

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫三：懸索支撐橋梁實場量測、風洞實驗與理論之比較 研究(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC94-2745-E-032-008-URD

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：林堉溢

計畫參與人員：徐佳煌、謝孟融

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 6 月 1 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果期中報告

懸索支撐橋梁實場量測、風洞實驗與理論之比較研究 (II)

Comparative Study of Field Measurements, Wind Tunnel Tests and Theory of Cable-Supported Bridges (II)

計畫編號：NSC 94-2745-E-032-008

執行期限：94年8月1日至95年7月31日

主持人：林堉溢 淡江大學土木系

計畫參與人員：徐佳煌、謝孟融 淡江大學土木系

一、中文摘要

本研究計畫共分為三年，研究重點是藉由實場量測與風洞實驗結果的比對來檢驗橋梁受風理論，及依據抖振理論及不同幾何形狀橋梁斷面的氣動力行為來建立橋梁等值靜力風載重。第二年的計畫包括兩部分，第一部分是執行標的物橋梁的全橋模型風洞實驗，在不同風速下探討流場、風向角對抖振反應及顫振臨界風速的影響。第二部分則是進行不同幾何形狀、不同寬深比之橋梁斷面模型實驗。目前第一部分全橋模型風洞實驗已完成大部份，第二部分斷面模型實驗正進行中。

關鍵詞：纜索支撐橋梁、實場量測、斷面模型實驗、全橋模型實驗、等值靜力風載

Abstract

There are two major parts in this year, the first is to perform full model test of the targeted bridge from which the results will be used in the third year; the second is to perform section model tests of different bridge deck shapes with various width-depth ratios. From the full model test, the dynamic responses of the full bridge can be measured and the results can be used for comparison. From the section model tests, the

aerodynamic coefficients of different bridge deck shapes can be obtained and used in the database. At present, the section model tests are being conducted and the full model tests are almost established.

Keyword: Cable-supported Bridge, Field Measurement, Section Model Test, Full Model Test, Equivalent Static Wind Loads

二、緣由與目的

目前探討橋梁氣動力效應，主要是藉由風洞實驗配合理論模式來進行。然而風洞實驗的準確性與否、不確定性及抖振理論的諸多假設仍有待實場量測結果作一比對驗證。目前國內新建此型橋梁大多有裝設監測系統，然而此類系統並非針對風力來設計，所以無法提供有效的數據作比較分析。因此本計畫即是配合總計畫的實場量測系統，將量測資料與本計畫斷面模型實驗及全模型實驗的分析比較結果，來檢驗全模型風洞實驗的準確性與不確定性，同時也探討目前抖振理論分析模式中某些參數(如氣動力阻抗函數、風力交頻譜相關性)的適用性。另一方面由於抖振反應須借助斷面模型實驗配合理論模式計算而得，其分析過程較為複雜，所以本計畫擬依據抖振理論及不同幾何形狀橋梁斷面的氣動力行為來建立橋梁等值靜力風載重，除了

可以作為橋梁風力規範的基本外，並可作為結構工程師設計橋梁的參考。由於目前國內橋梁工程師對橋梁氣動力行為較無深入的了解，因此一些中跨徑(主跨約 100-200m)懸索支撐橋梁沒有進行風洞實驗，亦無氣動力反應的評估，在某些狀況下可能造成危險性，藉本計畫橋梁等值靜力風載重的建立及顫振臨界風速的簡易計算，即可讓橋梁工程師在設計階段評估橋梁的氣動力行為。

本計畫為三年期，第二年的計畫包括兩部分，第一部分是執行標的物橋梁的全橋模型風洞實驗，第二部分則是進行不同幾何形狀、不同寬深比之橋梁斷面模型實驗。內容包括 (1) 在不同風速下探討流場對橋梁顫振臨界風速、渦流振動及抖振反應的影響。(2) 在不同風速下探討風向角(yaw angle)對橋梁顫振臨界風速、渦流振動及抖振反應的影響。(3) 完成橋梁等值靜力風載重中不同幾何形狀、不同寬深比之橋梁斷面模型實驗。本計畫標的物橋梁原先規劃為漁人碼頭之情人橋，然而此橋跨徑不長且勁度較高，因此在第一年已改為目前國內最長的高屏溪橋。由於經費不足的關係，本計畫全橋模型風洞實驗是與建研所執行的計畫合作採用相同的實驗結果。

