

臺灣混凝土之創新挑戰與機遇—— 產業回顧挑戰願景

黃兆龍、湛淵源 技師

美國混凝土產業 2030 年的願景與臺灣混凝土產業的發展

2000 年 9 月 27 日，混凝土行業的戰略發展委員會在伊利諾伊州芝加哥舉辦了一個混凝土願景研討會。與會者有 50 多個混凝土、水泥和其他聯盟行業首席執行官員、總裁、副總裁、實驗室和混凝土行業研究經理以及政府代表們，回顧了 1970 年來美國混凝土行業狀態、現階段行業狀況，擬定出美國混凝土行業 2030 年的願景，確定了實現混凝土行業的 2030 年願景的具體目標 [1,2]。參與者將混凝土行業定義為「混凝土原料供應商、拌和廠、交通運輸業和混凝土施工廠商等」。匯集不同參與者所形成未來統一的願景，並建立未來 30 年內指導混凝土行業及研究夥伴們的指導綱領，這是一份滾動式的文件，不斷重新審視振興 2030 年願景的步調，反映出混凝土行業的持續發展，以及競爭、監管、機構和社會變化動能，類似現代企業管理 2.0 專注 ESG(環境、社會和治理) 的新想法，傳達了美國混凝土行業的重大事實如下：

- 致力於成為良好的能源使用和環境保護典範 (E)。
- 致力於使混凝土成為基於生命週期成本和性能下營建產業的首選材料 (G)。
- 致力於提高各類混凝土製造的效率和生產率，並同時在生產過程中保有高安全性和健康標準 (S)。

筆者將之整理成表 (見基礎研究篇 (一))，可以清晰窺出混凝土步入高科技領域，將人工智能 (AI) 及萬務互聯 (Iot) 導入，讓混凝土技術行業遙遙領先成為高尚的行業，並能將 ESG 導入混凝土行業中。願景中共概述了八個需要研究方向：製程改良、產品性能、能源效率、環境性能、技術轉移、團隊改造、教育與就業、工業的形象，以及在政府與行業夥伴關係下可以發揮的角色，這些研究方向涵蓋 ESG，也包括 Aiot 的現代數位科技與知通訊、智能自動化等在內。

(一) 美國混凝土行業2000年狀況回顧

混凝土是世界上除了「水」以外最普遍使用的物質，全球每人每年使用混凝土量略多於一噸，而美國平均每人每年使用超過兩噸。在國家基礎工程建設的整個營造界、工業界、運輸、國防、公用事業和住宅部門而言，混凝土是一種負擔得起，且可靠度高的材料。在美國有超過 6100 家公司生產水泥、預拌混凝土、混凝土管道、混凝土塊、預鑄和預力混凝土，和其他水泥混凝土製品廠。這些由許多小型企業組成的混凝土行業，僱用了將近 200000 人。然而有超過 95% 與混凝土有關的小型企業僅僱用了不到 100 人。每年混凝土和水泥製品業的總產值超過 350 億美元。混凝土和水泥產業消耗大量能源，水泥生產使用工業用電量約佔總數的 80%，燃油消耗約 66%。運輸骨材 (粒料) 及其他混凝土組成至混凝土生產場所，並將成品運送到市場，也需要大量能源。

除了混凝土和水泥生產製造外，混凝土行業還包括骨材 (粒料) 和材料供應商、設計師、運輸業、營建業以及維修及維護公司在內，美國光是營建業就有超過 200 萬個與混凝土有關的工作機會。雖然混凝土行業內部仍有甚大異議，但是混凝土行業的各個角落都已有一個共同的目標 - 誠心的渴望能提供高品質、耐久、具競爭力 and 永續性

的產品。這也是近年來台灣混凝土追求的目標。

混凝土達成安全又耐久的關鍵點，在於仔細控制基本和製程的所有組成材料，包括：

- 水泥：卜特蘭水泥為當今混凝土中最廣泛使用的膠結料成分，由鈣、矽、鋁、鐵和氧等原子所組成。
- 骨材 (粒料)：骨材主要是天然的惰性顆粒狀材料，例如砂子、礫石或碎石。然而，技術上可以擴展至使用再生粒料和合成粒料。在臺灣使用再生粒料的混凝土已於 2020 年被列再生綠建材中 R 類綠混凝土標章中。
- 水：水的成分和溶解其中的礦物質和化學物質對混凝土品質至關重要。
- 化學摻料：化學摻料在混凝土拌合之前或拌合期間加入，以減少水的需求、加速 / 延緩凝結或提高特殊混凝土耐久性。
- 補充性膠結材料：補充性膠結材料，也稱之為「礦物摻料」，有助於透過水化反應或卜作嵐反應來硬固混凝土。典型的例子是天然的卜作嵐材料、飛灰 (粉煤灰)、高爐石粉、稻殼灰和矽灰。

