

山區懸索橋梁之風致反應評估

黃明慧^{1*} 陳昭維^{2*} 邱奕峰^{3*} 陳琮文^{4*}

^{1*}淡江大學土木工程系 助理教授

^{2*}青山工程顧問股份有限公司 總經理

^{3*}青山工程顧問股份有限公司 經理

^{4*}青山工程顧問股份有限公司 組長

摘要

隨著近年來休閒與景觀導向之發展需求興起，許多以人行或低運量用途之中小型跨越性橋梁亦日益受到重視。此類橋梁多位於地勢起伏劇烈之深谷地區，在地形限制下，懸索橋反成為更具可行性的設計方案。然而，懸索橋固有之高柔度結構使其對風載具有高度敏感性，加上其所處之山區地形複雜，易導致工址風場條件產生顯著空間變化，進而提高風致反應評估之不確定性。由於橋梁風致振動行為深受氣流條件影響，如何有效評估此類橋梁之風場特性與風致響應，實為一項極具挑戰之課題。本文以一座位於桃園山區之懸索橋為研究標的，橋梁全長約 380 公尺，主梁採用桁架構造，橋寬 3 公尺，可提供車輛單向通行。風致反應評估分為兩個主要階段：首先藉由 1/2000 縮尺之地形模型進行山區風環境試驗，探討橋址地區之風場特性，包括設計風速與紊流強度分佈；其二，依據風場試驗結果設計 1/100 縮尺全模型風洞試驗，於 100 年回歸期設計風速內進行量測，評估標的橋梁之風致振動反應。

關鍵字：懸索橋梁，縮尺全模型風洞試驗，複雜地形風環境

Keywords: Suspension Bridge, Full Model Wind Tunnel Test, Wind over Complex Terrain

1. 前言

纜索支撐橋梁（Cable-Supported Bridge）透過纜索承擔主要的垂直荷載，使主梁得以大幅減輕自重，得以展現優越的跨徑能力及材料經濟性。同時，纜索支撐橋梁下部結構規模相對縮小，可有效降低對地形與環境的干擾，於環境敏感區或山區地帶更能彰顯其「輕量化、低環境負擔」之優勢。由於其兼具結構與美學價值，完成後往往成為地區地標（landmark），展現現代土木工程技術與景觀設計融合之成果。諸多優點使其成為近代長跨徑橋梁設計中極具代表性的結構型式。

然而相較於一般樑式橋，纜索支撐橋梁亦因其高柔度的結構特性，導致對風力作用特別敏

感，尤其是懸索橋(Suspension Bridge)型式，其承重機制主要依賴曲線主纜，整體行為由主纜主導，結構除了高柔度與低阻尼外，亦有顯著的幾何非線性特性，使其在抗風評估上更具挑戰。1940 年的塔科馬海峽大橋 (Tacoma Narrows Bridge) 即採用懸索橋設計，塔科馬海峽大橋於設計風速內崩塌必然是風工程史上最具震撼的事件之一，亦揭開了橋梁氣彈不穩定 (aero-elastic instability) 研究的序幕。此事件使工程界深刻認知到，柔性長跨橋梁在設計時，必須同時重視抗風穩定與動態舒適性評估。

在台灣的橋梁工程實務中，公路系統多以斜張橋(Cable Stayed Bridge)為主流設計，懸索橋則多半出現在山區、溪谷或原民部落間，作為人行用途的聯外橋梁或休閒景觀橋梁。這類用途的山區懸索橋通常不設具顯著外型的結構主樑，橋面直接由吊索懸掛於主纜之下，氣流可自由通過橋樑斷面，不易形成大規模的流場分離或渦散，換言之，該類橋樑的氣動外形相對良好。此外，該類懸索橋也普遍增設「抗風索」系統 (anti-wind cable) 以抑制側向與扭轉向的擺動，亦顯著提升結構整體勁度與抗風穩定性。

而本研究所探討之案例為台灣少見的具輕量車行功能之山區懸索橋，研究標的橋梁兼具山區懸索橋與車用橋之特徵，探討其抗風問題須同時面對多種挑戰：(1)懸索橋結構具有高度非線性特徵，主纜、吊索與橋面間的力學互制，使結構動態反應對風力作用高度複雜化；(2)車用橋樑主樑斷面通常具有一定的量體以提供強度需求，間接導致其氣動力特徵顯著；(3)山區地形為典型的複雜地形，風速剖面與紊流剖面的分布與平原地形迥異，對橋梁的抖振、顫振乃至渦致反應均有重大的影響。基於此些因素，本研究透過全橋縮尺風洞試驗，評估該懸索橋於實際山區風場條件下之風致反應行為，其風致行為及安全性評估極具研究與實務參考價值，期能提供未來山區車行懸索橋設計與抗風評估之參考，並與結構及風工程界共享經驗成果。

