



基於超高性能混凝土的高性能工程結構研究開發

Research and Development of High-Performance Engineering Structures Based on UHPC

Fan Jiansheng 樊健生

Tsinghua University 清華大學

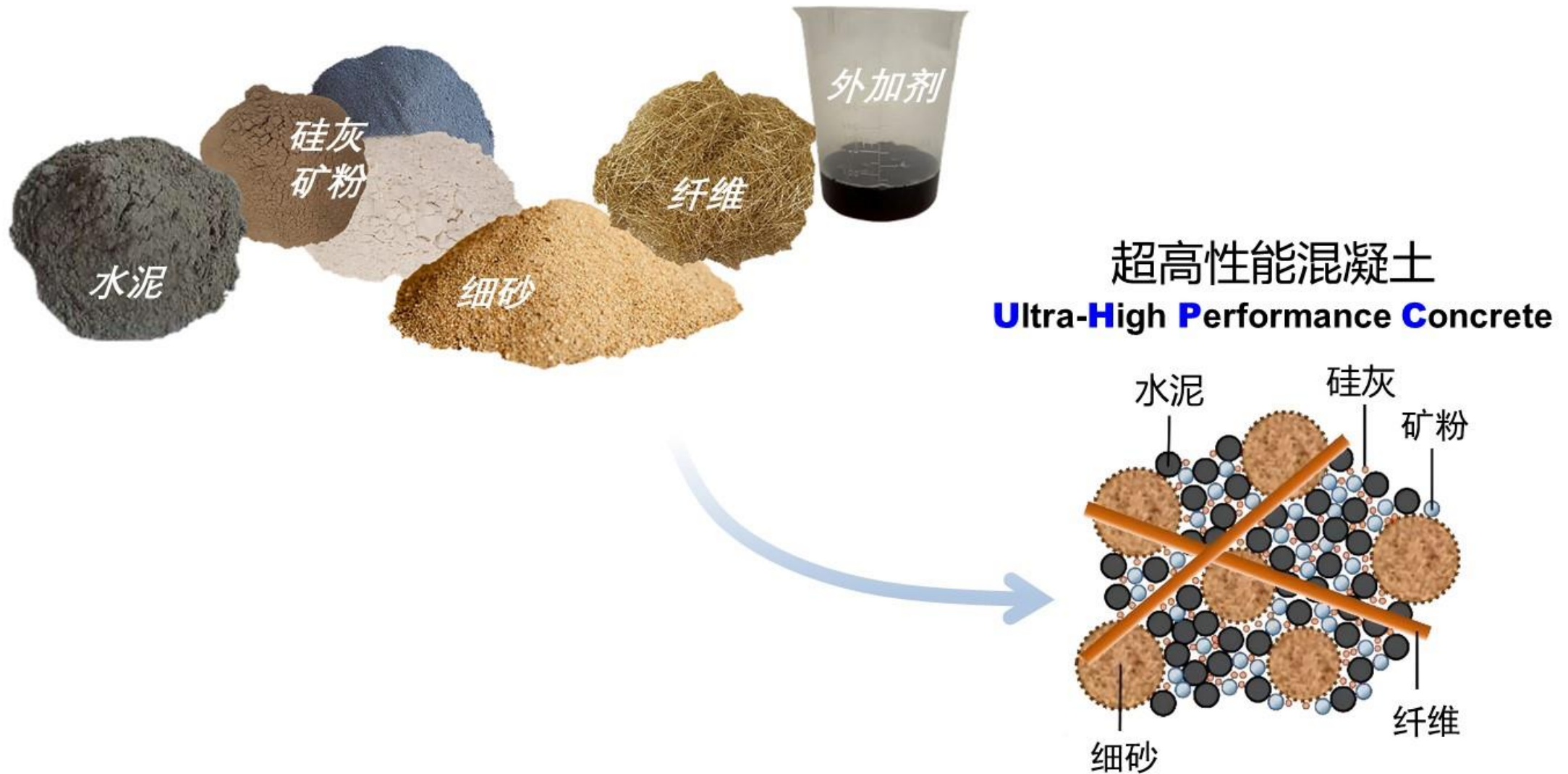
2024/01/19



- 
- 1 關於UHPC結構的幾點認識**
A few points about UHPC structures
 - 2 UHPC在橋樑工程中的應用研究**
R&D of UHPC bridges
 - 3 UHPC在房屋建築中的應用研究**
R&D of UHPC buildings
 - 4 總結**
Summary



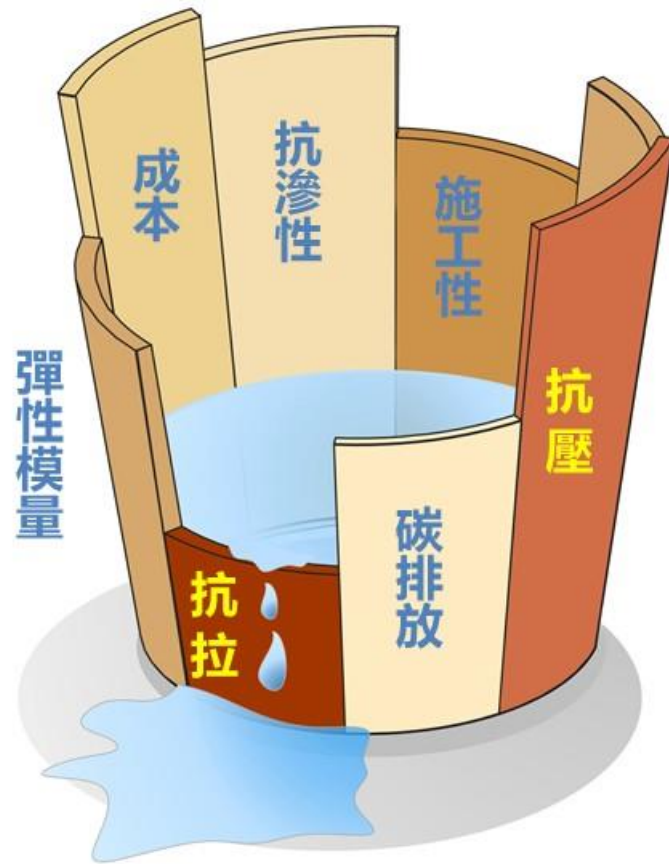
1 UHPC结构概述



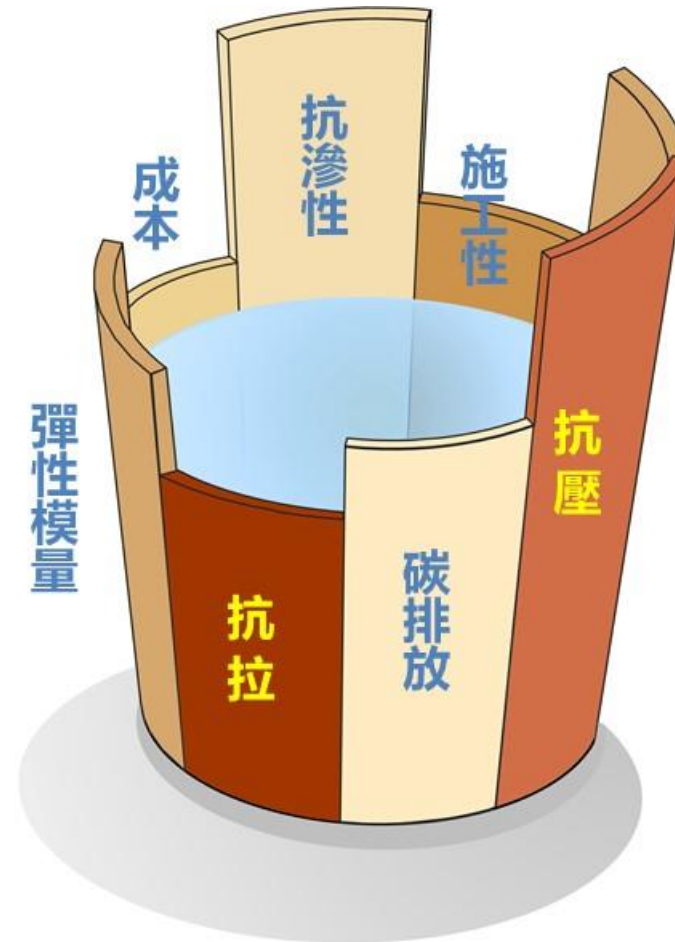
1 UHPC結構概述

性能指標	普通混凝土 NC	超高性能混凝土 UHPC	UHPC / NC
密度 (kg/m ³)	2300	2350~2450	≈1
抗壓強度 (MPa)	20~60	120~200	2~10 ★
直拉強度 (MPa)	1.5~3.0	7~10	3~5 ★
抗折強度 (MPa)	4~6	25~50	5~10 ★
彈性模量 (GPa)	30~35	40~60	1.3~1.6 ★
拉伸應變 (10 ⁻⁶)	100~200	2000~8000	20~40 ★
斷裂韌性 (kJ/m ²)	0.1~0.15	20~40	150~300 ★
氯離子擴散係數 (mm ² /s)	(4~8)×10 ⁻⁶	(0.05~0.1)×10 ⁻⁶	1/100 ★

1 UHPC結構概述



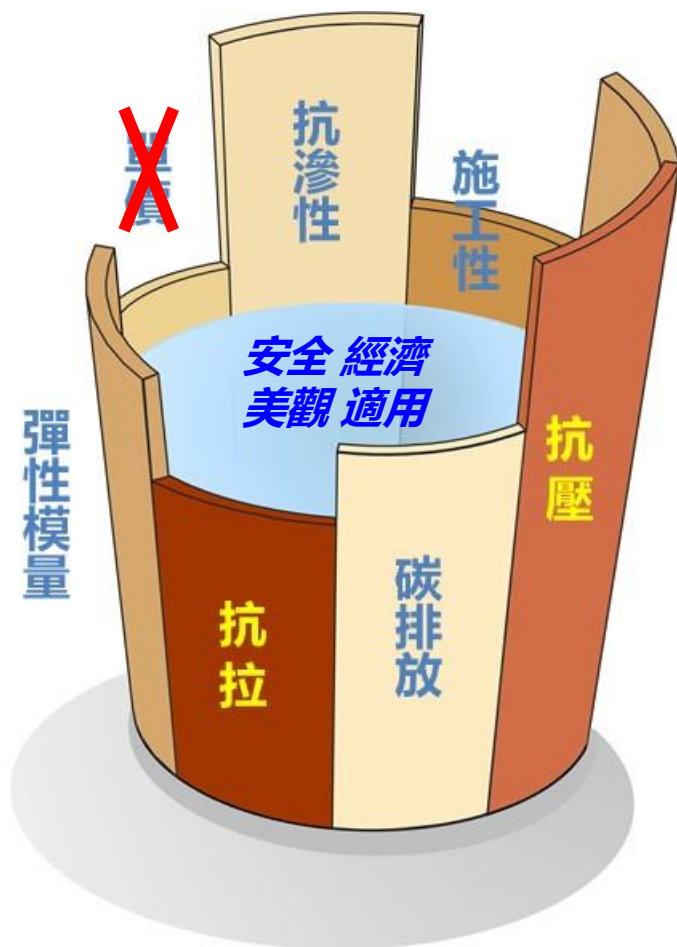
普通混凝土



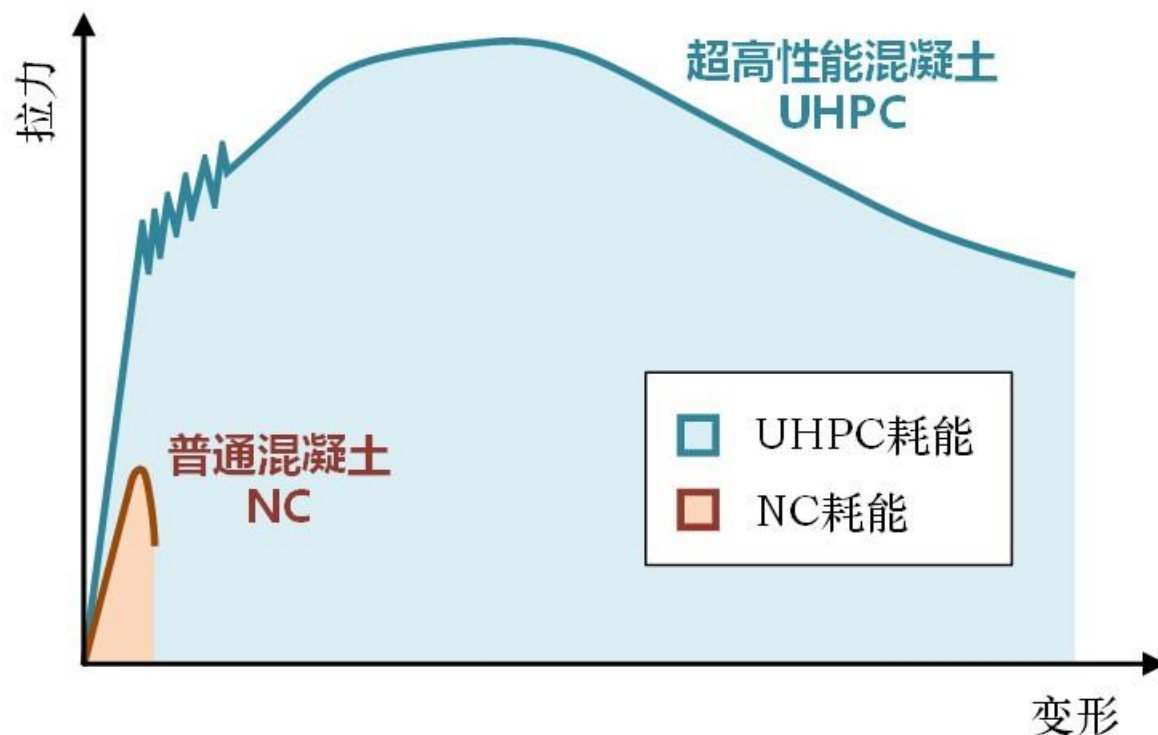
超高性能混凝土

1 UHPC結構概述

- 降低工程全壽命造價、提升綜合效益 是推廣應用UHPC結構的重要目標之一
- 材料成本並不構成UHPC推廣應用的最大障礙



1 UHPC結構概述



- 普通混凝土抗拉強度低、延性差，是多數應用場景中的突出短板
- 利用UHPC抗拉、韌性及低氯離子滲透性，是當前的主要應用方向

1 UHPC結構概述

- **橋樑結構：**預製梁、橋面板、鋼橋面鋪裝、濕接縫 ...
- **基礎設施：**樁及基礎、防護結構、核廢料處置、海洋結構 ...
- **房屋建築：**建築外牆、殼體/穹頂、建築小品、樓梯 ...
- **其他領域：**抗震修復、加固、防腐保護層 ...



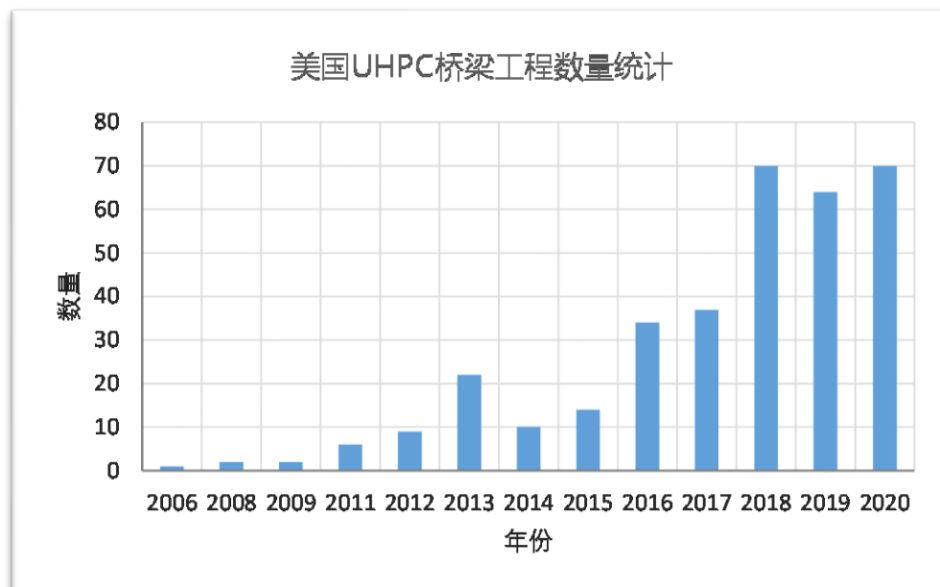
UHPC

超高抗壓、高抗拉及韌性、緻密耐久

1 UHPC結構概述

- 根據CCPA統計，2022年全國UHPC用量超過8.2萬m³（2021年7萬m³），多為預混料，其中橋樑48%、建築約23%、其他29%
（中國混凝土與水泥製品協會UHPC分會不完全統計，趙筠）
- 行業內越來越瞭解、認可UHPC材料和結構，並積極探索、試用、推廣
- 工程及學術層面的交流活動頻繁、活躍
- 規範體系逐步完善 ...

