



新世代多功能性混凝土材料

— 高性能纖維混凝土

洪崇展／國立成功大學土木工程學系所教授

顏誠皜／國立成功大學土木工程學系所碩士生

戴艾珍／國立成功大學土木工程學系所碩士生

溫國威／國立成功大學土木工程學系所碩士生

張庭維／國立成功大學土木工程學系所碩士生

高性能纖維混凝土為近年來混凝土工程先進國家中，最受矚目的新型混凝土材料。根據其特性，高性能纖維混凝土於國際科學文章中，常獲得不同暱稱，如「可變形混凝土（如圖1所示）」、「高強度混凝土」、「不需箍筋的混凝土」、「耐久與永續性混凝土」、「防災的混凝土」、「不須修復的混凝土」及「可自癒合裂縫的混凝土」。本文透過廣泛文獻收集，介紹高性能纖維混凝土材料之特性與其應用現況。

高性能纖維混凝土

高性能纖維混凝土之特性

高性能纖維混凝土（high performance fiber reinforced concrete，簡稱 HPFRC）為國際間極受矚目的一種新型營建材料^[1-9]，其與傳統混凝土與纖維混凝土不同之處在於，翻轉了混凝土抗拉與抗裂能力不佳之缺失，如圖2所示，其極限拉應變值最高可達6%以上，超過普通混凝土的一百倍，且具有優良之裂縫抑制能力，裂縫寬度在混凝土受到1%拉力應變前，可控制於0.06 mm以下，這樣優良的拉力特性，不僅顛覆了教科書中對混凝土材料脆性的定義，亦使得傳統混凝土力學分析不再全然適用於這新世代的高科技混凝土材料。如果使用高性能纖維混凝土於抗耐震構件上，可大幅提升構件之韌性與抗剪能力，減少圍束與剪力鋼筋使用量，以及簡化施工設計與技術。除此之外，高性能纖維混凝土具有良好的損傷容限與裂縫寬度控制能力，能有效地提高結構物的耐久性及使用年限，減少日後維護與修繕等相關成本。



圖1 高性能纖維混凝土彎曲變形能力^[10]

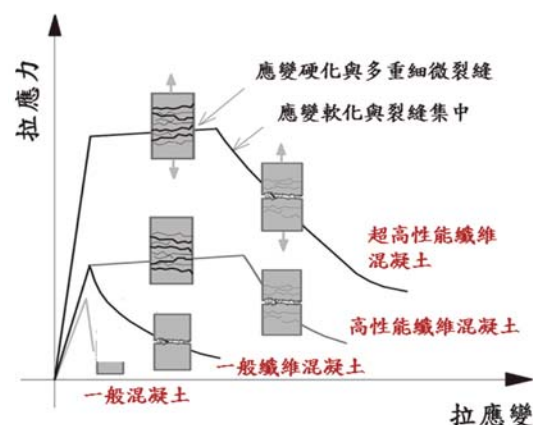


圖2 不同混凝土之拉應力應變行為

洪崇展與 El-Tawil [11]，設計兩座耦合結構牆抗震系統，第一座使用傳統鋼筋混凝土（RC），第二座使用高性能纖維混凝土於耦合牆之塑性區中，考慮高性能纖維混凝土之優越性能，洪崇展與 El-Tawil 減少了結構牆塑鉸區之 20% 撓曲鋼筋與 50% 圍束箍筋，連接梁亦減少圍束鋼筋使用量與簡化配筋方式。經非線性動態分析結果發現，在減少鋼筋使用量下，高性能纖維混凝土耦合牆不僅可達成預定之性能目標，更能增強地震消能機制，並有效減少結構牆塑性區之最大轉角，以及地震過後之永久損傷。

洪崇展與陳育瑄 [12] 研究使用高性能纖維混凝土於非韌性 RC 構件補強之有效性，所開發之高性能纖維混凝土具有可觀之韌性與變形能力，極限拉力應變高達 5% 以上。研究結果發現，使用高性能纖維混凝土進行補強，能有效減少補強鋼筋之使用，甚至完全不需補強箍筋，亦可有效強化非韌性 RC 構件於反覆載重下之變形韌性、強度、以及勁度。洪崇展等人 [13] 研究高性能纖維混凝土撓曲構件之反覆載重行為，並建議其力學分析模型。洪崇展與蘇彥方 [14] 研究高性能纖維混凝土之受裂後之自癒合特性，研究結果發現，由於高性能纖維混凝土具有低水膠比與高含量膠結材料，不僅能有效自癒合裂縫，更能回復 80% 以上之拉力強度與拉力勁度。洪崇展與顏偉閔 [15] 結合高性能纖維混凝土與形狀記憶合金，成功開發出新型 RC 構件，能在反覆載重作用下，產生結構自復位之特性，減少災後之維修。洪崇展與 El-Tawil [11] 使用高性能纖維混凝土於 RC 耦合結構牆之塑角區，研究結果發現，使用高性能纖維混凝土取代傳統混凝土於抗震構件中，能有效延緩裂縫之開裂與混凝土之壓碎，並能簡化鋼筋之設計與配置。

2004 年與 2007 年，日本東京與橫濱地區分別完工一座 27 樓高與一座 41 樓高之 RC 大樓，如圖 3，兩大樓均採用 RC 耦合結構牆抗震系統，此抗震系統內連繫兩 C 型 RC 結構牆之連接梁，使用高性能纖維混凝土取代傳統混凝土，以提升整體耦合結構牆之抗震消能能力，並避免或減少強震後所需之維修。

美國西雅圖於 2017 年即將完工的兩座 41 層樓與 31 層樓住商混合大樓，如圖 4 所示，亦採用 RC 耦合結構牆抗震系統，藉由高性能纖維混凝土取代傳統混



(a) 東京 Glorio Roppongi 27 層住宅大樓



(b) 橫濱 41 層樓大樓

圖 3 高性能纖維混凝土於日本抗震高層建築應用案例

凝土材料於連接梁，不僅大幅減少連接梁內橫向鋼筋量約 50%，並將設計與施工複雜之對角鋼筋籠簡化為傳統縱向鋼筋配置，不僅使施工容易、減少工時，同時亦減少了 20%~30% 之材料總成本。

超高性能纖維混凝土

由於高性能纖維混凝土的傑出力學與耐久性特性，國際混凝土產學界已多年持續投入大量資源，進行相關研究與應用，並開發更優秀之力學與耐久性能力，此新一代高性能纖維混凝土的國際間通用名稱為：超高性能纖維混凝土（ultra high performance fiber reinforced concrete，簡稱 UHPFRC），其可在維持傑出之變形韌性能力與漿體工作性下，如圖 5 所示，將抗壓強度提升至 150 MPa 以上，抗拉強度大於 10 MPa 以上。一般而言，超高性能纖維混凝土的彈性模數為 50 至 65 GP，柏松比約為 0.2，而膨脹係數約為 10×10^{-6} 至 $12 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$ 。



(a) 大樓完工外貌示意圖



(b) 興建過程 -1



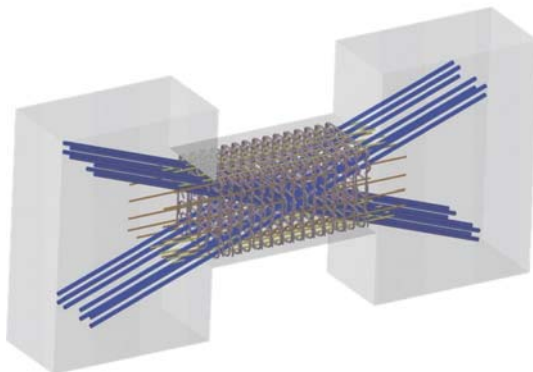
(c) 本案所用之高性能纖維混凝土



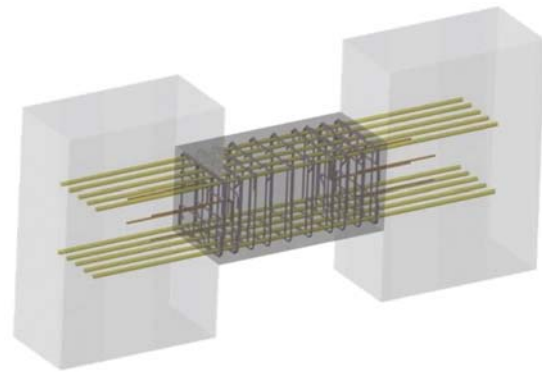
(d) 高性能纖維混凝土連接梁灌漿



(e) 興建過程 -2

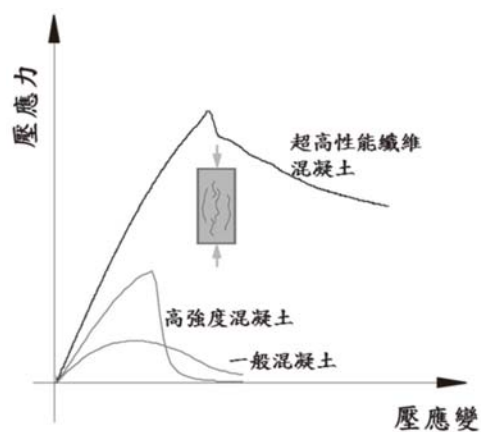


(f) 傳統混凝土連接梁鋼筋配置

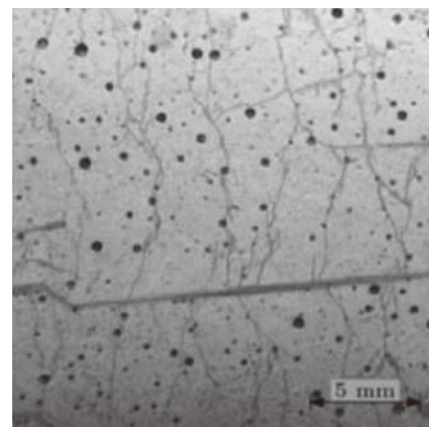


(g) 高性能纖維混凝土連接梁鋼筋配置

圖 4 高性能纖維混凝土於美國抗震高層建築應用案例



(a) 具圍束效應之壓應力應變行為



(b) 受拉開裂之細微裂縫

圖 5 超高性能纖維混凝土行為

為了達到超高性能纖維混凝土的高力學性能，其組成材料的使用上，除了使用如石英粉與矽灰等細粒添料，以增加顆粒堆積之緻密性，並避免使用粗骨材，以防止材料產生弱面，此外，藉由添加 1 ~ 3% 體積比的短纖維（以鋼纖維為例，一立方混凝土約加入 80 ~ 240 公斤纖維），以讓混凝土增加 8 ~ 11 MPa 的拉應力，以及 25 ~ 40 MPa 的撓曲應力，並賦予混凝土傑出的韌性與圍束性。