三、全橋模型模擬相似律與實驗設計

1. 試驗風洞：

由於淡江大學風洞尺寸太小無法進行高屏溪全橋模型實驗，因此實驗採用內政部建研所於成功大學歸仁校區所完成之風洞，該風洞為一閉迴式風洞(Open Suction Type)。風洞試驗斷面高 2.6 公尺、寬 6 公尺。風洞之最高風速可達 20 m/s。設有直徑 3 公尺之油壓升降式旋轉工作平台，並

配有數位式角度計可精確量測旋轉角度。

主要流場分為平滑流場及模型工址地形流場。(1)平滑流場：風洞內未設置任何會增加紊流強度及紊流長度尺度之架構。

(2)紊流邊界場：模擬原型橋梁工址周圍之地況特性邊界層。

2. 模擬相似率

模型進行風洞實驗時，須遵守模型氣彈力相似性模擬原則，包括風洞流場特性、模型特徵長度縮尺、空氣密度及黏滯力、風速及因重力影響所導致的加速度等。這些物理上的特質則以下述幾點討論：

(1) 雷諾數 (Reynolds Number (Re))

雷諾數為空氣的慣性力與黏滯力的比值，配合不同的風速 (U) 以及橋面版寬 (B) 便可得到實驗所需的雷諾數。

$$\left(\frac{rUB}{m} \right)_m = \left(\frac{rUB}{m} \right)_p \quad (1)$$

式中下標 m 為模型， p 為原型。可是一般的風洞實驗無法達到 $Re = 10^7 \sim 10^8$ 之實場狀況。在縮尺模擬中，大氣邊界層的雷諾數超過 10^5 時，以及鈍體氣動力實驗之雷諾數超過 10^4 時，縮尺模擬的流場特性已不受雷諾數大小的影響。

(2) 福祿數 (Froude Number) :

$$\left(\frac{U^2}{Dg} \right)_m = \left(\frac{U^2}{Dg} \right)_p \quad (2)$$

福祿數為空氣的慣性力和由重力或造成之垂直力的比值為滿足垂直向動力特性上的一致。當縮尺模型需考慮重力影響時，則模型與原型間須滿足福祿數的相似性要求。

(3) 密度比 (Density Ratio)

密度比代表了結構慣性力和空氣慣性力的比值。所以模型應依實場結構的密度

來模擬，模型密度比應符合原型。

$$\left(\frac{\mathbf{r}_s}{\mathbf{r}_f} \right)_m = \left(\frac{\mathbf{r}_s}{\mathbf{r}_f} \right)_p \quad (3)$$

(4) 彈性比 (或稱 Cauchy Number)

由於勁度比的模擬將影響結構的自然頻率，故須將模型的勁度比模擬和原型相同。然而在模型的製作上，對於勁度比的模擬相當困難，所以一般在實際的運用上是以質量比與史特赫數 (Strouhal Number) 為模擬基準。換句話說，若模型和原型能夠符合質量的模擬，且滿足史特赫數時，則勁度比即能符合。

$$\left(\frac{f_0 D}{U} \right)_m = \left(\frac{f_0 D}{U} \right)_p \quad (4)$$

其中 f_0 ：為結構的自然頻率。

由於模型與原型之間必須保持頻率比一致，則必須滿足

$$\left(\frac{f_i}{f_j} \right)_m = \left(\frac{f_i}{f_j} \right)_p \quad (5)$$

(模型 i 振態與 j 振態的頻率比應與原型相同)

(5) 阻尼比 (Damping Ratio)

