



超高性能混凝土 (UHPC)

材料與結構應用及文獻回顧

顏誠皜／國立成功大學土木工程系所 研究助理

洪崇展／國立成功大學土木工程系所 特聘教授

超高性能混凝土憑藉其傑出力學與耐久性能掀起當代營建材料的革命。優異的力學性質有利於設計出更細長薄的結構，增加建築物的可用空間，並簡化鋼筋設計，可有效降低勞動成本，並提供更大的建築自由度，使建築師與工程師發揮更具創意之構造型式。此外，呼應永續工程，超高性能混凝土相較傳統工法可大幅縮減斷面與材料用量，並具有優異之耐久性，可有效減少長期維修，能減少碳排放量，因此可視為綠色營建材料。

關鍵詞：超高性能混凝土、材料特性、工程應用

前言

混凝土在民生工程中扮演著舉足輕重的角色，一般而言，使用者期待鋼筋混凝土構造物能使用至少五十年，然而其本身強度、耐久性及工作性不足，往往使得結構物服務性能打折甚至縮減了生命週期，無法符合社會大眾普遍期待，因此業主需要額外耗費修繕與重建的費用。有鑑於此，過去的四十年中產官學界積極尋求新的混凝土材料以解決此缺陷，並嘗試開發高性能水泥基質材料。

超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete，簡稱 UHPC) 為現今國際間受矚目的一種新型營建材料，其核心概念為開發具有非常緻密且均質的水泥基體，以防止在承受載重時結構內產生微裂紋。早期稱這類型混凝土材料為活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete，簡稱 RPC)，主要使用惰性或具膠結性的礦物摻料，相較傳統混凝土 (NSC) 添加粗細粒料，粒料彼此間縫隙大，造成孔隙因而力學強度與耐久性不足，RPC 捨棄使用粗粒料改用材料粒徑小於 1 mm 的填充料以達到高堆積密度^[1]。美國混凝土協會 ACI 將 UHPC

定義為「抗壓強度至少為 150 MPa (22 ksi) 且具有耐久性、拉伸延性及韌性要求的混凝土；通常包含達到規定要求的纖維」。

UHPC 兼具卓越之力學特性^[2-5]與耐久性能^[6,7]，超高性能混凝土 (UHPC) 的抗壓強度約為傳統混凝土的 4 倍以上；此外，傳統混凝土並不具有可利用之抗拉性質，而 UHPC 透過添加 0.5% ~ 3.0% 體積含量之纖維，其抗拉強度提升至 60 kgf/cm² 以上，約為傳統混凝土之 5 倍以上，同時間延展性與能量吸收提升至高性能混凝土 (HPC) 的 300 倍，其極限拉應變可達到 6%，約為傳統混凝土的一百倍以上，且透過添加纖維 UHPC 能有效控制裂縫並延緩混凝土剝落問題^[8-13]。一般而言，UHPC 的彈性模數介於 30 至 60 GPa、而撓曲強度於 150 kgf/cm² 至 400 kgf/cm² 之間^[2,6,14,15]。類似於高韌性水泥基複合材料 (Engineered Cementitious Composites，簡稱 ECC)^[16-24]，UHPC 藉由內部纖維所提供之橋接效應 (Bridging Effect)，使其具備擬應變硬化行為 (Pseudo Strain-hardening)，如圖 1 所示，此為 UHPC 特有的現象亦是除了強度外判定是否能稱為 UHPC 的重要標準。

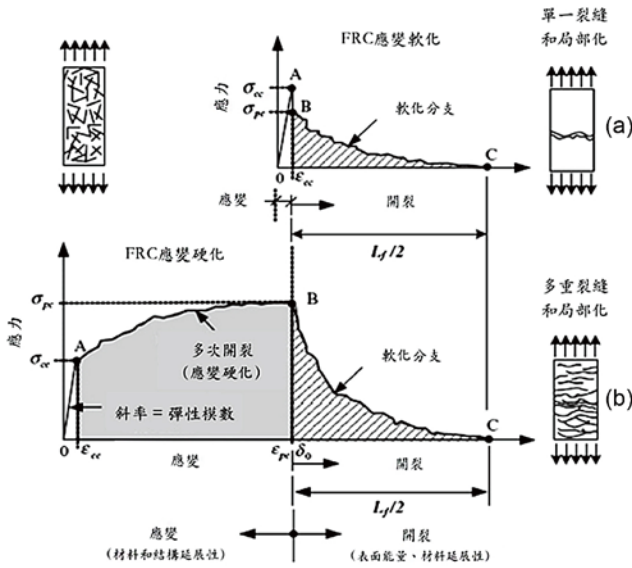


圖 1 拉伸應變軟化與硬化行為 [25]