超高性能纖維混凝土一般使用高強度鋼纖維，文獻中所使用之鋼纖維主要分為三種類型^[16]：(1) 直條型鋼纖維（圖 6(a)），(2) 彎鉤型鋼纖維（圖 6(b)），(3) 螺旋型鋼纖維（圖 6(c)-6(e)），螺旋型鋼纖維亦可根據每單位長度的旋轉數不同，區分為低螺旋型及高螺旋型鋼纖維。

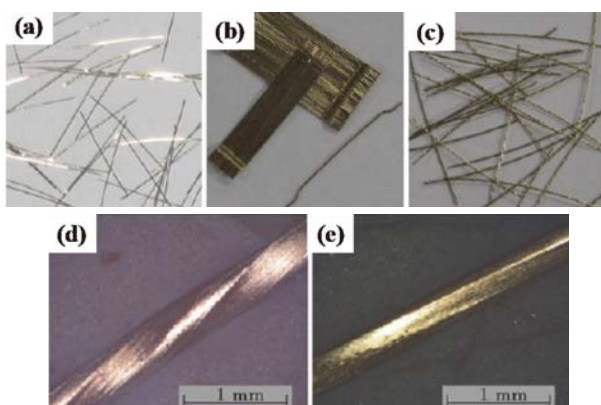


圖 6 鋼纖維的類型 (a) 直鋼纖維 (b) 彎鉤型鋼纖維 (c) 螺旋型鋼纖維 (d) 高螺旋型鋼纖維 (e) 低螺旋型鋼纖維^[16]

超高性能纖維混凝土在不使用熱養護狀況下，文獻記載之抗壓強度最高可達約 200 MPa，而使用熱養護則可強化抗壓強度至 400 MPa 以上。超高性能纖維混凝土的高溫養護方式主要可分成兩種，一種是在澆置後短時間內即進行大約 65°C 的養護，有益於其早期的強度發展；另外一種是將模板拆除後的幾小時後，進行約 90°C 的高溫養護，此種方式有益於其長時間的力學發展，能增進其耐久性。

超高性能纖維混凝土的收縮幅度大約為 400 ~ 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ ，主要是來自因水泥粉體水化反應而造成的自體收縮。若將超高性能纖維混凝土進行前述的高溫養護，可激發材料潛在收縮性質，使用這樣的養護方式於超高性能纖維混凝土預鑄構件，可有效降低預鑄構件出廠後的體積變化。因超高性能纖維混凝土具有低水膠比與低滲透性，其乾縮相較於自體收縮小了許多，此外，透過熱

處理，超高性能纖維混凝土之潛變係數可由 0.8 ~ 1，大幅降至 0.2 ~ 0.5。

由於超高性能纖維混凝土中不含粗骨材，水膠比也小於 0.25，微結構中高密度的水化反應產物所含的比例較一般混凝土高出許多，如圖 7 所示，擁有緻密堆疊的細粒料，因此其相關的耐久性指標（孔隙率、滲透性、氯離子擴散率、潛變等）都較其他混凝土優異，如表 1 所示，因此，其可以有效抵抗較嚴苛的環境，這些特質將有利於永續設計上。由於超高性能纖維混凝土含泥量較一般混凝土高 50% 以上，因此超高性能纖維混凝土單位重的碳排放量較一般混凝土高，但是在實際建物的運用中，使用超高性能纖維混凝土取代一般混凝土時，可減少約 2.5 至 3 倍的材料使用量，不僅可以減少載重，其優良的耐久性也可以使建物在生命週期中，大幅減少維修的可能。

表 1 混凝土耐久性與強度的比較^[17]

	一般混凝土	高性能混凝土	超高性能纖維混凝土
孔隙率 (%) Water porosity	14 ~ 20	10 ~ 13	1.5 ~ 5
透氣性 (m^2) Oxygen permeability	10^{-16}	10^{-17}	$< 10^{-19}$
氯離子滲透係數 (m^2/s) Chloride diffusion coefficient	2.10^{-11}	2.10^{-12}	2.10^{-14}
氫氧化鈣含量 (kg/m^3) Portlandite content	76	86	0
抗壓強度 (MPa) Compressive strength	20 ~ 50	60 ~ 100	> 150

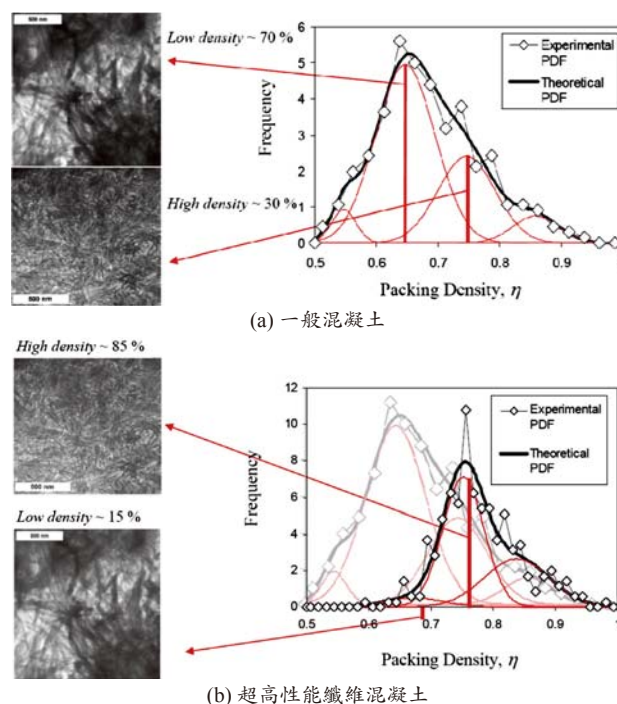


圖 7 混凝土水化產物之微奈米結構^[18-21]

法國於 1990 年開始研究超高性能纖維混凝土。90 年代後期開始進行最佳化配比設計，並且開始銷售這項技術於西歐、亞洲、澳洲以及美國等地，用於橋梁、建築以及非結構之裝置藝術品，在 90 年代後期，在法國與西歐等地之超高性能纖維混凝土主要用於老舊房舍的補強。隨著混凝土工程先進國家前後陸續投入大量資源於超高性能纖維混凝土的研究與應用，法國土木工程協會（Association Française de Génie Civil）率先於 2002 年發表了超高性能纖維混凝土的使用與設計建議手冊，之後許多各國（包含日本、韓國以及澳洲等）的土木工程協會，亦陸續發布了其國內的超高性能纖維混凝土相關手冊。2005 年，德國投注 1,000 萬歐元，在大學的研究團隊領導下，積極研究超高性能纖維混凝土，日本也積極將超高性能纖維混凝土應用於抗震結構、人行陸橋、公路及鐵路橋等。在澳洲，超高性能纖維混凝土則用於避難所的設計。發展超高性能纖維混凝土的企業與研究單位中，主要有法國的 DUCTAL®、BSI/CERACEM®、BCV®，瑞士及加拿大的 CEMTECmultiscale® 以及丹麥、德國、日本發展出的超高性能纖維混凝土產品：BSI/CERACEM® 與 Ductal® 更遍佈於亞洲、澳洲、北美等地。

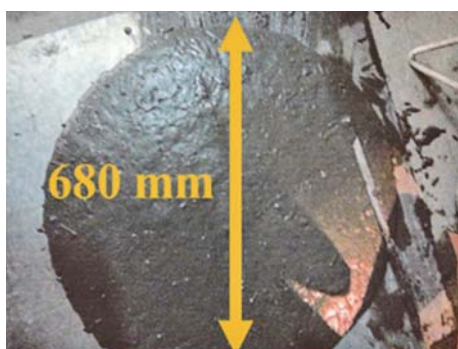
超高性能纖維混凝土於國內之發展

洪崇展等人^[10]結合超高性能纖維混凝土與高強度鋼筋，以提升 RC 結構牆之耐震行為，其成功與國內預拌場進行產學合作，如圖 8-9 所示，使台灣混凝土業界能大量自產具有良好工作性之超高性能纖維混凝土，坍落度可達 680 mm，抗壓強度可達 160 MPa 以上。由實驗結果得知，使用超高性能纖維混凝土與高強度鋼筋於結構牆中，能有效延緩混凝土裂縫的發展，而超高性能纖維混凝土的多重細微開裂之材料特性，以及應變硬化能力，能顯著提升試體的結構韌性、強度、以及韌性。實驗結果亦發現，超高性能纖維混凝土之纖維能分擔水平鋼筋之剪力，並有效提升試體之側向勁度與抗剪能力，不論使用高強度鋼筋或一般鋼筋，超高性能纖維混凝土結構牆之極限強度均比一般鋼筋混凝土結構牆提升 15% 以上。

洪崇展與關辰宇^[22]研究高拉力鋼筋加勁超高性能纖維混凝土梁撓曲構件之反覆載重行為，研究結果發現超高性能纖維混凝土撓曲構件於反覆載重作用下，不僅能展現高強度與高勁度，更能有效避免傳統高強度混凝土於反覆載重下易剝落之特性，有效增強高強度撓曲構件之變形韌性。研究結果也發現，使用超高性能纖維混凝土取代傳統高強度混凝土，能有效減少箍筋與撓曲鋼筋之應變，延長彈性變形區段。



(a) 預拌廠內以電腦控制拌合流程



(b) 具有良好之工作性與纖維均佈性



(a) 剪力牆實驗試體



(c) 預拌車工作情況



(d) 泵送車夜間澆置超高性能纖維混凝土



(b) 拉力試體受拉裂縫分布

圖 8 洪崇展等人^[10]與國內預拌廠合作生產超高性能纖維混凝土

圖 9 洪崇展等人^[10]製作之超高性能纖維混凝土剪力牆實驗試體

國際應用實例

超高性能纖維混凝土所具有之超高強度、可變形能力、與耐久性，在過去二十年中已有許多應用，三個主要的類別分別為結構應用、耐久性應用、以及建築應用，以下將詳細介紹。

結構應用

超高性能纖維混凝土於材料性能上之特性，可轉變成結構構件性能上之優越能力，強化結構物於反覆載重下之拉壓力韌性、剪力強度、以及抗彎強度，許多專家學者已探索使用超高性能纖維混凝土於各式結構構件，以提升抗震與補強效能之可能性 [11,16,23-31]。

位於法國的 Huisne River 橋梁，為了能提升交通負載量，並使得新規劃之橋面電車得以行經不在原設計載重中的橋梁，因而進行橋梁補強，補強的方式為使用超高性能纖維混凝土，加深橋面板厚度以及擴大主梁斷面，如圖 10 所示。

法國的 Perpignan 停車場上欲增建樓層，因而使用超高性能纖維混凝土取代一般混凝土，進行擴柱補強，以避免停車場空間過分縮減而損失原有功能，補強前後設計如圖 11 所示，在此案例中，使用超高性能纖維混凝土可在僅增加柱斷面積 21% 的情況下，有效

