

超早強鋼纖維混凝土應用於特殊工程之可行性評估

賴怡君上尉、李明輝教授、戴毓修工程師

提要

- 一、超早強鋼纖維混凝土是新興的營建材料，同時兼具超早強混凝土迅速凝結硬固，及鋼纖維混凝土高強度與高抗張性能之特點，對於高抗張能力要求之急迫性工程，能發揮極大作用。
- 二、舉凡道路搶修、隧道開通、橋面開通、機場道路鋪設，甚至是預鑄工程，無論是平時或戰時之民間建設或軍事工程興建，超早強鋼纖維混凝土都能發揮材料優勢，突破現階使用材料時間與強度上之限制。
- 三、本文中針對此材料進行介紹，並以實際實驗測試材料性能與施工可行性，證實超早強鋼纖維混凝土能妥善應用於戰鬥工事與防禦建設，為未來軍事工程提供另一種更速捷、更高性能之建設材料。

關鍵字：超早強鋼纖維混凝土、鋼纖維、軍事工程

前言

混凝土是當今使用最廣泛的工程材料，廣泛的用於道路、橋樑、隧道與建築物等各種設施。其強度與可塑性是混凝土施工中的基本要素。然而，一般混凝土於澆置後需實施至少 7-14 日之養護，才能完全硬化，並且需要達到設計抗壓強度的

七成，才被視為具有足夠之抗壓強度，並進行脫模與後續之工項。¹但對於許多具有時效性的專案，諸如高速公路路面、橋樑結構、機場跑道等重要工程之興建或維護，冗長的工期將導致較長的交通封閉期，對民眾生活便利性造成極大影響，同時，對於交通壅塞導致的碳

¹ Yasin, A. K., Bayuaji, R., & Susanto, T. E. (2017). A review in high early strength concrete and local materials potential. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 267, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.

排放增加，亦不是現今政府或是施工單位所樂見。若能採用適當的方式縮短工期將能消弭對人民生活影響的直接衝擊。另外，間接受益的是對工程成本的節約，無論是預鑄混凝土或現地澆置，縮短凝固時間，減少拆脫模板的期程，可加速模板的再利用率，提升施工效率，若能縮短 50%的工期，將可降低超 20%的間接成本。²

為此，已有許多工程實績應用早強混凝土，其透過材料配比設計及養護環境之控制，在澆築後 1-3 天內即可獲得足夠的強度，進行拆模，大幅縮短施工的時間。但對於特殊的急迫性工程而言，諸如戰時機場跑道修復、臨時便道搭設等，時間仍嫌過長，也因此能在 1 天

內甚至幾小時時間就可完工之超早強混凝土，成為致力發展的目標。

超早強混凝土的特性在於極短的時間內即能快速發展出強度，主要是以外加劑及加熱養護系統的輔助，以達到超早強特性。³ 隨著化學添加劑的研發及蒸養設備的提升，要達到超早強混凝土的標準並非難事，但伴隨的問題仍不可忽視。例如，澆置初期強度迅速發展，迅速產生的水化熱易造成體積膨脹，從而產生更大程度的體積收縮，另外，在硬化過程中因溫度造成的熱應變，導致收縮應變超過拉伸應力造成的應變，使混凝土材料開裂，降低強度及耐久性。⁴ 鑒於混凝土開裂的主要原因，是由於混凝土體

² Ghosh, D., Abd-Elssamd, A., Ma, Z. J., & Hun, D. (2021). Development of high-early-strength fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121051.

Golaszewski, J., Cygan, G., & Golaszewska, M. (2019). Development and optimization of high early strength concrete mix design. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 11, p. 112026). IOP Publishing.

Sika Services AG, *Sika Concrete Handbook*, Zurich: Sika Services AG, 2013.

³ Golaszewski, J., Cygan, G., & Golaszewska, M. (2019). Development and optimization of high early strength concrete mix design. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 11, p. 112026). IOP Publishing.

⁴ 同註 3 及 Li, M., & Li, V. C. (2011). High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites for Fast, Durable Concrete Repair-Material Properties. *ACI materials journal*, 108(1). ; 6. Safiuddin, M. D., et al. "Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations." *Applied Sciences* 8.10 (2018): 1730. ; 7. Do, Tu Anh, et al. "Evaluation of heat of hydration, temperature evolution and thermal cracking risk in high-strength concrete at early ages." *Case Studies in Thermal Engineering* 21 (2020): 100658. ; 8. Mihashi, H.; Leite, J.P.D.B. State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* 2004, 2, 141-154.。

積迅速的膨脹與收縮所致，許多研究也提出了改善策略，例如透過使用無收縮藥劑降低混凝土釋放之水化熱以抑制體積過度的膨脹。另外，亦可由控制養護環境、溫度或濕度等方面著手，將可明顯改善初期混凝土內外溫差造成的裂縫。另外，工程對力學性質有更高要求的工程項目，通常會透過添加纖維以提升抗彎性質及抗張能力，同時也能藉由纖維增加混凝土體積的穩定性。⁵

一般而言，混凝土常以抗壓強度作為驗收標準，混凝土材料的特色在於高抗壓性，但承受拉力及彎曲能力較差，限制了工程的結構設計與應用層面。隨著力學理論的發展與試驗量測儀器的精進，混凝土的抗彎強度在許多工程中越來越受到重視，如交通工程中，道路鋪面需避免溫度變化或行駛車輛交互作用，導致鋪面產生反射裂縫及角隅破裂等損壞狀況(如圖 1)，因此，抗彎強度也常列為材料性質檢驗中不容忽視的項目之一。

為了增加道路的品質與耐久性，鋪面材料需具有足夠的

抗彎強度，且材料的抗彎強度也會影響鋪面的設計厚度。剛性路面所使用之混凝土抗彎強度設計一般大於 **500psi**，而工業用剛性路面或機場跑道所用的混凝土抗彎強度則應大於 **650psi**。⁶ 雖然添加摻料或經由特殊養護後，混凝土要達到 **650psi** 之抗彎強度並非難事，然而長年承受反覆載重作用，原屬脆性材料之混凝土難免有裂紋產生，混凝土開裂後，造成工程強度降低甚至失效，尤其是為了盡早通行常以早強混凝土來鋪設，而早強混凝土本身也因快速水化作用而潛藏產生裂縫隱憂。為了解決此一難題，許多的工程逐漸引入纖維以增



圖 1 鋪面之反射裂縫

資料來源：[https://me-](https://medesign.com/medesign/data/Reflection%20Cracking_Addendum%20to%20MOP_25December2015.pdf?AspxAutoDetectCookieSupport=1)

[design.com/medesign/data/Reflection%20Cracking_Addendum%20to%20MOP_25December2015.pdf?AspxAutoDetectCookieSupport=1](https://medesign.com/medesign/data/Reflection%20Cracking_Addendum%20to%20MOP_25December2015.pdf?AspxAutoDetectCookieSupport=1)，檢索日期：西元2022年5月10日。

⁵ Kiviste, K., Ryabchikov, A., & Lille, H. (2011). Determination of shrinkage of fibre reinforced concrete. *Civil Engineering*, 11, 113-116.