2. 標的橋梁概況

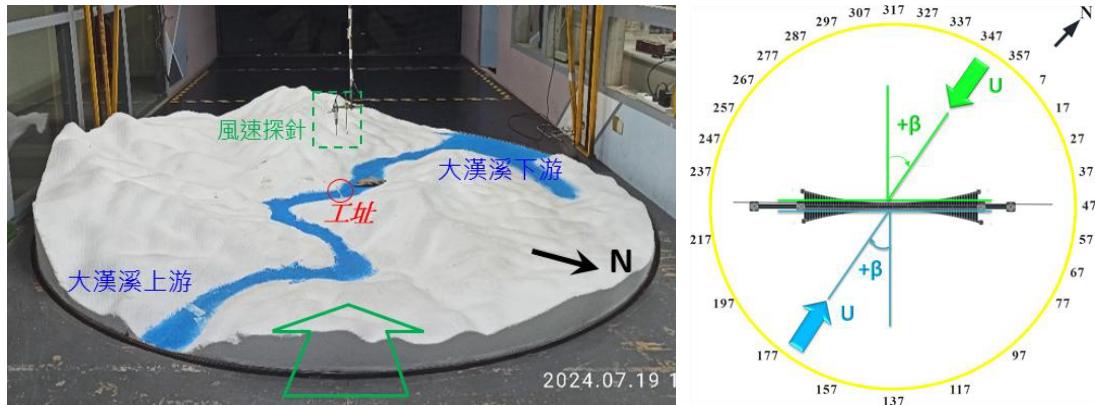
標的橋樑工址位於桃園大漢溪上游山區，橫跨溪谷地形，全長 380 公尺，主跨 270 公尺，屬中長跨懸索橋等級。橋面除了人行通行外也須提供單車道的車輛使用，故採用桁架斷面搭配透風護欄的主樑設計，桁架斷面寬度與深度皆為 3 公尺。

3. 工址風場研究

風場特徵對於大跨橋樑的風致反應及氣動力穩定性影響甚大。就平原地形而言，可依循建築物耐風設計規範及解說所建議之風速剖面以及紊流強度剖面進行設計。然而，山區地形山巒林立，風場情況複雜，逼近流場特性不同於一般標準地況，即便位處同一山區，但不同位置的風場特性亦不相同，若直接採用規範所規定的 A、B、C 三類地況來模擬逼近流場並不合宜。本案中首先規劃 1/2000 之地形模型進行場址風場評估，其涵蓋範圍約為標的橋梁半徑 3 公里內之地形。

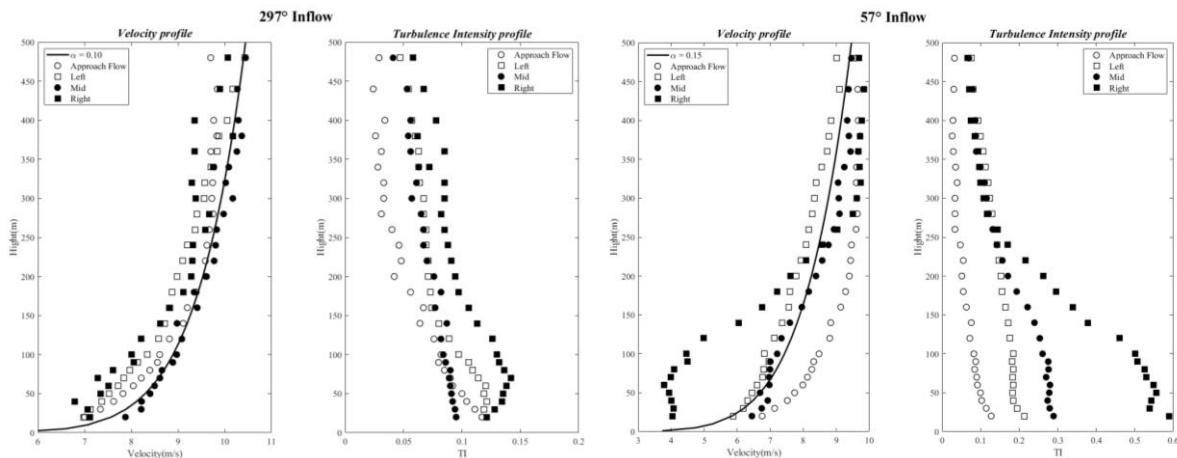
風場研究包含兩階段，第一階段主要欲了解 360 度的遠場來流時，橋址所在處的近場逼近流特性，遠場入流角度選定參見圖一，觀測 28 個遠場入流角度可以得到以下結論：(1) 不論遠場來流風向角為何，經過山區地形自然發展後，工址近場逼近流風向角大約都在 20~40 度左右。(2) 對於近場逼近流的平均風速而言，北側來風(綠色)與南側來風(藍色)之最大平均風速分別出

現在遠場於 297 度及 57 度來流方向。因此本案中選定此二遠場來流為主控來流風向。



圖一：兩千分之一縮尺地形試驗

第二階段則針對此二主控來流風向，進一步量測橋址所在處的風速剖面、紊流剖面。實驗結果如圖二所示，橋址附近平均風速與紊流剖面分佈並非一般常見指數分佈型態，其中由於南側 57 度情況，遠場來流翻越山嶺抵達工址，其風力特徵由地形所主導，因此其風速特徵剖面更顯特殊。此外，該風速特徵剖面結果亦將作為後續縮尺全橋模型試驗中邊界層紊流場模擬之參考依據。