阻尼比為結構振動週期中的能量損耗率，因此阻尼比的大小將影響結構位移反應的大小，所以為預測結構反應很重要的一項參數。

$$(\mathbf{x})_m = (\mathbf{x})_p \quad (6)$$

所以模型的阻尼必須和原型相同。

3. 全橋模型設計

本計劃橋梁工址位于高雄縣與屏東縣間，為一橫跨高屏溪的南二高橋梁，該橋的地形自西端穿出丘陵後，向寬廣遼闊之高屏溪河谷平原伸展東延，以百分之一點七坡度向東側傾斜。

原型橋梁之主跨徑 330 公尺，側跨徑 180 公尺，全長 510 公尺，箱型梁寬 34.4 公尺，高 3.2 公尺。

依據風洞物理模擬求得橋梁架構之所需資料與尺寸，全橋模型考慮時間、長度及速度縮尺、質量模型則考慮密度比之模擬，其模型設計方式如下：

(1) 設計全橋模型之橋面板：將模型縮尺設計為 1：125，則全橋模型跨徑長約 4.08 公尺、橋面板寬 27.6 公分、橋面板深 2.56 公分。

(2) 設計全橋模型拱圈模型：將橋塔設計書所提供之橋塔斷面，同時利用有限元素法模擬橋塔整體勁度，可得到斷面設計。

(3) 由於模型是由各種不同的材料所組合而成，因此在計算轉動慣量時，是利用數值計算求得質量分配位置，將其設置於模型內。

(4) 利用橋梁設計書所設計之纜索資料，對於纜索之質量與拖曳向力量做一模擬。

(5) 全橋模型基本設計完成其鋼架結構，最後再將全橋模型剛架利用壓克力做出造型，並將質量分配至壓克力如圖1。

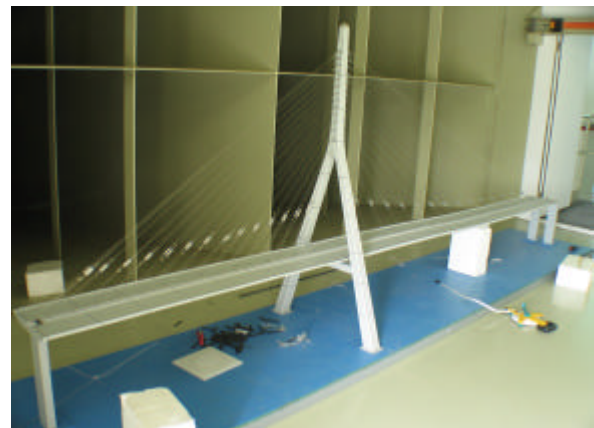


圖 1 全橋模型剛架外型完成圖

(6) 利用加速度計求取全橋模型之基本振態頻率。其結果如表 1 所示。

表 1 全橋實驗參數一覽表

	實場量測 原型 橋梁頻率 (Hz)	縮尺後 頻率 理論值 (Hz)	敲擊試驗 之全橋模 型頻率 (Hz)
第一垂直	0.273	3.05	3.375
第一扭轉	0.730	8.16	7.75
第一托曳	*0.609	6.81	6.125
頻率比 ($\frac{w_q}{w_n}$)	2.67	2.67	2.30

四、實驗結果

1. 平滑流場

圖 2 至圖 4 為平滑流場下主跨之振動反應。垂直向振動反應隨風速增加其反應亦有遞增現象，但對於風攻角的改變並無明顯變化。因橋梁之扭轉頻率較高，使橋梁之扭轉振動反應並無隨風速與攻角變化而明顯改變。在主跨拖曳向擾動反應方面，對於風速及攻角的變化反應並不明顯。

當實場風速接近 120m/s 時，其扭轉向振動反應並無明顯攀升，此時試驗風速遠超過 500 年回歸期設計風速 60.8m/s。而在數值分析方面，顫振臨界風速約為 145.6m/s，亦遠高於 500 年回歸期設計風速，顯示在平滑流場下無氣動力不穩定的現象。