⁶ 楊定良，黃隆茂，混凝土的抗彎強度及抗壓強度於剛性鋪面工程之使用要點，現代營建，(326期)，民國96年。

加混凝土的抗彎性能並透過纖維的添加抑制裂縫的擴展。

依據前揭所提出纖維對混凝土力學性質之改善，及工程實務上對於加速施工以縮短工期之需求，超早強鋼纖維混凝土成了重要的工程候選材料之一。⁷ 它結合了超早強混凝土與鋼纖維混凝土的特性與優勢，能在極短的時間內達到高強度及高韌性。超早強鋼纖維混凝土能突破舊有建材框架，對民用及軍事工程都有重要貢獻。雖然國內相關材料規範尚未建立，但本研究針對超早強混凝土的特性進行基本性質分析，評估應用於軍事工程之可行性，為未來軍事建設提供更速捷、更高性能之建設材料選擇上之參考。

超早強鋼纖維混凝土

一、超早強混凝土

早強混凝土的硬固時間較一般混凝土短，主要利用減少用水量和加速水化反應的方式加速混凝土的硬固。此外，在材料選用及養護環境兩個方面亦須特別強調其重要性(如圖 2)。材料的選用可藉由採用高含量的水泥(410 至 740 kg/m³)或是波特蘭 III 型水泥(早強水泥)、降低水灰比(0.2~0.45)、優化粒料粒徑分布、添加化學外加劑(減水劑或早強劑)及礦物摻料(矽灰、飛灰、爐石粉...等)，或是加熱粒料及提高添加水溫等方式，來促進水泥進行水化反應。⁸ 另外，在養護環境則可採用絕緣形式、高溫或高壓蒸氣養護，保持水化反應所需之



⁷ 同註 1、2、3。

⁸ 同註 3。

熱源及濕度等方式，⁹使混凝土在澆築後 1-3 天內即可獲得足夠的強度拆模，大幅縮短施工的時間。

對於特殊的急迫性工程而言，早強混凝土仍不足以滿足應用上的需求，強度發展週期應再縮短，期能在一天或是更短的時間內即能達到預期強度。於是，透過優化早強混凝土的配比及材料細節的手段，目前已能創造出在 1 天內達到足夠脫模的強度之超早強混凝土。超早強混凝土被定義為在澆置後 24 小時內，可達到設計抗壓強度之 50%以上，且抗壓強度不低於 3045.8psi(21MPa)之混凝土，¹⁰其性質亦屬於超高性能混凝土之一，配比設計上降低水灰比的同時，也提升了混凝土的強度，因此通常強度又比普通混凝土略高。最常被運用在機場及道路鋪設上，能迅速達到高強度之需求。

另就施工時間的觀點而言，超早強混凝土的早期凝固

速度快，在工程實務上應確實掌握拌合、運輸與澆注的時間，避免場拌之超早強混凝土在運輸過程中，延宕澆置之最佳時期，導致早強混凝土在預拌車中凝結硬固。為解決過早硬固的問題，工程上亦透過添加緩凝劑來改善，以控制早強混凝土初、終凝時間。另一方面，水泥的生產及使用都相當耗能，還會排放過多的 SO_2 和 CO_2 ，對環境造成污染，若採用高水泥含量來達到早強效果，除了成本較高，也對環境污染較為嚴重，故若能減少混凝土中水泥的使用，等同於減少溫室氣體排放，對環境較為友善，¹¹也因此通常混凝土會利用其他摻料取代部分水泥，對經濟和生態方面都有所幫助。

二、鋼纖維混凝土

交通工程中，行駛車輛交互作用，對剛性路面造成之受力行為(如圖 3)所示，加上道路鋪面會受到溫度變化作用，導致之反射裂縫及角隅破裂等損

⁹ 楊定良，黃隆茂，混凝土的抗彎強度及抗壓強度於剛性鋪面工程之使用要點，現代營建，(326期)，民國 96 年。

¹⁰ 同註 1 及 4. Sika Services AG, Sika Concrete Handbook, Zurich:Sika Services AG, 2013.。

¹¹ 同註 1 及 Uwasu, M., Hara, K., & Yabar, H. (2014). World cement production and environmental implications. Environmental Development, 10, 36-47.; 13. Kim, Y., Hanif, A., Usman, M., Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., & Kim, S. (2018). Slag waste incorporation in high early strength concrete as cement replacement: Environmental impact and influence on hydration & durability attributes. Journal of Cleaner Production, 172, 3056-3065.。

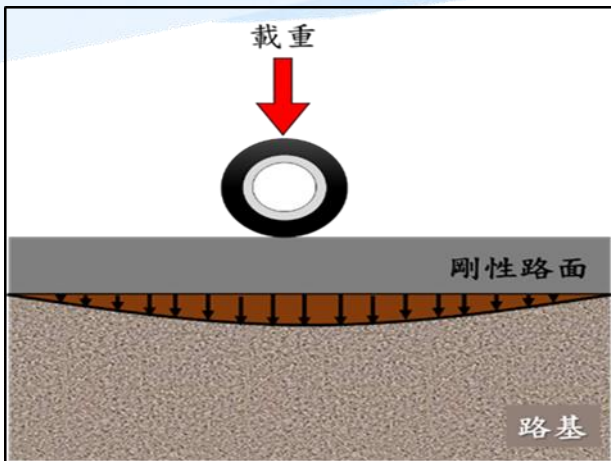


圖 3 剛性路面上車輪載荷分佈情形
資料來源：作者根據 R.O. ANDERSON 建設公司官方網站重繪
<https://www.roanderson.com/2011/12/22/rigid-versus-flexible-pavement-design/>，檢索日期：西元2022年5月10日。

