

創新材料吊索橋 輕盈、抗腐蝕、延壽

蔡俊鏡 林同棧工程顧問股份有限公司 技術顧問／博士

國內外近幾年吊索式橋梁因為吊索鋼腱鏽蝕引致斷裂造成橋梁崩塌，如南方澳跨港鋼拱橋、義大利莫蘭迪斜張橋 (Pontì Morandi) 等，造成人員傷亡、交通中斷及經濟損失。以傳統橋梁材料混凝土或鋼構，隨著齡期增加均面臨材料老化及使用壽命之限制，須予補強或更換。鑑於地球資源有限，如何延長材料壽命是一重要課題，目前緊急救難斜張橋改用碳纖吊索，就是著眼於質輕、強度高、便利現場組裝。針對吊索系統橋梁結構 (包含鋼拱橋、脊背橋、斜張橋及吊橋)，吊索是最重要系統構件，不論是永久或臨時吊索橋梁，可考慮採創新複合材料吊索 (如碳纖吊索) 取代傳統鋼吊索，具質輕、強度高、耐久性好之特點。

創新材料

一、複合材料吊索

對於質輕、高強度且非金屬之複合材料吊索，滿足高防腐蝕、耐疲勞、高比強度及高剛度比的性能，原為研究超長跨徑橋梁 (主跨徑超過 2,000 公尺) 的重要材料。現有鋼吊索對超長跨徑橋梁增重速率大於結構自重增加速率，勢必因為吊索太重難以組立及施拉預力，而碳纖吊索則可滿足質輕、施工快速及耐久性佳之特點。

《材料應用》

日本已研發出使用碳纖維複合式吊索 (CFCC)，組合成類似平行線鋼絞索 (PWS) 之構造，極限強度達 2,070MPa (約 211kg/mm²)，其單位重 (15kN/m³) 約為鋼重 (78.5kN/m³) 1/5，其彈性係數略較鋼為低，但強度相對重量比值 (比強度) 為鋼的 3 倍，根據 Leonhardt and Zellner 研究，只要減低 80% 吊索重量，對吊橋設計及施工有重大之衝擊影響，目前使用相對成本雖高，衡諸未來鋼造價持續增高，不無使用推廣之可能 [1]。對材料用量方面，採碳纖吊索較傳統鋼吊索減少面積並耐鏽蝕，可以減少吊索重量及長期維護成本。

表一比較鋼線及複合材料 (包含碳纖、硼、Kevlar 及玻璃) 之材料特性，一般吊索拉應力約與單位重成線性比，可知碳纖吊索拉應力僅為鋼線之 20%，相對承載能力可多提高 4 倍，承受活載重的比重由一般 10~20% 提升至 60~65%，對上部結構靜載重可減少 45~50%，故碳纖吊索面積較鋼線可減少一半。表二則針對吊索理論極限跨徑研究，吊索採複合材料之理論極限跨徑可達鋼線的 1.4~2.3 倍。

表一 鋼線及複合材料特性 (參考王文濤：斜拉橋換索工程)

吊索材料	單位重 γ (kN/m ³)	極限強度 σ_u (Mpa)	彈性模數 E (Gpa)	比強度 σ_u/γ (10 ⁴ m)	比剛度 E/ γ (10 ⁶ m)
鋼線	78.5 (100%)	1600 (100%)	200 (100%)	2.0 (100%)	2.5 (100%)
碳纖	15.5 (20%)	1620 (101%)	140 (70%)	10.5 (525%)	9.0 (360%)
硼	21.0 (27%)	1400 (88%)	215 (108%)	6.7 (335%)	10.2 (408%)
Kevlar	13.8 (18%)	1348 (84%)	76 (38%)	10.0 (500%)	5.5 (220%)
玻璃	20.0 (25%)	780 (49%)	40 (20%)	3.9 (195%)	2.0 (80%)

表二 鋼線及複合材料吊索理論極限跨徑 (參考王文濤：斜拉橋換索工程)

理論極限跨徑 (m)	鋼線 (100%)	碳纖 (230%)	硼 (180%)	Kevlar (220%)	玻璃 (140%)
按承載能力計算	3,000~4,800	6,900~11,040	5,400~8,640	6,600~10,560	4,200~6,720
按剛度需求計算	1,300	2,990	2,340	2,860	1,820
按動力需求計算	600~1,200	1,380~2,760	1,080~2,150	1,320~2,640	840~1,680