圖二：297 度及 57 度來流情況下，工址位置之風速特徵剖面

4. 縮尺全模型試驗

縮尺全模型試驗幾何縮尺採用 1/100，包含邊界層紊流場、氣彈全模型設計與抖振反應評估二部分。

4.1 縮尺邊界層紊流場與氣彈全模型設計

依據 1/2000 風場研究結果，本案中分別針對北側 297 度與南側 57 度兩個主控來流情況設

計相對應的邊界層流場，其橋面高度的紊流強度設計目標分別採 9.5% 與 28.9%，流場配置如圖三所示。而風場研究中北側 297 度來流來情況，橋址高度平均風速因地形發展有增速現象，因此對其設計風速 $V_{10}(C)$ 進行放大修正。

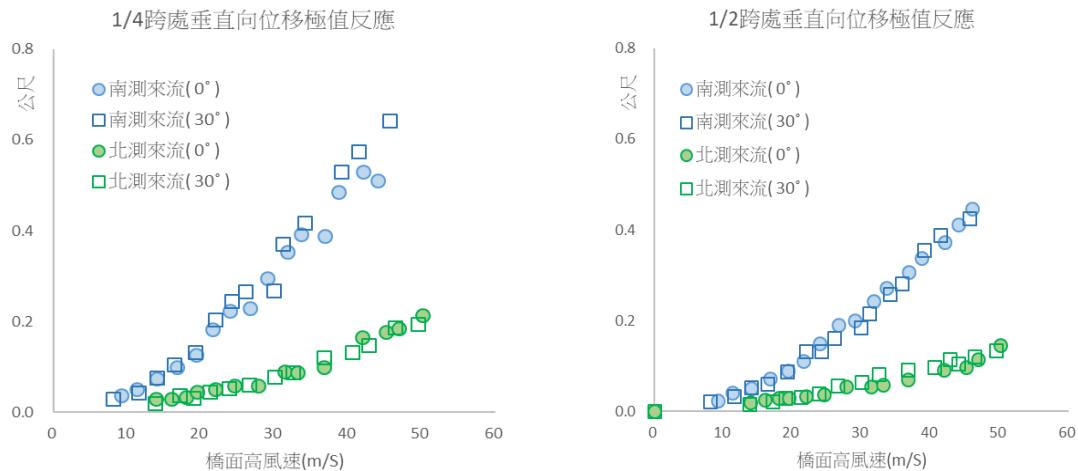
縮尺全模型設計須依循相似性轉換關係，確保模型與實橋具有相似的質量、勁度、幾何相似性以反應合理的橋樑風致反應。本案中以標的橋梁的前四階振態為模擬目標，第一及第二振態分別為主梁的對稱及反對稱拖曳向振態，而第三及第四振態則分別為主梁的反對稱及對稱垂直向振態，縮尺模型的實測頻率與目標頻率誤差值約在 3~10% 左右。



圖三：左(北側來流，30 度風向角)，右(南側來流，0 度風向角)。

4.2 抖振反應評估

抖振評估之試驗架設可參閱圖三，採用非接觸式雷射測距儀量測橋梁主樑 1/2 跨與 1/4 跨的風致抖振反應，試驗條件包含南側與北側兩邊界層流場，以及 0 度、30 度風向角共四種情況，垂直方向的位移極值反應如圖四所示。整體而言，因為大跨懸索的第一垂直振態常以反對稱呈現，故 1/4 跨處的反應均大於 1/2 跨。再者，可觀測到 0 度與 30 度風向角情況下，橋梁抖振反應並無明顯差異，換言之，如利用傳統餘弦法則推估不同風向角時的抖振反應，則會有所低估。最值得注意的是，南側來流因受地形影響甚大導致其紊流強度大幅提升，故該情況的抖振反應是遠大於北側來流情況，足以顯示山區複雜地形的風場研究對於橋梁抖振反應評估的重要性。



圖四：標的橋梁垂直向位移極值反應

5. 致謝

承蒙 桃園市政府原住民行政局暨 青山工程顧問股份有限公司委託本案橋梁風洞實驗，使國內全橋風洞實驗之經驗、技術得以累積提升，本文摘錄部份成果加以整理，目的在於促進台灣風工程領域之學術交流與經驗分享。並感謝 淡江大學風工程研究中心全體同仁，戮力配合完成風洞實驗，為國內土木界增添新的一頁。

6. 參考文獻

- [1] 內政部建築研究所，建築物耐風設計規範及解說，內政部，台北市，2014 年。
- [2] Satoa, H., Hiraharaa, N., Fumotoa, K., Hiranob, S. and Kusuhara, S., "Full aeroelastic model test of a super long-span bridge with slotted box girder", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, Vol. 90(12-15), pp. 2023- 2032.
- [3] Bowen, A. J., "Modelling of strong wind flows over complex terrain at small geometric scales", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, Vol.91, pp1859-1871.
- [4] Simiu, E., and Scanlan, R. H. *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, New York, 1996.