美國採用UHPC的橋樑約 350座



1 關於UHPC結構的幾點認識

A few points about UHPC structures



2 UHPC在橋樑工程中的應用研究

R&D of UHPC bridges

3 UHPC在房屋建築中的應用研究

R&D of UHPC buildings

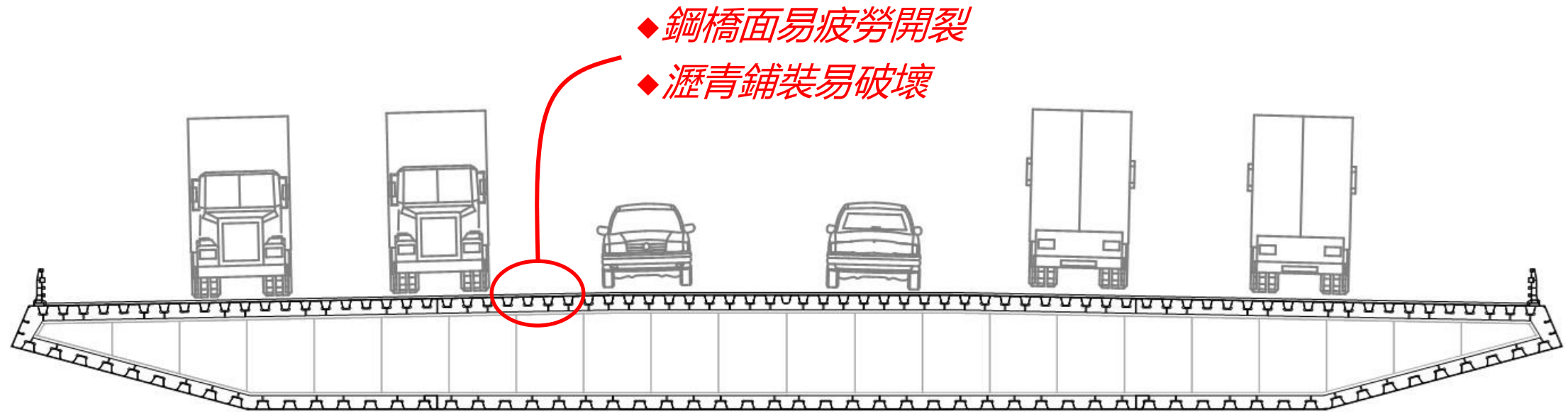
4 總結

Summary



2 UHPC橋樑結構研究應用

- 典型應用：懸索橋UHPC組合橋面加勁梁



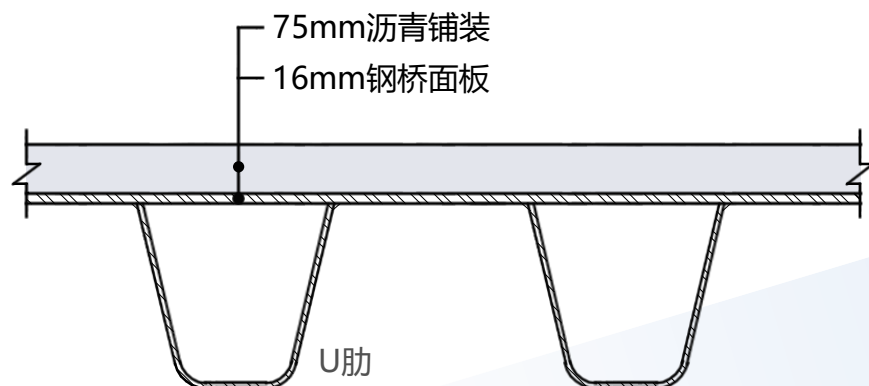
正交異性鋼橋面易發病害

2 UHPC橋樑結構研究應用

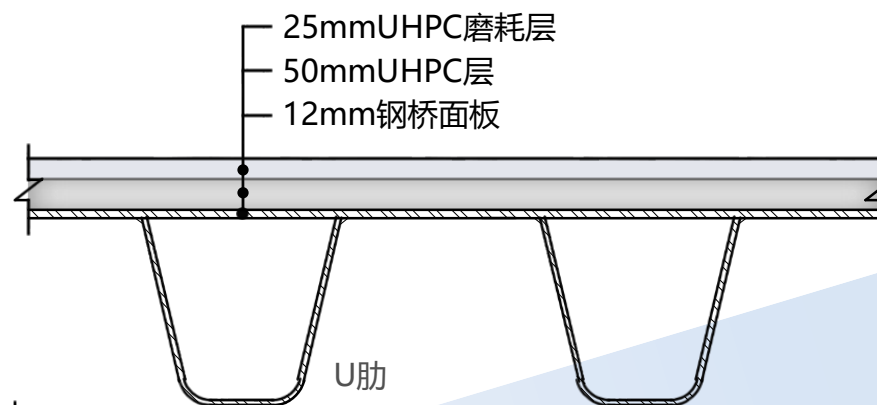
● 典型應用：懸索橋UHPC組合橋面加勁梁

UHPC 高強、高模量

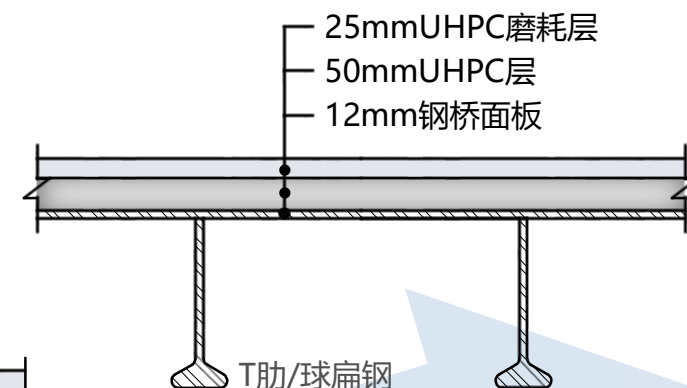
- ✓ 增大頂板剛度
- ✓ 降低應力水準
- ✓ 改善鋪裝層受力



U肋正交異性鋼橋面



UHPC層 + U肋鋼橋面



UHPC層 + 開口肋鋼橋面

2 UHPC橋樑結構研究應用

- 典型應用：懸索橋UHPC組合橋面加勁梁



馬布多·卡騰貝大橋

680m, UHPC組合橋面 (方案未實施)



湖南洞庭湖大橋

1480m, UHPC組合橋面桁梁

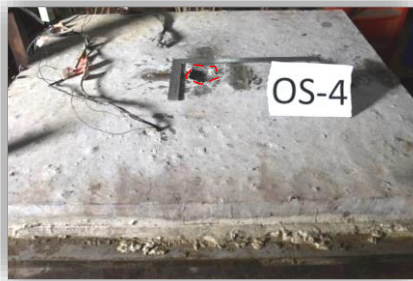


雲南紅河特大橋

700m, UHPC鋼箱組合梁



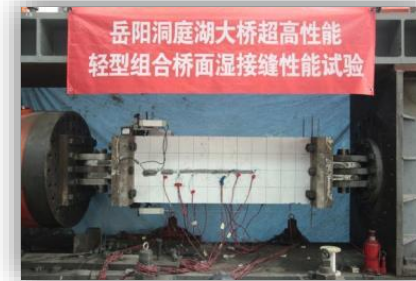
受彎試驗



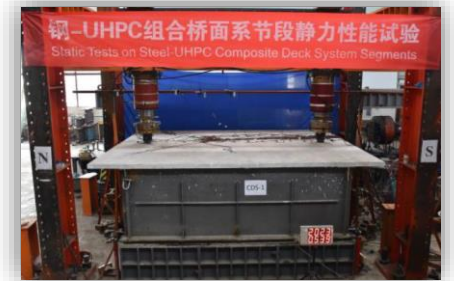
沖切試驗



疲勞試驗



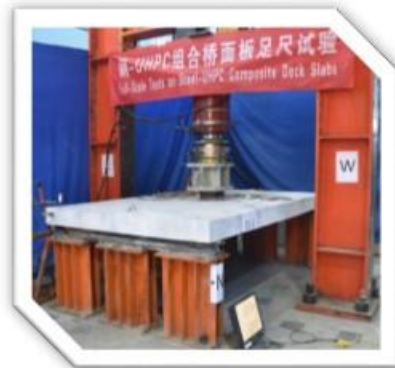
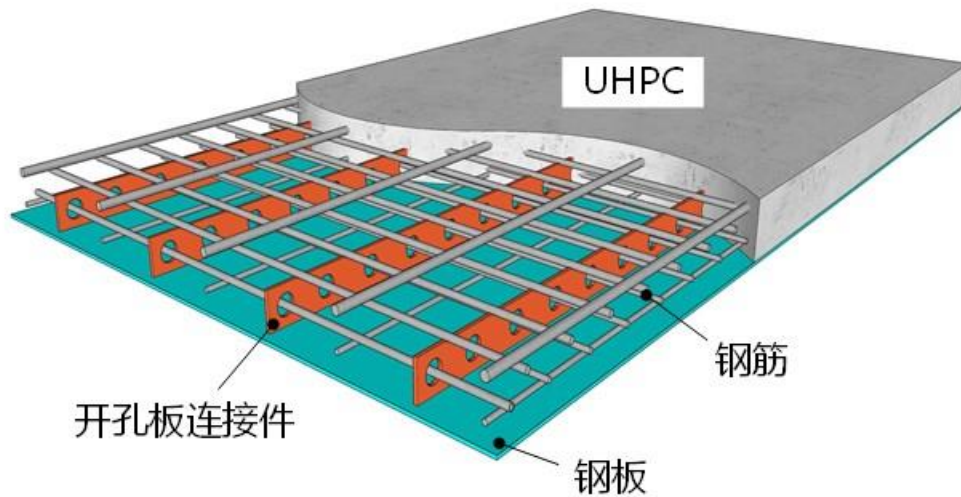
濕接縫試驗



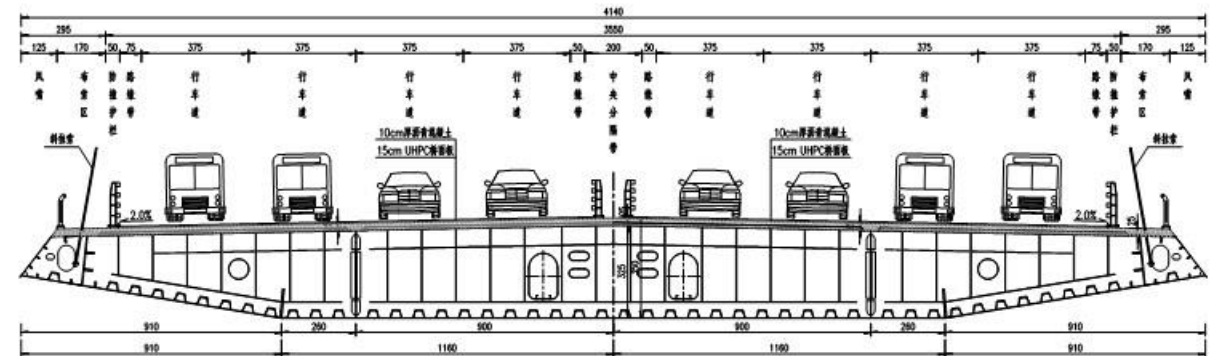
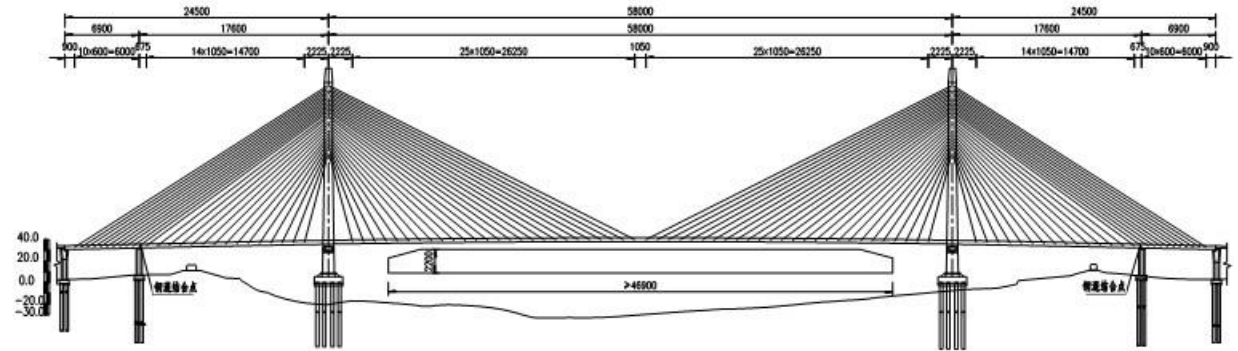
節段整體試驗

2 UHPC橋樑結構研究應用

- 典型應用：斜拉橋 鋼-UHPC輕型組合橋面



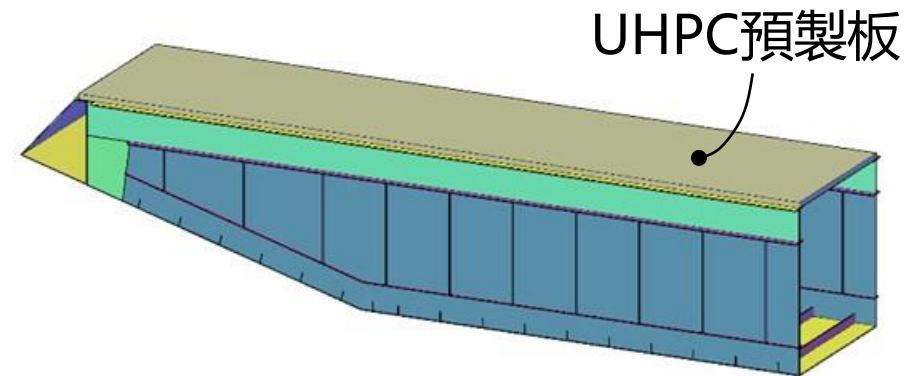
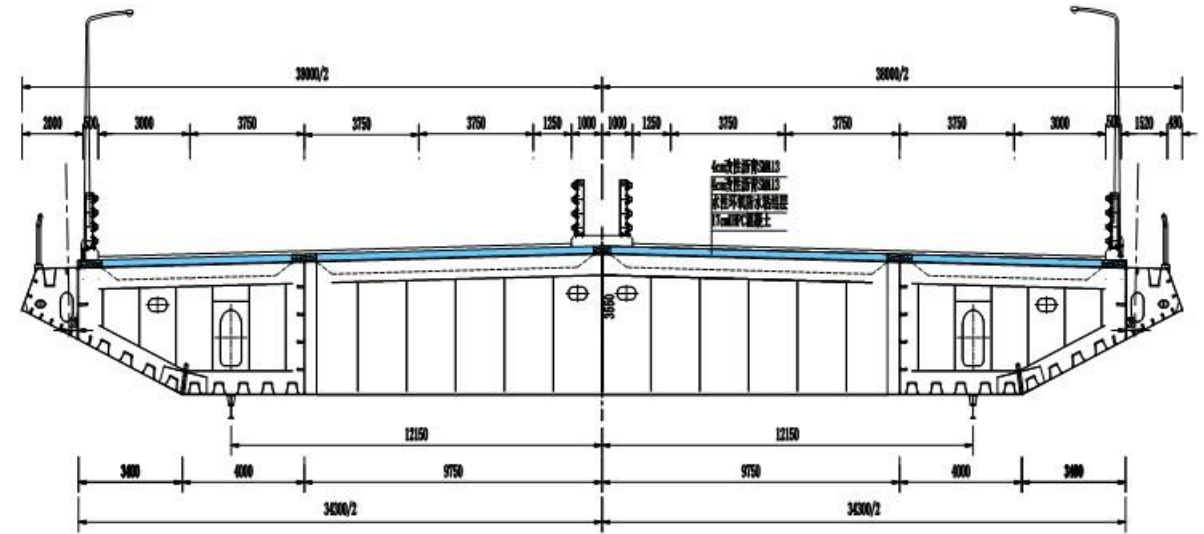
廣東佛山富龍西江特大橋
580m, 鋼-UHPC輕型組合梁



