

斜張橋鋼纜索力振動行為與實場實驗

林岳龍¹ 林嘉辰¹ 陳振華^{2*}

¹ 國立高雄大學土木與環境工程學系 學士

²* 國立高雄大學土木與環境工程學系 教授

摘要

斜張橋本著柔軟、細長與高聳的結構外型，風力引致的動力效應遠比地震效應的影響大，因此，斜張橋的各主要構件，如鋼纜的索力、橋面板的流線形狀，以及主塔的穩定性等，皆是直接影響斜張橋的抗風能力的主因。本文主要是以實場實驗方式，量測斜張橋鋼纜的振動頻率與橋面板的振動頻率，並進行索力計算，再評估當橋面受風振動時，兩者是否有局部共振行為，評估鋼纜受到橋面振動牽引的安全性。另外，此一便利性實場實驗方式極易施作，且可獲得工程實務上的精度要求，可藉以快速評估斜張橋之安全性。

關鍵字：蒜頭大橋，鋼纜，監測

Keywords: Aerodynamics, Shuantou Cable-Stayed Bridge, Stayed Cable, Monitoring

1. 前言

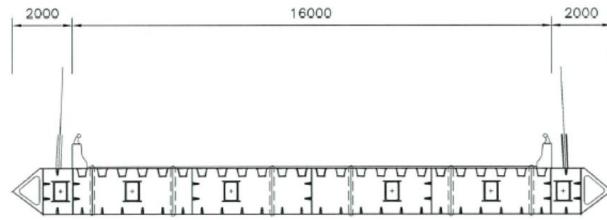
嘉義縣蒜頭大橋完工通車於 110 年 2 月，施工初期曾委託淡江大橋進行風洞試驗評估橋梁整體氣動力穩定性[1]。完工後營運初期即進行長期索力監測工作[2]。因此，除橋梁氣動力穩定性外，其橋體空氣動力反應亦考慮能盡量降低，以符合行人行走之舒適性。另外，斜張橋的鋼纜是最為危險的受拉構件，若有風振疲勞受損與預力損失等情形，將會立即危害到橋梁安全[3]。而鋼纜結構之健康性則是直接反應在鋼纜索力上，若能適度地監測鋼纜索力之變化，亦能達到此類橋梁安全維護之目的。在本文中，主要是利用蒜頭大橋鋼纜索力長期監測與現地試驗工作[4, 5]，再配合橋梁風洞試驗與氣動力規範[6]，探討 20 條鋼纜索力變化、橋體共振行為，藉以提供特殊性橋梁安全監測與抗風維護管理之依據。

2. 橋梁說明

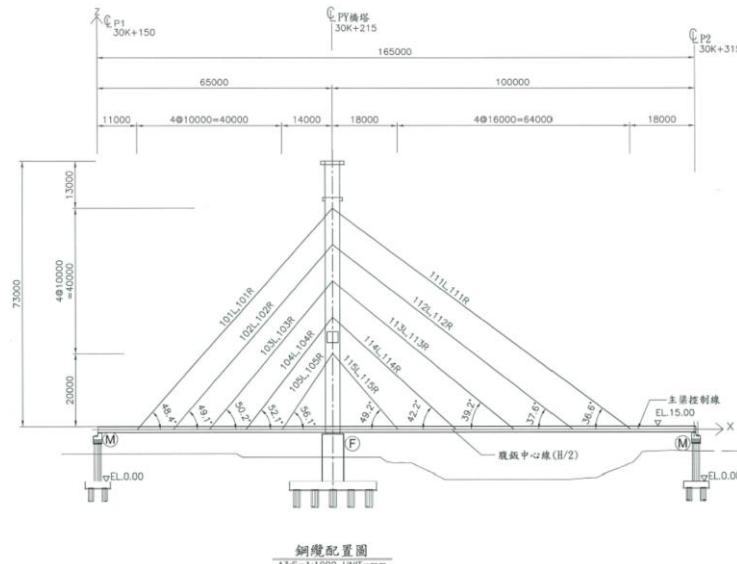
蒜頭大橋為一單塔雙跨度雙索面斜張橋，如圖一所示，主梁標準斷面形狀，寬度 20 公尺及深度 1.5 公尺，如圖二所示，蒜頭大橋跨越中央管河川朴子溪，主塔採用鋼構造 A 型橋塔，塔高度為 73 公尺，斜張橋跨度配置為 65M+100M，總長度為 165 公尺，如圖三所示，鋼纜於橋塔兩側各排列 5 組鋼纜，合計採用 20 組鋼纜懸吊主梁，每組斜拉鋼纜則是採用 55 條單根 Ø15.2mm 鋼絞線組合而成，索長從 24.6 公尺變化到 101.5 公尺。



