❑ 教室每跨有90cm高之窗台
- ❑ 教室外單側有走廊，但走廊無柱

柱編號	C1	C2	C3
斷面			
主筋	○4-D22 ●8-D19	●6-D16	○4-D19 ●4-D16
箍筋	D10@25	D10@25	D10@25
尺寸	30x50	24x30	36x36

➤ 正立面圖(Y2)



➤ 背立面圖(Y6)



補強方式-案例1: UHPC包覆柱

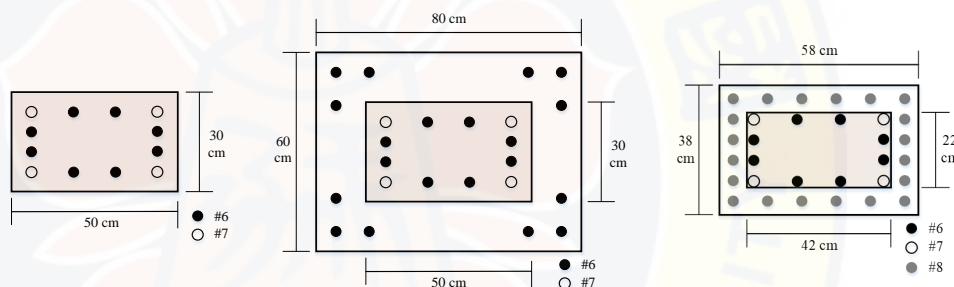
$$V^* = \frac{A_T}{A_p} V \implies \Delta V_L = V_{RC,S} - V_{RC} \implies N = \frac{V^* - V}{\Delta V_L}$$

$$S_{DS} = S_S^D \times F_a = 0.7$$

$$A_T = 0.4 \times S_{DS} = 0.28$$

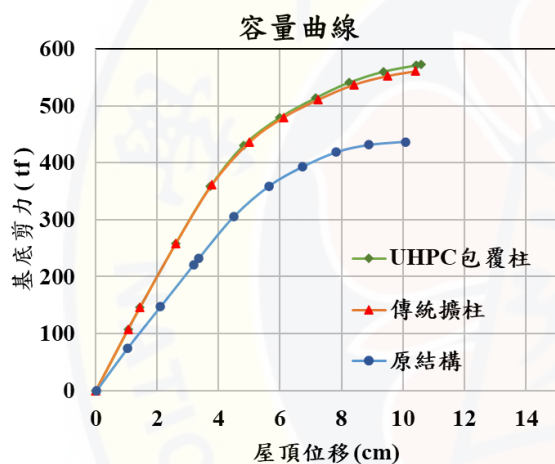
$$V = 436.8 \text{ tf}$$

$$A_p = 0.237g$$



	既有結構柱	傳統擴柱補強	UHPC 包覆柱補強
斷面(cm^2)	30 × 50	60 × 80	38 × 58
補強層厚度(cm)	0	15	8
$V_n(\text{tf})$	7.89	53.2	55.57