混凝土澆置後，混凝土組成材料必須維持足夠濕氣和溫度，允許長時間充分發展強度。雖然 1997 年混凝土產業創立了戰略開發委員會，贊助不少研究領域，著重於相關混凝土研究計畫，專注於問題 - 解決的技術發展，範圍包括先進水泥製造流程、高性能混凝土、自動化施工系統和整個行業的服務壽命預測模型。政府有關混凝土的研究計畫，贊助機構包括產官學研，更廣泛進行的混凝土基礎科學研究及應用研究，以改善混凝土和維修材料技術。研究主旨在開啟全面應用具成本效益的「高性能混凝土」，以延長混凝土結構的服務壽命，並通過健全材料科學基礎研究來推昇混凝土技術。

(二) 混凝土行業的挑戰

早在二千年前古羅馬帝國時期就已知混凝土是一種經濟、堅強且耐久的產物，就混凝土廣度而言，產業界認為必須改善混凝土在生產率、產品性能、能源效率和環境友善的水準，才會使混凝土產業市場不斷增長。共同認知 2030 願景時間框架中，必須全力以赴改進混凝土技術，這是混凝土行業需要積極面對和克服許多機構、競爭者和技術開發者的挑戰。

對混凝土行業來說，雖然傳統水泥製造的基本技術已經建立數十年，採用先進水泥製造技術，能大大提高源效率。自 1970 年代中期以來，平均生產一噸水泥的能耗減少了 30%，經由製程和技術改良，透過新材料、製程技術、運輸機制的研究，加上訊息技術 (ICT) 的應用可以改變混凝土行業，更有效使用於水泥產業上，現今的人工智能 (AI) 可以加速技術的改進。

混凝土行業素以廣泛性和多樣化而聞名，混凝土行業中大多數是小型企業，分散的混凝土產業對引進新技術的速度很遲緩、不願投資研究項目、對採用可用新技術也猶豫不決，以致表面上混凝土品質看似良好，實際上常在不合設計標準的情況下被使用，導致因品質不佳引發重大事故的責任。混凝土生產者、用戶和設計師不願嘗試使用經過驗證的新技術和新材料，直到有長期使用案例才肯接受，期間超過 15 年。

整個混凝土工業對環境影響甚大，兼顧成本與

環境親和性是很重要的，避免空污及噪音等至關重要，單就水泥和混凝土運輸中降低能耗，就可以改善混凝土行業能源效率和環保性能。因為運輸成本佔混凝土的最終成本的 20% 至 50%，並且施工中延遲混凝土交付，對混凝土產生大量的勞動停滯時間。而且普遍「不要在我家後院」的綜合恐懼症，迫使水泥廠和混凝土工廠、骨材料源要遠離需求地點，增加了混凝土產品輸送業所需的車輛里程數量，所以搬遷混凝土設施到偏遠地區造成運輸能耗增加對環境傷害的機率。

混凝土生產鏈中水泥的生產是能源最密集型的部份，因為水泥生產需要高溫才能產生必要的化學轉化。每噸水泥熟料都會產生大約一噸二氧化碳，約一半由碳氫化合物的燃燒，其餘的來自分解水泥製造中石灰石原料。

需求先進材料和製程技術，生產高性能且更先進的混凝土步履正在緩慢前進，可是並沒有即時融入市場，因欠缺目前混凝土產品性能績效和服務壽命的數據，限制了設計師和營造商及時將混凝土產品的「生命週期」優點傳達給用戶的機會。

更大的材料改進步調，將使混凝土行業能夠明確地證明混凝土全部性能優勢。混凝土行業的規範並非基於績效環境中運行，因此通常無法發揮混凝土的全部潛力。採購混凝土施工和產品的生產過程，因為沒有能夠提供激勵提高性能獎勵措施，且通常喜愛「低價競標者」，以致混凝土公司為了降低成本，造成品質不佳，相當不利於研究與開發投資上。採用先進技術可以使用更少的能源，防範過早維修，降低生命週期成本。