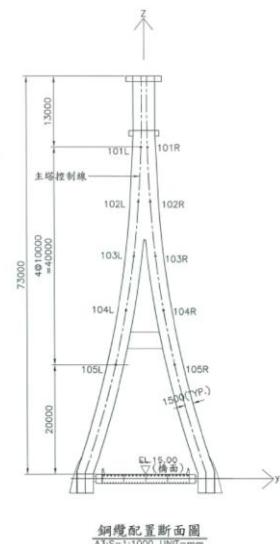
圖一：蒜頭大橋現況照片



圖二：蒜頭大橋標準斷面圖



圖三：蒜頭大橋結構配置立面圖



3. 索力監測系統與現地量測

本文分別採用索力現地量測，如**圖四**所示，與監測系統，如**圖五**所示，兩種方式進行現地試驗，並配合理論公式求得鋼纜索力。

3.1 鋼纜索力監測系統

蒜頭大橋於施工時即於每條鋼纜埋設 3 個 EM 磁通量索力感測器，共使用 60 組索力監測儀器，進行索力長期監測工作，監測系統儀器配置與相對的頻道編號，如**圖六**所示。並依據監測儀器安裝位置進行線路配置(訊號線)、磁通量傳感器(EM sensor)、採集器(多通道採集儀)，以及磁彈分析儀等之安裝。

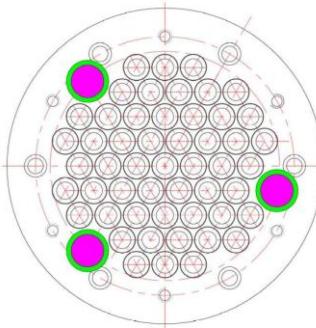
3.2 現地動力試驗與動力特性參數識別分析

現地動力試驗採用微動試驗方式，所使用的儀器是攜帶式儀器設備，儀器精度需求較高，因此，本文以高精度感應器與集錄設備，進行橋梁現地振動試驗，並配合系統識別方法[4]，探求橋體自然振動頻率。橋梁動力試驗方法步驟說明如下：

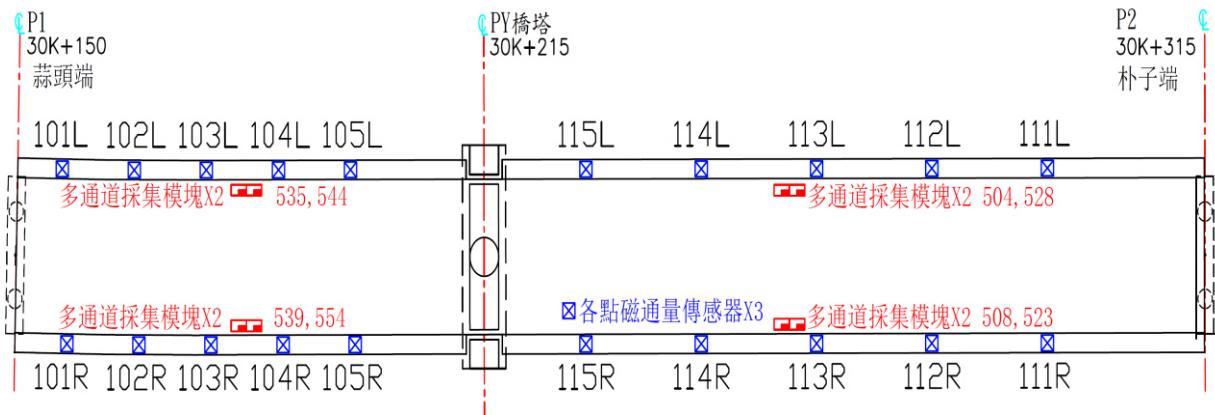
- 橋梁動力試驗以微動試驗方法，獲得橋梁三方向歷時反應圖與頻譜圖。
- 系統識別分析方法，以 ARV 模式或小波轉換識別方法[4]，進行橋梁動力特性識別。
- 由此即可獲得橋體振動頻率等動力特性參數，包括頻率、阻尼比與振態形狀。