註：吊索動力性能需求為針對抗疲勞性能。

二、FRP 橋面版

未來橋梁防蝕問題及材料耐久性是一重要課題，塑鋼 (FRP) 提供解決超長跨徑橋梁靜載重問題與金屬材料及鋼筋腐蝕問題，FRP 纖維材料包含碳纖、硼、Kevlar 及玻璃。

橋梁最有可能使用 FRP 的構件為吊索、預力鋼腱及橋面版。複合材料由細纖維以及聚酯樹脂當接合劑製造而成，在美國則使用環氧樹脂或聚酯樹脂製造，極限張力強度介於 1,100 至 5,500MPa，張力彈性模數介於 172,400 至 55,100MPa。FRP 複合橋面版主要優點為輕盈、抗腐蝕及預製模式單元製作，可大量製作及組立，不需現場支撐或模板，加速施工，減少工期及交通維持費用，FRP 橋版相較傳統混凝土橋版減輕自重 70%至 80%[2]。

使用 FRP 雖減輕自重及構件尺寸，唯對氣體動力學振動增加較大風險，並衍生對整體或局部結構的挫屈問題，對其衍生缺點及限制需加以注意，更精確的動力分析方法配合改進結構阻尼以克服這些缺點是有其必要性。

複合材料橋梁

複合材料主要以 FRP 系列為主，具質輕、高強度、耐久性高、耐蝕、耐酸、防磁性等優點，包含無機纖維 (如碳纖維 CFRP，玻璃纖維 GFRP) 及有機纖維 (加強纖維 AFRP，乙烯基纖維 VF) 兩大類，茲將全球複合材料相關試驗性橋梁摘要如表三，並列舉幾個案例說明如下：

表三 複合材料橋梁[3]

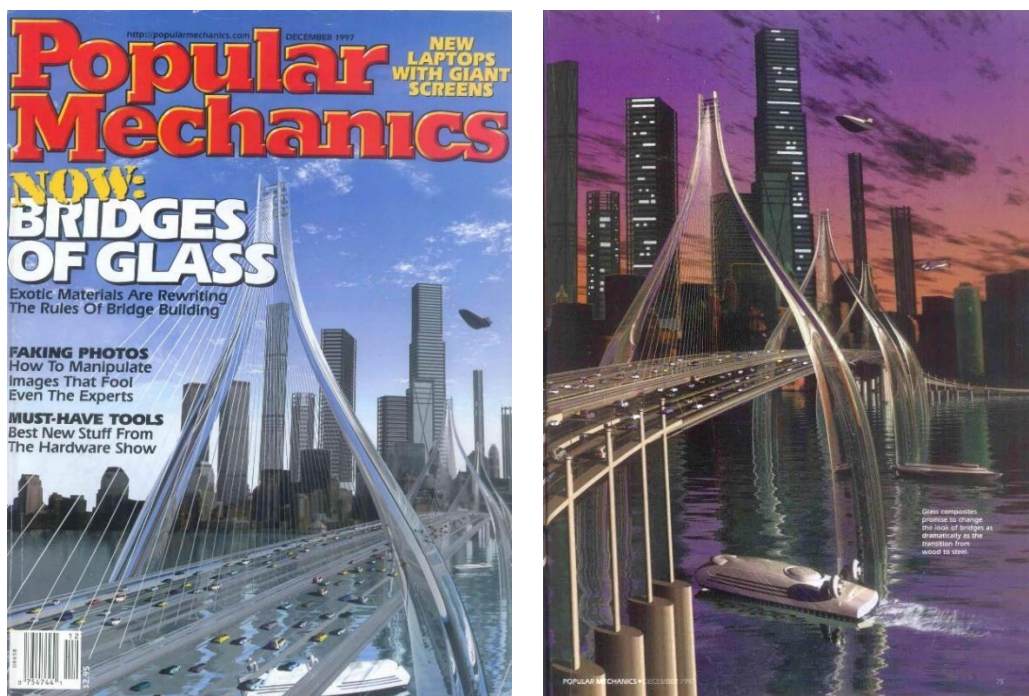
橋梁型式	橋長／橋寬	複合材料
吊床版橋 (日本)	54.5m／2.1m	床版預力鋼腱採用 AFRP 19.5×4.9mm (fy=136kg/mm ²)， 吊索採用 GFRP 8mmφ, 5mmφ (fy=184 kg/mm ²)
斜張橋 (日本)	28.2m／3m	吊索採用 GFRP 8mmφ (fy=165~192 kg/mm ²) CFRP 8mmφ (fy=232~246 kg/mm ²)
PC 床版橋 (日本)	36.02m (3@12m) ／2.4m	預力鋼腱採用 FRP 7.3~14.7mmφ (fy=140~152kg/mm ²)
梁式橋 (日本)	111m／3.6m	預力鋼腱採用 CFRP 12.5mmφ (fy=191kg/mm ²)
梁式橋 (日本)	10.48m	預力鋼腱採用 CFRP 8~12.5mmφ (fy=157~191kg/mm ²)
梁式橋 (加拿大)	42.85m, 22.83m+ 19.23m／22.7m	預力鋼腱採用 CFRP 8~15.2mmφ (fy=200~178kg/mm ²)
梁式橋 (加拿大)	165m, 5@33m	預力鋼腱採用 CFRP 15.2mmφ GFRP 用於混凝土胸牆
斜張橋 (蘇格蘭)	28.5+63+28.5m	吊索採用 Kelvar aramid fiber & PE coating FRP 床版