混凝土比起其他材料而言具有甚佳的永續性，但這不被消費者完全認可，部分是因混凝土行業無法證明對永續施工有可觀的貢獻，有必要推廣永續性定義和成本效益的重要性。

AI 人工智能大數據系統可以為通過考慮到技術、經濟和環境因素，提供實務基礎得到最佳化的混凝土性能。所以急需開發先進系統模型，以預測任何混凝土在數十年後甚至幾個世紀後的環境條件下的設計性能。在這個概念下，骨材 (粒料)、水泥、維修和維護、材料運輸、生命週期分析及其他領域，都可以迎刃而解。也可以考慮全球環境的觀點、減少熱量的洩漏點、混凝土使用的材料、人口增加的建築需求、以及因施工延遲而造成了能量浪費，透過 Aiot 分析將提供非常有用的工具，證明混凝土的好處。

(三) 統一混凝土行業的願景

多樣性的混凝土行業體認到統一和前進視野的重要性。共同確認潛在的材料和成分的突破、產品性能、供應商與設計者的互動，混凝土施工和公眾看法，也意識到探索未知領域的過程將涉及不可預見的極大挑戰，並熱切地看待向前遇到的挑戰。

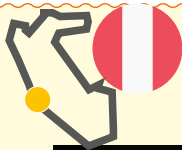
具體而言，行業領導者將 2030 年願景分為八個關鍵領域，這些都是隨機被提出的，以下的說明配合美國混凝土願景中遠見，穿插台灣自 1983 年至今研發過程的發展，供台灣混凝土業科技發展的借鑒。

1. 製程改進

混凝土行業在整個混凝土生命週期中，進行設計、製造、運輸、施工、維護和維修的製程改良，預期將使混凝土成為最有效、最具成本效益的營建材料。

利馬是西班牙殖民時期的重要城市，所有南美的主要物資都是從這個港口進出的，連南美的教宗後來都搬到這邊，值得看得東西真的不少。

如果只能選一項觀光景點，利馬音樂噴泉公園（El Circuito Magico del Auga）應該是這個城市的第一選擇，園內有多個音樂噴泉，形態各異，有好幾種水舞和噴水方式，數 10 座噴水池每 10 秒都有一種變化，三個時段有主秀內容是結合秘魯本身的這種文化資產和大自然動物等等，配合音樂很有意境，入夜亮燈後更是醉人。



利馬音樂噴泉公園

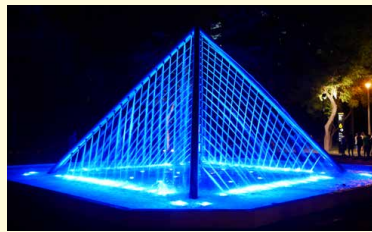
陳政昇 技師



泉公園一景



噴泉公園地景



噴泉公園金字塔

混凝土生命週期中進行製程效率的改善，引入突破性技術和創新方法可以獲得巨大的能源和環境效益。混凝土產製過程中水泥的生產和材料運輸是兩個能源密集的階段，提供了重大改進的機會。此一方面，臺灣於 1998 年在進行中鋼軌枕與高健全核能筒的研發時，針對製程改良設計出「雙核心拌和設備」新型專利技術，以解決拌和困難及不均勻的問題。

混凝土行業在製程改良方面，將工業廢棄物如鑄造砂、飛灰（粉煤灰）、矽灰、高爐石粉，和來自鋁、金屬鑄造、鋼鐵和發電等行業所淵生的其他副產品，引入當作水泥和混凝土生產的組成成分。混凝土行業承諾全力實踐改變材料、設計和施工場域，透過使用再生材料和系統來改善性能、耐久性和永續性。臺灣在 2019 年前已大量使用這些材料的機會，並且在綠建材中的再生綠建材列出 R 類、G 類及 H 類綠混凝土標章，和控制性低強度材料 CLSM 再生綠建材標章，並且 2024 年更將水泥全面捨棄，領先全球列出「近零排放的綠混凝土」，CZ（Close Zero）級綠混凝土標章。由傳統保守觀念步入節能減碳的全球近零現實，關注於替代方案 / 先進材料和系統來高效利用有限的資源，獲得好處，這種未來材料的心態，克服技術、教育和機構障礙的挑戰。加速採用創新材料和應用，關注理解和應用這些支持技術，其主要的挑戰是設計者和營造公司缺乏理解混凝土行業可以提供的效益，所以仍有必要加強推廣。具體內容如下分析：