圖四：現地索力量測



圖五：蒜頭大橋結構配置圖與安裝情形



圖六：鋼纜電磁拉力計監測通道分布圖

3.3 鋼纜索力現地振動實場實驗

本文鋼纜索力現地振動實場實驗採用振動法，此振動法係將三軸向感應器安裝於鋼纜與橋面板上，如圖四所示，並同時量測橋體三方向反應與鋼纜局部三方向振動時間歷時反應。振動安全檢測方式以現地動力試驗之高精度儀器檢測方式進行，選擇的振動檢測方法可保持橋梁正常通車。另外，量測所得之時間歷時反應可依據學理探求鋼纜局部振動頻率。本文採用工程實務常用的弦振動理論模式[5]，將鋼纜假設為一繃緊弦，索力值可寫成

$$T = \frac{4wl^2}{n^2 g} f_n^2 \quad (1)$$

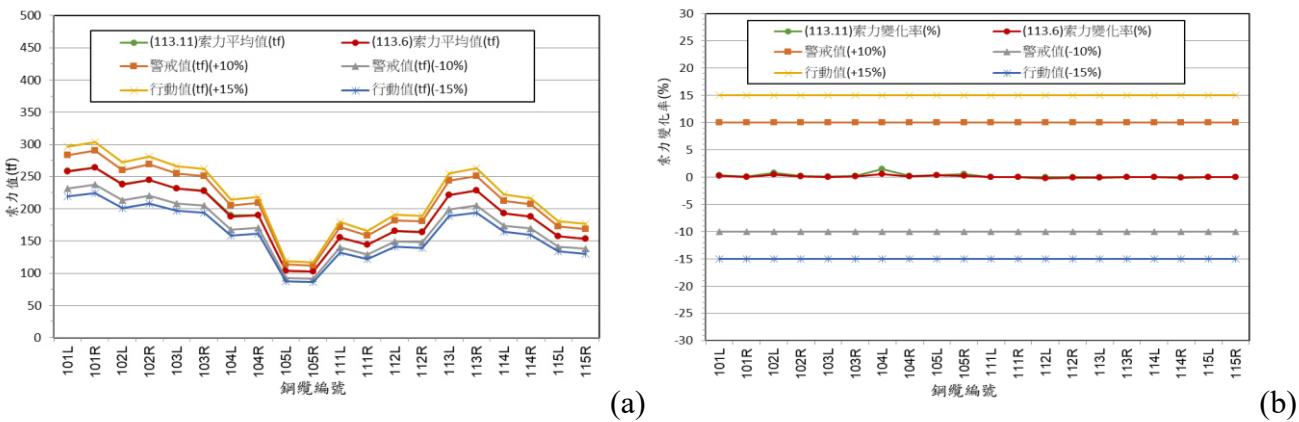
其中 T 為鋼纜張力， w 為鋼纜單位重量， l 為索長， f_n 為第 n 個自然振動頻率值(Hz)， g 為重力加速度($9.81 m/sec^2$)。即可求出個鋼纜索力值。