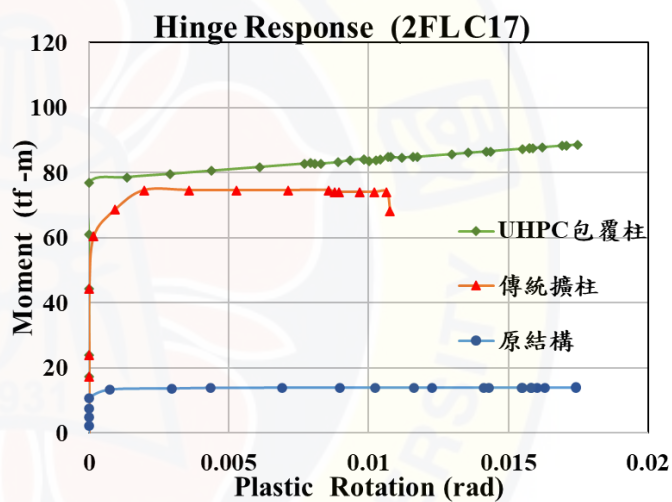
UHPC包覆柱: 容量曲線 & 塑角反應



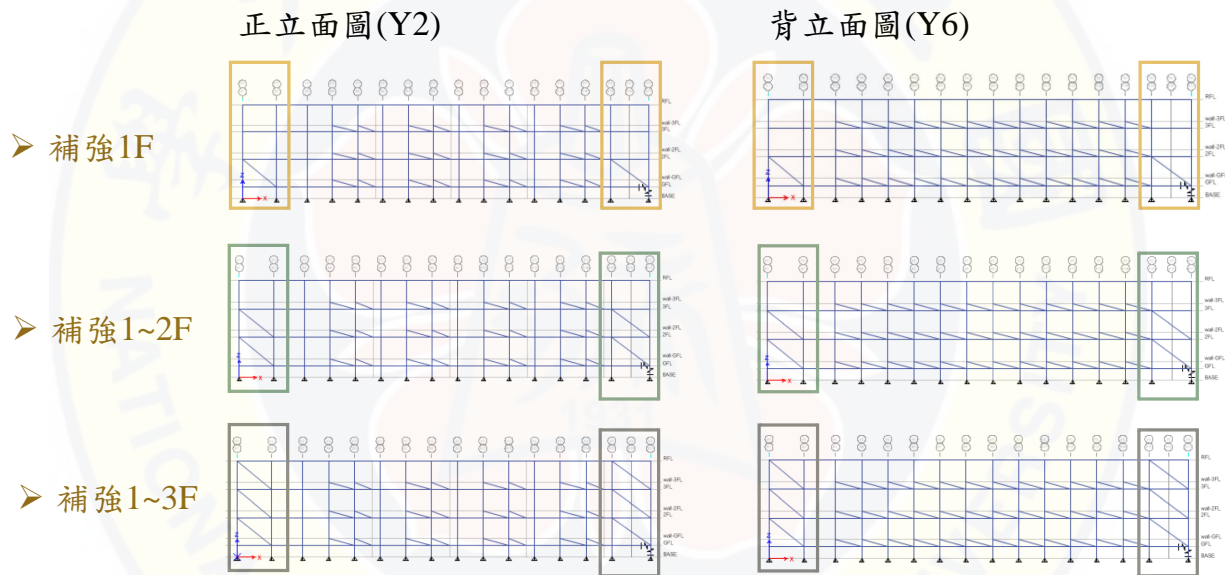
原結構 $A_p = 0.237g$

傳統擴柱 $A_p = 0.280g$

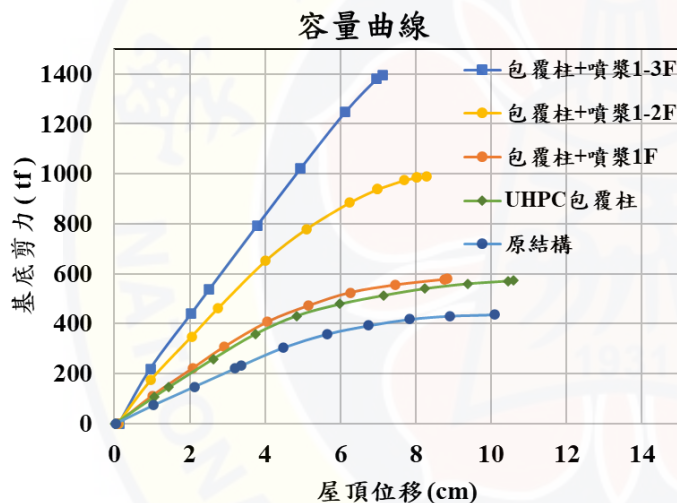
UHPC 包覆柱 $A_p = 0.282g$



補強方式-案例2: “UHPC包覆柱+UHPC噴漿補強”於不同位置



UHPC包覆柱+噴漿: 容量曲線之比較



UHPC包覆柱補強

$$V = 572.00 \text{ tf}$$

$$\Delta = 10.59 \text{ cm}$$

$$A_p = 0.282g$$

UHPC柱+1F噴漿補強

$$V = 578.99 \text{ tf}$$

$$\Delta = 8.82 \text{ cm}$$

$$A_p = 0.2562g \text{ (NG)}$$

UHPC柱+1-2F噴漿補強

$$V = 989.15 \text{ tf}$$

$$\Delta = 8.29 \text{ cm}$$