2 UHPC橋樑結構研究應用

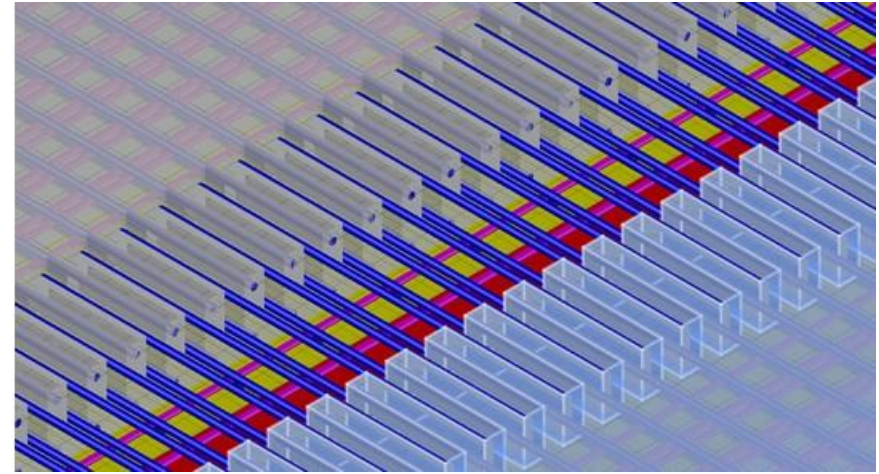
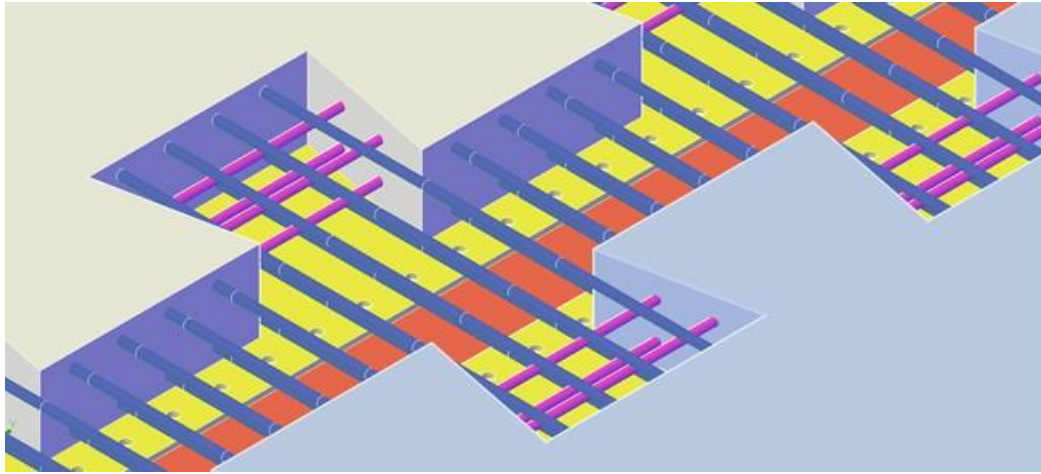
- 典型應用：斜拉橋UHPC橋面板

沾臨公路黃河特大橋
442m, 雙邊箱-UHPC預製板組合梁



2 UHPC橋樑結構研究應用

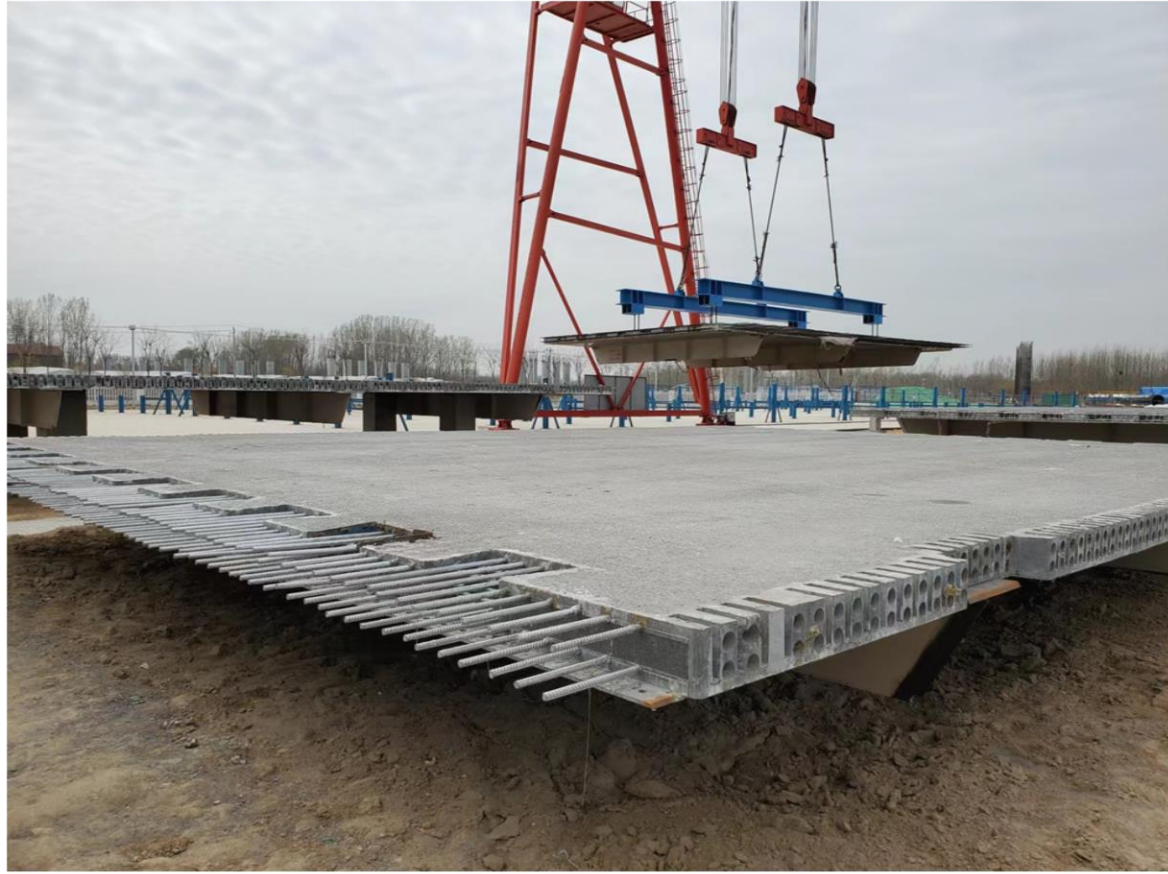
- 典型應用：斜拉橋UHPC橋面板



採用搭接鋼筋構造簡化施工

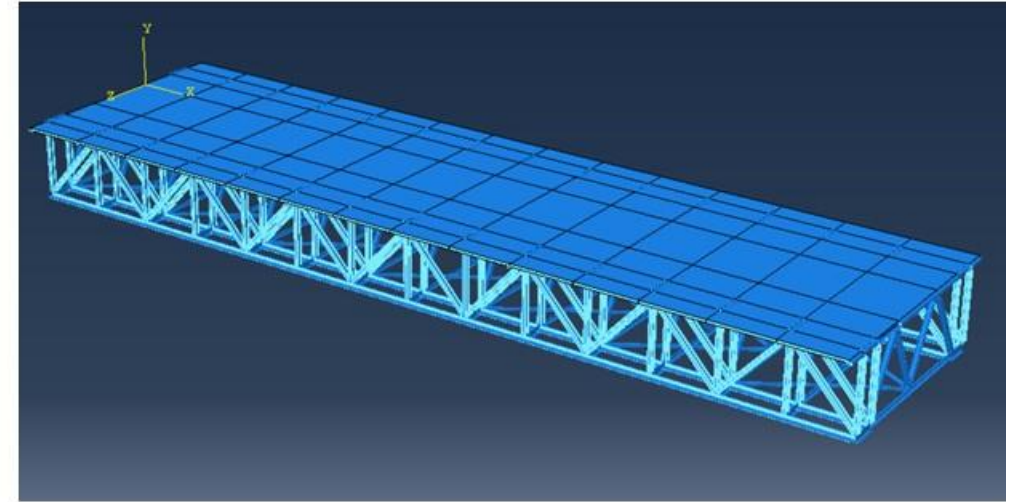
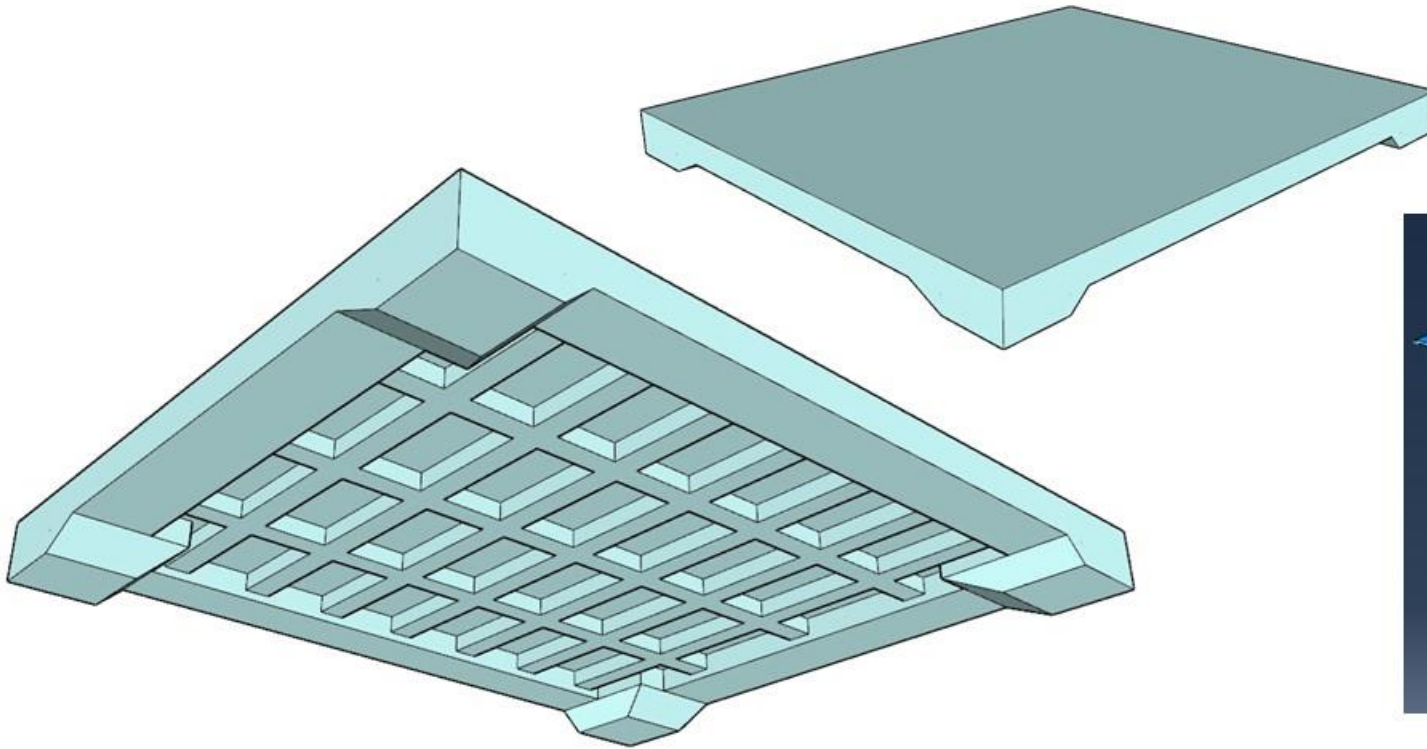
2 UHPC橋樑結構研究應用

- 典型應用：斜拉橋UHPC橋面板



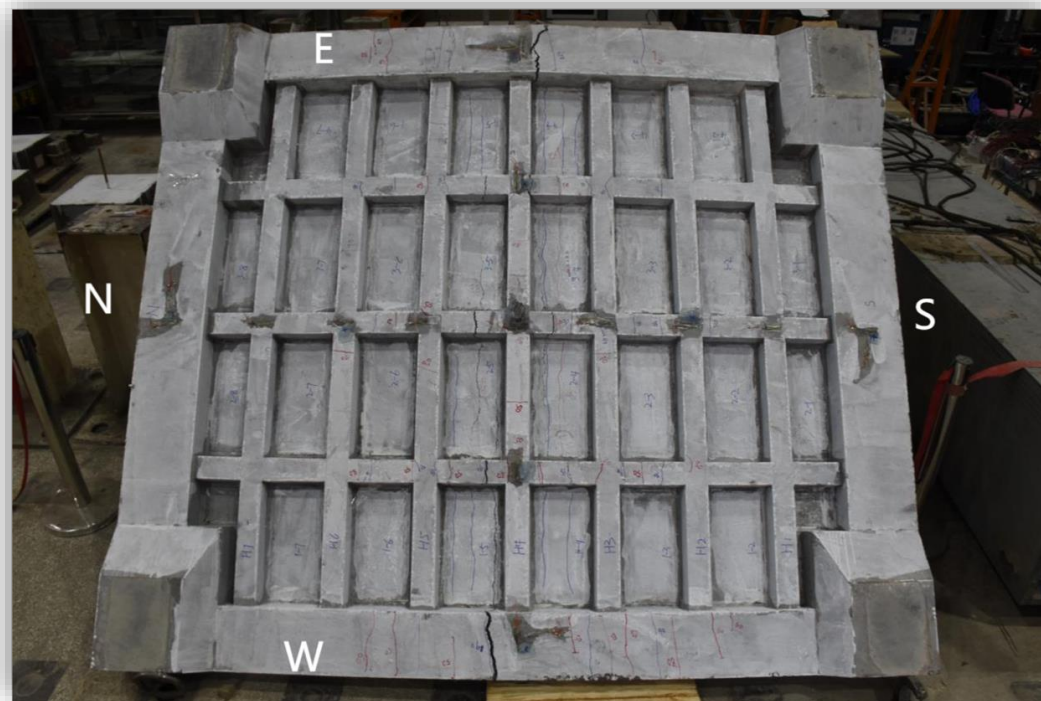
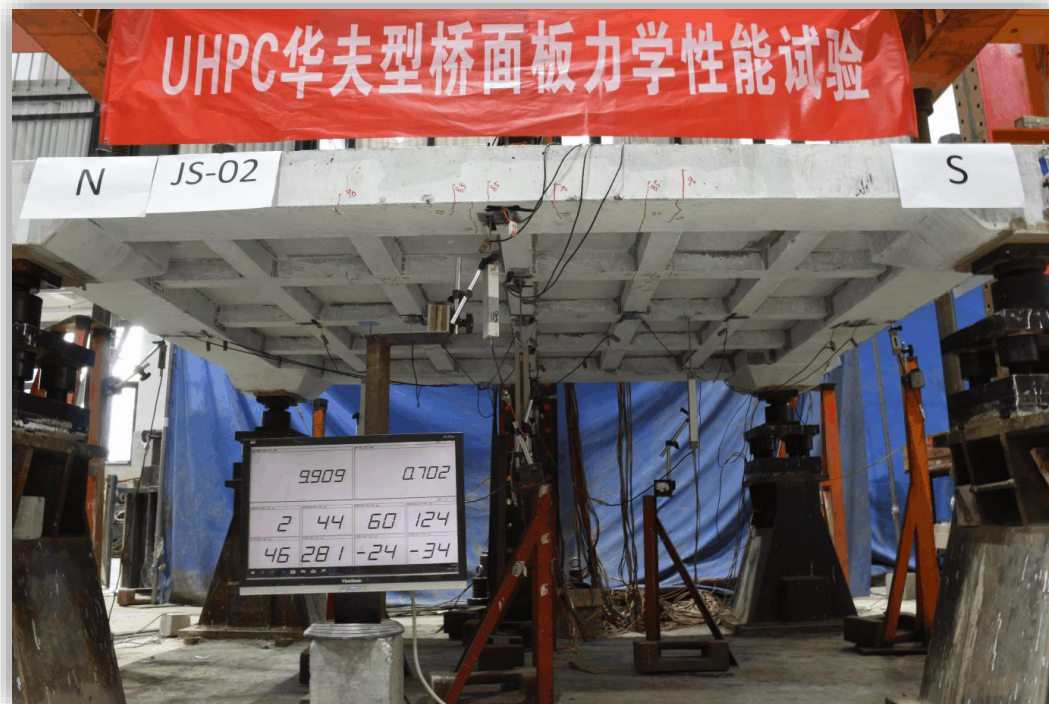
2 UHPC橋樑結構研究應用