壞狀況，因此在設計上，混凝土的抗彎強度須納入考量中，以確保鋪面具有足夠的強度及耐久性。最有效提升混凝土抗彎能力的方式，即是藉由鋼纖維的添加。¹² 另外，混凝土硬固過程中，混凝土體積快速膨脹或是大幅的收縮容易造成構件破裂，為了減少體積的收縮，添加抑制收縮的摻料或是

外加劑、控制養護環境的溫度與濕度都是常見的方法，¹³ 而研究也發現，在混凝土中添加纖維，可有效改善混凝土收縮的現象。

纖維混凝土並非新興材料，但經過數十年的研究及發展，逐漸形成一套完善的理論，也漸漸應用在工程上。¹⁴ 纖維在工程上的發展，可追溯至 1874 年，Berard 提出在混凝土中添加纖維的構想，試圖解決混凝土基本性質的問題，¹⁵ 直到 1963 年美國才對纖維混凝土（FRC）有了實際的科學研究，Romualdi 與 Mandel 成功利用添加鋼纖維來改善混凝土材料的性質，並展開一系列的實驗室力學測試，¹⁶ 自此，纖維混凝土的研究開始蓬勃發展。纖維的種類繁多，包括玻璃纖維、碳纖維、聚合纖維、植物纖維及鋼纖維等，所具有的效果

¹² Naaman, A. E. (1985). Fiber reinforcement for concrete. *Concrete International*, 7(3), 21-25.

¹³ Kiviste, K., Ryabchikov, A., & Lille, H. (2011). Determination of shrinkage of fibre reinforced concrete. *Civil Engineering*, 11, 113-116.

¹⁴ Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13(20), 4562.; Faris, M. A., Abdullah, M. M. A. B., Muniandy, R., Abu Hashim, M. F., Błoch, K., Jež, B., & Ghazali, M. F. (2021). Comparison of hook and straight steel fibers addition on malaysian fly ash-based geopolymer concrete on the slump, density, water absorption and mechanical properties. *Materials*, 14(5), 1310.

¹⁵ 廖文正，高流動性應變硬化鋼纖維混凝土，杜風 39 期特別報導。

¹⁶ Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite structures*, 86(1-3), 3-9.; Behbahani, H. P., Nematollahi, B., & Farasatpour, M. (2011). Steel fiber reinforced concrete: a review.

也不盡相同，較常使用之纖維整理(如表 1)所示，¹⁷可觀察到各類型纖維的物理性質。其中，又以鋼纖維混凝土最為常見。鋼纖維本身就具有極高的抗拉能力，藉由鋼纖維與混凝土之間的握裹力，可在受力過程中發揮橋接效應，於抗拉、抗壓、抗彎拉、抗剪、韌性等各項物理力學與耐久性指標都有顯著提升，也因此鋼纖維混凝土廣泛地應用於各種鋪面工程，包括路面、工業地板、隧道、邊坡穩定和抗衝擊結構等。¹⁸

長久以來，鋼筋混凝土是臺灣最主要的建材之一，鋼筋的使用可減緩混凝土受張力作用導致的撓曲及開裂行為，然而為了有足夠的保護層保護鋼筋，以及足夠的強度，通常構件會設計為較大的斷面，除了材料成本較高、自重增加，配筋量

的設計與現地施工綁紮鋼筋的技術，也會影響混凝土工程品質。相較於傳統鋼筋，鋼纖維隨機分佈的形式，雖然受力後鋼纖維的抗張效率比整根的鋼筋低，但緊密的鋼纖維利用不連續且均勻的方式分布在混凝土中，與混凝土的密合度更高，對混凝土建材整體的韌性和抗張性能反而有所提升，而非像鋼筋僅提高局部斷面的抗張強度(如圖 4)。

不同的鋼纖維會有不同的力學優勢，鋼纖維常見的型式(如圖 5)。主要可分成變形纖維與非變形纖維，非變形指的是直線型，優點是在拌和過程中較不容易有交纏現象，但鋼纖維與混凝土基材的握裹能力也較低，拉拔強度較弱。變形鋼纖維包括彎鉤型、划槳型、螺旋型及不規則型等，因為形狀非直

表 1 各類型纖維之物理性質

纖維種類	直徑(μm)	長度(μm)	比重(kg/cm³)	抗拉強度(MPa)	彈性模數(GPa)
鋼纖維	5-1000	10-60	7.85	200-2800	195-210
玻璃纖維	6-35	10-50	2.54-2.70	1500-4000	72-80
聚乙烯纖維(PE)	25-1000	5-50	0.96	2500-3000	80-120
聚丙烯纖維(PP)	10-200	5-50	0.90-0.91	310-760	3.5-14.7

資料來源：1.作者自行整理2. Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13(20), 4562.

¹⁷ Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13(20), 4562.
¹⁸ 同註 17

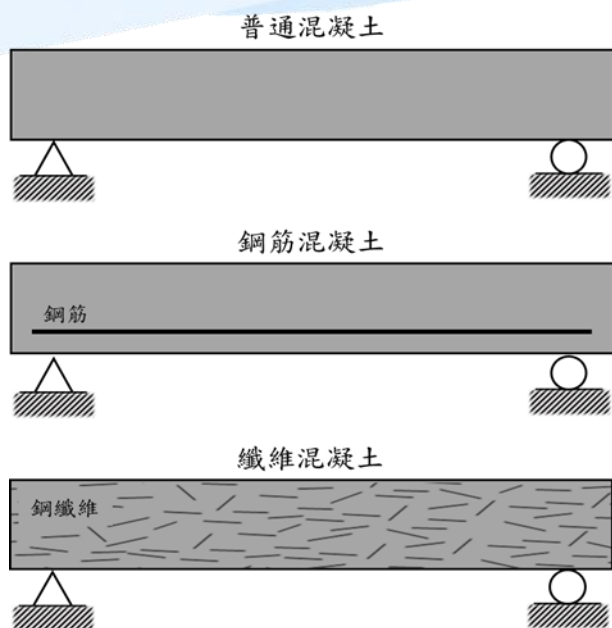


圖 4 不同類型混凝土示意圖
資料來源：作者自行繪製。



圖 5 鋼纖維型式
資料來源：作者自行繪製。

線型，與混凝土膠結時有較高的握裹力及拉拔強度，但拌合時易有打結情況產生，影響工作度較為明顯，且較粗的造型容易有沉澱行為，會限制漿體流動性的設計。¹⁹ 各式鋼纖維有不同的優缺點，在設計時要先了解所需的性質及各形狀鋼纖維之限制，再選擇適切的