- 使用來自其他行業的各種副產品以及再生混凝土粒料，用作混凝土生產的組成材料。在臺灣此項目始自 1983 年，由國科會、農業委員會及產業界的支助，經過長期台電飛灰、中鋼爐石粉、農業稻米廢棄物稻殼灰及再生混凝土粒料研究，已在 2020 年正式納入再生綠建材項下 R 類（再生粒料）、G 類（綠色）、H 類（高性能）級「綠混凝土」標章，並且在 2023 年有至少十家預拌混凝土廠申請到 G、H 級「綠混凝土」標章。
- 合成或生物質基材料通常用於混凝土生產中。經科技部贊助的專案及味丹公司的贊助，特別由北科大林利國教授進行研究稻殼灰應用於混凝土及免燒磚製作上，並已使用於臺灣下水道管材及並專利移轉給越南台商生產製作免燒磚（低水泥及無水泥）。
- 仿生過程或模仿自然機制的過程是用於創建混凝土。此項目在臺灣經過北科大鄭大偉教授團隊及作者研究室團隊共同努力，並已納入 2024 年版綠建材內「綠混凝土」項下之「近零碳排的 CZ 級標章」。
- 依特殊結構環境需求下定制混凝土配比設計。在臺灣自 1993 年高性能混凝土於東帝士大樓施工完成後，經數次高性能緻密配比設計理論研討會的推廣，為了特殊結構高流動及高強度要求，特別因應量身定做高性能混凝土。同時因台灣四面環海，受到海鹽侵蝕的機率甚高，因此公路總局為此特別委託進行「高性能混凝土應用於公路工程」的研究，針對不同類型的鋼筋凝土結構工程樣態，因為臺灣地理環境特殊，混凝土配比設計重點就有所不同，經過全

盤化的探討，定訂規範，並已實際將規範應用於淡江大橋上。全新版的 2024 年 New RC 鋼筋混凝土規範實施後，高強度混凝土及高強度鋼材的應用勢必大為推廣。

- 組合二種粒料的最佳粒徑分佈。臺灣 1994 年已經建構完整雙粒徑粒料以上與燃煤飛灰的緻密堆積最大單位重的方法，找出粒料與燃煤飛灰之最佳比例，據以設計混凝土配比，得到滿足工作性、安全性、耐久性、經濟性與生態性兼顧的「優生高性能混凝土 (Eugenic Concrete, EC)」，也可以轉變設計成為「自充填混凝土 (Self-compacting Concrete, SCC)」。
- 2003 年筆者著書推動「高性能混凝土緻密配比設計理論」[3]，目前已普及緻密設計理論於混凝土中。同時也推動使用富勒曲線於設計「超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC)」，土，又稱之為「活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC)」上。
- 水泥製造的能量減少，以降低碳排放量，例如一氧化氮和二氧化碳，並且減少產生水泥窯灰副產品。此方面台灣水泥及亞洲水泥也都朝此目標進行，成效良好。
- 混凝土行業使用公認的技術和過程，以產生重量更輕、強度更高的產品，從而減少體積要求，並使運輸更加容易和便宜。台灣已成功開發以水庫淤泥及污水廠污泥製作輕質粒料，並用於製作高強度輕質混凝土。但是大量應用由於輕質粒料生產所需能耗太高，並不符合節能減碳的精神。
- 混凝土行業使用高級系統建模技術，來預測提供給客戶混凝土的性能。
- 增強了混凝土的輸送系統。
- 混凝土澆置自動化成為的標準程序。目前除了改變拌和程序外，已嘗試將 Alot 等新技術於自動化生產上。