4. 鋼纜索力監測與現地振動實驗結果

4.1 索力監測結果與評估

蒜頭大橋 20 組鋼纜索力監測結果，各組鋼纜索力分布圖，如圖七(a)所示，監測各組鋼纜索力變化率圖，如圖七(b)所示。說明如下：

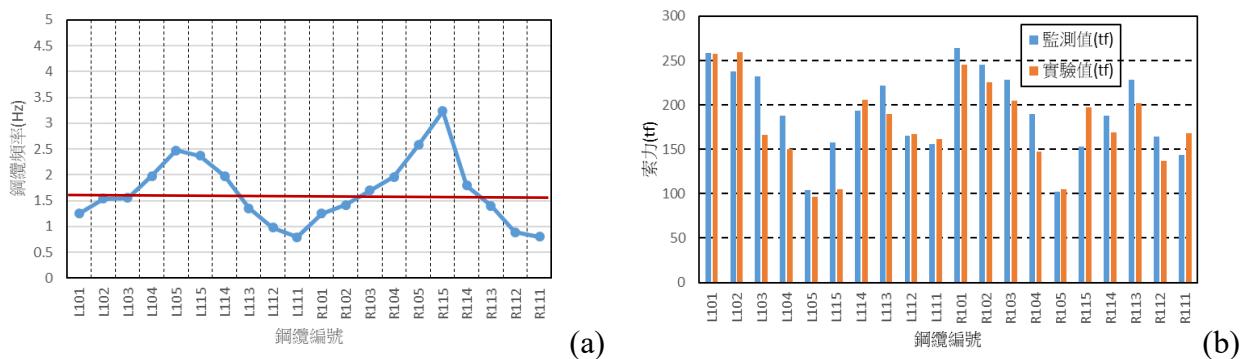
1. 如由圖七(a)所示，本次監測各鋼纜索力值皆在初始值的 $\pm 10\%$ 範圍內，最大索力為 R101 之 264.15tf；最小索力為 R105 之 102.28tf；尚無超過設定的警戒值。
2. 索力變化率圖，如圖七(b)所示，本次監測各鋼纜索力變化率皆介於 0.0%~1.50% 以內，屬於在 $\pm 10\%$ 範圍內，尚無超過設定的警戒值，因此，20 組鋼纜尚屬安全範圍內。



圖七：蒜頭大橋索力監測值：(a). 索力變化圖；(b). 索力變化率圖

4.2 現地索力檢測結果

蒜頭大橋 20 組鋼纜索力實場量測結果，如圖八所示，各組鋼纜第一個振態頻率變化圖，如圖八(a)所示，頻率值索的長度及拉力有關，由圖中可知索長的鋼纜頻率值較低，短索的頻率值則較高，各鋼纜頻率值介於 0.79~3.23Hz，左右兩側鋼纜亦有所差異。另外經由這些振動頻率配合式(1)計算公式即可求得索力，如圖八(b)所示，本次現地試驗各鋼纜索力值，**最大索力為 L102 之 259.46tf；最小索力為 L105 之 96.28tf**；尚無超過設定的警戒值。另外，現地試驗值與監測值相差範圍為-49.6%~22.5%，差異性相當明顯，但兩者尚在 $\pm 10\%$ 範圍內，尚無超過設定的警戒值，因此，20 組鋼纜尚屬安全範圍內。



圖八：蒜頭大橋索力值比較圖：(a). 鋼纜頻率分布圖；(b). 實場實驗與監測值比較圖

4.2 現地振動試驗結果

本文現地動力試驗採用微動試驗方式進行橋梁現地振動試驗，並配合系統識別方

法，探求橋體自然振動頻率。橋梁動力試驗分析結果，橋體三方向振動頻率如表一所示。由於鋼纜另一側是錨定於主梁，若鋼纜第一個振動頻率與主梁的垂直向第一個振動頻率相接近時，當主梁受風振動大時，基於共振效應，會使得相近基頻的鋼纜可能產生較常時大的振幅。因此，由圖八可知，L103 與 R103 鋼纜的振動頻率最為接近主梁垂直向振動頻率，對於此二組鋼纜與主梁的振動互制行為須加以監測。

表一：蒜頭大橋動力特性參數值

mode	X	Y	Z
1	1.52	1.62	0.82
2	3.87	2.98	1.81
3		3.6	2.93
4			4.11

5. 鋼纜渦致振動分析

鋼纜渦致振動振幅之評估，可以利用歐盟風力規範 EN 1991-1-4 中之附錄 E.1.5.2.1[6] 之計算方法評估最大振幅。其計算公式如下：

$$\frac{y_{max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot C_{lat} \quad (2)$$

其中 b ：鋼纜直徑(m)，本文實測鋼纜外套管直徑約為 0.3 公尺； St 為史特赫數，圓柱斷面採 0.18； Sc 為斯柯頓數，其定義為 $Sc = \frac{2 \cdot \delta \cdot m}{\rho \cdot b^2}$ ，其中 ρ 為空氣密度，採 1.25kg/m^3 ； m 為單位長度之質量，採 6.1854kg/m ； δ 為鋼纜對數衰減量，依歐盟風力規範建議，假設為 0.02； K 為振型因子，鋼纜設定為 0.1； K_w 為等效相關長度因子； C_{lat} ：橫向風力係數，圓柱為 0.7。另外，發生渦振之臨界風速可由下式計算