提升 70% 強度，具有相當高的補強效益。

超高性能纖維混凝土相較於傳統混凝土具有大幅提升之勁度與強度，更可進一步藉由預力設計，將超高性能纖維混凝土構件設計為更細長，並達成結構與材料的減量設計，可帶來工程上的運輸及儲藏優勢。法國的 Bourg-lès-Valence 橋梁使用超高性能纖維混凝土之大梁，具 Π 型梁斷面設計，如圖 12 所示，並使用超高性能纖維混凝土達成無鋼筋橋面。法國的另一座 Pont Pinel/Pont de Sarcelles 橋梁，其大梁採用高流動性超高性能纖維混凝土所製成，超高性能纖維混凝土漿體坍流度可達 650 mm，運用超高性能纖維混凝土設計之此橋梁，相較於鋼橋而言，在成本、耐久性與維護方面均具優勢。

跨越卡塞爾河 Fulda 的 Gärtnerplatz 橋梁，為首座高性能纖維混凝土與鋼構之複合橋梁（見圖 13），總長 132 m，共有六跨，於 2007 年完工。此座橋梁之設計與施工均與當地卡塞爾大學密切配合而完成，使用最大粒徑為 1 至 2 mm 的細粒料以改善超高性能纖維混凝土漿體之均勻性，內含 0.9% 的高強度鋼纖維，並開發出抗壓強度可介於 150 MPa 和 400 MPa 之超高性能纖維混凝土，橋梁的桁架結構由鋼構與高性能纖維混凝土所組成，其上則採用高性能纖維混凝土橋面板。這

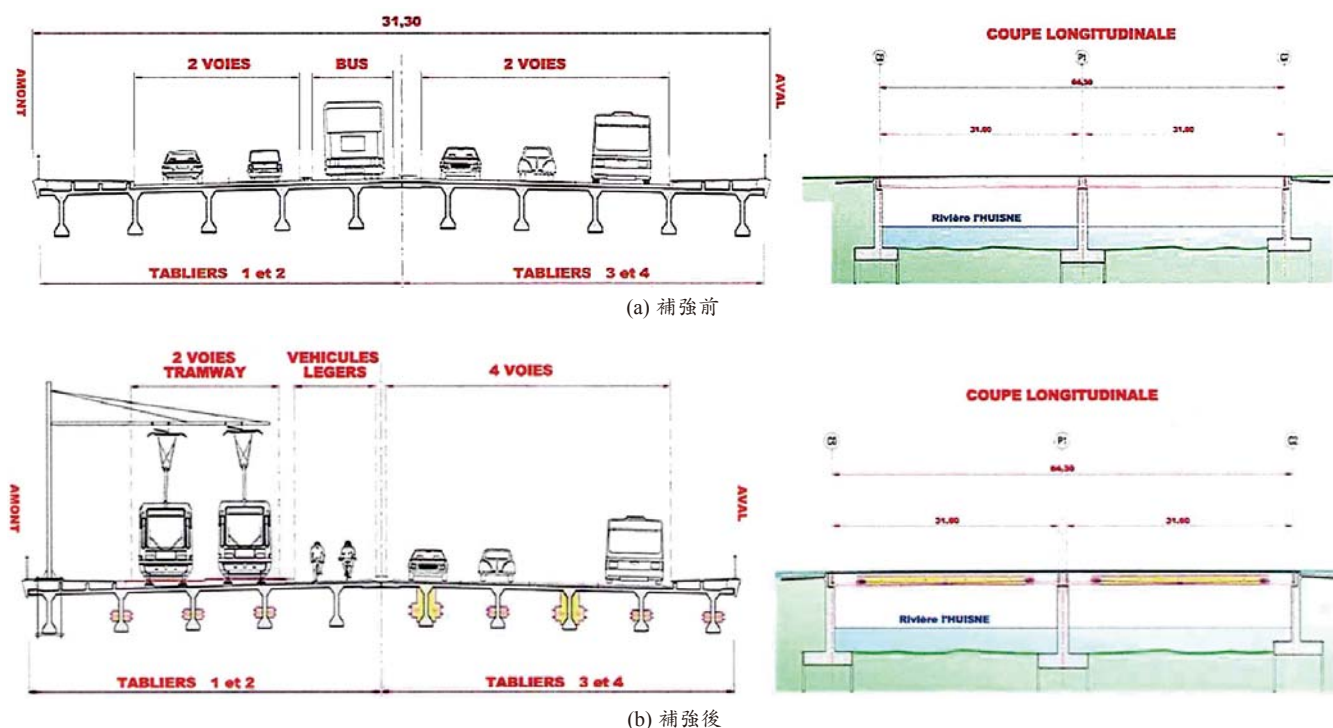


圖 10 法國 Huisne River 橋梁補強前後示意圖 [32]

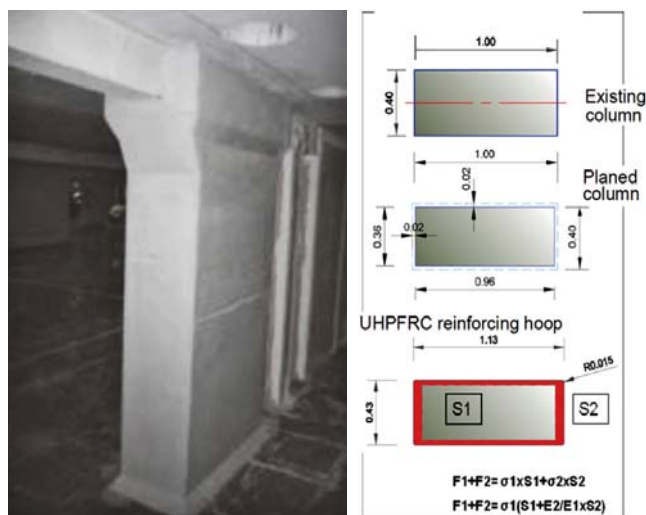


圖 11 法國 Perpignan 停車場擴柱補強^[32]



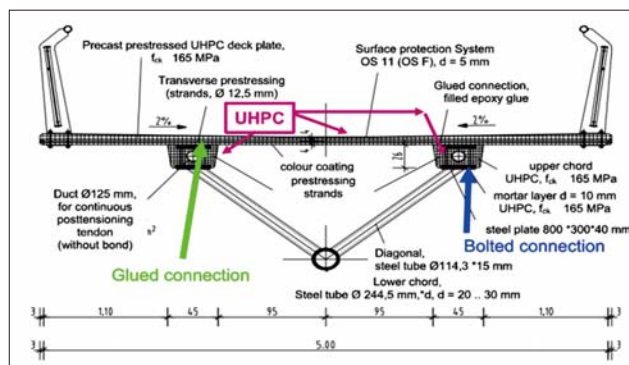
圖 12 法國 Bourg-lès-Valence 橋梁採用之超高性能纖維混凝土橋面版

座橋梁於設計時，不僅善用高性能纖維混凝土於拉伸與抗壓強度之優勢，更利用高性能纖維混凝土之高黏結力，於設計時有效縮短鋼筋之錨錠長度。

法國 PS34 橋梁跨長為 48 m，於規劃設計階段時以超高性能纖維混凝土取代一般混凝土材料，混凝土使用量可由 200 m³ 減少至 80 m³，所相對應減少的橋梁施工量，不僅加速施工時間，詳見圖 14，所減少的橋梁上部結構重量，亦可避免橋墩之設置（圖 14(b) 為示意圖），同時優化橋梁與景觀的融合，並使未來可有擴大公路平面之可能。此橋梁所採用之超高性能纖維混凝土具混和型纖維，纖維長度介於 10 mm 至 20 mm，直徑介於 0.1 mm 至 0.3 mm；纖維體積含量 2% 至 3%，並添加聚合物纖維以增加耐火性。

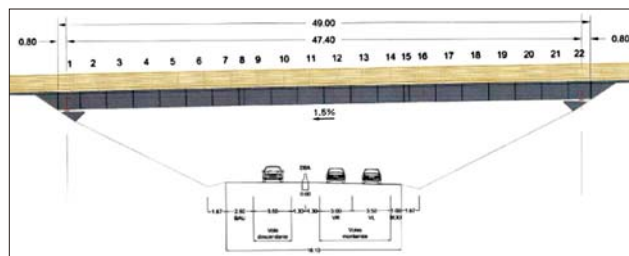


(a) 橋梁外觀



(b) 三弦桁架系統

圖 13 德國 Gärtnersplatz 橋梁^[33]



(a) 橋梁尺寸



(b) 優化橋梁與景觀的融合

BRIDGE MADE OF BCV	MONTH 1	MONTH 2	MONTH 3	MONTH 4	MONTH 5	MONTH 6
Segments prefabrication						
Bridge Abutment						
Segments assembly						

CLASSIC BRIDGE	MONTH 1	MONTH 2	MONTH 3	MONTH 4	MONTH 5	MONTH 6
Bridge Abutment						
Piers Erection						
Shoring of Deck						
Deck Erection						
Fittings						

(c) 超高性能纖維混凝土與傳統混凝土橋梁工期比較

圖 14 法國 PS34 橋梁^[33-36]

日本於超高性能纖維混凝土之開發與應用於已有長期發展，並同時透過研究工作與施工經驗，逐步應用與驗證創新技術。幾個實際工程案例，如圖 15，包含豐田人行橋、40 米跨度之單軌電車橋梁、羽田國際機場的地面設備橋、以及羽田機場跑道。

在澳洲超高性能纖維混凝土的開發和應用主要方向為公路橋梁結構，如澳洲 Shepherds Creek Road 橋梁，橋梁單跨度長 15 m，橋面載重由 16 根超高性能纖維混凝土預力梁所支撐（見圖 16(a)），此外，亦用於地震易發地區的人行橋以及需要耐用性或獨特美觀的應用（圖 16(b-c)）。



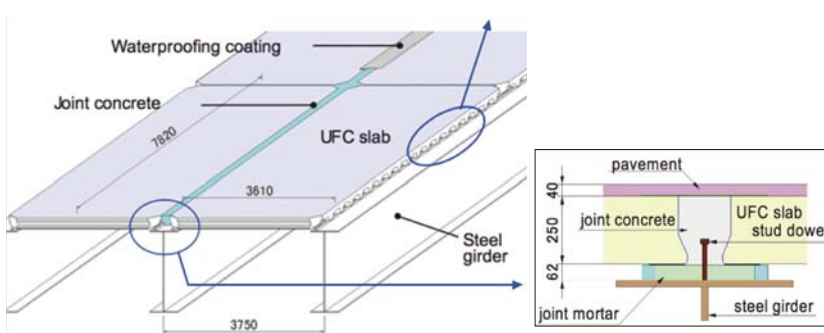
(a) 豐田人行橋



(c) 羽田機場 D 跑道

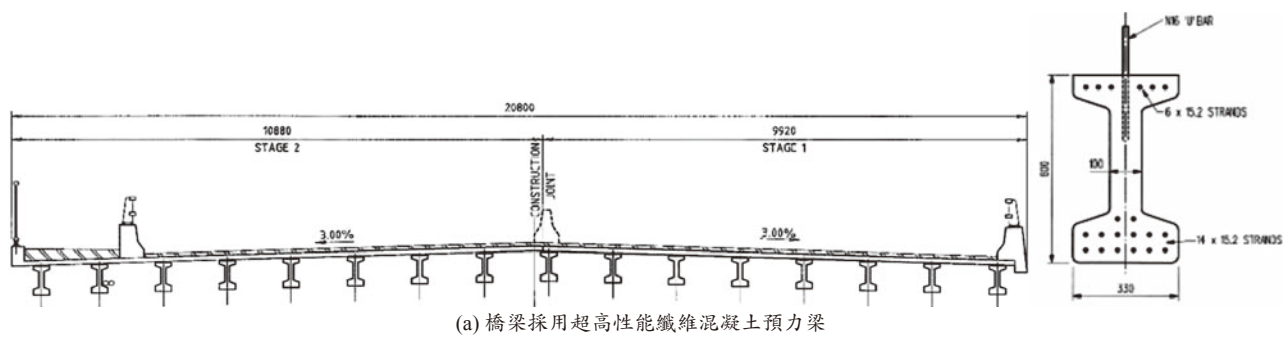


(b) 40 米跨度單軌電車橋



(e) 羽田機場 D 跑道之鋪面設計

圖 15 日本於超高性能纖維混凝土之應用案例^[37]