2. 混凝土性能

混凝土行業致力改善混凝土強度和其他性能，以便增進混凝土的需求和品質。預期 2030 年美國混凝土將是基於生命週期成本和性能最佳選擇的營建材料。土木工程中混凝土是一種最耐久、最具成本效益的營建材料。目前，存在著許多提高混凝土性能、可靠度和生命週期成本效益的機會。混凝土多面相的應用，可滿足市場所需的各項混凝土性能。混凝土行業需要有重要的研究計畫來支持產生高性能、具有成本效益的混凝土，須經歷混凝土製造中先進材料、數據改進，和先進技術過程。完全整合的工程設計方法、共享信息網絡 (ICT)、計算機輔助現場施工管理 (BIM)、共享生命週期數據、統一的現場測試技術，以及匯總資源和技術，將把傳統認知零散的營建業帶入一個斬新的等級。此方面早在 1993 年臺灣即已經陸續發展出「高性能混凝土，HPC」，並且成功設計出 5000~8000 psi(350~560 kgf/cm²) 應用於高雄東帝士 85 大樓 (Tun-Tex Tower)、中台禪寺、屏東車城海生館結構上。2000 年更以緻密混凝土配比理論設計出強度 10000 psi(700 kgf/cm²) 使用於臺北金融中心 (Taipei 101) 的高性能混凝土規範。

美國企望透過統一混凝土願景來指引未來研究項目，提供混凝土行業生產更好的產品，包括耐久的構造設施、低維護需求、滿足未來需求的儲備能力和靈活性，以提供適應敏捷製造原理的結構，俾能快速現場施工或預鑄施工，提供開放式和易於替代的施工系統和製程。近年來臺灣成功開發出石墨烯的高效生產技術，可以大量降低成本，居於石墨烯抗拉強度相當於鋼筋抗拉強度的 100 多倍，如此特性製作石墨烯混凝土，則因為等方性特質，不需用鋼筋就有抗拉性質，可以製成預製構件，利用自動化吊裝施工及或 3D 列印技術列印混凝土構件及建築單元，科技化吊裝及堆疊即可，不但減少人工又可提昇施工效率，也非常節能減碳。同時可以使用更輕型結構，具有柔軟性及高能量吸收性，能夠承受地震力。2023 年臺灣已進入超高性能混凝土及石墨烯混凝土的時代，將可提供人行道、橋樑、和地下結構體使用，減少了昂貴的維修和更換工作，以及這些設施延遲使用時間產生的公共花費。這些努力會還會引導出基礎設施修復、改造和翻新的突破點，也可以進一步增加廢棄物綜合利用的機會。

在過去三十年中，混凝土的產品性能優勢的資訊將會透過 YT 及短視頻快速傳達給混凝土使用者：

- 混凝土行業貫徹有效性及一致性的品質保證 / 品質控制標準，此方面在東帝士 85 大樓施工時即已建立由遠東企業中心傳承過來的品質保證措施及標準作業程，亦應用在許多工程建設上。
- 在適當的應用條件下，普遍使用「自充填混凝土 (SCC)」和「自流平混凝土 (SFC)」。
- 這一項目台灣早在 1994 年已普遍使用，並且強調低水泥量及低水量的黃氏緻密混凝土配比設計法。
- 混凝土行業充分利用了非破壞檢測技術、傳感器、智能養護技術，以及其他連續監控品質性能，並保持耐久性的先進技術。
- 混凝土產品的強度是當前水平的十倍，如此可以減少結構混凝土的總量。2022 年台灣設計的超高性能混凝土 (UHPC) 強度已達到近 30000psi 的水準，未來追求 120000psi 的高標準，預期可用於預鑄結構構件上，然後施工時將構件如堆積木般堆疊成裝配建築。
- 消費者有更多混凝土材料可以選擇，包括設計師要求的顏色和紋理。此一階段在 1994 年東帝士大樓完工後，已可以量身定製混凝土材料。
- 關於混凝土產品性能的問題減少了，因此需求量增加四倍。
- 混凝土行業具有共享及合併的數據，例如材料、結構、設計和性能數據庫，並與電腦輔助知識系統，以證明產品品質推廣給顧客。此方面學術界協助業者正緩步引入 AI 技術。
- 通過使用先進纖維和復合材料使混凝土加強物更耐久，增強了混凝土的生命週期益處。1995 年臺灣已開發出鋼纖混凝土軌枕及 HIC 核廢料儲存筒，顯示能設計出更強且更耐久的混凝土。同時 2023 年開始有系統的應用石墨烯的超高抗拉強度進入超高性能混凝土中，顯現增加強度的效益 [5]。