$$V_{crit,i} = \frac{b \cdot n_i}{St} \quad (3)$$

其中 n_i 為纜索第 i 階振動頻率。

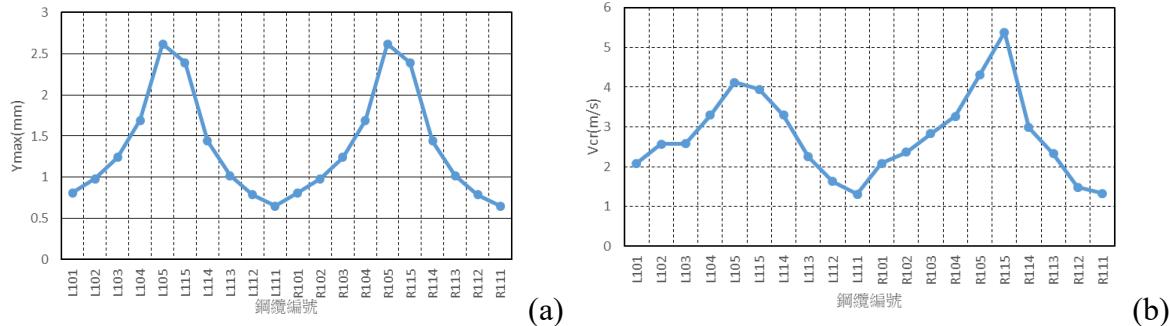
因此，在考慮第一模態下，各鋼纜的渦振臨界風速及最大渦致振幅值，如圖九所示。分析結果顯示，當渦振臨界風速很低時，渦致振動的幅度亦很小；最大振動振幅發生在 R105 鋼纜，臨界風速約為 5.38m/s ，其最大振幅為 2.62mm ，小於纜索直徑之 $1/20$ ，尚不會對纜索產生安全性的影響。

6. 結論

本文綜合現地索力試驗、監測與風洞試驗評估結果可知：

1. 長期監測索力之結果顯示，20 組鋼纜索力在過去監測期間並無發生索力異常情形。

2. 現地索力量測結果顯示，監測值與現地試驗值尚存在差異性，究其原因包括：監測系統屬於靜態監測，而監測值係針對每組 55 根鋼絞線中的 3 根進行量測，再將單根平均索力值乘上 55 根而得整組索力值；現地試驗振動法採用的弦模式產生的計算誤差，以及現地量測所產生的誤差，皆可能有所影響。



圖九：鋼纜渦致振動反應圖：(a). 最大振幅圖；(b). 涡振臨界風速圖

3. 在大風速下，L103 與 R103 鋼纜與主梁共振互制行為，須加以監控。
4. 由風洞試驗可知，鋼纜在低風速的渦激振動方面，最大振動振幅發生在 R105 鋼纜，臨界風速約為 5.38m/s，其最大振幅為 2.62mm，小於纜索直徑之 1/20，尚不會對纜索產生安全性的影響。

7. 致謝

感謝嘉義縣政府建設處支持及淡江大學風工程研究中心傅仲麟教授、黃明慧教授提供寶貴意見，使本文能順利完成，特此致謝。

8. 參考文獻

- [1] 傅仲麟、黃明慧、鄭詩穎、陳振華，(2023)「斜張橋之氣動力穩定性評估及風洞試驗介紹-以嘉義縣蒜頭大橋為例」，營建知訊，台北，台灣，第 484 期。
- [2] 嘉義縣政府，(2024)「蒜頭大橋監測報告書」，嘉義，台灣。
- [3] 陳振華、何宜忠，(2023)「嘉義縣蒜頭大橋氣動力穩定性評估及鋼纜索力監測評估」，第十屆全國風工程學術研討會，成功大學，台南，台灣。
- [4] Chen, C. H., and Ou, C. I., (2011) “Experimental Modal Test and Aerodynamic Analysis in Time Domain of a Cable-Stayed Bridge,” *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(1), 101-125.
- [5] Chen, C. H., and Lin, Y. Y., (2013), “Dynamic Characteristics of Steel Stay Cable in Civil Engineering Using Field Testing,” *Advanced Materials Research*, 634-638, 2770-2773.
- [6] 歐盟風力規範 EN 1991-1-4 中之附錄 E.1.5.2.1.