除此之外，UHPC 的水膠比通常小於 0.25，使得 UHPC 水化產物的結構非常緻密，並大幅減少毛細孔隙，因此具備抗碳化、抗凍融及低滲透性，藉此可延長結構體服務年限，同時減少維護成本。洪崇展與黃皇川 [26] 研究 UHPC 耐久性隨齡期之變化關係，研究結果證實 UHPC 之電阻係數於 28 天可達 300 kΩ·cm 以上，於 120 天更可高達 700 kΩ·cm，約為市售抗滲混凝土的 10 倍，根據 AASHTO T358-15 的標準，UHPC 已達到可完全忽略侵蝕的層級 (> 254 kΩ·cm)。此外，類似於 ECC 材料 [16-23]，UHPC 基質中存在大量未水化之膠結材料，在開裂情況並於適當環境下，提供自我修復潛力並有限度的將裂縫癒合 [17,19,21]。

在永續工程的層面上，由於 UHPC 之優異力學與耐久性質，可以減少結構體的斷面與材料量體，若以 UHPC 取代傳統混凝土，整體結構重量得減少三分之一或二分之一 [27]，不僅減少結構呆載重、亦可縮短施工時間，因此整體材料與機具所產生的碳排放量能有效降低，可減少二氧化碳排放量約 50% [28-31]。

UHPC 之性質

強度是評估水泥機質材料重要的依據。UHPC 的抗壓、抗拉與抗彎強度可達到 1,200 kgf/cm²、60 kgf/cm² 及 150 kgf/cm² 以上，差異具體取決於成分、纖維、澆灌及養護條件。UHPC 的高抗壓強度在受壓構件中是具競爭力的，因為 UHPC 具有較高的抗壓與抗拉強度，能夠抵抗軸向壓縮應力與橫向拉伸應力，並且，進而減少所需的橫向鋼筋 [2,10,32-35]，並降低混凝土剝落問題。Chao 等

人 [36] 研究指出相較傳統混凝土柱，UHPC 柱具備更高的損傷容忍程度，且擁有較高的強度與位移韌性。

UHPC 撓曲性能主要表現為單軸壓縮與拉伸的應力應變關係，在 UHPC 構件中，抗拉強度不能被忽略 [11,37,38]，因為它對受彎構件的受拉區的強度有貢獻 [2,8]，Chao 等人 [39] 研究 UHPC 梁撓曲行為，結果顯示 UHPC 梁具有較高的開裂強度，且即使縱向鋼筋量高，仍可藉由本身的高抗壓強度使梁具有高彎矩強度、彎矩曲率及抗疲勞能力。Sturm 等人 [37] 研究短、長及混合纖維對 UHPC 撓曲強度之影響，結果顯示短纖維能增加極限強度、降低撓度並抑制裂縫寬度，將 50% 短纖維以長纖維替代後，可以增加 UHPC 壓碎之荷載但破壞時的撓度減小。許多研究將 UHPC 用於複合鋼承板系統中，用以取代傳統混凝土 [40-42]。Xiao 等人 [40] 研究指出 UHPC 複合鋼承板系統可以提升撓曲行為、延展性與勁度，且可避免傳統混凝土鋼承板出現的貫穿剪力破壞。

UHPC 中的纖維橋接裂紋間隙因此增加了 UHPC 的剪力強度 [2]。洪崇展與溫國威 [43] 利用 UHPC 梁研究剪力強度，結果顯示 UHPC 可以提供比 ACI 318 規範高四倍以上的混凝土剪力強度，此外，使用混合纖維之 UHPC 能將剪力破壞的梁轉化為撓曲破壞 [44,45]。Hung 與 Hsieh [46] 研究指出 UHPC 結合高強度鋼筋，得以提升 RC 結構牆之耐震行為，橋接效應將集中裂縫轉變為細緻多重裂縫，並有效提升結構牆的韌性與強度，結果證實相較高強度混凝土，UHPC 可以提供約兩倍的混凝土剪力強度。添加鋼纖維於 UHPC 中增加了梁的開裂與極限抗扭能力，並增加了梁的抗扭延展性、開裂後勁度及韌性 [47,48]。此外，Fehling 與 Ismail [47] 研究發現纖維數量的增加，裂紋數量將增加，但裂紋寬度較小，而纖維的分布與方向性影響裂縫的角度。