一、玻璃橋 (Glass Bridges) [4]

1997 年 12 月美國流行技術雜誌 (Popular Mechanics) 刊登了一個特別的專題「玻璃橋」(Glass Bridges)(圖一)，雜誌封面並呈現了未來橋梁的遠景，提出新的材料以取代傳統的混凝土或鋼構，目前傳統橋梁構件均面臨維修保養問題，依當時美國聯邦公路運輸部調查報告為例，近 42% 美國國內 60 萬座橋梁須予修補，選擇高強度耐久性

《材料應用》

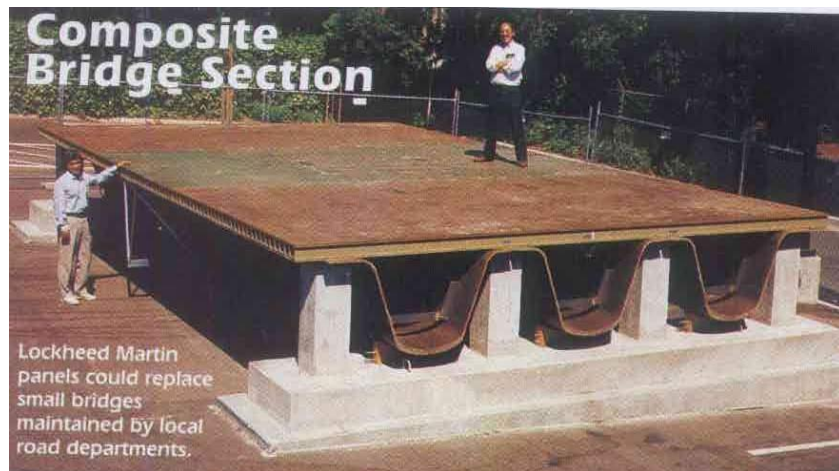
高的材料為重要趨勢。近年來環保概念高漲，推廣以材料延長壽命或再生觀念，橋梁構造採用高性能混凝土、鋼材或複合材料，吊索採用質輕、高強度且非金屬之材料；如日本明石海峽大橋 (Akashi Kaikyo Bridge) 主梁已採用HT780 鋼材質，降伏強度為 $630\text{N}/\text{mm}^2$ ，極限強度為 $780\text{N}/\text{mm}^2$ ，為一般高拉力鋼材強度 2 倍左右；混凝土的極限強度也由 $35\text{N}/\text{mm}^2$ 提升至 $105\text{N}/\text{mm}^2$ ，提高 3 倍左右。



圖一 玻璃橋全景(左圖) 及夜景(右圖)。(參考 Popular Mechanics, 1997.12)

根據相關研究報告指出，採用玻璃或碳纖維材料，重量輕僅有鋼 $1/5$ 並抗腐蝕，若使用玻璃纖維材料替代鋼筋埋置於混凝土橋，橋梁使用壽命將由 50 年延長至 200 年，折舊甚低，對地球有限資源使用不無幫助。另外碳纖維橋質輕、強度高之特性，尤其適合於野戰架橋車使用，每座由 2 片長 14 公尺、寬 1.5 公尺的踏板組成，整體構造如中空三明治式的蜂巢板，中央最厚處僅 63.4 公分，美國國防部曾以 9,000 磅重之碳纖維橋支撐 70 噸坦克車，以橫越障礙或溝渠，足以驗證複合材料之輕巧耐重，並可以充當緊急救難橋梁 (圖二)。

《材料應用》



圖二 複合材料橋面版。(參考 Popular Mechanics, 1997.12)

二、英國艾伯弗萊地人行斜張橋 (Aberfeldy Bridge, U.K.) [4]