- UHPC華夫板：輕型、省材、耐久
- 桑園子黃河大橋引橋：70m跨簡支鋼桁-UHPC輕型組合梁
 - UHPC華夫型橋面板，橫向最大跨度5.8m，四點支撐



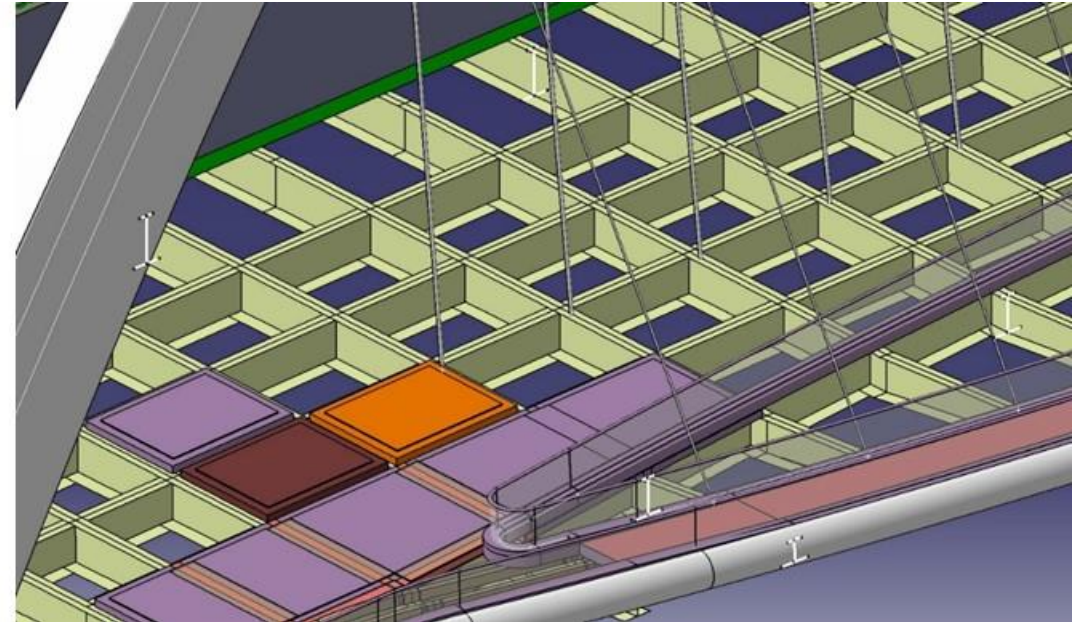
2 UHPC橋樑結構研究應用

- UHPC華夫板：輕型、省材、耐久



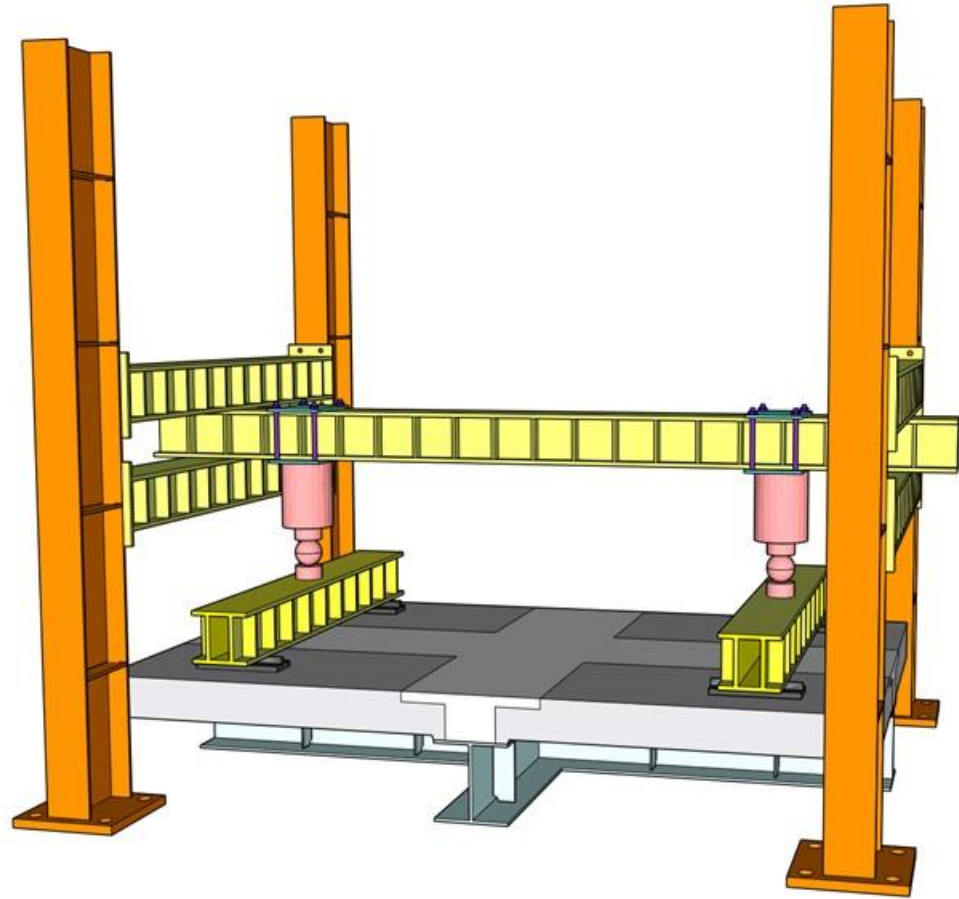
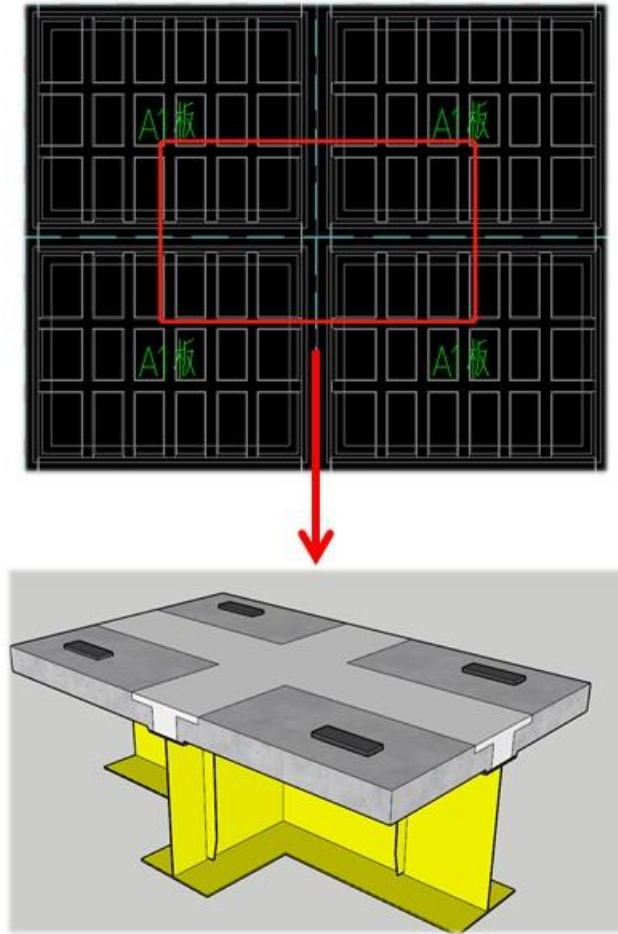
2 UHPC橋樑結構研究應用

- 北京亦莊文昌橋
 - 橋樑跨度142m、寬65.8m
 - 工字鋼梁+UHPC預製華夫板+現澆濕接縫



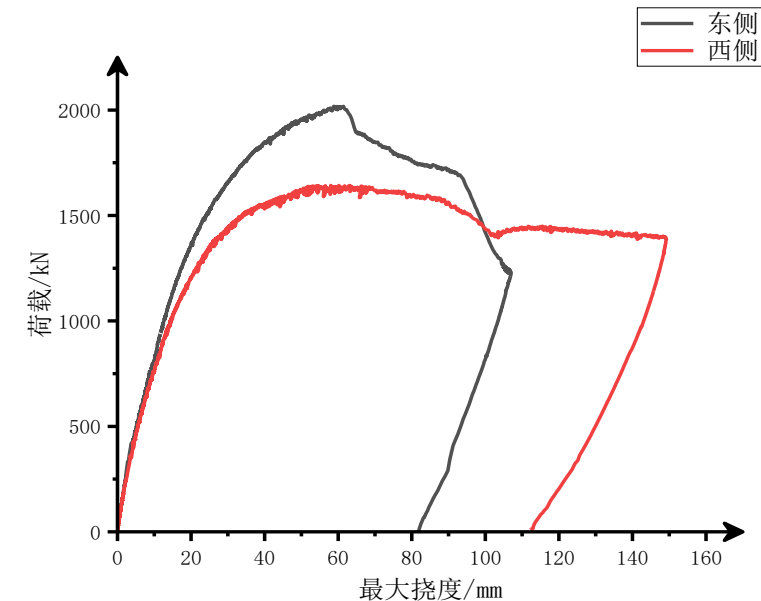
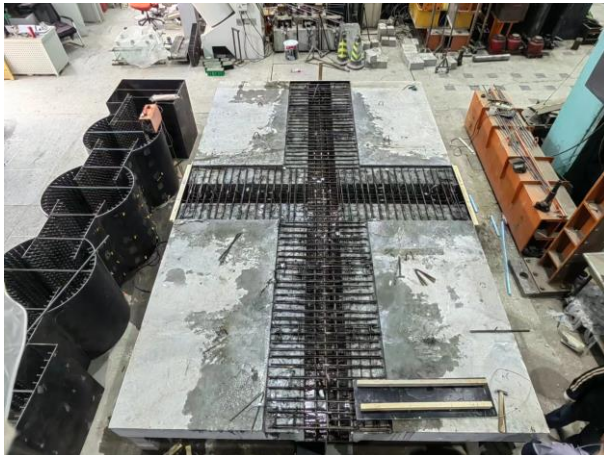
2 UHPC橋樑結構研究應用

- UHPC華夫板橋面雙向濕接縫試驗



2 UHPC橋樑結構研究應用

- UHPC華夫板橋面雙向濕接縫試驗
 - 對應設計荷載下華夫板及濕接縫均未開裂



Contents

1 關於UHPC結構的幾點認識

A few points about UHPC structures

2 UHPC在橋樑工程中的應用研究

R&D of UHPC bridges



3 UHPC在房屋建築中的應用研究

R&D of UHPC buildings

4 總結

Summary



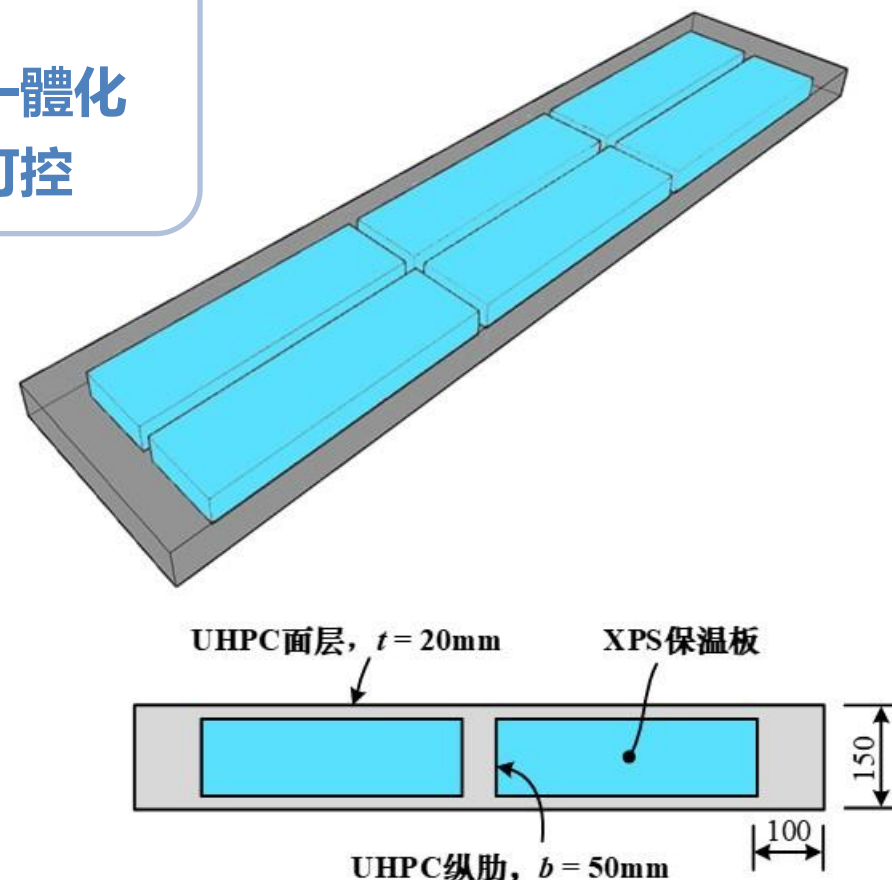
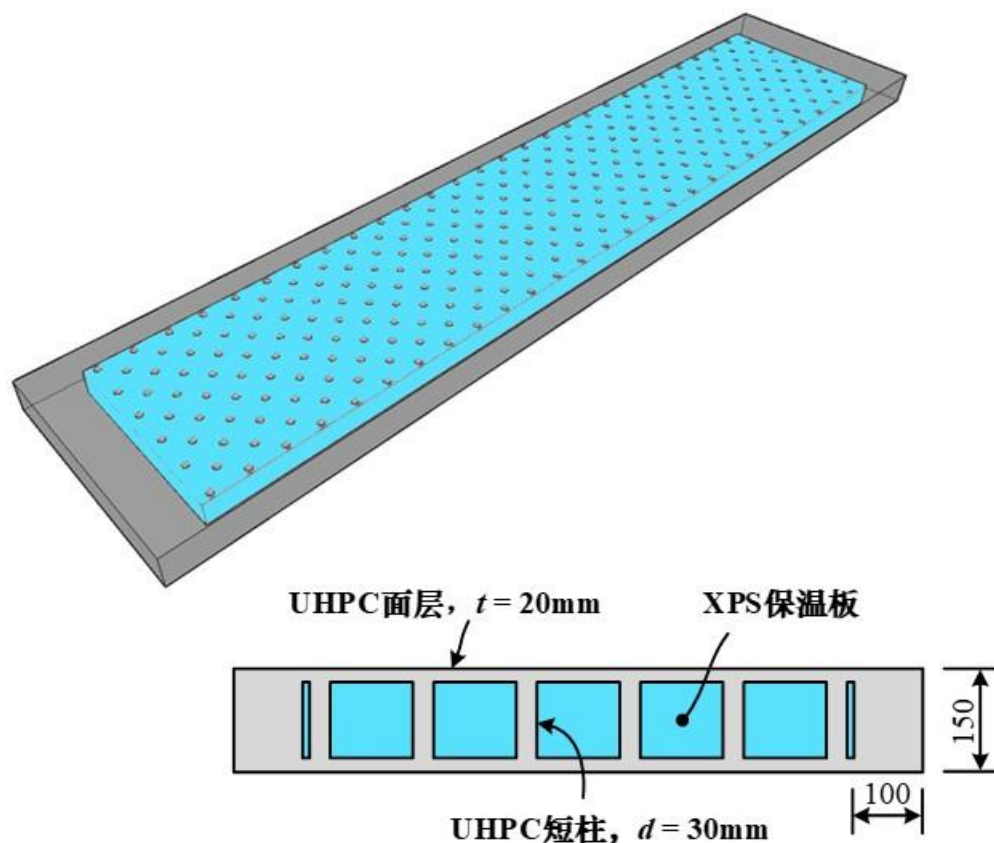
3 UHPC房屋結構研究應用