此外，UHPC 具備優異的抗衝擊性 [49,50]，常被用作軍事、銀行或防撞護欄等重要設施中，Zhang 等人 [51] 指出隨這鋼纖維含量的增加，可降低衝擊坑直徑與裂縫擴展，但對貫入深度沒有顯著影響。此外，由於能阻礙裂縫擴展，使用花崗岩作為粗粒料有利於 UHPC 之抗衝擊性。

借重 UHPC 卓越的力學性與黏附力，國外將其應用於鋪面、橋墩柱、建築工程、及函管等補強工程中。此外，UHPC 可提升與鋼筋之間的握裹力，因此具備簡化錨定鋼筋型式與長度的能力，從而簡化鋼筋綁紮與混凝土澆置程序。Graybeal 於美國聯邦公路管理局

的報告中^[52]指出使用UHPC可以將複雜的鋼筋錨定型式(U型或90度彎鉤)簡化成直線型,且錨定長度可縮減至8-10倍主筋直徑。

洪崇展與周笙展^[53]開發UHPC斜撐於門形構架之補強工法,與未補強的構架相比,可於受壓與受拉之強度向提升3.6與1.6倍,於勁度提升3.1與4.8倍。洪崇展與王昱棋^[54]開發超高性能混凝土噴漿補強,透過噴漿系統結合UHPC漿體於施作面均勻噴塗薄層,可依照需求選擇是否貼附鋼筋網,整體工法具有免除模版之優勢,實驗結果顯示,補強後能使極限強度發生於較後期之層間位移比,且在較高的位移比仍舊保有較高的側力強度,補強後分別提升磚牆極限變形量與側向強度200%與121%。洪崇展等人^[10,35,55]研究包含場鑄與預鑄版貼覆之UHPC柱補強工法,在有限度或不增加原斷面下,UHPC包覆補強即可提高耐震性能,其中輕薄預鑄版可像磁磚一般於現場貼覆組裝,並於間隙澆置UHPC,工法屬半乾式施工且免除模版工程,因此得降低時間成本、保持施工環境整潔且可深入施工環境艱困區域。施工程序上僅需剷除既有保護層並利用UHPC包覆至原有斷面尺寸,結果證明可提升柱構件側向強度達50%,同時極限層間位移角可提升200%以上(由補強前之1.5%,大幅提升至5.0%),值得注意的是,柱構件之破壞模式由不具韌性的剪力破壞轉變為撓剪破壞或撓曲破壞。

UHPC 國內外應用案例

國外應用案例

建立在充分的研究基礎上,國外已經將UHPC推向實務面並完成許多應用,尤其是在歐洲、北美洲、中國與東亞,初期主要為橋梁應用居多,相較於傳統混凝土,使用UHPC可大幅提升構件之勁度與強度,更可進一步搭配預力之使用,設計更細長之UHPC橋梁構件,以美國為例,截至2020年統計UHPC公路橋梁的應用超過300餘座。美國近年來推行橋梁無伸縮縫的設計,連接版(Link Slab)為其中相當廣泛的應用,此工法盛行於麻州、紐約州、麻里蘭州及維吉尼亞州,其概念為直接連接兩端橋面版,橋面版並無任何縫隙,此工法可改善傳統伸縮縫讓氫離子或水氣侵入橋梁下部結構的問題,進而延長橋梁生命週期。然而連接版之材料選用須著重其抗拉與裂縫控制能力,UHPC之抗拉強度遠大於傳統與高強度混凝土,且具

有極高之抗裂能力,滲透係數亦為傳統混凝土的千分之一,因而許多研究與實務工程開始應用UHPC於連接版^[56,57],其亦被美國聯邦公路管理局與各州運輸部作為橋面版連接材料的首選^[58,59]。馬來西亞於2011年完成了一座UHPC新建橋梁,由於UHPC的優異抗剪能力,大梁並未設計任何剪力鋼筋,相較原來的鋼結構設計版本,UHPC無須落墩於河面,提升整體美觀性並降低修繕成本,此外碳排放量更是相較鋼構橋減少57%,整體造價減少27%^[60]。位於法國的馬賽,其中一座高樓利用UHPC作為外牆版,借重其力學性凸顯出重量輕薄(35 mm)且符合成本效益,從而降低了運輸、安裝及對主結構物的負載,且因該建築物鄰近地中海而空氣鹽分相對高,UHPC之耐久性可抵抗惡劣的環境並延長使用時間^[61]。