在實場風速 40m/s 以下，並無發現產生渦流顫振現象，表示橋梁受到尾跡渦流影響較微弱。

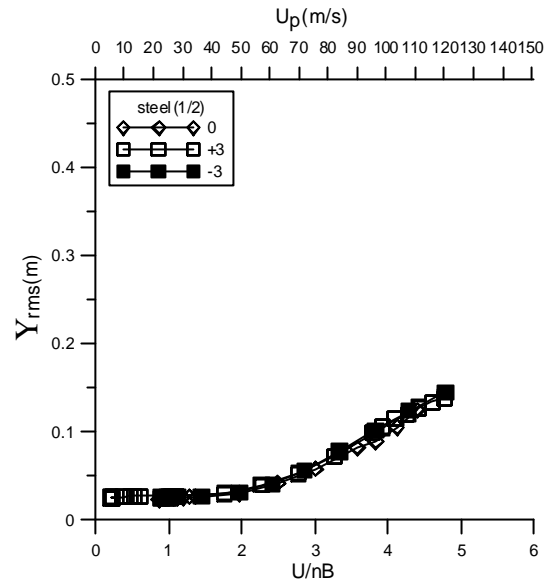


圖 2 平滑流場 0° 風向角下各風攻角在主跨 1/2 處之垂直擾動反應

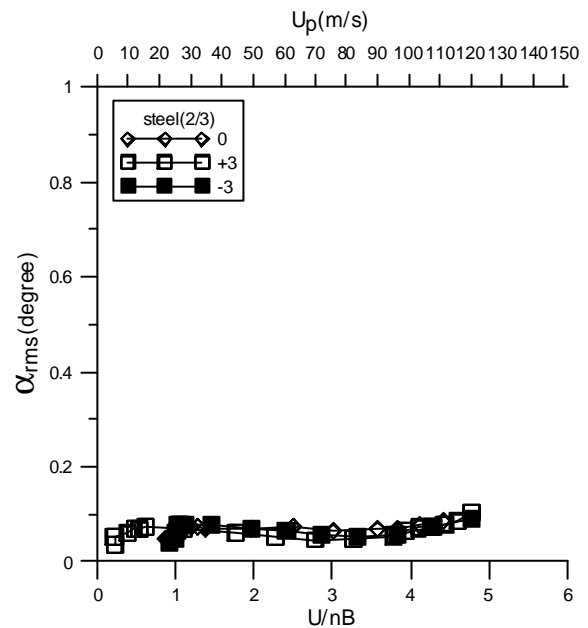


圖 3 平滑流場 0° 風向角下各風攻角在主跨 2/3 處之扭轉擾動反應

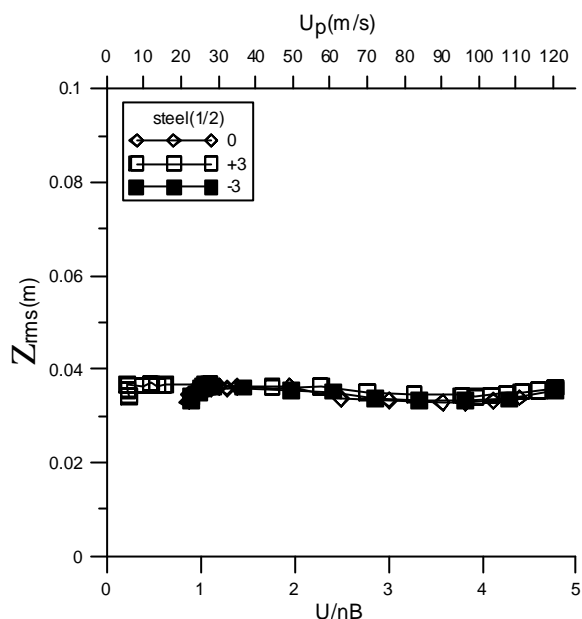


圖 4 平滑流場 0° 風向角下各風攻角在主跨 1/2 處之拖曳擾動反應

2. 邊界紊流場

圖 5 至圖 7 為邊界紊流場下之振動反應。橋梁的抖振反應係指橋梁在紊流作用的結構動態反應。因此抖振反應是以全橋模型在紊流邊界層流場的量測結果。

從圖中可知，垂直向擾動反應方面，在實場風速 90m/s 以前，0 度風向角反應較其他風向角大，超過 90m/s 後，則 +30 度風向角反應較其他角度明顯。扭轉向擾動反應方面，0 度風向角反應較其他風向角小，則 -30 度風向角則較其他兩角度有稍大之擾動反應。拖曳向反應方面，對於風速變化其值有些微遞增現象，且在 +30 度風向角較其他兩風向角變化稍大。概括來說，風向角的改變對於橋梁的擾動反應並無明顯差異產生。