3.1 屋面板樓板牆板

• UHPC夾芯樓板、牆板

博智林&清華大學聯合研發

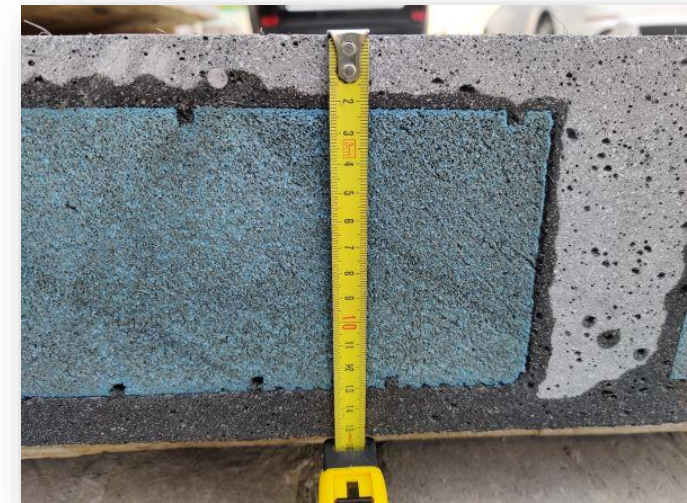
- ✓ 免配筋/少配筋
- ✓ 密度低 (<1.0)
- ✓ 安裝方便
- ✓ 結構功能一體化
- ✓ 綜合成本可控



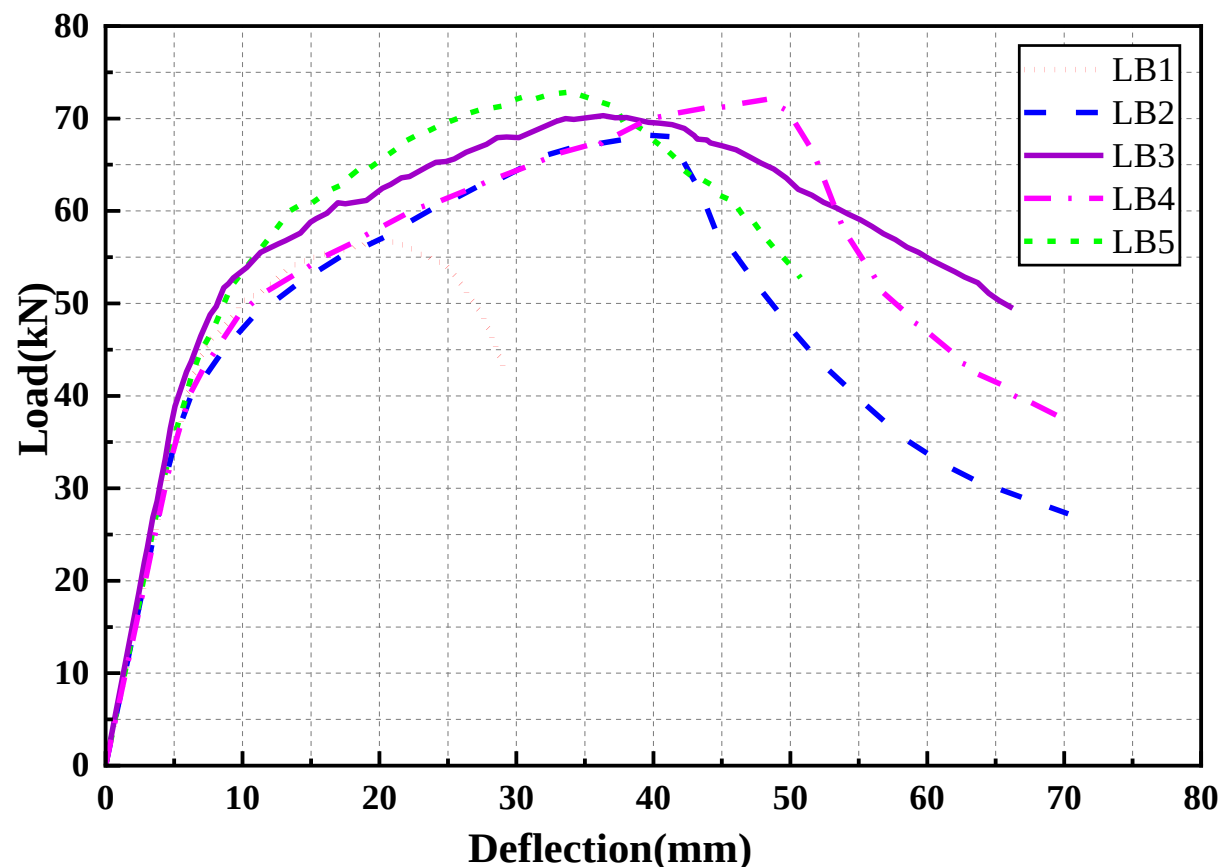
3 UHPC房屋結構研究應用

3.1 屋面板樓板牆板

- UHPC夾芯板構型優化、澆築工藝優化

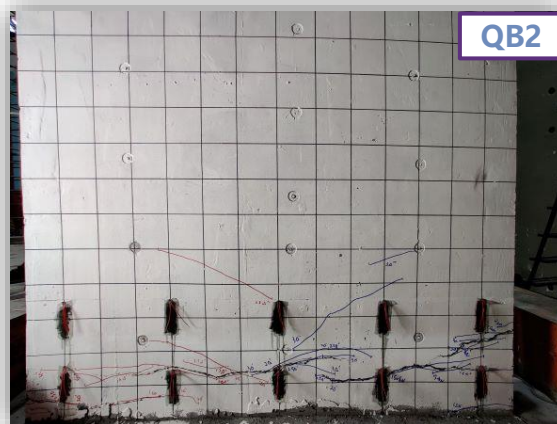
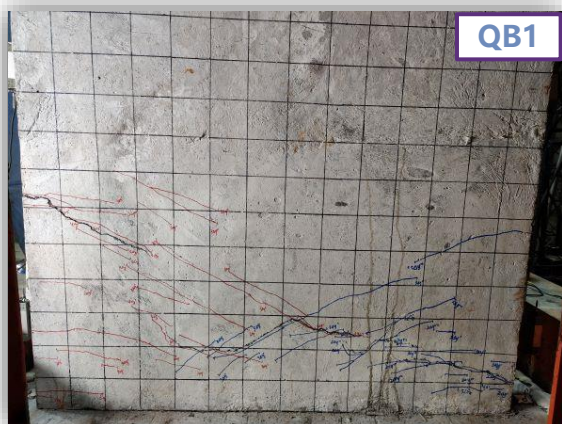


- UHPC夾心樓板：不配筋時承載力 $>1\text{t/m}^2$ 、少量配筋可顯著提高承載力/延性



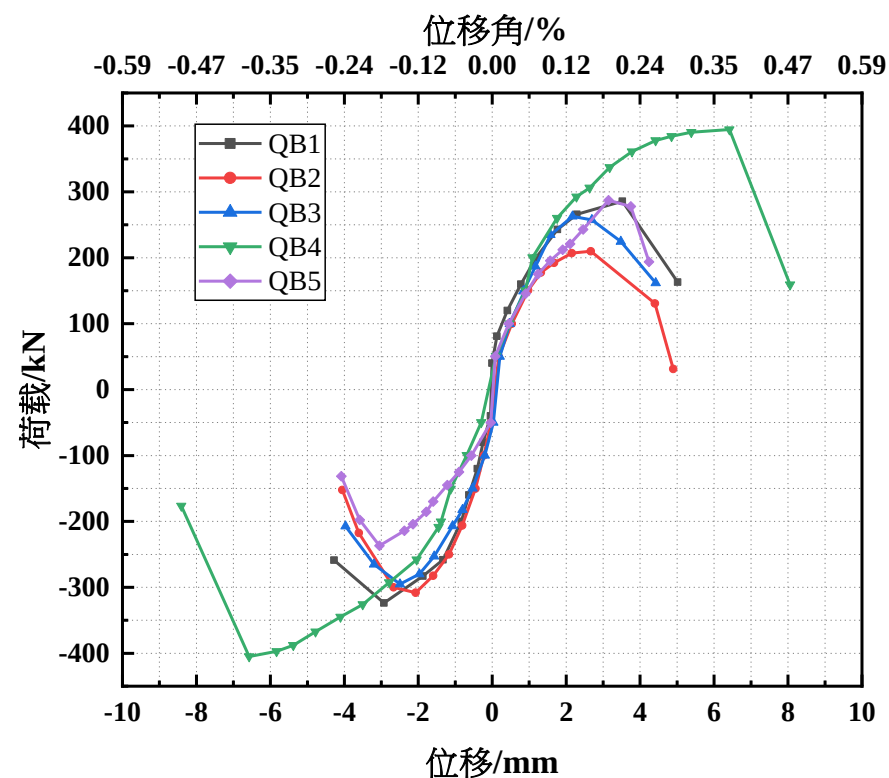
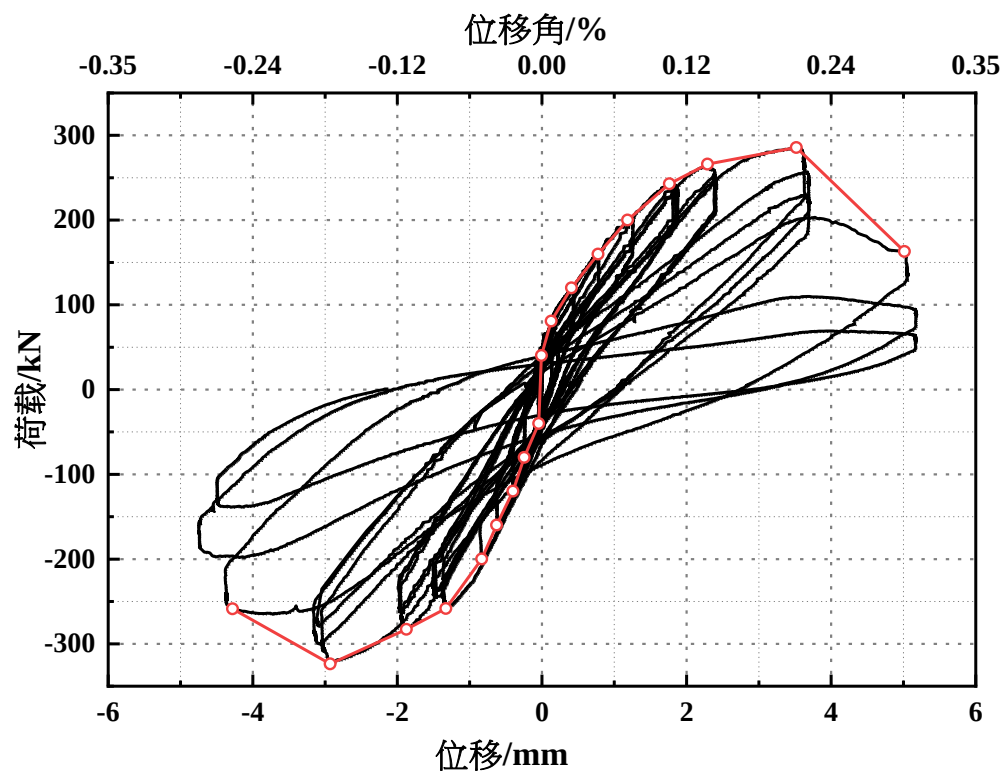
- UHPC夾心牆板

- 不配筋時也具有一定延性
- 剪切不控制承載力 (UHPC抗剪強度高)

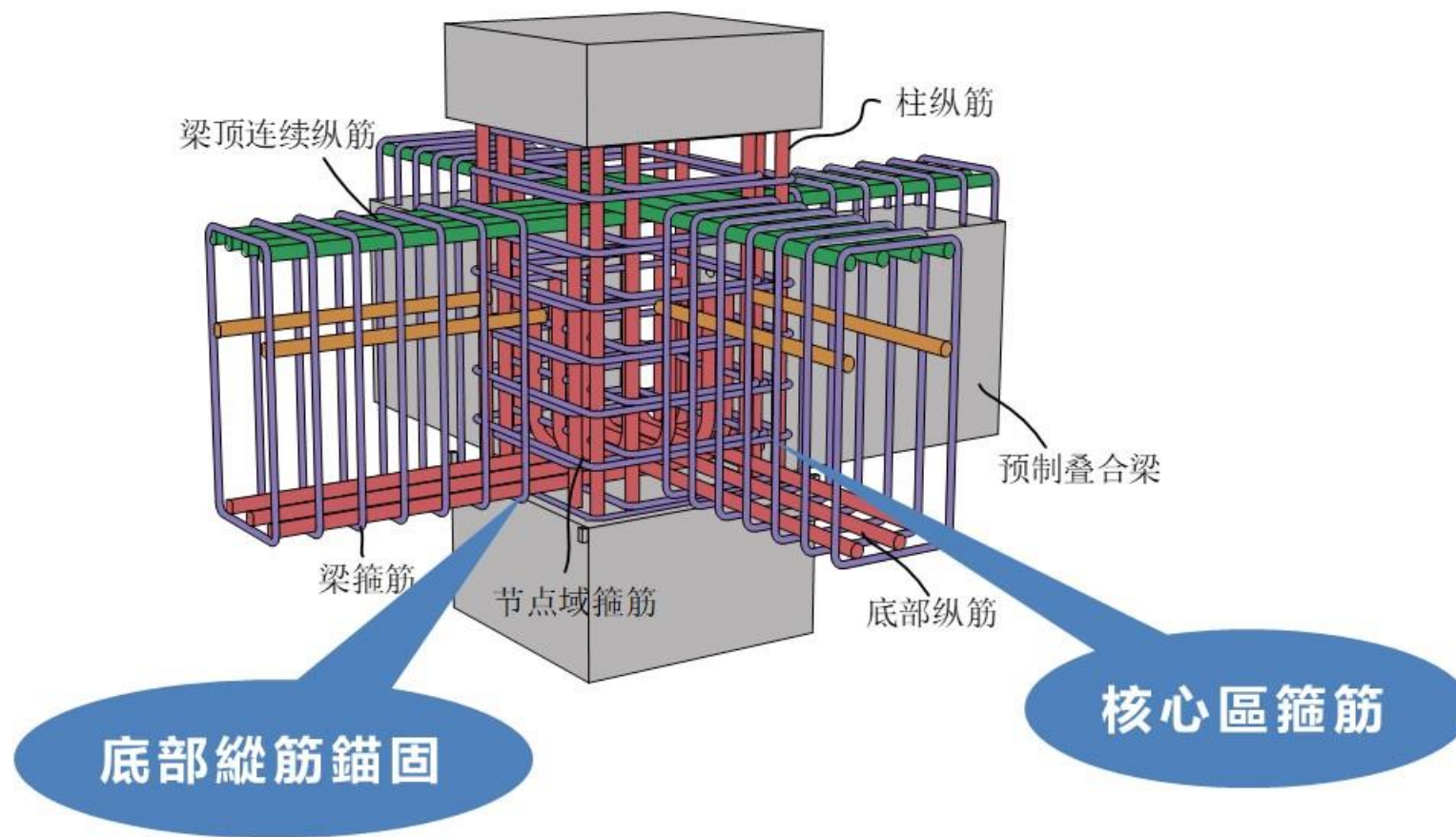


● UHPC夾心牆板

- 不配筋時也具有一定延性
- 剪切不控制承載力 (UHPC抗剪強度高)