國內應用案例

相較於國外UHPC的盛行,國內於近年來才漸漸推行UHPC於實務中。臺南都會區北外環道路率先於國內橋梁工程採用超高性能混凝土,如圖2(a),用於取代傳統伸縮縫中容易受損之高強度無收縮砂漿。考量UHPC相較於傳統混凝土具有超高強度、高韌性與優異抗衝擊能力等特色,應用於工程上可降低結構鋼筋用量、混凝土用量及增加耐久性,可大幅降低長期維修成本,該工程選三處之橋面伸縮縫採用UHPC取代高強度無收縮混凝土(420 kgf/cm²),其中所採用之UHPC,抗壓強度7天達1,200 kgf/cm²;28天達1,400 kgf/cm²(CNS 1010),28天抗彎強度300 kgf/cm²(CNS 1233),28天電阻抗(AASHTO T358-15)大於300 kΩ-cm,不僅可完全忽略生命週期中受侵蝕之可能性,且同時兼具自充填能力(流動性高於60公分)與高力學性質。

此外於民生工程中,坐落於台南市鹽水區的鹽水車站倉庫樹屋群利用三角形UHPC薄版取代鋼鈹,製作成補強老舊山牆的斜撐,如圖2(b)。於台南市熱鬧的老街中其建築多屬清領或日治時期的兩層樓鋪瓦磚牆結構,普遍耐震性能無法符合現今規範,但為保留其歷史價值,選擇以UHPC噴漿工法進行單面補強如圖2(c),僅僅四公分厚度,不僅有效利用本已狹窄的空間,更得以提升磚牆面內剪力與抗倒塌之能力。相較於傳統剛性鋪面,UHPC抗壓強度為3倍以上,耐磨性約為4至8倍,抗滑可達到80BPN(英式擺垂試驗),可大幅改善車輛衝擊與輪胎磨損造成的劣化,有



圖 2 UHPC 於國內應用案例

鑑於此，國內化工廠因長期受重車輾壓導致反覆修整地坪，該業主改利用 UHPC 取代傳統工法作為其工廠內重要路線的地坪用，如圖 2(d) 所示。

結論

超高性能混凝土設計透過減少孔隙率、改善微結構及提高均質性來優化其性質，原料選用、製備程序及養護方式對 UHPC 的性能皆有顯著影響。超高性能混凝土已具備相當完善的科學研究且有充足的國際科學文章佐證，出色的力學、良好的韌性及卓越的耐久性，皆證明 UHPC 具備潛力，此材料不僅僅是衝擊傳統混凝土的思維，更具有與鋼材料競爭的能力。此外，UHPC 能提升構建之服務年限，大幅度降低修繕成本，可歸類於永續綠色建材，符合永續工程的普世價值。近年來國際上已廣泛運用此嶄新的營建材料於結構工程、耐震修復、耐久性補強、鋪面工程、橋梁、以及建築元素等。隨著 UHPC 的廣泛應用，包含美國、法國、澳洲、中國及日本等已相繼針對此發布使用與設計相關之建議手冊，使工程界得以依循。然而，國內相對國外發展與應用超高性能混凝土較晚，且其產製程序仍須仰賴專業人員的管控，以達良好與穩定之品質。日後台灣仍須透過密切之產官學合作，引入超高性能混凝土於國內工程中，積極搭上這股新世代混凝土革命。