(a) 橋梁採用超高性能纖維混凝土預力梁



(b) 獨特造型人行橋



(c) 地震易發地區的人行橋

圖 16 澳洲於超高性能纖維混凝土橋梁之案例^[38,39]

奧地利首座超高性能纖維混凝土橋梁為「Wild」，外觀如圖 17，於設計階段時，考量超高性能纖維混凝土的彈性模數約為結構鋼的 25%，因此設計原則介於傳統混凝土與結構鋼之間，設計結果顯示，以超高性能纖維混凝土取代傳統混凝土，整體工程成本可約減少 50%；「Wild」以拱型構造支撐橋梁載重，以善用超高性能纖維混凝土高抗壓強度的特性，此外，因超高性能纖維混凝土可提供有效抗剪能力，橋梁結構可有效減少剪力筋之使用，並利用預力強化拱型之彎矩勁度。

圖 18 為首座在美國利用超高性能纖維混凝土的橋梁，橋址位於 Iowa，藉由超高性能纖維混凝土之使用，有效減少了橋梁所須之剪力筋，橋面設計為 π 型斷

面，以有效利用超高性能纖維混凝土之力學特性與耐久性，這樣的斷面設計可避免裝設額外之結構板，可加速施工。圖 18(b) 則為首座將超高性能纖維混凝土應用於預鑄橋面板間填充縫的案例。

橋梁之興建如須跨越既有道路或鐵路時，往往希望能減少橋版深度以增加橋下淨高度，因此橋梁之建造常使用高成本之鋼骨鋼筋混凝土，而超高性能纖維混凝土之使用成為了有效的替代方案，圖 19 為一設計案例，橋梁採用超高性能纖維混凝土預鑄預力梁，梁底部製成齊平切面，梁上再澆置傳統混凝土版，梁設計圖如圖 19(b)，可看到藉由超高性能纖維混凝土所提供之超高抗壓強度，可免除壓力筋的設計，此案之超高性能纖維



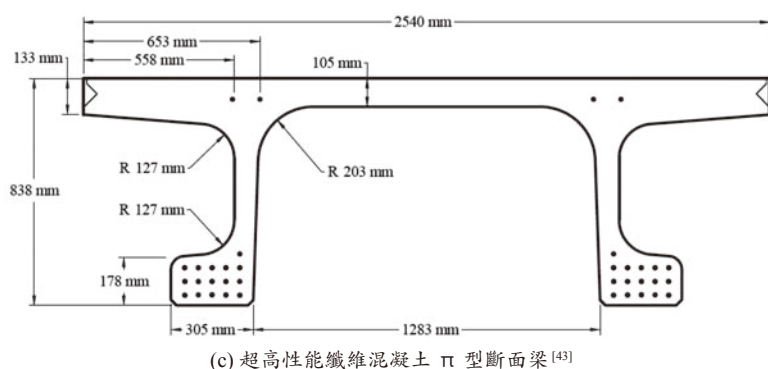
圖 17 陸橋「Wild」^[40]



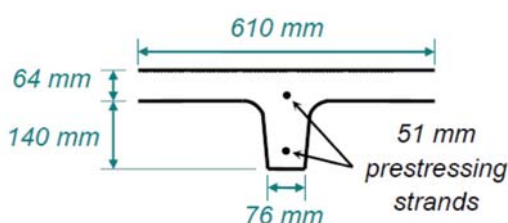
(a) Mars Hill bridge^[41]



(b) Route 31 bridge^[42]



(c) 超高性能纖維混凝土 π 型斷面梁^[43]



(d) 超高性能纖維混凝土 waffle 版斷面圖^[44]

圖 18 美國於超高性能纖維混凝土之橋梁應用

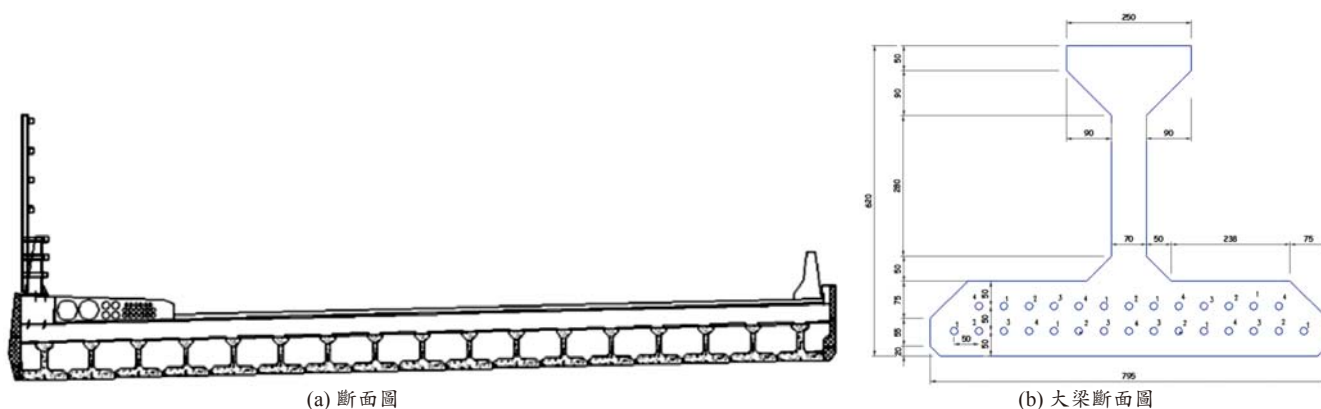


圖 19 Pinel 橋梁 (PRAD PRécontraintes par ADhérence)

混凝土具 165 MPa 的抗壓強度。使用超高性能纖維混凝土不僅可免除傳統鋼骨鋼筋混凝土於灌漿施作上之困難性，當橋梁之建造有跨越鐵路之需求時，可增加施工之安全性。法國的 Pinel bridge 橋梁亦使用超高性能纖維混凝土取代鋼骨鋼筋混凝土，除達成上述優點外，亦可免除鋼材之塗漆，可增加維護之方便性與安全性，對於一般大眾民眾而言，採用超高性能纖維混凝土所帶來的施工簡化，可降低施工期間對民眾交通之影響。

超高性能纖維混凝土在斷面很輕薄的情況下，即能發揮出可觀的承載力，使用於橋面時能達成輕量化與耐久性，滿足高交通負荷來帶來的抗疲勞需求。位於法國 Livron-Loriol 內的橋梁，橋面版設計採用超高性能纖

維混凝土預鑄版，每塊尺寸為長 2.5 m，寬 12 m，設計壓力與拉力鋼筋（如圖 20）；設計上考量長期情形，故對潛變需特別考慮，潛變係數範圍取 0.2 ~ 0.8。於興建前，藉由大型尺寸實驗驗證此設計之可行性，並證實使用超高性能纖維混凝土取代傳統混凝土，所減少的自重可縮短樁長的設計，因而適用於土層較差的場址，此外，超高性能纖維混凝土可避免裂縫的生成，施工上亦相對安全與簡易。

當既有鐵路橋梁達到服務年限或必須修復時，臨時橋梁常以鋼構為首選之一，因其可快速組裝及拆除，能降低對交通阻礙的衝擊，然而鋼橋沒有連續的道渣床，因此時速只能達到 80 到 120 km/hr 之間，且對於腐蝕保護、接頭疲勞及耐久性差，使得維護成本增加，有鑑於此，奧地利政府相關單位尋求超高性能纖維混凝土做為替代方案。超高性能纖維混凝土之自重強度比優於鋼材與傳統混凝土，並可利用預力加載的方式，補償拉力強度不足，再藉由熱養護處理及電腦控制預鑄，使成品行為接近鋼結構；此橋梁採 U 型斷面，如圖 21，藉由這樣的設計強化隔音及減少儲存空間，並可利用單位預鑄塊組裝出多種跨度，相較於傳統鋼結構固定跨度的選擇，不僅較為彈性，也可減少興建時的庫存量。

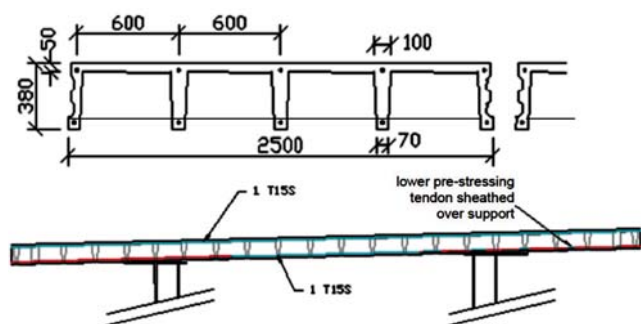


圖 20 Livron-Loriol 橋梁預鑄斷面圖 [45]

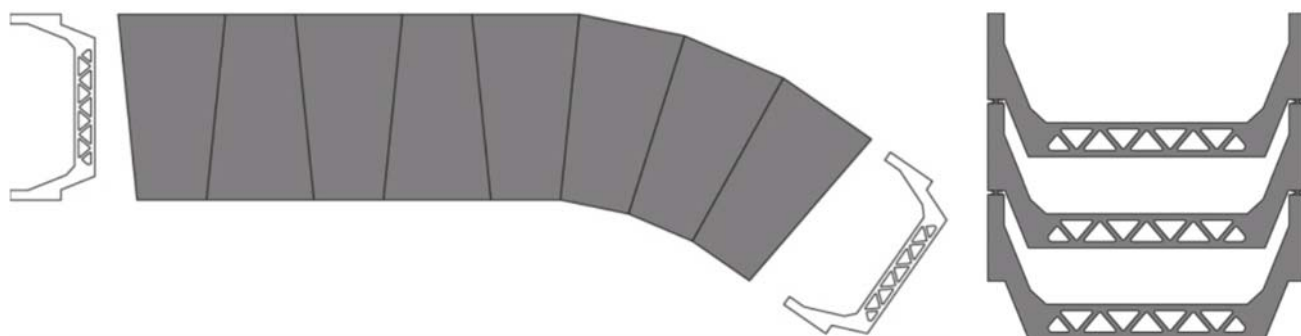


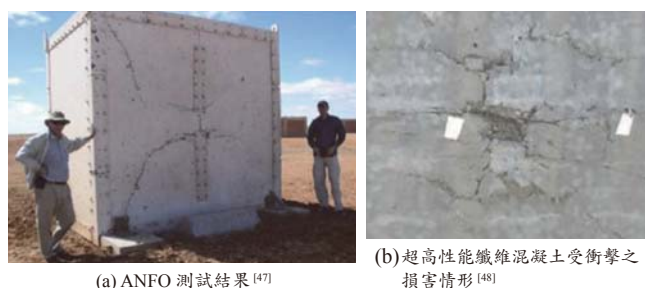
圖 21 U 型斷面橋梁 [46]