裝配式節點的要求：強節點、強錨固

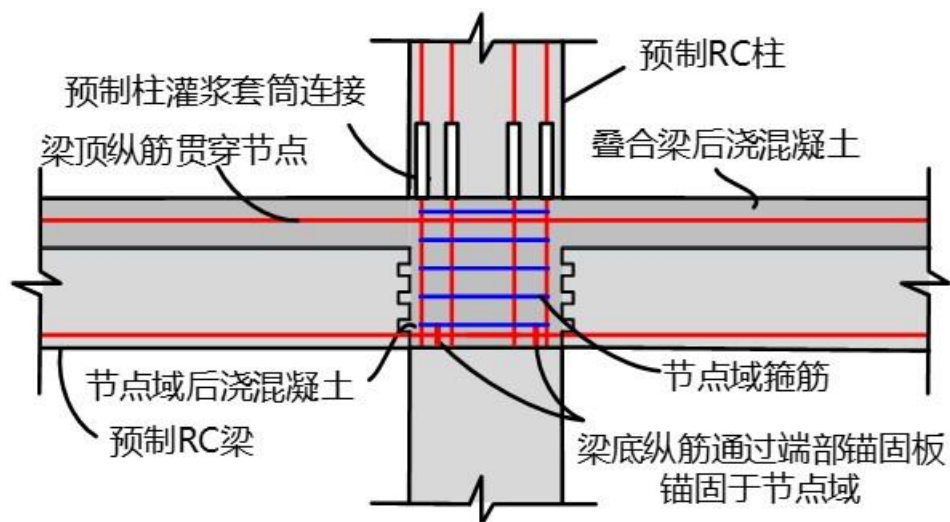


3 UHPC房屋結構研究應用

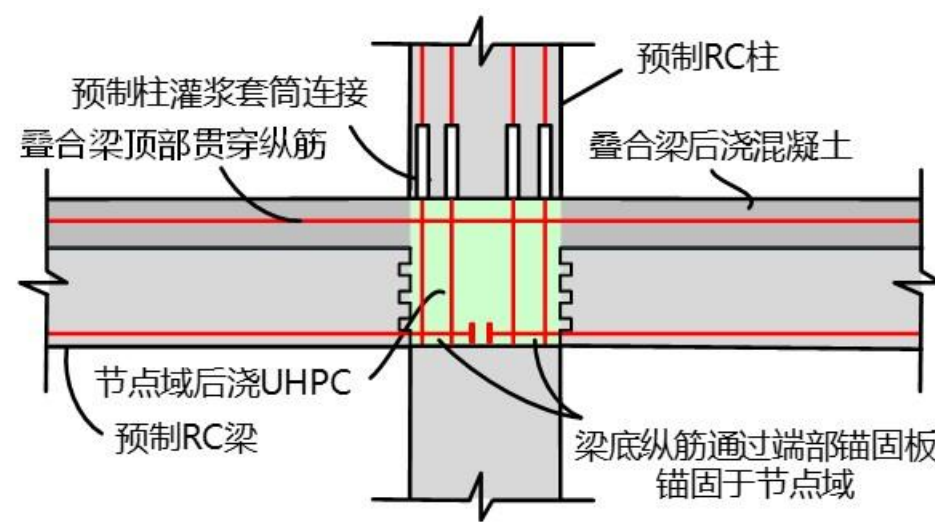
3.2 現澆節點

- UHPC錨固性能好 → 減少縱筋錨固長度
- UHPC抗剪強度高 → 減少/取消節點箍筋

傳統裝配式RC節點



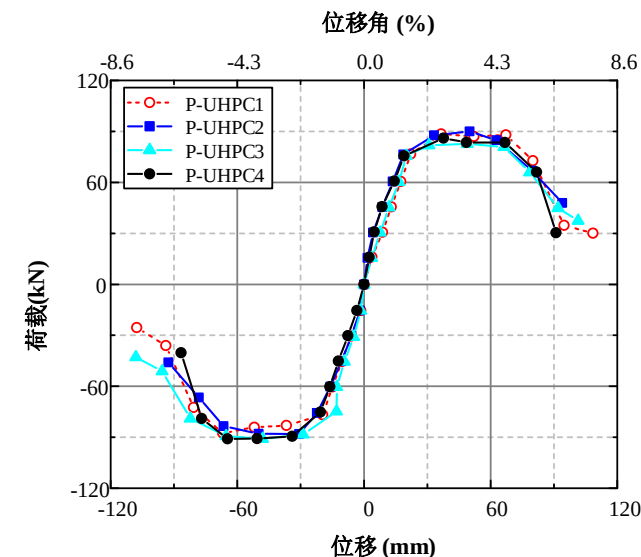
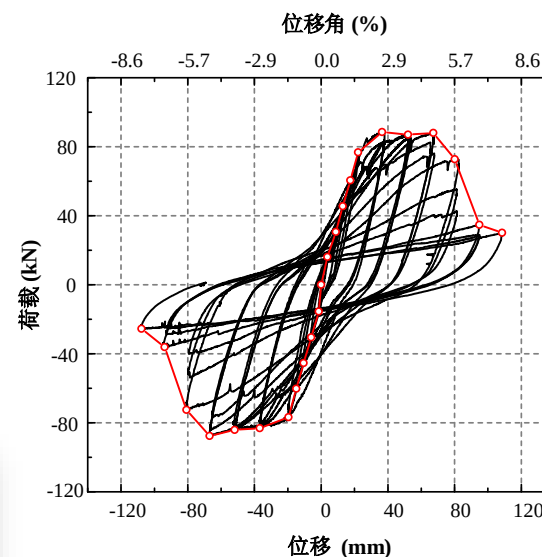
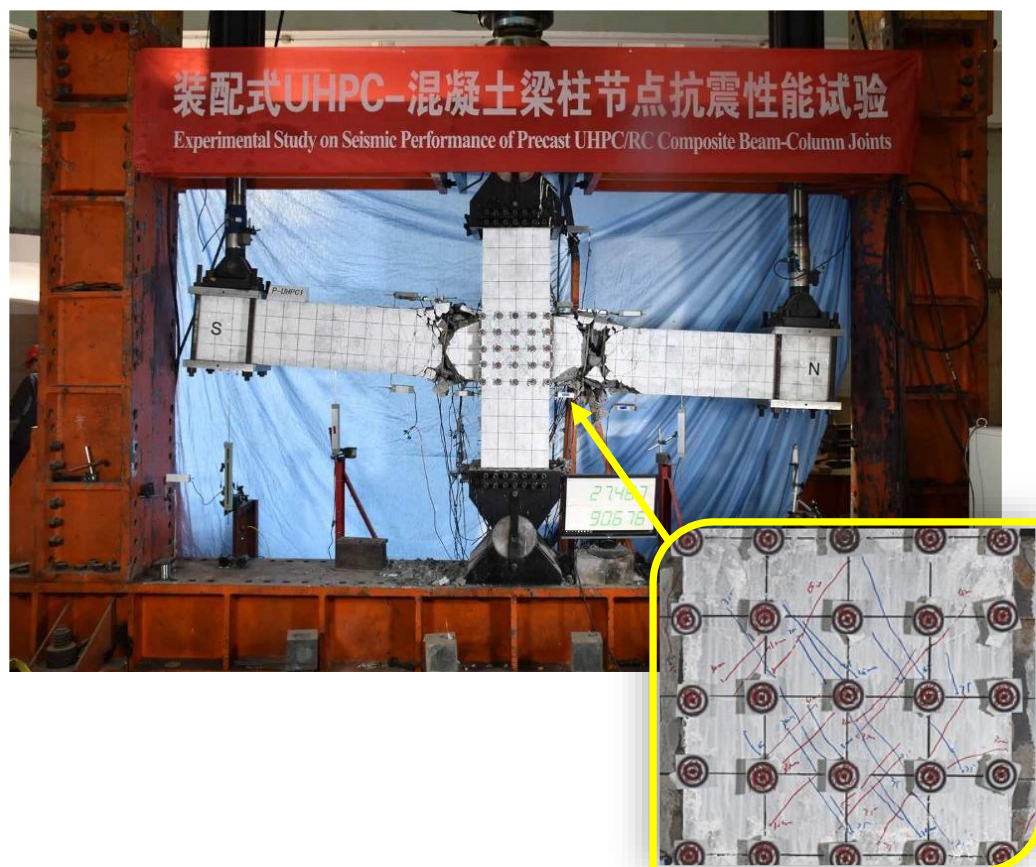
UHPC裝配式節點