型式，才能有效發揮鋼纖維的優點及降低缺點造成的影響。

鋼纖維對混凝土力學性質的功用，主要是橋接(bridge)裂縫並提供開裂後的延展性。若纖維與混凝土膠結力足夠堅固，材料受拉力開裂前，能靠鋼纖維與混凝土間的握裹力提高材料的抗拉(抗彎)強度。混凝土內部裂縫產生時，透過隨機分佈在混凝土中的鋼纖維，能有效的發揮橋接效應，產生束制效果。初開裂後，透過鋼纖維與混凝土之間的握裹力產生拉拔作用，藉由鋼纖維橋接裂縫兩端，使混凝土不至於直接開裂破壞²⁰(如圖 6)。外力持續作用，混凝土裂縫慢慢擴大，鋼纖維受到外力作用而拉伸，使混凝土材料具有較大的應變，並

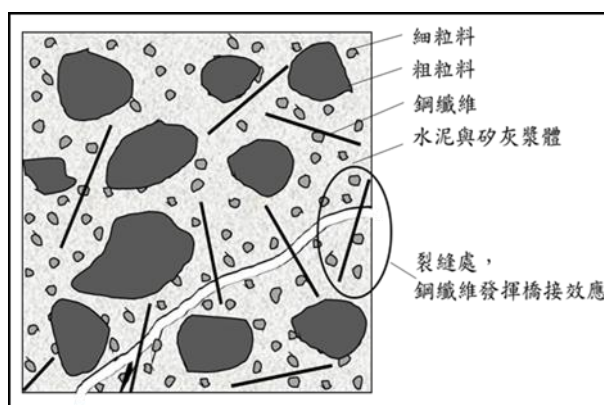


圖 6 鋼纖維橋接效應
資料來源：作者自行繪製。

¹⁹ 賴怡君，李明輝，戴毓修，不同鋼纖維型式與含量對超高性能混凝土抗彎性能之影，34 卷 5 期混凝土工程特刊，民國 111 年。

²⁰ 廖文正，新世代耐震材料－高流動性應變硬化鋼纖維混凝土的研發及應用，土木水利會刊，第 44 卷第 1 期，西元 2017 年。

持續提供抗拉(彎)能力，此時抵抗外力的能力逐漸下降，但非直接歸零，形成所謂之軟化現象(如圖 7)。在受力過程中，不一定僅形成單一主裂縫，有時也可能伴隨多重裂縫產生，而此現象恰好可增加材料的耗能與提升韌性。整體而言，鋼纖維在混凝土裂縫處發揮了橋接作用，使極限抗張(彎)強度提升，也提高了開裂後的性能，另外鋼纖維的添加有助於提高混凝土的疲勞強度，和使用的耐久性，²¹ 能有效改善混凝土材料脆性的缺點。

歐美、日本等國家已積極開發鋼纖維混凝土，廣泛應用於公路路面、橋面、飛機跑道、停車場等工程之鋪設，²² 高強度及高韌性之特性除了可縮小鋪面之設計厚度，減少材料成本之外，高纖維體積分數對於抑制反覆載重造成的疲勞現象也有出色的表現，能大幅節省裂縫維修及鋪面翻修的費用，並增加使用年限。另外，鋼纖維混凝土在澆築隧道襯砌、公路橋面及加固、開挖護坡面的保護等方面也有越來越多的應用。

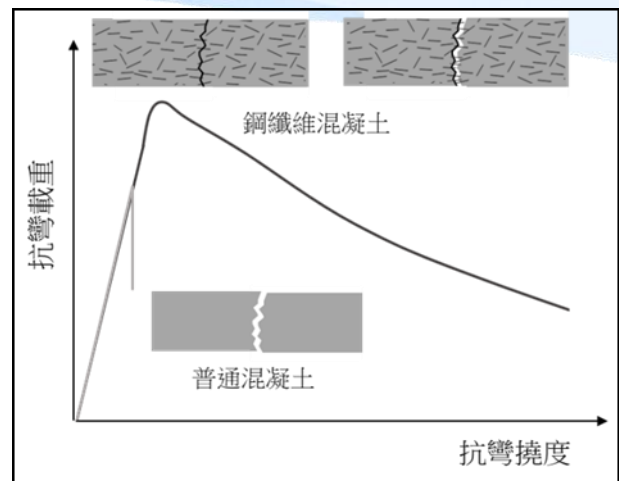


圖 7 不同混凝土抗彎載重-撓度曲線
資料來源：1.作者自行繪製2.廖文正，〈新世代耐震材料—高流動性應變硬化鋼纖維混凝土的研發及應用〉《土木水利》，第44卷，第1期，西元2017年。

三、超早強鋼纖維混凝土

超早強鋼纖維混凝土乃將鋼纖維加入超早強混凝土之中，結合了兩者的優勢，能有極高效率的水化反應，同時又能有出色的韌性性能。如前所述，混凝土欲達超早強之效果並不難，然而材料取得及養護條件的限制，也會影響施工方式之設計。國外常以早強水泥作為超早強混凝土之基本原料，其自身優勢能發揮良好的早強效果，但在國內並無產製，需透過國外採購以致增加成本，相形之下，若能以國內通用之 I 型水泥作為主原料，則能省去國外採購之繁瑣程序，亦能降低

²¹ 同註 17。

²² Sika Services AG, Sika Concrete Handbook, Zurich: Sika Services AG, 2013.; 22. Kobayashi, K. (1983). Development of fibre reinforced concrete in Japan. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 5(1), 27-40.