超高性能纖維混凝土的強度大於 140 MPa 含有大量矽砂使水膠比約為 0.16 甚至更低，若加入石英砂並適當養護可使強度達到 150 MPa 以上，若要更高強度即須加入特殊骨材，例如鋁礦物並搭配熱處理，如此強度可達到 400 MPa。鋼纖維的尺寸與骨材會影響保護層厚度，保護層厚度可控制為 10 ~ 15 mm；超高性能纖維混凝土運用於預鑄構件之填充縫，可發揮早強特性，圖 22 為兩預鑄構件之超高性能纖維混凝土填充縫的力學實驗，透過彎曲試驗發現此填充縫非受力弱點，可順利傳遞內力於相接預鑄構件。



(a) 兩預鑄梁間之填充縫 (AARUP) (b) 彎曲測試破壞圖 (AARUP)
圖 22 預鑄構件之超高性能纖維混凝土填充縫

超高性能纖維混凝土之高抗壓強度與韌性，以及抵抗碎裂的特性，亦適合設計用來抵抗爆炸與衝擊之元件。澳洲進行相關測試實驗，實驗規劃多種牆尺寸，2 m 長，1 m 寬，50 mm、75 mm、及 100 mm 厚，放置 TNT 炸藥或 ANFO (ammonium nitrate/fuel oil) 距離牆面 30 m、40 m、或 50 m，探討爆炸力為 2000 kPa、800 kPa 及 400 kPa。試驗結果顯示超高性能纖維混凝土試體只出現均勻分布的中小裂縫，變形撓度約 40 ~ 50 mm，可有效防止碎裂，如圖 23。



(a) ANFO 測試結果^[47] (b) 超高性能纖維混凝土受衝擊之損害情形^[48]
圖 23 超高性能纖維混凝土於衝擊載重防護之應用

超高性能纖維混凝土於高應變速率下，強度可從原先 180 MPa 增加至 350 MPa，約為二倍，而最高強度對應的應變仍可高達 0.7%。超高性能纖維混凝土能成為抗爆需求之有效解決方案，且設計尺寸可輕薄化，這項

新技術已應用於澳洲政府之安全建設上。此外，在防腐蝕功能上，雖然一般的混凝土已具有防腐蝕效果，但在渠道河川等有高度衝擊承載需求的區域，超高性能纖維混凝土可成為有效解決策略，並已應用於渠道 St Julien Mountain Canal，如圖 24。



圖 24 超高性能纖維混凝土於 St Julien Mountain 渠道之應用

耐久性應用

超高性能纖維混凝土非常緻密的微觀結構可使得氣液體不易滲透，抗化學侵蝕的能力較傳統及高強度混凝土優良，可在減少保護層厚度情況下，於嚴苛環境中，提供良好之耐候性，因此適合於水庫、海事工程及核能設施等耐久性應用。

核電廠冷卻塔的水具有高酸性，以及高氯離子與硫酸鹽濃度，為易於發生侵蝕生鏽的環境。法國 Cattenom 與 Civaux 核電廠為應用超高性能纖維混凝土的案例，其使用超高性能纖維混凝土取代傳統混凝土於冷卻塔，以提升耐久性，避免頻繁翻修所消耗之停機成本。其中，建造於 1980 年代的法國 Cattenom 核電廠，其冷卻塔於 1990 年代中期進行上部結構的更新工程，而由於附近的土質軟弱加上有沉陷發生的可能危險，藉由超高性能纖維混凝土預鑄梁的使用，可同時有效達成減重與滿足強度需求之目的^[49]。

於 2008 年，也就是更新工程後 10 年，維護人員對 Cattenom 核電廠冷卻塔內超高性能纖維混凝土梁腹板進行鑽心，以研究其耐久性。結果發現，表面鋼纖維並無被侵蝕的現象，孔隙率低至 4.3%，毛細管之吸水率為 0.025 ~ 0.035 g/cm²，這樣的吸水率大約是一般高性能

混凝土的十分之一。調查亦發現僅有距離表面 1 mm 的 PH 值小於 9，其餘部分的平均 PH 值為 12.3，表示大梁幾乎沒有受到環境的酸化與侵蝕。另外，也用探測電位的方式測得氯離子濃度，每 100 克僅含不到 0.1 克的氯離子，一般觸發侵蝕的濃度大約是每 100 克含 0.4 克，因此也無明顯的氯離子侵蝕。將鑽心試體修飾成適當的圓柱試體後，進行強度測試，抗壓強度約為 240 MPa、楊氏模數 54 GPa、柏松比 0.21，與原始材料資料庫相較之下，材料經過這十年的時間，仍然保持其穩定性。

橋梁經常須面對較原先設計考量較高之交通負荷，導致橋面版需頻繁的維修工作，如要規劃橋梁補強，其補強工作所需增加之靜載重須有限制，超高性能纖維混凝土可提供極佳之解決方案，不但可增加強度與勁度，且可大幅增加橋梁生命週期，減少維護費用。荷蘭具有許多預鑄與場鑄超高性能纖維混凝土相關補強案例。圖 25 為用於補強 Viaduc du Cher 橋柱的超高性能纖維混凝土板，厚度僅為 25 mm，可減少對可用空間縮小之衝擊性。

鑒於高性能纖維混凝土於低厚度情況下，仍可具有高緻密性、抗磨損力以及小於 0.012 的粗糙係數，因而被採用於日本細川地下渠道的修復工程，並以預鑄組裝工法縮短工期，成功減少工程成本。圖 26 為施工完成照，材料於第一百天之強度達 178 MPa。使用超高性能纖維混凝土能有效減少工期，比起傳統方法更經濟，且不需要特別的技術，由於日本成功的案例，使得超高性能纖維混凝土能在未來隧道工程上，具有廣泛之運用潛力。

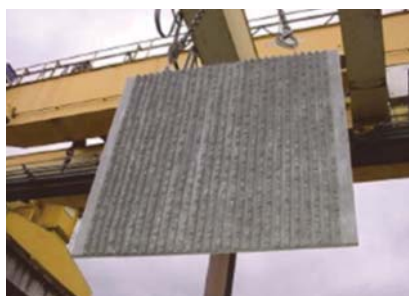


圖 25 Viaduc du Cher 橋柱之高性能纖維混凝土補強包覆版 [33,34]



圖 26 日本細川地下渠道以超高性能纖維混凝土修復完成照 [50]

AASHTO 發現美國多數橋梁已經快達到五十年的使用年限，將面臨大量因老化而有維修需求之橋梁。擁有突出的強度與耐久性的超高性能纖維混凝土可成為合適的方案，可以延長結構物的壽命，並且減少日後維修的頻率。美國每年需花費約 10 億美元，修復或替換已惡化的傳統基樁，大部分的損壞都可歸因於交通荷載，基樁的損壞不僅影響了結構的服務年限，甚至嚴重影響基礎承載力。在當地氣候溫度及乾濕情形下，埋入土壤中的基樁將承受環境循環的變化，鋼樁或混凝土樁的鋼筋會因腐蝕減少承載能力，為了克服這樣的情形，超高性能纖維混凝土其高強度及耐久性的特點可成為解決方案，超高性能纖維混凝土的抗壓強度可達 200 MPa 孔細率約為 1.5%，這樣的條件非常適合設計在嚴峻的環境中。Vande 等人 [51] 建議超高性能纖維混凝土基樁斷面形狀，分別為正方形、八角形及圓形，超高性能纖維混凝土可減少斷面抵抗壓力，但仍須搭配預力，使其抵抗拉力，並可減少整體材料成本。而斷面設計成中空，但不減少摩擦接觸面的周長，這樣的設計將斷面集中於彎矩大的地方，使整體效率化，但正方形、八角形及圓形三種斷面在製作上有難度，可能多增加的人力成本會消耗材料減少帶來的效益。合適的替代方案為選用 H 形斷面，H 形的內鈍角可預防應力集中及潛在裂縫的發生，且在澆置過程中可避免氣泡的形成；圖 27 為三種 H 型斷面的選擇。

在北美有超過 150,000 座的老舊橋梁，工程師欲尋找新的方式建造，以克服高額的維修費用，同時必須保持交通運作狀況下進行維修工程，為了解決材料性質的易腐蝕、耐久能力等等問題，選擇使用超高性能纖維混凝土材料，無論於預鑄橋面版之使用、或版間的填充結合材料，如圖 28，可在簡化施工複雜性之條件下，提供良好之力學特性，並賦予高耐久及抗腐蝕能力，比起傳統混凝土，少了許多維護成本。

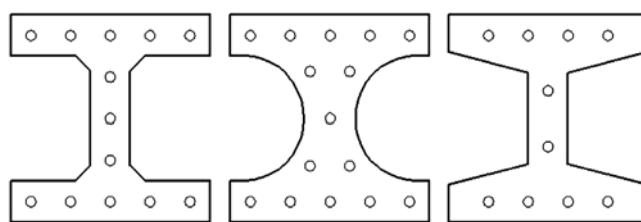


圖 27 超高性能纖維混凝土基樁之三種 H 型斷面 [51]

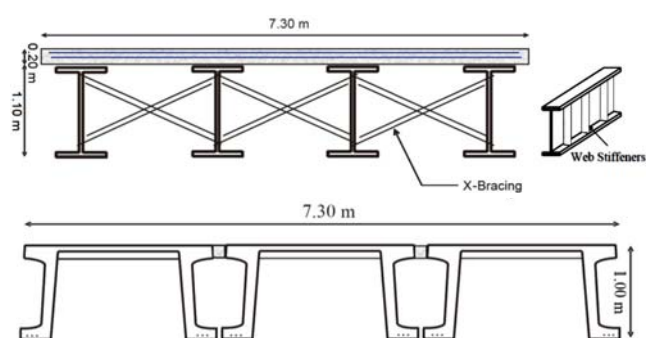


(a) 現場澆置情形 [52]

(b) 填充縫完成 [53]