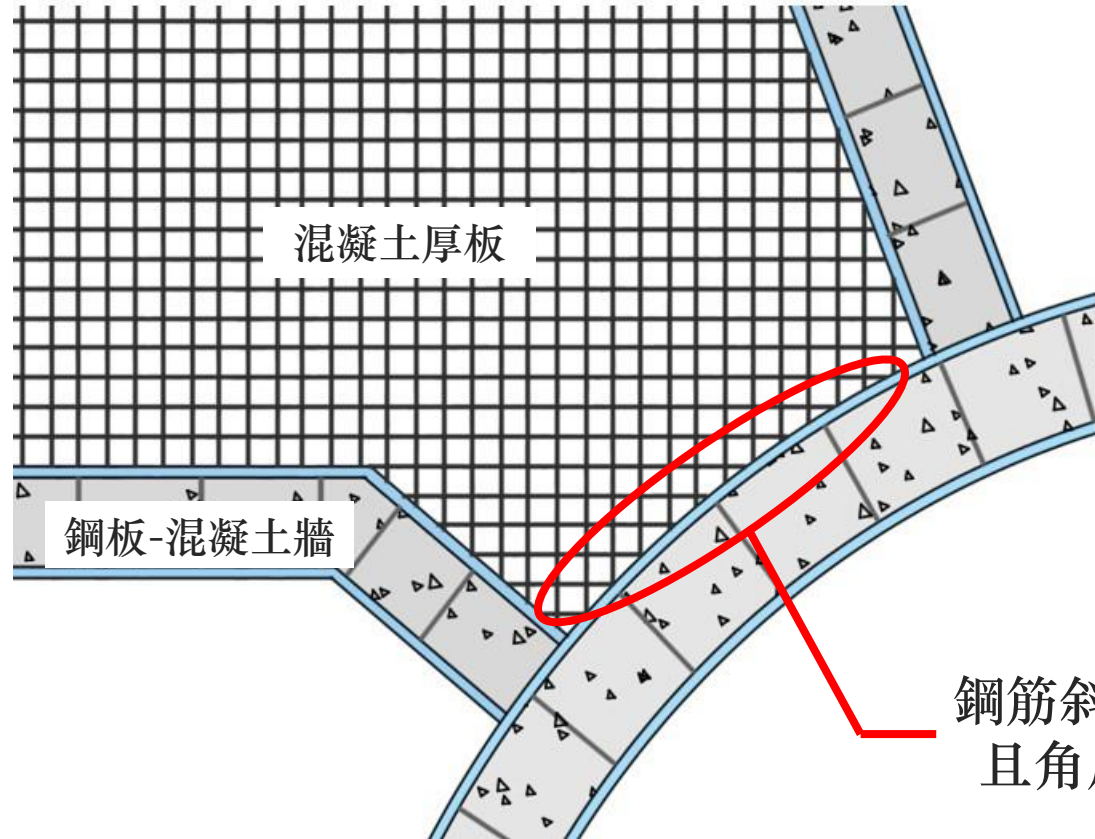
3 UHPC房屋結構研究應用

3.2 現澆節點

- 充分發揮UHPC抗剪強度和延性，可完全省略節點區箍筋
- 梁底縱筋錨固長度可取： $8d$ （螺栓錨頭）、 $15d$ （直鋼筋錨固）



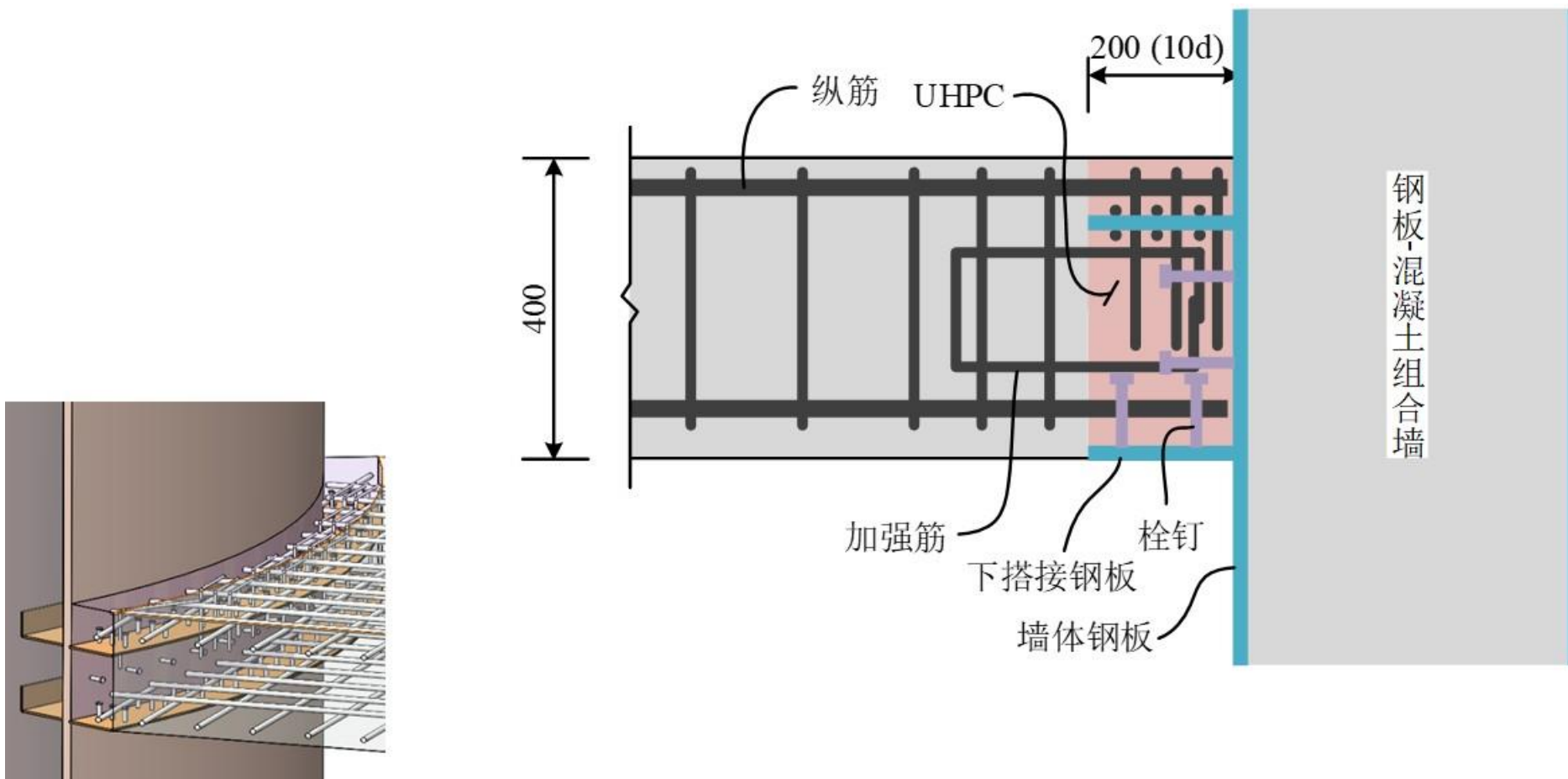
- 斜交板-牆節點的鋼筋錨固難題



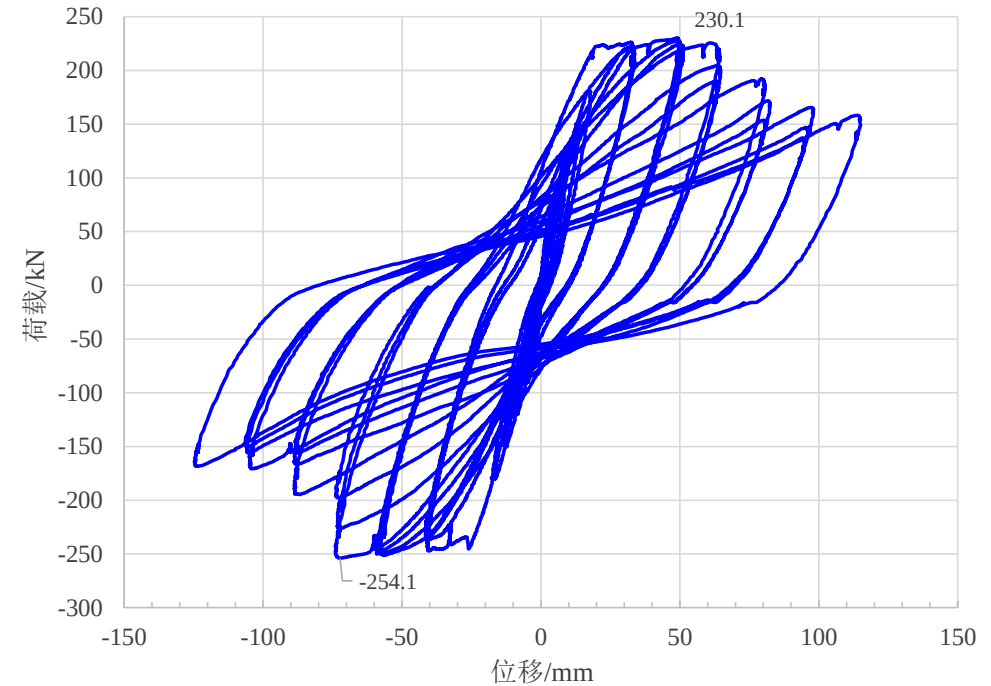
鋼筋斜交於牆體
且角度不一致



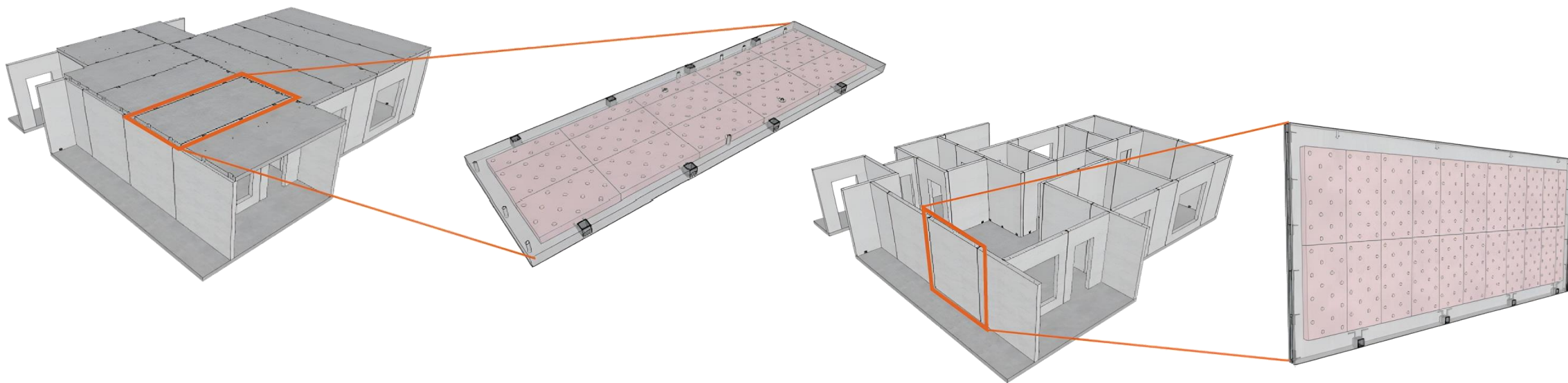
- 斜交板-牆節點的鋼筋錨固難題：利用UHPC實現等強搭接連接



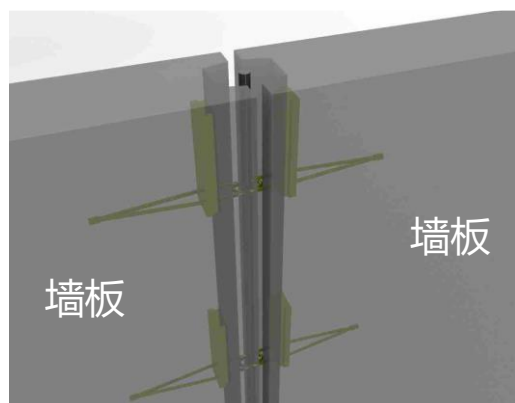
- 斜交板-牆節點的鋼筋錨固難題



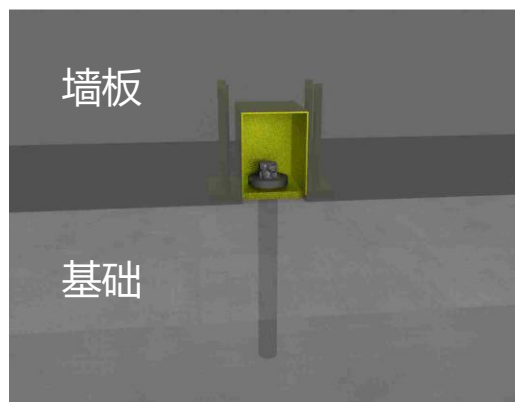
- 一種基於UHPC夾芯板的 **標準化/模組化** 裝配式建築（博智林 & 清華）
 - **輕質高強**：牆板、樓板等採用UHPC+XPS複合材料，強度高、複合密度小
 - **自動生產**：預製構件四面不出筋，UHPC無筋可塑成型便於高度自動化生產
 - **運輸便利**：平面構件運輸效率更高
 - **施工快速**：預製構件連接採用幹法作業，易於控制品質、安裝效率高



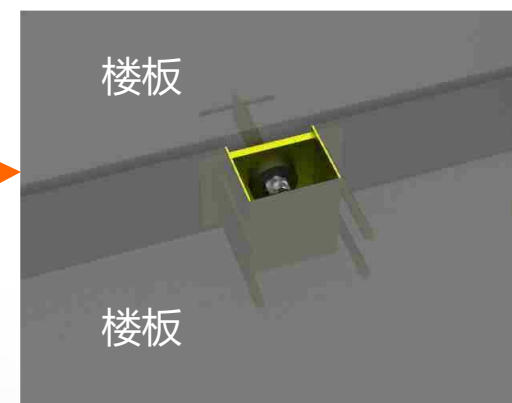
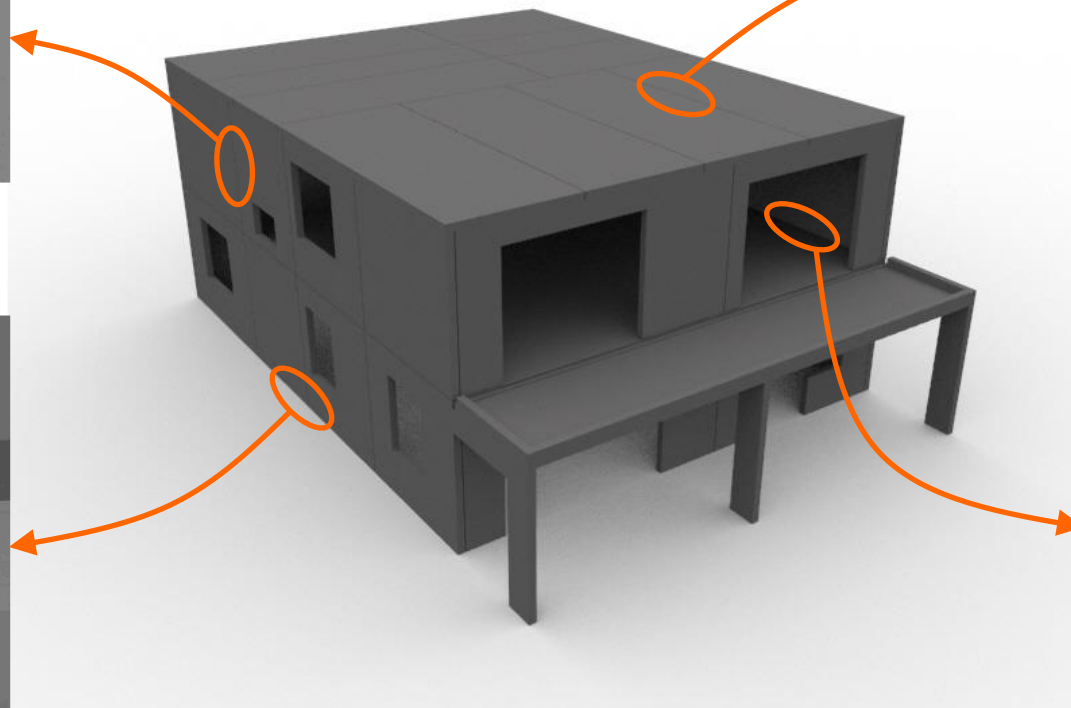
- 一種基於UHPC夾芯板的 標準化/模組化 裝配式建築



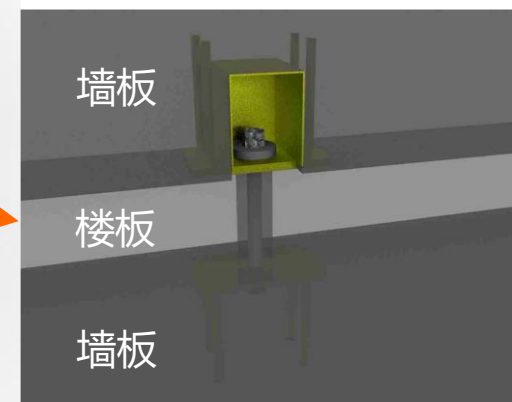
牆板-樓板連接



牆板-基礎連接



樓板-樓板連接



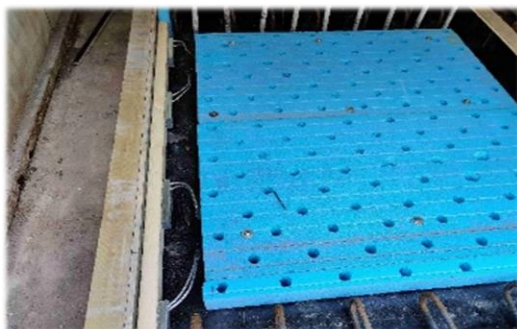
牆板-牆板連接

- **關鍵技術：**牆板-牆板節點、牆板-樓板節點優化構造及其抗震性能
- **試驗結論：**節點受力可靠，均能滿足抗震需求

牆板-牆板節點

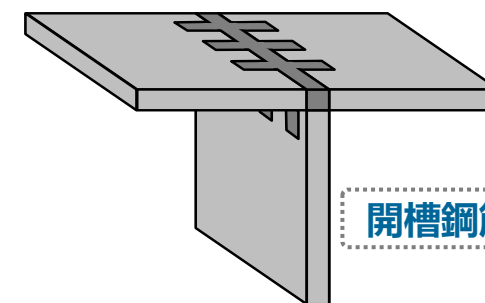
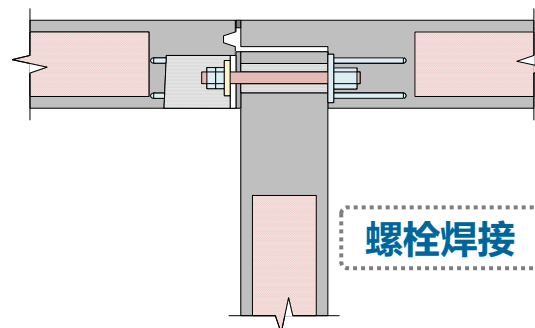


鋼板焊接



軟索連接

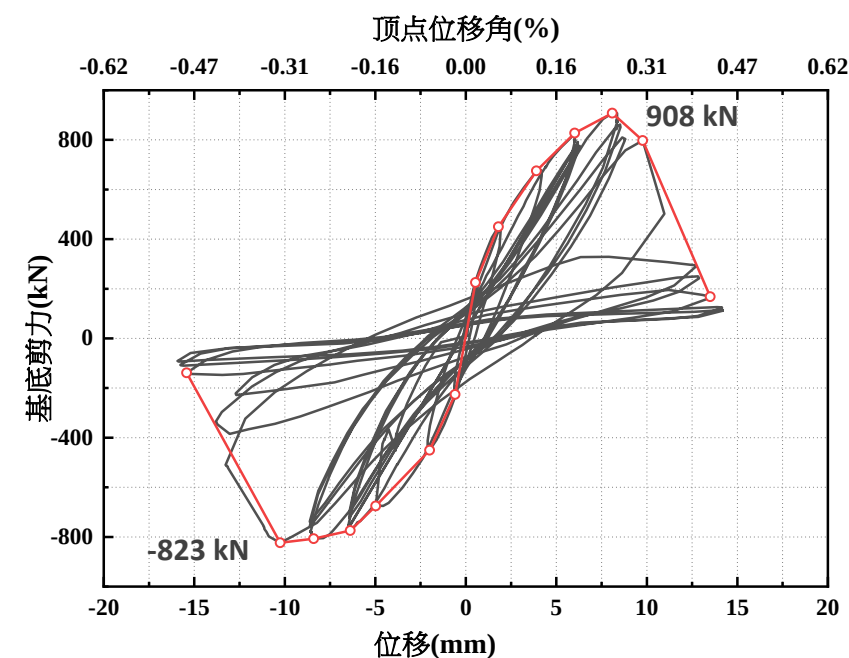
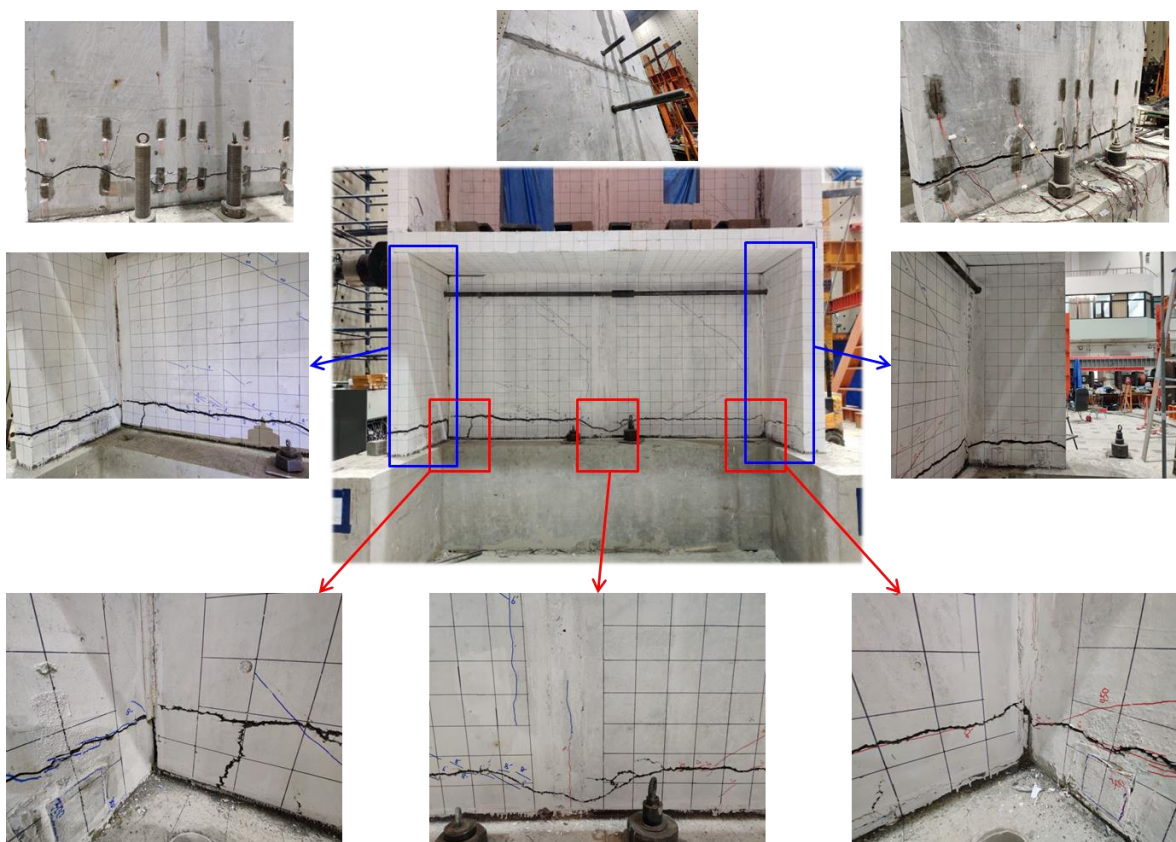
牆板-樓板節點