材料成本。另一方面，工程之養護若採以加熱或蒸氣方式養護，必然會提升造價，且大型工程於施工現場也不便於加熱及蒸養，因此在不加熱的前提下，若能依靠混凝土自身水化反應所釋放之熱量升溫，對工程上的貢獻更大。

工程案例

本文分別以國內常應用之超早強混凝土，及國外現有之纖維混凝土實際工程案例，列舉幾項代表性之工程進行說明。

一、早強混凝土

早強與超早強混凝土多應用於公路及機場跑道的翻修及整建，通常利用夜間進行施工盡量避免對交通及航班造成影

響。國內超早強混凝土的使用，如民國 101 年完成之國道 2 號拓寬工程(如圖 8-1)，其自桃園市中山路(12K+972)以東至大湳交流道西側橋(18K+142)之雙 T 樑之橋面板及隔樑，乃採用 4~5 小時內達到終凝，且 3 天抗壓強度可達極限強度 0.8 之早強混凝土。另外，西濱鳳鼻隧道頂版(如圖 8-2)則利用自動混凝土澆置，以早強混凝土進行澆置，1 天拆模時抗壓強度為 $145\text{kg}/\text{cm}^2$ ，視進度採用蒸氣養護提昇早期強度，運載至現場時強度達 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ ，²³就道路工程而言，都是相當出色的早強材料。

一般而言，鋪面工程採用抗壓強度機制設計，極易衍生裂縫損壞狀況，²⁴ 尤其是機場



圖 8 早強混凝土道路應用實例

資料來源：(1)高公局拓建處八德工務所蕭澄清，「國道2號拓寬工程」預力雙T型梁第二階段施工之橋面板混凝土-二次澆置早強早凝混凝土心得報告，民國101年。(2)國順預拌混凝土股份有限公司官方網站<https://www.kuoshun.com.tw/msg/msg35.html>。

²³ 西濱快速公路新設鳳鼻隧道段，國順預拌混凝土股份有限公司官方網站，2019。
<https://www.kuoshun.com.tw/msg/msg35.html>。

²⁴ 房性中，早強混凝土設計錯誤樣態探討，技師報，民國 105 年。

跑道鋪面，對抗彎強度的要求更高。臺灣機場跑道鋪面設計參考美國聯邦航空局 (FAA)²⁵ 之設計法，一般機場跑道的抗彎設計強度需大於 650psi，²⁶ 因此，在採用早強混凝土的同時仍須滿足機場設計之抗彎強度。如桃園中正機場跑道快速翻修一案(如圖 9-1)，僅 4 小時抗彎強度即可達到 650psi 以上，28 天達 700psi 以上；另外，馬公機場跑道快速翻修一案(如圖 9-2)，施工耗時 80 分鐘以上，其抗彎強度 3 小時達 650psi 以上，28 天達 724psi 以上，都是經典的超早強機場跑道鋪設案例。

二、鋼纖維混凝土

鋼纖維混凝土因為優異的抗張性、抗裂性及吸能性，常用於工業地板以及道路和機場跑道之材料、機器基礎和其他承受動態載荷的元件，或是結合超高性能混凝土所使用，設計出縮小斷面厚度、加大跨距之承重結構，或是特殊造型如薄殼狀結構。此外，鋼纖維結合噴凝土技術，也常使用於做為隧



圖 9 早強混凝土機場跑道快速翻修實例
資料來源：億穎國際股份有限公司官方網站，
https://www.vii.com.tw/vii_products_14.html，檢
索日期：西元2022年8月20日。

道、礦區的拱臂型結構或開挖坑洞的表面加勁。

最古老的由超高性能纖維增強混凝土 (UHPFRC)²⁷ 製成的公路橋樑，位於法國東南部 Bourg-lès-Valence 的 OA4 和 OA6 立交橋(如圖 10-1)。²⁸ 歷經數十年的使用，橋體的樑下

²⁵ Federal Aviation Administration (FAA) AC 150/5335-5D - Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR Document Information.

²⁶ 同註 9。

²⁷ Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC。

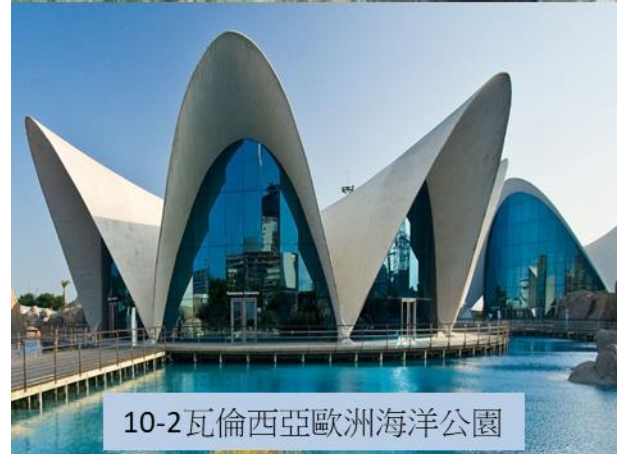
²⁸ Toutlemonde, F., Roenelle, P., Hajar, Z., Simon, A., Lapeyrère, R., Martin, R. P., & Baron, L. (2013, October). Long-term material performance checked on world's oldest UHPFRC road bridges at Bourg-Lès-Valence. In Proceedings of the RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC.

翼緣下端表面的纖維已有鏽蝕現象，但經由鑽心試驗觀察到圓柱試體中鋼纖維都是完好無缺，證實了此材料之抗滲透性及高耐久性。而讓人驚豔的UHPFRC著名例子，包括瓦倫西亞的歐洲海洋公園 (the European Oceanographic Park)，為薄殼結構覆蓋的建築物(如圖 10-2)，以傳統鋼筋混凝土和纖維增強混凝土的組合，利用鋼纖維的高韌性，大膽的設計複雜的結構造型，還能減小混凝土的厚度，以薄殼形式呈現，造就出美侖美奐之藝術建築。

鋼纖維噴凝土著名的工程實例包括加拿大“Société de transport de Montréal” (STM) 運營的蒙特利爾 (MONTREAL) 地鐵翻新案，²⁹ 西元 2004 年 STM 進行了地鐵基礎設施整修，其通風系統由鋼纖維噴凝土 (structural shotcrete steel fiber reinforced) 鋪設 135 毫米厚之開挖襯墊 (lining of excavation)(如圖 11-1)，其設計齡期 1 小時抗壓強度 >87psi，且 7 天抗彎強度為撓度 40mm 下達到 320 J (ASTM



10-1 Bourg-lès-Valence OA4和OA6立交橋



10-2 瓦倫西亞歐洲海洋公園

圖 10 超高性能鋼纖維混凝土實例
資料來源：(1)Long-term material performance checked on world's oldest UHPFRC road bridges at Bourg-Lès-Valence.(2)TicketLens 有限公司，<https://www.ticketlens.com/en/p664595/valencia/oceanografic>，檢索日期：西元2022年8月20日。

C1550)，在工程上而言，是相當成功的案例之一。而馬來西亞彭亨州 Ulu Jelai 區的水電站，其壩體中超過 30 公里的地下結構，即利用鋼纖維噴凝土技術來施作，以鞏固側向土壓力及水壓力造成的外力破壞(如圖 11-2)，也是浩大的雄偉工程。

²⁹ Sika Services AG, Sika Concrete Handbook, Zurich: Sika Services AG, 2013.