從表 2 與表 3 可看出，當設計風速 52m/s 與 500 年回歸期風速 60.8m/s 時，其各風向角之垂直擾動反應值約在 7~10cm；扭轉向擾動反應值約為 0.05~0.09 度；拖曳向擾動反應值約為 0.04，其影響均在可接受的範圍之內。

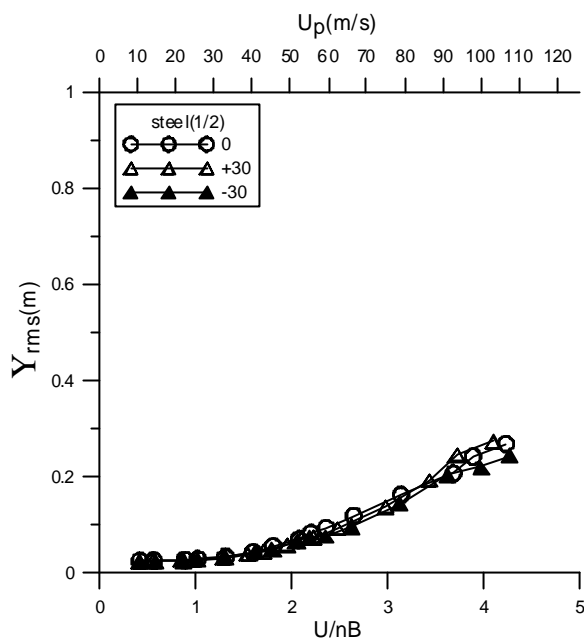


圖 5 邊界紊流場各風向角在主跨 1/2 處之垂直擾動反應

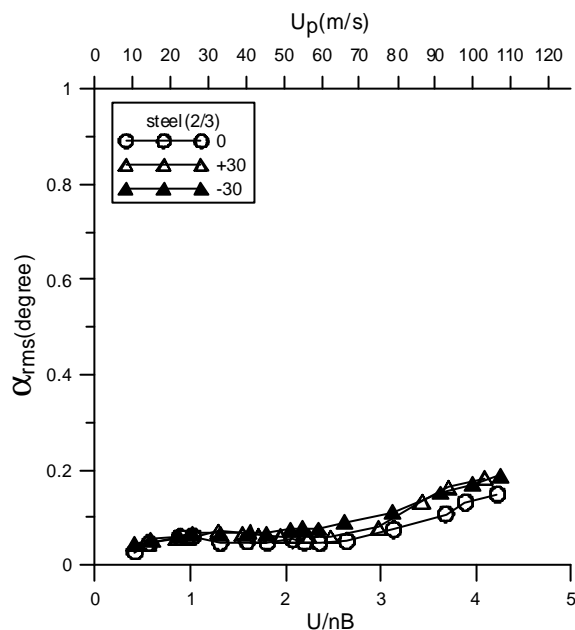


圖 6 邊界紊流場各風向角在主跨 2/3 處之扭轉擾動反應

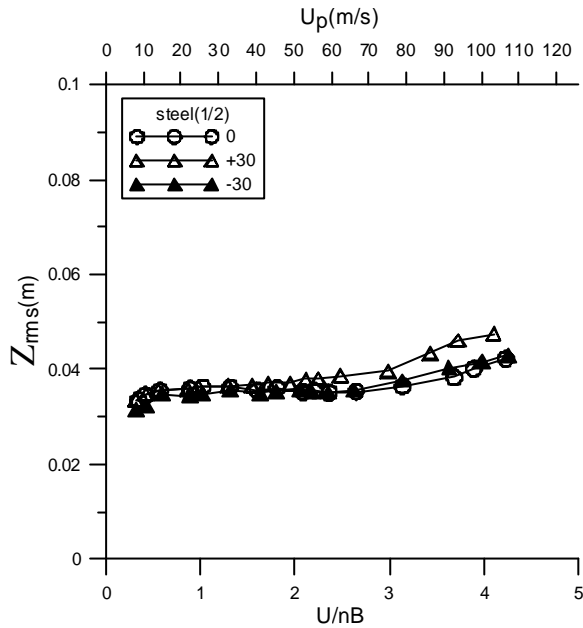


圖 7 邊界紊流場各風向角在主跨 1/2 處之拖曳擾動反應

表 2 全橋試驗在邊界紊流場於設計風速 52m/s 之反應 (單位：公尺、度)

	風向角	垂直 r.m.s	扭轉 r.m.s
主跨 2/3 處	30 °	0.0761	0.0600
	0 °	0.0787	0.0469
	-30 °	0.0647	0.0771

	風向角	垂直 r.m.s	扭轉 r.m.s
主跨 1/2 處	+30 °	0.0911	0.0595
	0 °	0.0925	0.0589
	-30 °	0.0752	0.0863

	風向角	拖曳 r.m.s
主跨 1/2 處	+30 °	0.0387
	0 °	0.0350
	-30 °	0.0352

表 3 全橋試驗在邊界紊流場於 500 年回歸期風速 60.8m/s 之反應 (單位：公尺、度)

	風向角	垂直 r.m.s	扭轉 r.m.s
主跨 2/3 處	+30 °	0.1141	0.0796
	0 °	0.0994	0.0505
	-30 °	0.0816	0.0902

	風向角	垂直 r.m.s	扭轉 r.m.s
主跨 1/2 處	+30 °	0.1366	0.0743
	0 °	0.1178	0.0664
	-30 °	0.0958	0.0938

	風向角	拖曳 r.m.s
主跨 1/2 處	+30 °	0.0397
	0 °	0.0353
	-30 °	0.0355

五. 結論

本計畫不同幾何形狀之橋梁斷面模型風洞實驗正進行中，另一部分全橋模型風洞實驗已完成大部份。

六. 參考文獻

1. Scanlan, R. H. and J. J. Tomko, "Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivative," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 97, 1971, pp.1717-1737.
2. Scanlan, R.H., "Interpreting Aeroelastic Models of Cable-Stayed Bridges," *J. Eng. Mech.*, ASCE, 113(4), 1987, pp. 555-575.
3. Sarkar, P. P., Jones, N. P., and Scanlan, R. H., "System identification for estimation of flutter derivatives", *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*,