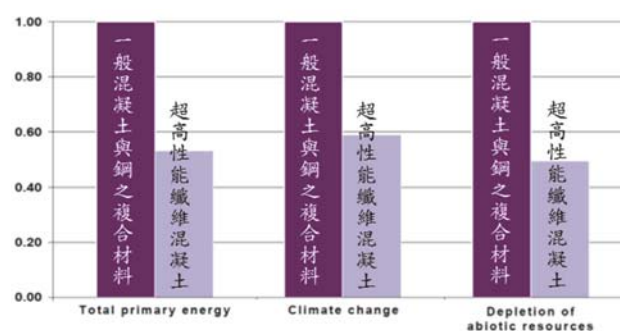
圖 28 超高性能纖維混凝土於預鑄橋面版填充縫之應用

永續環境與建設的議題在現今社會中廣為討論，生命循環週期評估方法（Lifecycle assessment）常於國際中用來分析建物生命週期中所使用的材料消耗能量，包含從材料的製作，到拆除與丟棄的階段，並根據這些過程的資源消耗與對環境排放等因素，分析相關的環境指標，如能源的消耗、對氣候的衝擊、自然資源的消耗、以及大氣酸化等等，以評估建物於生命週期中對環境的衝擊。AFGC [33,34] 使用超高性能纖維混凝土與一般混凝土分別設計一座功能相仿之橋梁，如圖 29(a) 所示，並利用生命循環週期評估方法的概念，分別計算兩種設計與建造方式對於環境的衝擊，結果如圖 29(b) 所示，可以明顯發現，使用超高性能纖維混凝土所製作的橋，其相關的環境衝擊指標都比傳統混凝土做法低上許多。



(a) 橋梁幾何尺寸

(上方：一般混凝土與鋼之複合材料，下方：超高性能纖維混凝土)



(b) 環境衝擊指標

圖 29 混凝土差異對於橋梁設計與環境衝擊之影響 [33,34]

另外一個例子則是使用超高性能纖維混凝土與傳統混凝土的施工方法，分別製作一層樓住宅，並進行效能比較。結果發現，傳統做法需要 65 噸的一般混凝土，而超高性能纖維混凝土僅需要 19 噸。另外，使用超高性能纖維混凝土所製作的夾板隔間，可使得建物具有較佳的氣密性，可以減少大約 20 ~ 30 kWh/m².yr 的能量消耗。而兩種建造方式對於環境的衝擊，比較結果如圖 30 所示，同樣可以發現超高性能纖維混凝土所造成的環境衝擊較小。從前面的比較實例來看，超高性能纖維混凝土具有成為永續建築材料的潛力。

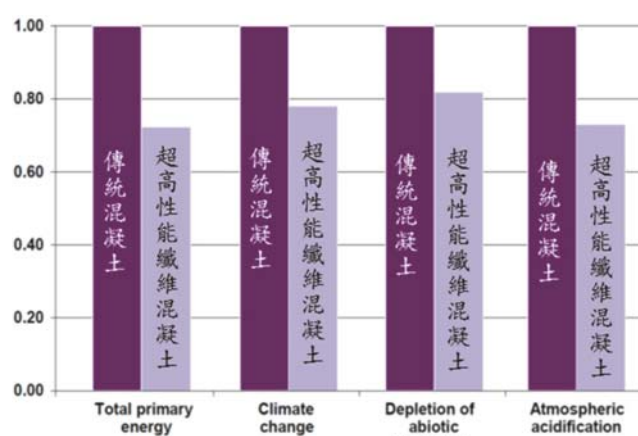


圖 30 房屋材料差異性於環境衝擊之影響 [33,34]

傳統公路護欄常因乾縮效應導致早期的裂縫產生，在寒帶國家的凍融現象下，護欄更易惡化而需經常維修，加拿大政府使用預鑄超高性能纖維混凝土公路護欄，可在減少傳統護欄 50% 的厚度下；提供良好之功能性與耐久性。超高性能纖維混凝土亦可應用於高流量交通公路的上層鋪面，如圖 31 所示，以提升鋪面的生命週期，減少維護需求。

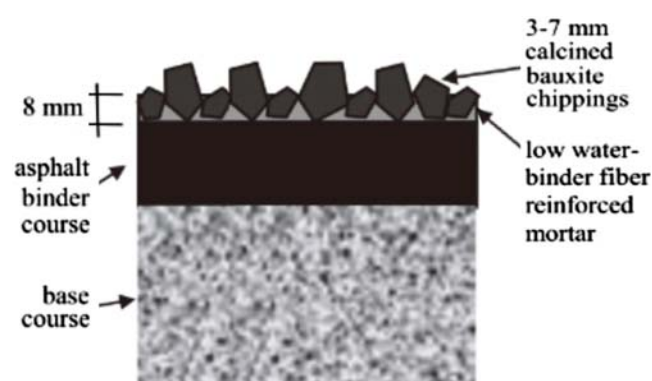


圖 31 超高性能纖維混凝土於鋪面應用案例 [54]

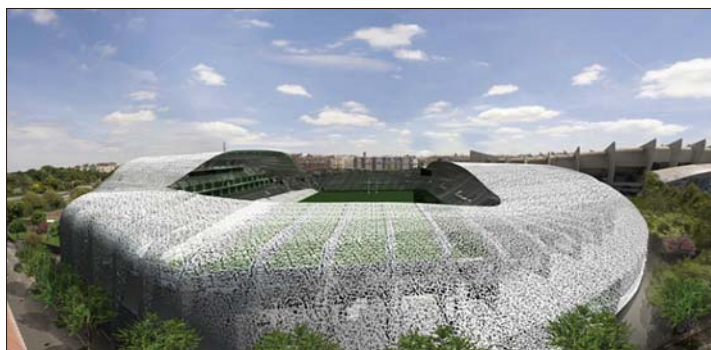
建築應用

超高性能纖維混凝土的高拉壓強度、韌性及耐久性，可以避免複雜的鋼筋設計，製成輕量且優雅的結構，並同時滿足土木結構的嚴格安全要求。它也可以在不使用任何鋼筋情況下，完成建築樓梯，並為其他細長預鑄產品提供可靠的結構安全性。此外，透過特殊配比設計，超高性能纖維混凝土可以獲得非常廣泛的紋理和顏色效果，並可結合預應力技術，協助工程師與建築師完成許多構架元素的創新設計。因此，超高性能纖維混凝土被建築師視為傳統混凝土與鋼材之外的第三種選擇。

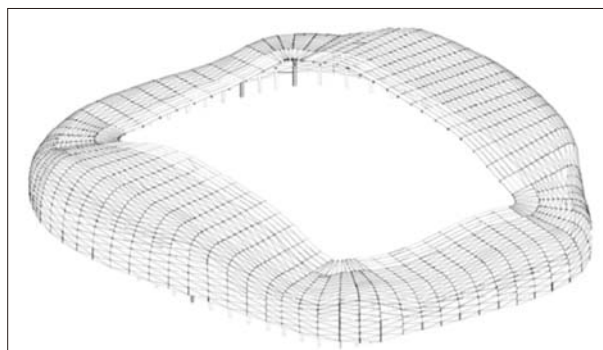
法國的 Jean Bouin 體育場重建計畫始於 2009 年年底，體育場屋頂跨越 11,500 平方米，目標設計容納 2 萬個座位。建築外部結構，見圖 32，由超高性能纖維混凝土

製成的網狀元素所組成，厚度僅約 45 mm，體育場所用超高性能纖維混凝土的材料面積在屋頂為 11500 平方米，立面為 9500 平方米。Jean Bouin 體育場重建計畫應用了超高性能纖維混凝土的多重性能，包括：結構性能、輕量、耐久性和水密性，透過超高性能纖維混凝土取代其他可能材料，有效降低材料用量，進而減少了工作的環境足跡。

法國 Enrico Navarra 美術館建立於 2007 年，建築設計目的為將整體美術館與自然景觀融為一體（見圖 33），因此外型上必須使用非常輕薄的斷面。屋頂的主要結構為 U 型梁的設計，其中最大斷面高為 50 公分，最小斷面高為 3 公分。為了確保此輕薄斷面能有效抵抗外力，其屋頂採用 20 片尺寸為 2 m × 10 m 之超高性能纖維混凝土薄板元素，製成懸臂超過 7 米之屋頂，並於一週內施工組立完成。



(a) 建築外部結構



(b) 三角形面板構成之網狀包絡

圖 32 法國 Jean Bouin 體育場 [33,34]



(a) 3 厘米厚邊緣的屋頂



(b) 美術館全景圖



(c) U 型懸臂版 (© Agence Rudy Ricciotti)

圖 33 法國 Enrico Navarra 美術館 (Rudy Ricciotti 建築師) [55,33,34,56]

建於 2008 年的法國 Sedan 市政廳與在巴黎左岸的 ZAC 公寓則可看到超高性能纖維混凝土多孔元件的例子，使光線巧妙地進入內部空間（見圖 34），可捕獲光的微妙厚度變化。其中，ZAC 公寓中的建模工作，利



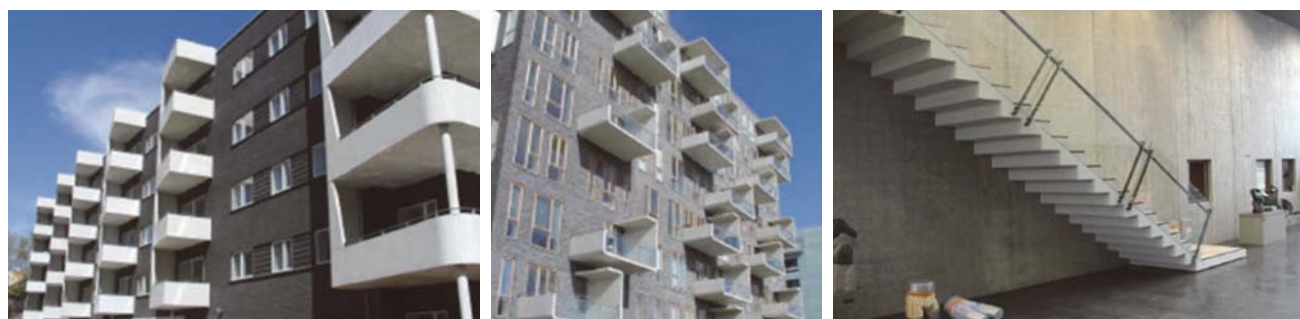
光線巧妙地進入內部 (© Philippe Ruault) ZAC 公寓的外牆元素 (© Betsinor) 填充面粗糙 (© Philippe Ruault)

圖 34 法國 ZAC 公寓 (Badia-Berger 建築師) [55]

用超高性能纖維混凝土優異的力學性能，由 15 m² 的 50% 中空超高性能纖維混凝土板所組成。

如圖 35 之陽台與樓梯，均採用超高性能纖維混凝土所製成，其剪力需求低於 5 MPa，不需設計剪力鋼筋，其中，建築師為了增加美觀會以白色砂砂取代配比中的傳統砂砂，使超高性能纖維混凝土能有白色外觀。