11-1 蒙特利爾(MONTREAL)地鐵開挖襯墊

11-2 Jelai 區的水電站地下結構

圖 11 鋼纖維噴凝土實例

資料來源：Sika AG官方網站<https://www.sika.com/en/reference-projects/montreal-metro-tunnels.html>；<https://www.sika.com/en/reference-projects/ulu-jelai-hydropower-dam.html>，檢索日期：西元2022年8月20日。

優缺點分析

普通混凝土、早強混凝土與超早強混凝土之間，主要是水化率及硬固時間之差，普通混凝土雖然水化反應可以持續3年以上甚至超過10年，為了評估混凝土之強度，通常以28天強度作為強度基準(100%)，而需要7天才能達到66%以上的強度。早強混凝土則在藥劑及養護環境的促使下，可以在

3-7 天內即發展出 75-80%之強度，而超早強混凝土水化效率更高，在 6-24 小時內就可達到 50%的強度，3 天內可發展出 80%之強度，三者之間的發展趨勢顯而易見(如圖 12)。

本研究經由試驗比較普通混凝土、超早強混凝土及超早強纖維混凝土三者之間的優劣及特色，彙整如表 2。普通混凝土的優點在於普及已久，無論

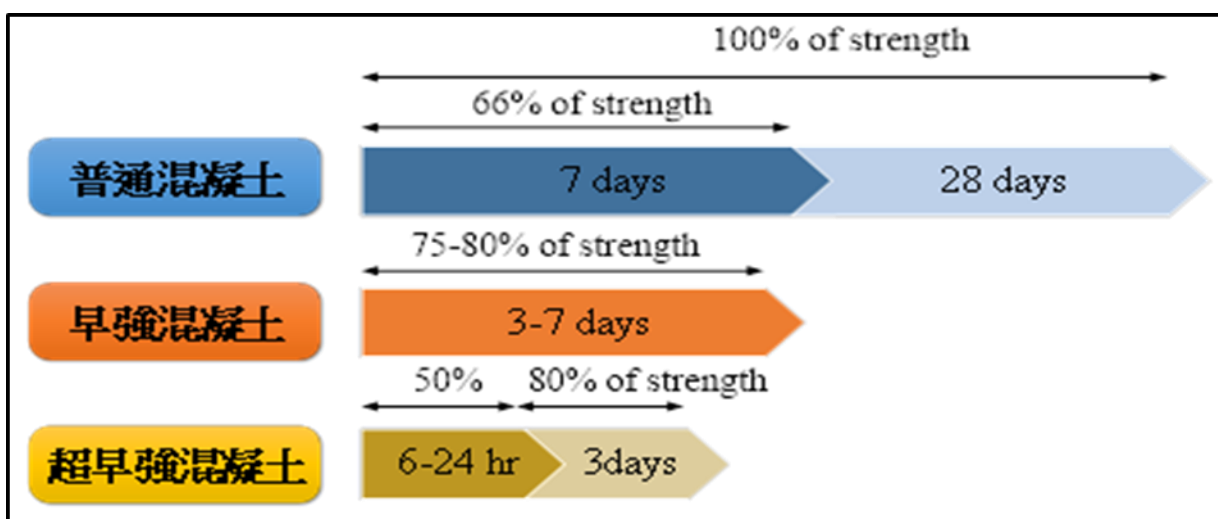


圖 12 各類型混凝土強度發展所需時間

資料來源：作者參考Mcube RMX公司官方網站重繪。

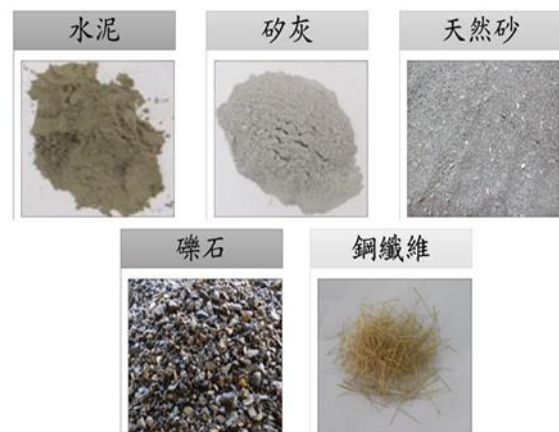
表 2 各式混凝土特性比較

	普通混凝土	超早強混凝土	超早強纖維混凝土
養護時間(可拆模時間)	7~21天	1~3天	1~3天
齡期3天強度發展程度	<50%	>75%	>75%
抗壓強度(Psi)	3000~5000	3000~6000	>10000
抗拉強度(Psi)	300~500	300~600	>1000
抗彎強度(Psi)	300~700	300~1000	>1000
韌性	低	低	高，因纖維種類而異
優點	成本低，所需技術低。	高早強性，可應用於時間急迫之工程。	高早強，高韌性，具高抗張性及耐久性。
缺點	養護時間較長，整體工期耗時，抗張能力較差。	抗張能力較差，養護須注意，始有較佳耐久性。	成本較高，台灣規範尚未完整建立，實際工程案例較少。