- 41-44, 1992.
4. Imai, K., Yun, C. B., Maruyama, O., and Shinozuka, M., "Fundamentals of System Identification in Structural Dynamics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, **4**(4), 1989, pp. 162-173.
 5. Iwamoto, M., and Fujino, Y., "Identification of Flutter Derivatives of Bridge Deck from Free Vibration Data," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics*, **54/55**, 1995, pp. 55-63.
 6. Holmes, J. D., "Effective static load distributions in wind engineering," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **90**, 2002, pp. 91-109.
 7. Chen, X., and Kareem, A., "Equivalent Static Wind Loads for Buffeting Response of Bridges," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **127**(12), 2001, pp. 1467-1475.
 8. Holmes, J. D., "Effective static load distributions for resonant dynamic response of bridges," *Proc. 10th Int. Conf. on Wind Engrg.*, Copenhagen, 1999, pp. 907-911.
 9. Kasperski, M., and Niemann, H. -J., "The LRC (load-response-correlation) method: a general method of estimating unfavorable wind load distributions for linear and nonlinear structural behavior," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics*, **43**, 1992, pp. 1753-1763.
 10. Xu, Y. L., and Zhu, L. D., "Field measurement results of Tsing Ma suspension Bridge during Typhoon Victor," *Structural Engineering and*

Mechanics, **10**(6), 2000, pp. 545-559.