由 Rudy Ricciotti 所設計的歐洲與地中海文化博物館 (Museum of European and Mediterranean Civilizations)，如圖 36，坐落在河堤旁，必須能抵抗風力，且位在法國地震帶上。此博物館使用多元的超高性能纖維混凝土結構元素所建築完成，包含博物館內大跨距的超高性能纖



(a) 超高性能纖維混凝土陽台與柱

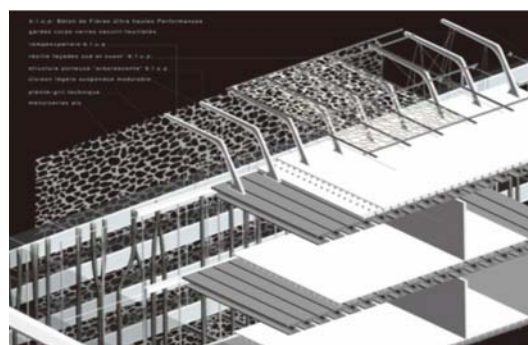
(b) 超高性能纖維混凝土陽台

(c) 超高性能纖維混凝土樓梯 (牆未支撐樓梯)

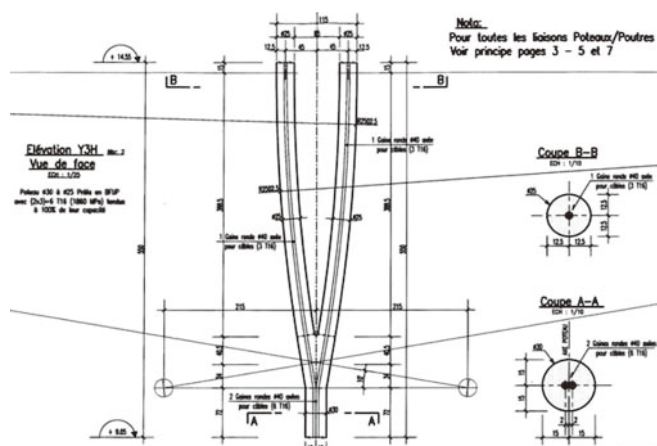
圖 35 超高性能纖維混凝土於陽台與樓梯應用 [57-60]



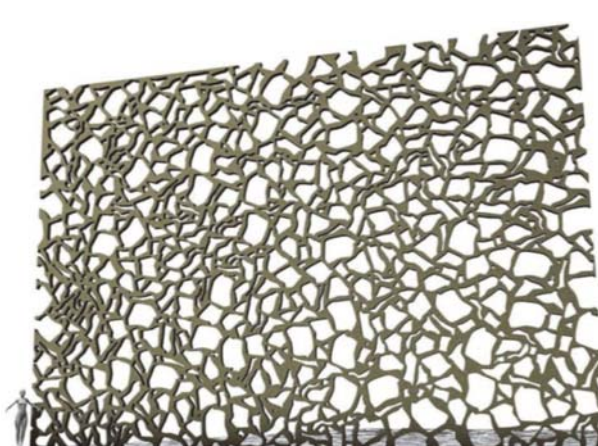
(a) 博物館外觀



(b) 超高性能纖維混凝土外層帷幕與支撐



(c) Y 型超高性能纖維混凝土柱



(d) 超高性能纖維混凝土外層帷幕元素

圖 36 法國歐洲與地中海文化博物館 [33,34]

維混凝土預力梁與結構柱（圖 33.5），其中部分柱外型採樹狀分支，如圖 36(c)，設計時須考慮挫曲和彎矩，柱本身設計有預力鋼腱，並設計可耐火時間達 1.5 小時。此外，博物館外層帷幕設計成網狀圖形（圖 36(d)），也是由超高性能纖維混凝土製成，此圖形採數學隨機亂數原理所描繪，而連結博物館外圍與內部的人行橋柵欄與行走通道板也是採用超高性能纖維混凝土所製成。

建造於 2001 年的法國 Bourg-lès- Valence 橋梁（圖 37(a)），為世界上第一座超高性能纖維混凝土公路橋梁，且布爾萊瓦朗克橋、高速鐵路烏爾克運河跨越橋（見圖 37(b)）、米洛高架橋收費亭（見圖 37(c)）以及多項建築產品（見圖 37(d-e)）亦均使用超高性能纖維混凝土於結構或補強目的。



(a) 法國 Bourg-lès- Valence 橋梁^[33,34]



(b) 高速鐵路烏爾克運河跨越橋^[61]



(c) 米洛高架橋收費亭^[62,63]



(d) 荷蘭超高性能纖維混凝土街道設施



(e) 超高性能纖維混凝土建築元素（Rudy Ricciotti 建築師）

圖 37 超高性能纖維混凝土之其他應用

結論

使用高性能纖維混凝土取代傳統混凝土材料所製成之結構構件，可有效提高結構構件之耐久性與服務年限，包含：抵抗反覆載重之疲勞行為、減少混凝土開裂滲透、降低鋼筋腐蝕機會、抑制塑性乾縮裂縫生成、以及減低潛變量等，因而可以有效減少日後維護、修繕及補強等相關時間與成本。高性能纖維混凝土除了力學行為上之優異性能，其材料配比中，採用永續綠色材料，如飛灰、爐石及矽灰等，因此為一種具有高性能力學性質之永續綠色建材，並已成為近年來國際土木材料工程中極受矚目之未來新型材料。高性能纖維混凝土的成功開發與廣泛應用，帶來混凝土科技一項嶄新的突破，藉由高性能纖維混凝土的使用，不僅可使得結構構件更輕、更薄、更具有耐久性，亦可有效降低施工時間，提升工程效率，此外，藉由高性能纖維混凝土之使用可有效減少橫向鋼筋之使用，並簡化鋼筋設計與施工，這些優勢將成為研究高性能纖維混凝土的助力。本文介紹了高性能纖維混凝土之廣泛應用，包含結構工程、地震工程、修復補強、減少環境衝擊、鋪面工程、橋梁與隧道交通工程、衝擊與爆炸防護、結構與非結構建築元素等，雖然目前許多混凝土科技先進國家均已發布高性能纖維混凝土使用與設計相關之建議手冊，未來仍需全球性的共同設計規範，使工程界能廣泛使用這項新型混凝土材料，此外，高性能纖維混凝土之產製流程，仍須仰賴專業人員的管控，以達良好與穩定之生產品質。台灣日後仍需持續透過密切之產官學合作，以逐步建立高性能纖維混凝土完整之生產與應用模式。當前僅是高性能纖維混凝土發展與應用的非常早期，在未來時間中，可以預期這項多功能混凝土材料將更快速進入並影響整個建築相關產業。

誌謝

本文作者感謝亞東預拌混凝土股份有限公司，與其永康預拌廠人員所提供之材料與人力，協助參與超高性能纖維混凝土之開發。亦感謝科技部與國家地震工程研究中心所提供之研究經費，以及作者所參與之國家地震中心高強度混凝土（New RC）研究團隊於高強度混凝土議題上之珍貴討論與意見。

文獻資料

- Hung, C. C. and Su, Y. F. (2013), "On modeling coupling beams incorporating strain-hardening cement-based composites," *Computers and Concrete*, Vol. 12, No. 4, pp. 565-583.
- Hung, C. C., Su, Y. F., and Yu, K. H. (2013), "Modeling the shear hysteretic response for high performance fiber reinforced cementitious composites," *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 37-48.
- Kim, K. and Parra-Montesinos, G. J. (2003), "Behavior of HPFRCC low-rise walls subjected to displacement reversals," *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)*, pp. 505-515.
- Lequesne, R. D., Setkit, M., Kopczynski, C., Ferzli, J., Cheng, M.-Y., Parra-Montesinos, G., and Wight, J. K. (2011), "Implementation of high-performance fiber reinforced concrete coupling beams in high-rise core-wall structures," *ACI Special Publication*, SP-280, pp. 94-105.
- Lequesne, R. D., Setkit, M., Parra-Montesinos, G. J., and Wight, J. K. (2009), "Seismic detailing and behavior of coupling beams incorporating high-performance fiber reinforced concrete," *Antoine E. Naaman Symposium Four decades of progress in prestressed concrete, fiber reinforced concrete, and thin laminate composites*, SP-272, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 14, pp. 205-222.
- Li, V. C., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M., and Keoleian, G. (2004), "Development of green ECC for sustainable infrastructure systems," *Proceedings of Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing.
- Parra-Montesinos, G. J. (2003), *HPFRCC in earthquake resistant structures: Current knowledge and future trends*. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 4 (HPFRCC 4), Proceedings of the Fourth International RILEM Workshop, Naaman AE and Reinhardt HW, eds, RILEM Publications SARL, Cachan Cedex, France, pp. 453-472.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., and Koh, K. T. (2011), "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 172-184.
- 洪崇展、曾柏庭、游文吉、黃忠良 (2011)，「使用高性能纖維混凝土於耦合結構牆以提升地震行為表現之有效性」，*結構工程*，第 26 卷，第 4 期，第 3-16 頁。
- 洪崇展、陳弘錡 (2015)，高強度鋼筋加勁超高性能纖維混凝土低矮型結構牆之反覆載重行為。
- Hung, C. C. and El-Tawil, S. (2011), "Seismic behavior of a coupled wall system with HPFRCC materials in critical regions," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 12, pp. 1499-1507.
- Hung, C. C. and Chen, Y. S. (2016), "Innovative ECC jacketing for retrofitting shear-deficient RC members," *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 408-418.
- Hung, C. C., Yen, W. M., and Yu, K. H. (2016), "Vulnerability and improvement of reinforced ECC flexural members under displacement reversals: Experimental investigation and computational analysis," *Construction and Building Materials*, Vol. 107, pp. 287-298.
- Hung, C. C. and Su, Y. F. (2016), "Medium-term self-healing evalu-