資料來源：作者自行整理。

技術或是施工工法均已相當成熟，成本也較低，然而所需養護時間較長，且混凝土基材為脆性材料，不具有良好的抗張能力；而超早強混凝土則對急迫性的工程有重要的貢獻，若使用降低水灰比方式達到早強效果(如添加減水劑或提高水泥量)，同時強度也會有所增，強度會較普通混凝土高，惟養護過程須留意混凝土膨脹與收縮現象造成的開裂行為。超早強鋼纖維混凝土結合超早強與鋼纖維混凝土的優勢，同時具有高早強、高抗張能力及高韌性的性能，同時也具有良好的耐久性，但品質控管較嚴謹，目前施工技術尚未普及，也無訂定相關規範，實際工程案例較少，多處於實驗室測試階段。

本研究特別以設計了鋼纖維不同體積比的超早強鋼纖維混凝土，來進行力學性質之比較，觀察鋼纖維對超早強鋼纖維混凝土之力學貢獻。使用的乾料(如圖 13)，膠結材除了水泥，還添加了矽灰作為輔助，矽灰能豐富粉料級配的緻密性，也能藉由火山灰反應來提升水化反應效率，同時還能減少水泥用量，是工程上常見的摻料；本次添加的鋼纖維為直線型微

圖 13 超早強混凝土乾料及摻料
資料來源：作者自行拍攝。

鋼纖維，體積比分別設計為 0、0.5 及 1% 之含量添加，並搭配早強劑與強塑劑(強效減水劑)使用，以達到超早強之功效。除了超早強及高韌性的目標，混凝土之流動性也必須滿足施工性，才能確保施工品質。流動性太差會導致工作性不佳，不易澆置，而流動性過大，則容易造成粒料沉澱及析離現象，理想的漿體狀態(如圖 14)，漿體應具有足夠的流動性，粒料需均勻分布且被漿體緊密膠結。另一方面，為了設計出可應用於不便於加熱養護之施工環境，本實驗僅以保麗龍箱作為保溫裝置，模擬大範圍(厚度超過 30 公分以上)之鋪面工程。

依設計澆置出不同鋼纖維體積比之超早強鋼纖維混凝土，分別於齡期 4 小時、6 小時、1 天、3 天、7 天及 28 天時進行抗壓試驗，並於齡期 1 天、3 天、7 天及 28 天時進行抗彎試驗，得到的結果(如圖 15 及圖 16)。超早強混凝土於澆置 4 小時即發展出超過 3400psi 的驚人強度，但在澆置完 3 天內鋼纖維的作用尚未明朗，三種不同鋼纖維含量之混凝土抗壓強度發展相近，於齡期 1 天時均已超過 9000psi，而齡期 3



圖 14 超早強混凝土理想之流動性
資料來源：作者自行拍攝。

天時，鋼纖維對抗壓強度的影響逐漸發揮作用，體積比 0.5% 之超早強鋼纖維混凝土比超早強混凝土高了 1300psi，而體積比 1% 之超早強鋼纖維混凝土比未添加鋼纖維之超早強混凝土高了 2800psi；當齡期 28 天時，超早強混凝土維持在 12000psi 左右，而體積比 0.5% 之超早強鋼纖維混凝土已有將近 14000psi 的強度，體積比 1% 之超早強鋼纖維混凝土的抗壓強度則已突破 15000 psi，顯示出本研究之材料除了具有出色的超早強性質，即便未添加鋼纖維的情況下也具有高抗壓強度，添加鋼纖維後抗壓強度也有明顯的差異。