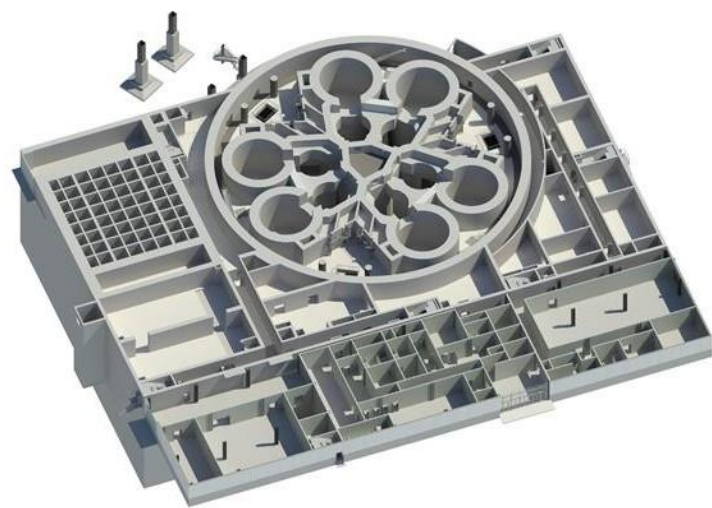
- UHPC夾芯板裝配式二層牆板子結構試驗，揭示子結構整體受力性能



- UHPC夾芯板裝配式二層牆板子結構試驗，揭示子結構整體受力性能
 - 底部受彎破壞；峰值基底剪力約為重力荷載10倍；結構抗震安全儲備高，可大震不裂



- 以高溫氣冷堆(HTR)為代表的第4代核電站，對防護結構的安全性、經濟性、施工便捷性、工程品質提出新要求

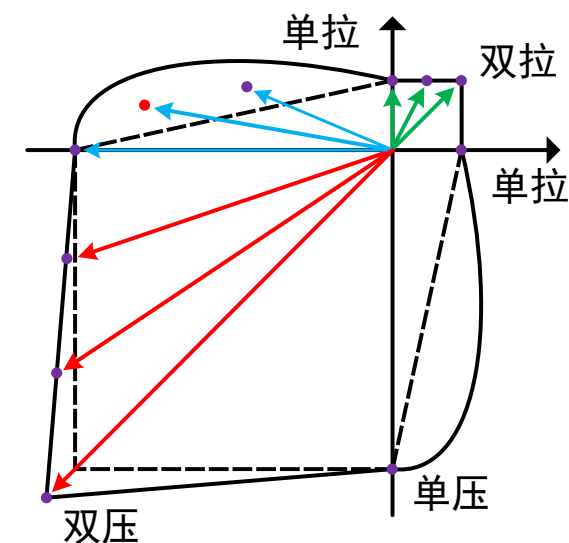
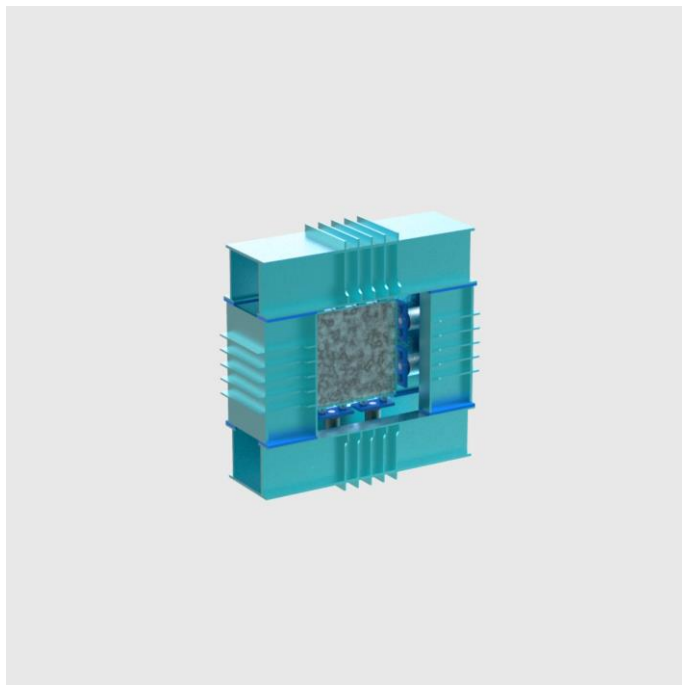


结构形式	实现主要安全功能的措施
预应力混凝土结构	增加墙厚和配筋实现承载力和密封要求
钢筋混凝土+钢衬结构	增加墙厚和配筋实现承载力要求，钢衬里实现密封要求
单钢板+UHPC结构	钢板与UHPC共同实现极限承载力和密封要求



● 試驗載入方案

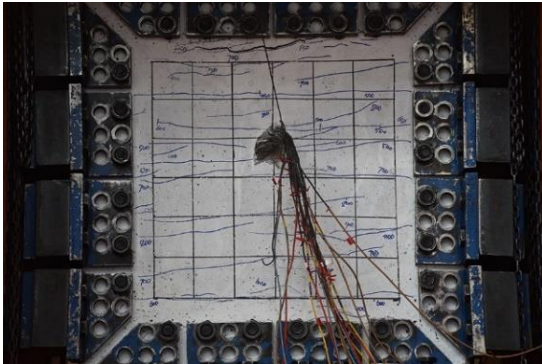
- 採用平面雙向多功能載入試驗裝置載入
- 載入模式包括：單向單調受拉、雙向單調受拉、迴圈剪切



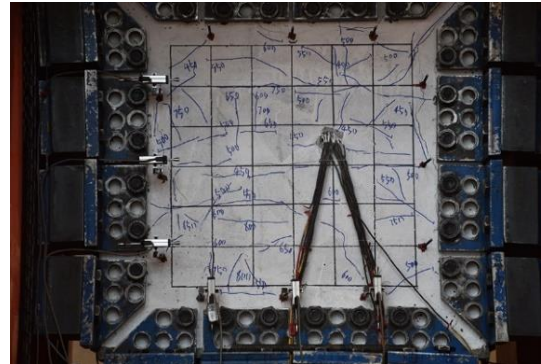
平面应力空间加载

- 試驗現象

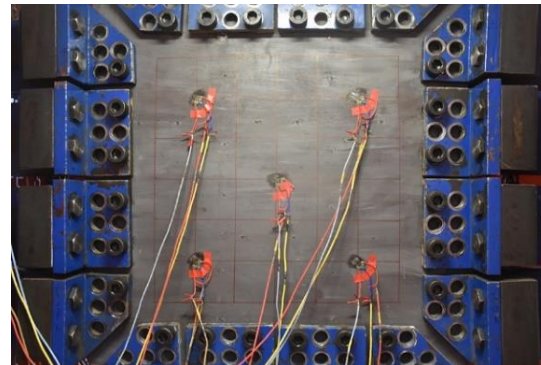
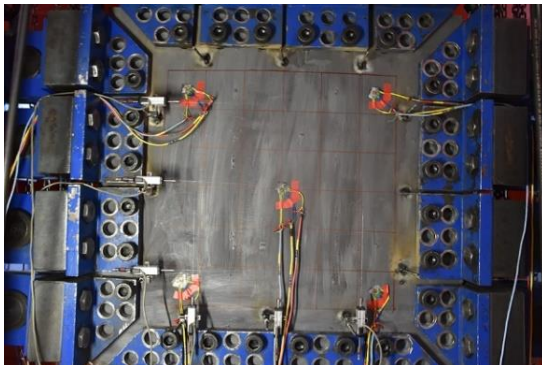
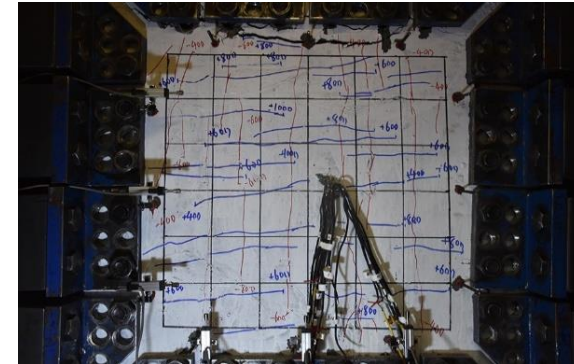
單向受拉



雙向受拉



迴圈剪切



- 受拉承載力
 - 承載力介於考慮UHPC和不考慮UHPC之間
 - 可按下式計算單元抗拉承載力，並作為主內力設計控制值

$$T_u = A_{p1} f_{p1} + A_e f_e + 0.7 A_{uhpc} f_t$$

构件编号	HSU-T-Base	HSU-T-S4.0	HSU-T-B0.2	HSU-TT-Base		HSU-TT-S4.0		HSU-TT-B0.2	
等效厚度 t_e /mm	0.198	0.198	0.099	0.198	0.198	0.198	0.198	0.099	0.099
单侧钢板抗拉贡献/kN	569.8	756.0	569.8	569.8	569.8	756.0	756.0	569.8	569.8
等效钢板抗拉贡献/kN	50.1	50.1	25.1	50.1	50.1	50.1	50.1	25.1	25.1
UHPC抗拉贡献/kN	775.2	759.4	775.2	775.2	775.2	759.4	759.4	775.2	775.2
抗拉承载力 (考虑UHPC)/kN	1395.1	1565.5	1370.0	1395.1	1395.1	1565.5	1565.5	1370.0	1370.0
抗拉承载力 (不考虑UHPC)/kN	619.9	806.1	594.9	619.9	619.9	806.1	806.1	594.9	594.9
试验承载力/kN	1189	1305	1111	1112	1119	1363	1365	998	1018
公式计算结果	1163	1338	1138	1119		1295		1094	
公式计算误差/%	-2.22	2.50	2.38	0.66	0.03	-4.96	-5.10	9.65	7.49

- 受剪承載力
 - 根據不同載入路徑下的單元試驗，提出了相對保守的拉剪和壓剪承載力計算公式

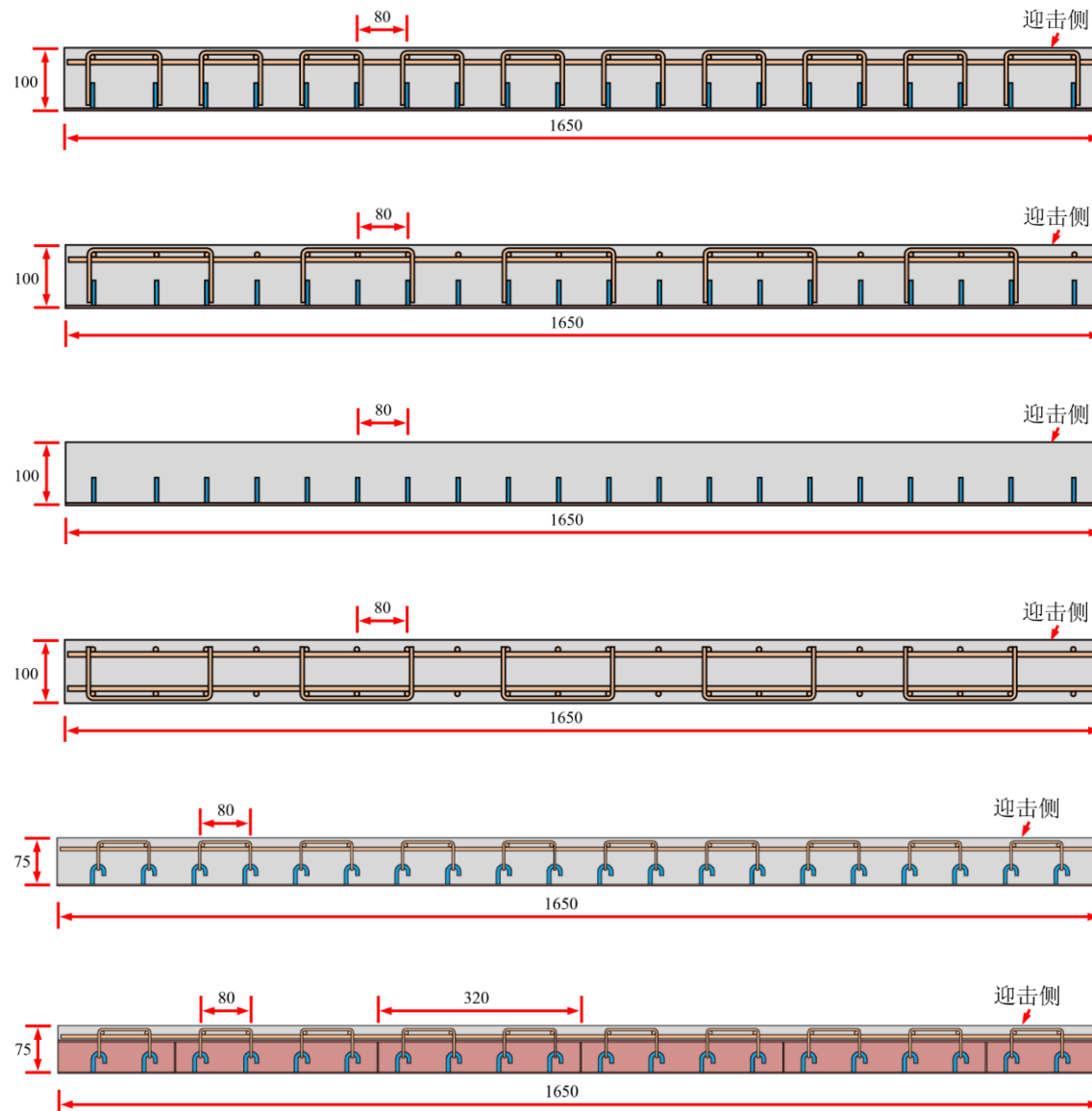
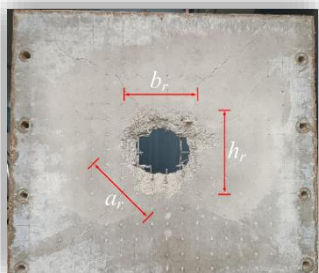
$$T_u = \varphi \left(A_{p1} f_{p1} + A_e f_e + 0.7 A_{uhpc} f_t \right)$$

$$\varphi = \frac{N_u}{N_u + T_u - 0.5 f_c A_c} \leq 1.0$$

构件编号	HSU-CT-Base		HSU-CT-S4.0		HSU-CT-B0.2		HSU-CT-33		HSU-CT-1:2		HSU-CT-2:1	
等效厚度 t_e /mm	0.198		0.198		0.099		0.198		0.198		0.198	
单侧钢板抗拉贡献/kN	569.8		756.0		569.8		569.8		569.8		569.8	
等效钢板抗拉贡献/kN	50.1		50.13		25.1		50.1		50.1		50.1	
UHPC抗拉贡献/kN	775.2		759.4		775.2		775.2		775.2		775.2	
抗拉承载力 (考虑UHPC)/kN	1395.1		1565.5		1370.0		1395.1		1395.1		1395.1	
抗拉承载力 (不考虑UHPC)/kN	619.9		806.1		594.9		619.9		619.9		619.9	
试验承载力/kN	1158	1169	1396	1436	1077	1059	1133	1089	1210	1124	1213	1211
公式计算结果	1163		1338		1137		1163		1163		1163	
公式计算误差/%	0.39	-0.55	-4.18	-6.85	5.62	7.41	2.61	6.75	-3.92	3.43	-4.16	-4.00

● 面外抗衝擊性能

- 針對不同連接構造、材料性能、鋼板厚度等參數，採用輕氣炮發射高速彈體進行測試，最大發射速度為160m/s



Contents

1 關於UHPC結構的幾點認識

A few points about UHPC structures

2 UHPC在橋樑工程中的應用研究

R&D of UHPC bridges

3 UHPC在房屋建築中的應用研究

R&D of UHPC buildings



4 總結

Summary



4 總結

- 如能準確準備把握實際工程需求，UHPC能夠有效提升工程結構綜合性能
- 為充分發揮材料優勢，需突破基於傳統混凝土材料/結構的認知，發展相適應的理論方法、技術措施，如制訂相適應的強度/延性等性能指標限值、提升預製件加工精度至亞mm級別
- 技術方案和實施路徑上，鼓勵百花齊放，通過實踐證實證偽





清華大學
Tsinghua University

感謝聆聽，請指正