參考文獻

- Schmidt M and Fehling E., Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. ACI Spec Publ. 2005, 228:51-78.
- Hung C-C, El-Tawil S, and Chao S-H., A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design. Journal of Structural Engineering. 2021, 147:03121001.
- Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, and Fang Z., A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. Construction and Building Materials. 2015, 101:741-51.
- Wille K, Naaman AE, and Parra-Montesinos GJ., Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. ACI materials journal. 2011, 108.
- Saleh E, Tarawneh A, Naser M, Abedi M, and Almasabha G., You only design once (YODO): Gaussian Process-Batch Bayesian optimization framework for mixture design of ultra high performance concrete. Construction and Building Materials. 2022, 330:127270.
- Li J, Wu Z, Shi C, Yuan Q, and Zhang Z., Durability of ultra-high performance concrete—A review. Construction and Building Materials. 2020, 255:119296.
- Voo YL and Foster SJ., Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 2010, 3:168-87.
- Hung C-C and Chueh C-Y., Cyclic behavior of UHPFRC flexural members reinforced with high-strength steel rebar. Engineering Structures. 2016, 122:108-20.
- Hung C-C and El-Tawil S., Hybrid Rotating/Fixed-Crack Model for High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites. ACI Materials Journal. 2010, 107.
- Hung C-C, Kuo C-W, and 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, 44:103305.
- Hung C-C, Lee H-S, and Chan SN., Tension-stiffening effect in steel-reinforced UHPC composites: constitutive model and effects of steel fibers, loading patterns, and rebar sizes. Composites Part B: Engineering. 2019, 158:269-78.
- Hung C-C, Li H, and Chen H-C., High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: cyclic behavior and design implications. Engineering Structures. 2017, 141:59-74.
- Sturm A, Visintin P, and Oehlers D., Rational design approach for the instantaneous and time-dependent serviceability deflections and crack widths of FRC and UHPFRC continuous and simply supported beams. Journal of Structural Engineering. 2019, 145:04019138.
- Hung C-C, Chen Y-T, and Yen C-H., Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers. Construction and Building Materials. 2020, 260:119944.
- 洪崇展、戴艾珍、顏誠崎、溫國威、張庭維，新世代多功能性混凝土材料 - 高性能纖維混凝土，土木水利，2017，44:33-51.
- Hung C-C and Chen Y-S., Innovative ECC jacketing for retrofitting shear-deficient RC members. Construction and building materials. 2016, 111:408-18.
- Hung C-C and Hung H-H., Potential of sodium sulfate solution for promoting the crack-healing performance for strain-hardening cementitious composites. Cement and Concrete Composites. 2020, 106:103461.
- Hung C-C and Su Y-F., On modeling coupling beams incorporating strain-hardening cement-based composites. Computers and Concrete. 2013, 12:565-83.
- Hung C-C and Su Y-F., Medium-term self-healing evaluation of engineered cementitious composites with varying amounts of fly ash and exposure durations. Construction and Building Materials. 2016, 118:194-203.
- Hung C-C, Su Y-F, and Hung H-H., Impact of natural weathering on medium-term self-healing performance of fiber reinforced cementi-