- ation of Engineered Cementitious Composites with varying amounts of fly ash and exposure durations,” *Construction and Building Materials*, Vol. 118, pp. 194-203.
15. Hung, C. C. and Yen, W. M. (2014), “Experimental evaluation of ductile fiber reinforced cement-based composite beams incorporating shape memory alloy bars,” *Procedia Engineering*, Vol. 79, pp. 506–512.
16. Hassan A.M.T, Jones S.W., Mahumd G.H. (2012), Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*. 37, pp. 1–9.
17. Baroghel-Bouny V. (ed.) (2004), *Conception des Bétons pour une Durée de vie Donnée des Ouvrages*, Association Française de Génie Civil.
18. Velez, K., Maximilien, S., Damidot, D., Fantozzi, G., and Sorrentino, F. (2001), “Determination by nanoindentation of elastic modulus and hardness of pure constituent of Portland cement clinker,” *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31, No. 4, pp. 555–561.
19. Ulm, F. J. et al. (2007), “Statistical indentation techniques for hydrated nanocomposites: Concrete, bone and shale,” *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 90, pp. 2677-2692.
20. Constantinides, G., Ravi, Chandran, K. S., Ulm, F. J., and Van, Vliet K. J. (2006), “Grid indentation analysis of composite microstructure and mechanics: Principles and validation,” *Mat. Sc. Eng.*, Vol. A 430, No. 1-2, pp. 189-202.
21. Constantinides, G. and Ulm, F. J. (2007), “The nanogranular nature of C-S-H,” *J. Mech Phy. Solids*, Vol. 55, pp. 64–90.
22. Hung, C. C. and Chueh, C. Y. (2016), “Cyclic behavior of UHPFRC flexural members reinforced with high-strength steel rebar,” *Engineering Structures*, Vol. 122, pp. 108-120.
23. Hung, C. C. and Li, S. H. (2013), “Three-dimensional model for analysis of high performance fiber reinforced cement-based composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 1441-1447.
24. Lequesne, R. D., Parra-Montesinos, G. J., and Wight, J. K. (2009), “Seismic detailing and behavior of coupled- wall systems with high-performance fiber-reinforced concrete,” *ACI Special Publication*, SP-265, pp. 1-18.
25. Kim, D. J., El-Tawil, S., and Naaman, A. E. (2009), “Rate-dependent tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites,” *Materials and Structures*, Vol. 42, No. 3, pp. 399–414.
26. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. (2006), “Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response,” *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 5, pp. 547–555.
27. Parra-Montesinos, G. J. (2005), “High-performance fiber reinforced cement composites: An alternative for seismic design of structures,” *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 5, pp. 668–675.
28. Parra-Montesinos, G. J., Canbolat, B. A., and Jeyaraman, G. (2006), “Relaxation of confinement reinforcement requirements in structural walls through the use of fiber reinforced cement composites,” 8th National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA.
29. Kesner, K. E. and Billington, S. L. (2005), “Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 11, pp. 1712-1720.
30. Li, V. C. (2003), “On engineered cementitious composites (ECC) – A review of the material and its applications,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 215-230.
31. Parra-Montesinos, G. J. and Chompreda, P. (2007), “Deformation capacity and shear strength of fiber reinforced cement composite flexural members subjected to displacement reversals,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 3, pp. 421–431.
32. Pigeon, A., Charlon, P., Sale, R.-G., and Novarin, M. (2007), “Renforcement du tablier du Pont sur l’Huisne Le Mans,” *Travaux*, No. 839, pp. 49–54.
33. AFGC (2002), “Bétons fibrés à ultra-haute performances (Ultra high performances fibre reinforced concretes),” SETRA – Service d’étude technique des routes et autoroutes, AFGC - Association française du génie civil, Interim Recommendations, p. 152, France.
34. AFGC (2002), Interim recommendations, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, AFGC, Paris.
35. Resplendino, J., et al. (2006), “Construction of an overpass on the highway A51 in box made of prestressed concrete high-performance fibre (BFUP),” *The Second International Fib Congress*, Naples.
36. Vinci Prize 2005, Project No. 096, An overpass at all levels, 2005.
37. Japan Society of Civil Engineers (2004), *Guidelines for the Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete*, JSCE.
38. AS 3600-2001, *Concrete Structures*, Standards Australia, Sydney, Australia, 2001.
39. Wight, G., Rebertrost, M., and Cavill, B. (2007), “Designing bridges with Ductal® reactive powder concrete,” *Proceedings of the 23rd Biennial Conference*, Concrete Institute, Adelaide, Australia, pp. 249-258.
40. Freytag, B., Reichel, M., Sparowitz, L., Heinzle, G., and Santner, G. (2009), “Full-scale experiment bridge WILD - Design of an UHPC arch bridge based on experiments,” (in German), *Beton- und Stahlbetonbau*, Vol. 104, No. 3, pp. 134-144.
41. Bierwagen, D. and McDonald, N. (2005), “Ultra high performance concrete highway bridge,” *Proc. Precast/Prestressed Concrete Institute National Bridge Conference*, Palm Springs.
42. Graybeal, B. (2010), “Behavior of ultra-high performance concrete connections between precast bridge deck elements,” *Proc., Concrete Bridge Conference*, Phoenix, Arizona, p. 13.
43. Graybeal, B. (2009), *Structural Behavior of a Prototype Ultra-High Performance Concrete Pi-Girder*, National Technical Information Service Report No. PB2009-115495, p. 145.
44. Garcia, H. (2007), *Analysis of an Ultra-High Performance Concrete Two-Way Ribbed Bridge Deck Slab*, National Technical Information Service Report No. PB2007-112112, National Technical Information Service, Washington DC.
45. Toutlemonde, F., Resplendino, J., Sorrelli, L., Bouteille, S., and Brisard, S. (2005), “Innovative design of ultra-high performance fiber-reinforced concrete ribbed slab: Experimental validation and preliminary detailed analyses,” 7th Int. Symp. HSC/HPC, Washington DC, USA, ACI SP-228, SP 228-76, pp. 1187-1206.
46. Jungwirth, J. (2006), *Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton*, thesis, EPFL Lausanne.

47. Ngo, T., Mendis, P., Lam, N., and Cavill, B. (2005), "Performance of ultra-high strength concrete panels subjected to blast loading," The 2005 Science, Engineering and Technology Summit, Canberra, Australia.
48. Gupta, A., Mendis, P., Ngo, T., and Rebstroff, M. (2006), "Modelling localised response of steel fibre reinforced ultra high-strength concrete panels under high velocity impact," Australasian Conference of Materials and Structural Mechanics, Christchurch, New Zealand.
49. Dutilleul, F., Thibaux, T., Cadoret, G., and Birelli, G. (1998), "BSI: A new, very high performance concrete. Initial industrial application," La technique française du béton/The French Technology of Concrete, XIII^e FIP Congress, Amsterdam, pp. 25-32.
50. Matsuoka, A. and Nishiba, T. (2007), "Irrigation channel repair work using ultra-high-strength fiber reinforced concrete panels," Journal of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering (JSIDRE), Vol. 75, No. 1, pp. 29-30.
51. Vande Voort, T., Suleiman, M., and Sritharan, S. (2008), Design and Performance Verification of UHPC Piles for Deep Foundations, Final Report to Iowa Highway Research Board, IHTB Project TR-558, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa.
52. Harryson, P. (2003), "High performance joints for concrete bridge applications," Structural Engineering International, Vol. 13, No. 1.
53. Perry, V., Scalzo, P., and Weiss, G. (2007), "Innovative field cast UHPC joints for precast deck panel bridge superstructures CN overhead bridge at Rainy Lake, Ontario," 2007 Concrete Bridge Conference, US.
54. De Larrard, F., Garcin, O., Hammoum, F., and Travers, F. (2005), "Preliminary tests on a hydraulic surface dressing for wearing courses with a long life, Technical note," Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 258-259, pp. 121-128.
55. Behloul, M. and Arsenault, J. (2007), "Ductal®: A durable material for durable structures," Proc. CONSEC'07, Tours, Toutlemonde F. (ed.), pp. 951-958.
56. CSTB, "Essais d'imperméabilité menés au CSTB, rapport d'essais n° EEM 08 26015708-1 concernant des essais d'imperméabilité sur des éprouvettes de Ductal® FM (Premix G3)," CSTB (2008).
57. Reargos (2009), "Brise soleil en Ductal® à Clichy-la-Garenne: Une précision géométrique," Creargos, April 11, (Available at: www.creargos.com/wps/portal/Creargos/realisations/reportage/vueensemble?path=/LAF_Ctg_Realisation_CR@LAF_Hierarchie_Realisation_CR/2/28, accessed 8.13.09).
58. AARUP B, CRC JointCast, a technical note that can be downloaded from the documentation page at www.crc-tech.com.
59. AARUP B, CRC – a description, a technical note that can be downloaded from the documentation page at www.crc-tech.com.
60. Rom, L., Ellegaard, P., and Aarup, B. (2005), "Slender CRC columns," Nordic Concrete Research, Vol. 34, No. 2, (also available for download following www.crc-tech.com).
61. Thibaux, T. (2005), "La Recherche sur les BFUP vers un nouveau mode de construction," Travaux, No. 821, pp. 31-34.
62. Hajar, Z., Simon, A., Thibaux, T., and Wyniecki, P. (2004), "Construction of an ultra-high performance fibre-reinforced concrete thin-shell structure over the Millau Viaduct toll gates," fib Symposium, Avignon (France), p. 236.
63. Dolo J.-M., Hajar, Z., Simon, A., Thibaux, T. (2005), Special issue "Viaduc de Millau," Travaux, No. 816, pp. 77-80. 



本文第一作者洪崇展教授，任職於國立成功大學土木工程學系。洪崇展教授 2001 年於國立成功大學土木工程系取得大學學位，並進行輕質材料之碩士論文研究，隨後前往行政院公共工程委員會，展開為期兩年的服務。2005 年赴美於 University of Michigan, Ann Arbor 攻讀土木工程博士學位，研究領域包含纖維混凝土、中高層 RC 耦合結構牆抗震系統、以及結構修復與補強。除了博士學位，於美期間，亦獲得機械工程碩士學位，其主要領域為智慧型材料與結構。2010 年，返國於國立中央大學土木工程系擔任助理教授，並於 2014 年轉任於國立成功大學土木工程系擔任副教授，2016 年升任教授。

洪崇展教授的研究目標為透過先進混凝土材料與結構之整合，提升混凝土建設於強烈地震與其他自然或人為災害下之安全性，以達成永續混凝土建設。研究興趣在開發新型混凝土材料與結構、並評估其在不同災害下之行為、以及發展有效之 RC 結構修復與補強方法。近十年來，主要專注於新型高強度與高韌性混凝土，相關研究成果，已發表逾 20 篇國際期刊文章。除了校內工作，洪崇展教授亦積極協助業界開發新型混凝土材料與應用，並與亞東混凝土預拌廠合作，完成高流動性—超高性能纖維混凝土之大型產製與灌漿作業。

洪崇展教授亦投入國內外相關學術委員會，目前為中華民國結構工程學會—超高強度鋼筋混凝土結構委員會之委員，台灣混凝土學會—非破壞性檢測技術委員會之副主任委員，台灣混凝土學會—抗耐震混凝土結構發展技術委員會之主任委員，美國土木工程師學會與混凝土學會之委員。除獲邀擔任美國第一屆國際高性能混凝土研討會之國際諮詢委員，目前亦擔任美國土木工程師學會—結構工程期刊 (ASCE Journal of Structural Engineering, SCI) 之副主編。近期獲得之獎項包含科技部優秀年輕學者獎 (2015)、Engineering Structures (SCI) 國際期刊之傑出審查 (2015)、國立成功大學工學院明日之星 (2015)、國立中央大學傑出研究獎 (2014)、國立中央大學工學院教學優良教師獎 (2013)、國立中央大學優良專項輔導導師獎 (2012)。