抗彎強度方面，以三分點抗彎試驗方式量測超早強鋼纖維混凝土抗彎能力，經分析後

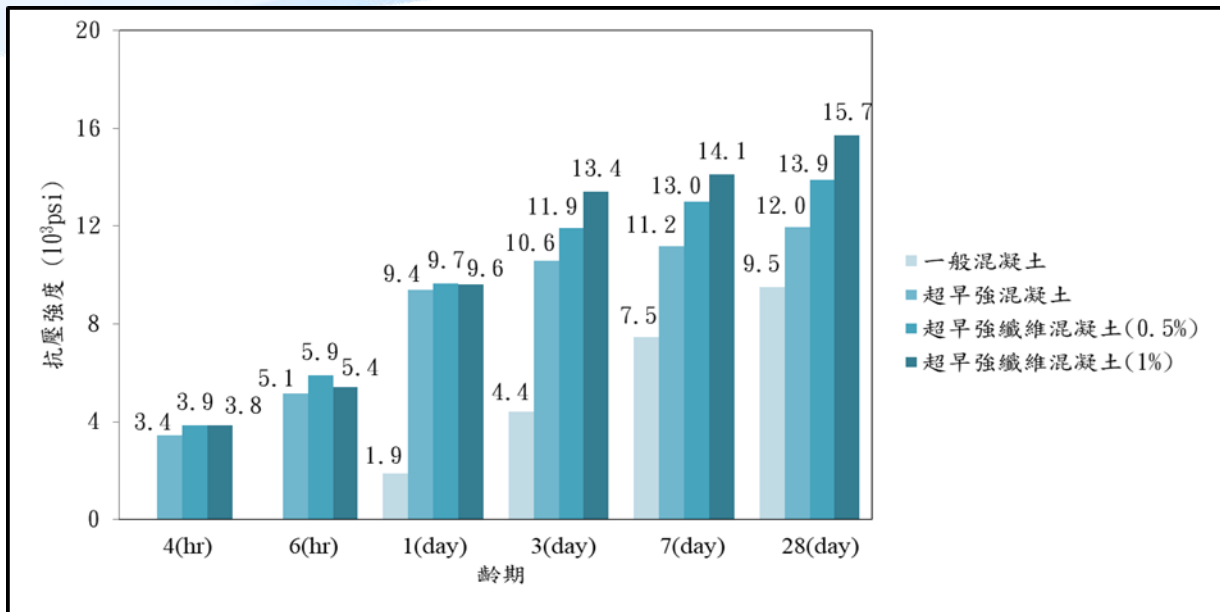


圖 15 不同體積比之超早強纖維混凝土各齡期抗壓強度
資料來源：作者自行繪製。

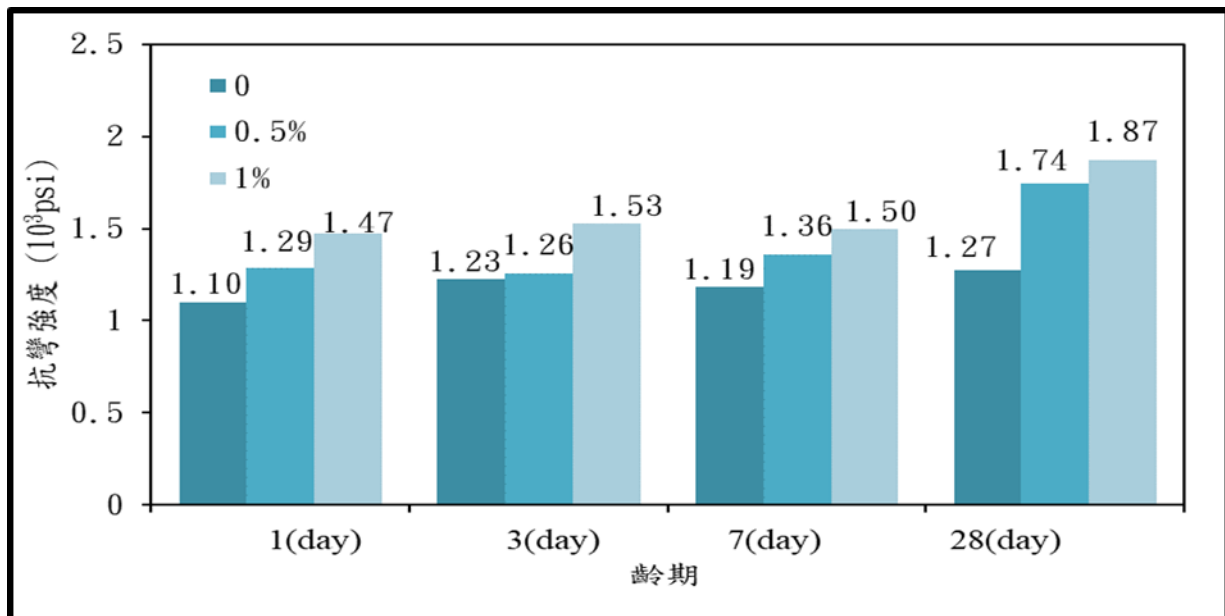


圖 16 不同體積比之超早強纖維混凝土各齡期抗彎強度
資料來源：作者自行繪製。

獲得之強度(如圖 16)，並將一般混凝土之抗彎強度併同比較。於圖中可發現，本研究材料於齡期一天時即能有超過 1000psi 的高抗彎強度，對工程上而言是相當有幫助的材料，然一般混凝土此時強度發展不足，尚無強度資料，三天時一般

混凝土之強度僅 600psi，直至齡期 7 天後，超早強混凝土的優勢才慢慢降低。另一方面，鋼纖維對抗彎性質的影響，於齡期 1 天時，體積比 0.5% 之超早強鋼纖維混凝土即具有 1300psi 之抗彎強度，體積比 1% 之超早強鋼纖維混凝土之

抗彎強度則高達 1500psi。在齡期 7 天內各材料抗彎強度成長漲幅不明顯，超早強混凝土維持於 1200psi 左右，體積比 0.5% 之超早強鋼纖維混凝土則介於 1300~1400psi 之間，體積比 1% 之超早強鋼纖維混凝土則維持在 1500psi 上下，但齡期發展至 28 天時，除了未添加鋼纖維之超早強混凝土仍維持在 1300psi，添加鋼纖維之體積比 0.5% 及 1% 之超早強鋼纖維混凝土均有所突破，藉由鋼纖維的拉拔效應，使抗彎強度有所提升，均有超過 1700psi 之超高強度，體積比 1% 者甚至突破 1900psi，分別比未添加鋼纖維之超早強混凝土抗彎強度提升了 37% 及 47% 以上，顯示出鋼纖維對抗彎性質的提升相當驚人。也可預期此材料若應用於受力之構件，能大幅提升整體強度，進而提高混凝土結構物的耐久性及使用年限。

平戰時應用之評估

透過圖 12 及表 2 中可知，超早強鋼纖維混凝土具有時間上與力學性質上的優勢，而國內外對於超早強混凝土與鋼纖

維混凝土的應用也有不短的歷史及諸多實例，雖然超早強鋼纖維混凝土在臺灣尚未普及，但對工程上仍有突破與貢獻的潛能，也具有可觀的發展性。應用於民生建設上，就時間而言，能使道路或橋面之路面工程，在最短時間內鋪設及搶通，預鑄型結構構件也能大幅縮短養護時間，節省工期；而鋼纖維提升了混凝土的韌性，對需要承載反覆載重之交通鋪面或底層基礎結構，均能提高抗疲勞及耐久性，對位於地震帶的臺灣建築而言，也大幅增加了抗震性及安全性。

軍事工程為增加我方優勢而建設之永久性或臨時性建築，戰鬥及防禦工事包括戰備跑道、防禦掩體、壕溝、彈藥庫、防空洞等，這些軍事建設及重要交通要塞若受到敵方攻擊破壞，對我軍戰況局勢會造成嚴重影響，因此軍事工程之建材首重高強度與抗爆性能。而具有良好橋接效應的鋼纖維混凝土，也在許多研究中認為能有效降低爆炸震波能量造成的衝擊破壞³⁰，若能結合超早強之特性，對戰時急迫之要道及橋

³⁰ 許皓筑，纖維加勁混凝土版抗炸性能補強之數值模擬研究，碩士論文，西元 2021 年。

樑搶修，或用來製作預鑄型障礙物³¹，都能發揮優異的超早強效果，使工程更迅速完成，恢復戰場優勢。

結論

藉由本研究，可知超早強鋼纖維混凝土對工程上是突破性之材料，透過文獻及實驗結果，明顯看出鋼纖維能有效降低混凝土體積收縮、提升抗壓及抗彎性質，也增加混凝土的韌性，使營建之工程構件更為強韌與耐用；而搭配超早強混凝土使用，則可以達到快速施工，對於道路搶通、機場搶修、橋樑補修等具有急迫性且需足夠抗彎性質之鋪面工程而言，是相當出色且適合之材料選擇，無論是應用於民生交通工程或是軍事防禦工事，都具有可行性，未來可考慮將其應用於軍事工程上，增加工事之構築效率與強度。

³¹ 李明宗，民間預鑄式混凝土構造物運用於工兵支援任務之研究，陸軍工兵半年刊第156期，西元2020年。