$$A_p = 0.4198g$$

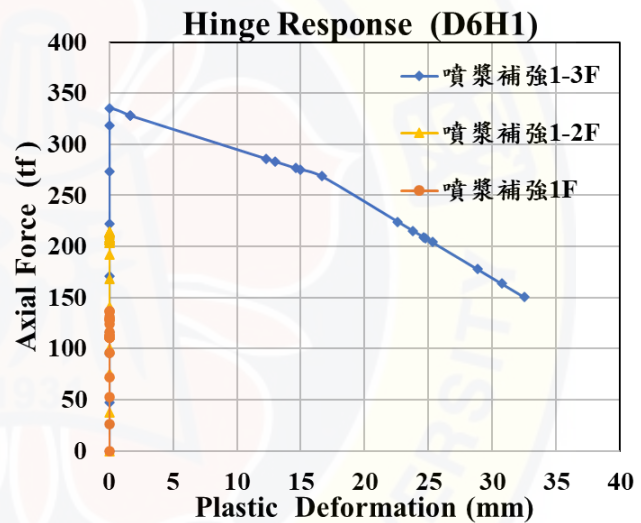
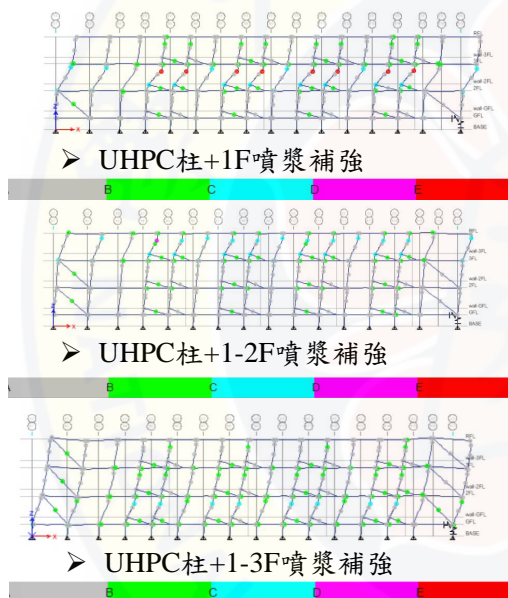
UHPC柱+1-3F噴漿補強

$$V = 1394.71 \text{ tf}$$

$$\Delta = 7.12 \text{ cm}$$

$$A_p = 0.4877g$$

UHPC包覆柱+噴漿: 塑角反應

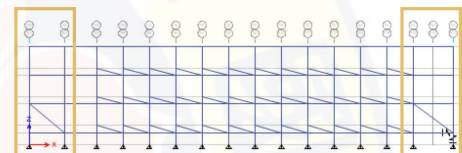
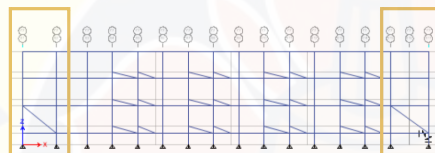


補強方式-案例3: “UHPC包覆柱+ UHPC斜撐補強” 於不同位置

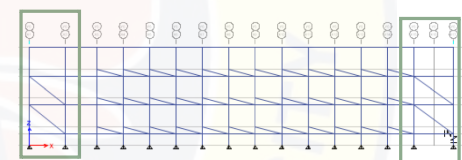
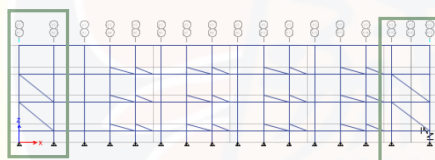
正立面圖(Y2)

背立面圖(Y6)

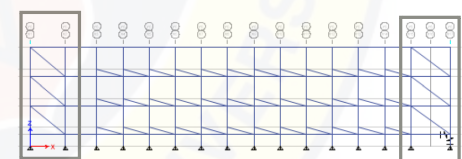
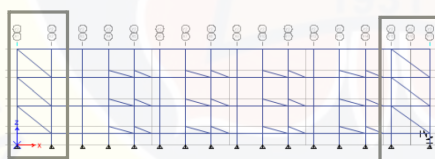
➤ 補強1F