- tious composites with intrinsic crack-width control capability. *Cement and Concrete Composites*. 2017, 80:200-9.
21. Hung C-C, Su Y-F, and Su Y-M., Mechanical properties and self-healing evaluation of strain-hardening cementitious composites with high volumes of hybrid pozzolan materials. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 133:15-25.
 22. Hung C-C, Yen W-M, and Yu K-H., Vulnerability and improvement of reinforced ECC flexural members under displacement reversals: Experimental investigation and computational analysis. *Construction and Building Materials*. 2016, 107:287-98.
 23. 袁宇秉、洪崇展、Victor C Li., 應用高韌性纖維混凝土 (ECC) 邁向永續基礎設施工程, 中國土木水利工程學刊, 2020, 32:713-20.
 24. Do TDD, Yen K-J, Yen C-H, and Hung C-C., Impact of tension stiffening on the tensile and flexural behavior of ECC ferrocement. *Construction and Building Materials*. 2022, 329:127201.
 25. Park SH, Kim DJ, Ryu GS, and Koh KT., Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2012, 34:172-84.
 26. 黃皇川, 超高性能混凝土抗壓性質與耐久性隨齡期之變化關係, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導, 2019.
 27. AFGC., Interim recommendations, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, AFGC, Paris. 2002.
 28. Dong Y., Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*. 2018, 167:414-25.
 29. Randl N, Steiner T, Ofner S, Baumgartner E, and Mészöly T., Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. *Construction and Building Materials*. 2014, 67:373-8.
 30. Sheheryar M, Rehan R, and Nehdi ML., Estimating CO2 Emission Savings from Ultrahigh Performance Concrete: A System Dynamics Approach. *Materials*. 2021, 14:995.
 31. Yu R, Spiesz P, and Brouwers H., Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*. 2015, 55:383-94.
 32. Hung C-C and Hu F-Y., Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading. *Construction and Building Materials*. 2018, 175:422-33.
 33. Hung C-C, Hu F-Y, and Yen C-H., Behavior of slender UHPC columns under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2018, 174:701-11.
 34. Hung C-C and Yen C-H., Compressive behavior and strength model of reinforced UHPC short columns. *Journal of Building Engineering*. 2021, 35:102103.
 35. Shao Y, Kuo C-W, and Hung C-C., Seismic performance of full-scale UHPC-jacket-strengthened RC columns under high axial loads. *Engineering Structures*. 2021, 243:112657.
 36. Chao S, Shamshiri M, Liu X, Palacios G, Schultz A, and Nojavan A., Seismically Robust Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*. 2021, 118:17-32.
 37. Sturm AB, Visintin P, and Oehlers DJ., Blending fibres to enhance the flexural properties of UHPFRC beams. *Construction and Building Materials*. 2020, 244:118328.
 38. Sturm A, Visintin P, Seracino R, Lucier G, and Oehlers D., Flexural performance of pretensioned ultra-high performance fibre reinforced concrete beams with CFRP tendons. *Composite Structures*. 2020, 243:112223.
 39. Chao S-H, Kaka V, and Shamshiri M., Toward A Non-Prestressed Precast Long-Span Bridge Girder Using UHP-FRC. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete: Iowa State University Digital Press*, 2019.
 40. Xiao J-L, Zhou M, Nie J-G, Yang T-Y, and Fan J-S., Flexural behavior of steel-UHPC composite slabs with perfbond rib shear connectors. *Engineering Structures*. 2021, 245:112912.
 41. Shao X, Qu W, Cao J, and Yao Y., Static and fatigue properties of the steel-UHPC lightweight composite bridge deck with large U ribs. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018, 148:491-507.
 42. Cheng Z, Zhang Q, Bao Y, Deng P, Wei C, and Li M., Flexural behavior of corrugated steel-UHPC composite bridge decks. *Engineering Structures*. 2021, 246:113066.
 43. Hung C and Wen K., Investigation of shear strength of ultra-high performance concrete beams without stirrup. *Proc, 17th World Conf on Earthquake Engineering, 17WCEE Tokyo: International Association for Earthquake Engineering 2020*.
 44. Bermudez M and Hung C., Shear Behavior of Steel Reinforced Ultra High Performance Concrete Members with Hybrid Fibers. *EASEC16: Springer*, 2021. pp. 1645-54.
 45. Bermudez M, Wen K-W, and Hung C-C., A Comparative Study on the Shear Behavior of UHPC Beams with Macro Hooked-End Steel Fibers and PVA Fibers. *Materials*. 2022, 15:1485.
 46. Hung C-C and Hsieh P-L., Comparative study on shear failure behavior of squat high-strength steel reinforced concrete shear walls with various high-strength concrete materials. *Structures: Elsevier*; 2020. p. 56-68.
 47. Fehling E and Ismail M., Experimental Investigation on UHPC Structural Elements Subject to Pure Torsion. *Proceeding: Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete 2012*.
 48. Yang I-H, Joh C, Lee JW, and Kim B-S., Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams. *Engineering Structures*. 2013, 56:372-83.
 49. Ngo T, Mendis P, Lam N, and Cavill B., Performance of ultra-high strength concrete panels subjected to blast loading. *The 2005 Science, Engineering and Technology Summit*, 2005.
 50. Gupta A, Mendis P, Ngo T, and Rebstrost M., Modelling Localised Response of Steel Fibre Reinforced Ultra High-Strength Concrete Panels Under High Velocity Impact. *Australasian Conference of Materials and Structural Mechanics 2006*.
 51. Zhang M, Shim V, Lu G, and Chew C., Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, 31:825-41.
 52. Graybeal B., Design and construction of field-cast UHPC connections. *United States. Federal Highway Administration*, 2014.
 53. 周筌展, 超高性能混凝土 (UHPC) 預鑄斜撐於構架之耐震補強, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導, 2021。
 54. 王昱棋, 超高性能混凝土 (UHPC) 噴漿工法於含磚牆 RC 構架之耐震補強, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 洪崇展指導, 2021。
 55. 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, 32:693-9.
 56. Caner A. Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks. 1998.
 57. Doiron G and White P., UHPC link slab solutions in North America. *AFGC-ACI-fib-RILEM International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete 2017*, pp. 2-4.
 58. Haikal G, Ramirez JA, Jahanshahi MR, Villamizar S, and Abdelaleim O., Link Slab Details and Materials. 2019.
 59. Royce M., Utilization of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in New York. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete: Iowa State University Digital Press*, 2016.
 60. Lei V-Y, Nematollahi B, Said ABM, Gopal BA, and Yee TS., Application of ultra high performance fiber reinforced concrete-The Malaysia perspective. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2012, 3:26-44.
 61. Toutlemonde F, Bernadi S, Brugeaud Y, and Simon A., Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC. *UHPC 2018, 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures: International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials ...*, 2018. p. 24 p., bibliogr. 