1992 年 10 月 3 日在英國蘇格蘭第一座完全複合材料的橋梁落成使用，在當時是全世界第一長的複合材料斜張橋 (圖三)，可以保證前 20 年免維修，全長 113 公尺、橋寬 2.12 公尺，主跨徑 63 公尺，為對稱雙 A 塔式的三跨 (25+63+25 公尺) 連續斜張橋構造，由英國茂盛 (Maunsell) 工程顧問公司負責設計，主要領導工程師為卡迭 (John Cadei)，並由丹迪大學 (Dundee University) 提供材料的製造及學生的協助，全橋以 8 周時間完成架設施工，這是任何傳統橋梁很難達到的目標，據說每塊模組橋版的重量僅憑 2 個人就可以搬動，難怪施工快速。本橋的業主為私人高爾夫球場老闆，他為了擴充 9 個球洞到 18 個球洞，於是購買了塔河 (River Tay) 對岸的一塊地，因此需要架設一座橋梁來連接兩個球場，以讓球友能順利打完全場，全部的工程造價為 20 萬英鎊。

一般公路橋梁活載重與自重比約為 15% 至 30%，本橋主要設計活載重為讓高爾夫球車滿載通過，依照大英國協 (UK) 的設計標準為 5.6kN/m ，但相對本橋採用超輕質材料，自重僅有 2.0kN/m 而言，活載重仍偏高很多 (約 280%)，所以對本橋動力穩定性的要求也相對來得高，以避免類似產生爾後英國千禧橋的不穩定情況，雖然本橋完

《材料應用》

成較早，但是在 2000 年重作更精確的動力分析檢核，其穩定性仍是安全可靠的。全橋複合材料共重 14.5 噸，包含床版及塔採用加強玻璃纖維聚合物 (Glass Fiber Reinforced Polymer)，吊索則採用凱夫拉爾 (Kevlar) 的超強纖維，共有 40 條吊索，每條以平行 49 根的集束而成，外面均套著 PE 保護套管。此外，因為整體結構太輕，所以橋塔基礎設計重點，最特別的不是抗壓力及沉陷，而是抗上揚力。本橋完工後並由丹迪大學檢核施工的可靠性，以確保本橋的使用無虞。



圖三 英國艾伯弗萊地人行斜張橋。(Faber Maunsell 提供)

三、瑞士史托爾克斜張橋 (Stork Bridge, Switzerland) [5]

1996 年在瑞士溫特圖爾(Winterthur)全球第一座採用碳纖吊索的公路橋完工通車，以碳纖吊索斜張橋跨越火車站 18 股軌道區(圖四、五)。本橋為 A 型單塔的二跨 (63+61 公尺) 斜張橋，全長 124 公尺，主跨徑 63 公尺，塔高 38 公尺，採用鋼筋混凝土橋面版，配置雙索面系統，共有 24 條吊索，每條以平行 241 根的鋼線集束而成，外面套著 PE 保護套管。碳纖吊索設計安全係數達 3 倍，抗疲勞強度達 1,000 萬循環次數。本橋並安裝監測系統以了解複合材料的特性，及作為相關設計規範訂定的參考。



圖四 瑞士史托爾克斜張橋[5]



圖五 瑞士史托爾克斜張橋（參考 Google Map）

複合材料延長吊索壽命 可推廣至全橋構件

展望未來，橋梁設計理念將朝向延長設計年限，由現有 50 年、100 年延長至 200 年，臺灣淡江大橋設計壽命 120 年，舊金山新海灣大橋設計壽命 150 年，唯吊索設計壽命 70 年，至少需更換 1 次。橋梁基本要求需滿足安全、實用、經濟及美觀，未來發展趨勢應以改進施工法、創新材料及設計方法革新為主。吊索系統橋梁採用複合材料吊索，可取代傳統鋼吊索，延長使用壽命，複合材料是未來趨勢，可

採漸進方式逐步推廣，由吊索、橋面版至全橋構件。甚至未來超長跨徑橋梁採用複合材料吊索取代鋼吊索，是重要選項也是個趨勢。

參考文獻

1. Stanley Gordon and Walter Podolny “Future Trends in Suspension Bridges”, Bridges into 21st Century, Hong Kong, 1995.
2. Plechnik, J. Henriques, O. and Deshpande, R. “Plastic Highway Bridges”, Civil Engineering, ASCE, Vol 61, No.7, July 1991.
3. 蔡俊鏡，「斜張橋」，科技圖書，1999。
4. 蔡俊鏡，「橋梁—築橋亦築夢」，科技圖書，2018。
5. U. Meier, “Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?”, Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 37, Number 2, 2012.