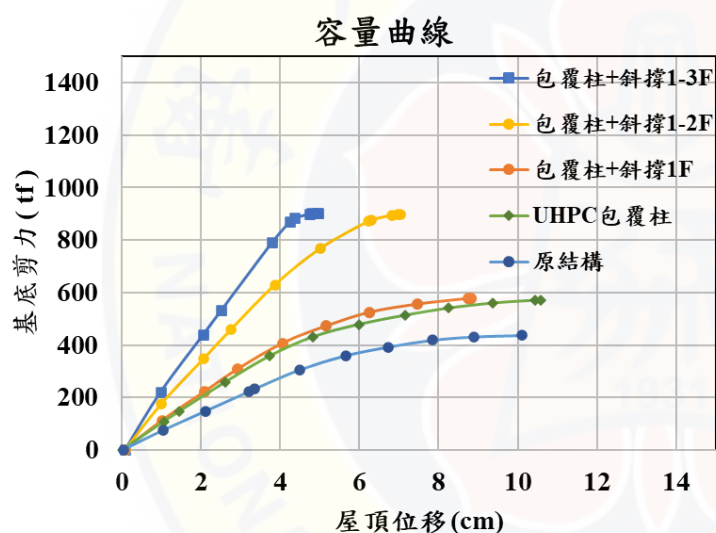
➤ 補強1~2F



➤ 補強1~3F



UHPC包覆柱+斜撐: 容量曲線之比較



UHPC 包覆柱補強

$V = 572.00 \text{ tf}$

$\Delta = 10.59 \text{ cm}$

$A_p = 0.282g$

UHPC柱+1F斜撐補強

$V = 578.93 \text{ tf}$

$\Delta = 8.83 \text{ cm}$

$A_p = 0.2561g \text{ (NG)}$

UHPC柱+1-2F斜撐補強

$V = 898.19 \text{ tf}$

$\Delta = 7.05 \text{ cm}$

$A_p = 0.3679g$

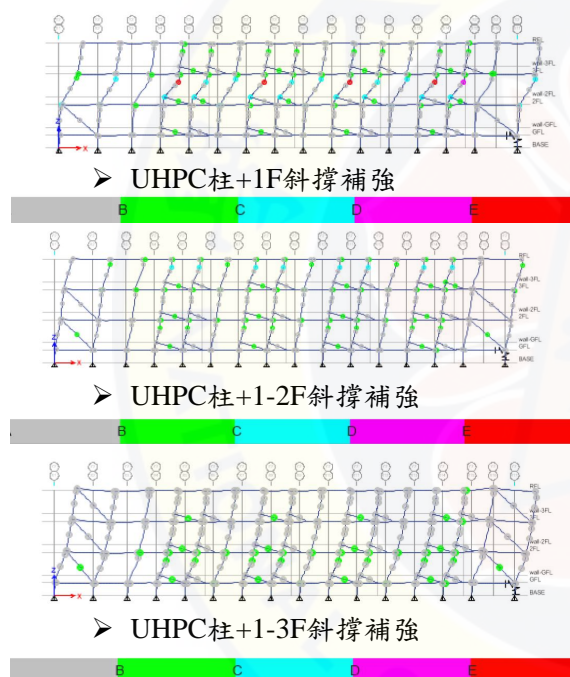
UHPC柱+1-3F斜撐補強

$V = 901.70 \text{ tf}$

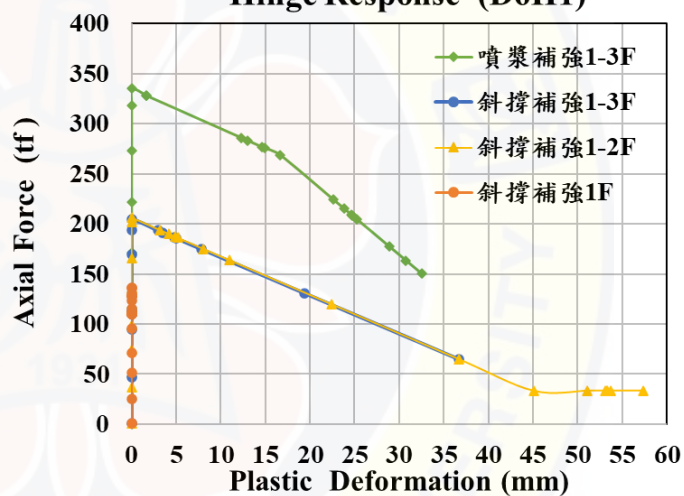
$\Delta = 4.97 \text{ cm}$

$A_p = 0.3453g$

UHPC包覆柱+斜撐: 塑角反應



Hinge Response (D6H1)



超高性能混凝土 (UHPC) 修繕與補強工法

- UHPC材料力學界於傳統混凝土與鋼材。
- 台灣已累積諸多UHPC補強應用實例。UHPC已廣泛推廣於歐美日韓與東南亞，國外已公布許多規範與參考標準。
- (1)梁與柱包覆UHPC、(2)牆面施塗UHPC、(2)UHPC斜撐、(3)UHPC耐震間柱。
- 適用於梁、柱、牆、版等不同結構構件、以及整體構架之補強。
- 經濟性、有效性、簡易施工性、快速性、可設計性、以及對既有空間之最小影響性。
- “UHPC耐震補強之分析軟體”
 - 開放軟體，且具使用者圖形使用介面。
 - 自動計算非線性塑鉸，並將其自動匯入使用者所輸入之ETABS模型中，使ETABS之側推分析獲得UHPC補強後之結構容量曲線。
 - 方便執業技師進行UHPC補強工法之設計與分析。