

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

長跨徑橋樑渦散振動的實驗與分析研究

Experimental and Analytical Study of Vortex-Induced Vibrations of Long-Span Bridges

計畫編號：NSC 89-2211-E-032-022

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：林堉溢 淡江大學土木系

共同主持人：鄭啟明 淡江大學土木系

計畫參與人員：藍倉連 吳國鼎 淡江大學土木系

一、中文摘要

渦流顫動是橋樑顯著的氣動力效應之一。而斷面幾何形狀是影響渦流顫動的主要因素，所以本文藉由風洞實驗來求得兩種斷面在不同寬深比的氣動力阻尼參數，並探討其對在鎖住現象下位移反應的影響。本文預測橋樑在渦流顫動的位移反應主要分為兩步驟，首先是建立一數值模式用來描述橋樑的運動狀態，利用風洞實驗所得結果來定義欲求之參數；再來是將所得之參數帶入原型橋樑運動方程式以獲得其位移反應。由本文的研究可知，結構斷面形狀對渦流顫動的位移反應有很大的影響。

關鍵詞：長跨徑橋樑、渦流顫動、斷面模型、寬深比、鎖住現象

Abstract

Vortex shedding is one of the prominent aerodynamic phenomena of long-span bridges. It is mainly affected by the geometry of bridge deck section. In this project, wind tunnel tests and numerical analyses were conducted to study the effects of different width-depth ratios on vortex shedding of bridges. A nonlinear vortex shedding model is adopted in this study. Through the tests,

the parameters in this model can be obtained, and then were used in the numerical analysis to calculate the lock-in response of bridges. The results indicate that effects of different width-depth ratios on vortex shedding are significant.

Keyword: long-span bridges, vortex shedding, section model, width-depth ratio, lock-in

二、緣由與目的

長跨度橋樑由於其跨徑長、重量輕，相對的結構柔度也較大，所以對空氣動力效應極為敏感。而渦流顫動是橋樑顯著的氣動力效應之一，所謂渦流顫動是由於氣體在物體表面發生分離所引起的現象，使物體的上下側產生規律有週期的渦流，由於渦流在不同時間產生，造成物體上下側壓力不同，而使結構發生不穩定顫動現象。

渦流發生的頻率不但與風速有關，也和結構物形狀、大小有關，對於非圓柱形結構物亦與風攻角有關。渦散振動一般都在低風速下形成，雖不會對橋樑結構有立即性的破壞，可是其持續性振動可能引發橋樑結構產生疲勞效應而破壞，且此振動對行車的安全性、舒適性都會有所影響。所以本文研究乃針對兩種不同的橋樑斷面，探討斷面寬深比對渦散振動效應的影響。

響。

三、實驗配置

1. 風洞：本研究係使用淡江大學大氣邊界層風洞實驗室來進行一系列的風洞模擬實驗。此風洞為一開放吸入式風洞，試驗段長 18.0m，試驗段寬 3.2m，試驗段高 2.0~2.4m。

2. 斷面模型：本研究橋樑斷面，寬為 30m，深分為 2.5m、3m、3.75m 和 5m 四種，選用兩種典型的幾何形狀。一為箱型斷面，以下簡稱 Model_1-4；另一為流線箱型斷面，以下簡稱為 Model_1f-4f。模型縮尺為 1/100。其幾何斷面形狀如圖 1 所示。

四、理論背景

以 Van der Pol 模式為基礎，鈍體垂直向渦流顫動反應的非線性模式，可表示如下[1]：

$$F = \frac{1}{2} \dots U^2 (2D) \left[Y_1(K) \left(1 - \nu \frac{y^2}{D^2} \right) \dot{y} + \frac{1}{2} \bar{C}_L(t) \right] \quad (1)$$

其中 D 為垂直向迎風面寬度； \dots 為空氣密度； $K = \dot{S}D/U$ 為渦流顫動之無因次化頻率； S 是滿足 Strouhal 關係之渦流顫動頻率； ν, Y_1 為實驗識別的參數項； \bar{C}_L 為昇力係數。

1. 參數識別

本研究是使用衰減共振法來識別 ν, Y_1 。此法是給予一適當的初始位移，當橋體在鎖住現象發生時，可很快達到穩態。利用此法，則垂直向參數可表為：

$$Y_1 = \frac{1}{4m_r} [rS^2 + 8'K_1] \quad (2)$$

$$\nu = \frac{r'}{m_r Y_1} \quad (3)$$

其中

$$r = -\frac{2K}{nfs^2} \ln \left[\frac{A_0^2 - S^2 R_n^2}{A_0^2 - S^2} \right]; A_0 \text{ 為起始振幅}; R_n = A_0 / A_n; A_n \text{ 為 } s = 2nf/K \text{ 時之正規化振幅}; \beta \text{ 為穩態振幅}; m_r \text{ 是質量比} = \dots D^2 / m; ' \text{ 為結構垂直向阻尼比。}$$

扭轉向渦流顫動反應可用類似式 1-3 求得。

2. 數值分析

由於鎖住現象的振動會發生在接近單一振態的自然頻率上。利用廣義座標 $\langle_h(t)$ 及形狀函數 w_h ，則橋樑垂直運動方程式可表為：

$$M \left[\ddot{\langle}_h(t) + 2'_{h} \dot{\langle}_h(t) + S_1^2 \langle_h(t) \right] = \quad (4)$$

$$\left\{ \dots UD \int_0^L Y_1 [1 - \nu w_h^2(x) \langle_h^2(t)] w_h^2(x) dx \right\} \langle_h(t)$$

其中 M 為廣義質量。假設廣義座標可用 $\langle_h(t) = \langle_{h0} \cos(\dot{S}t)$ 表示，其中 $\dot{S} \approx S_1$ ，利用能量條件推導， \langle_{h0} 可表示如下：

$$\langle_{h0} = 2 \sqrt{\left(\frac{\Phi_{h2}}{\nu \Phi_{h4}} \right) \left[1 - \frac{2'_{h} K_1}{m_r Y_1} \right]^{1/2}} \quad (5)$$

其中 $\Phi_{hp} = \int_0^L w_h^p(x) \frac{dx}{L}$ ， $p=2$ or 4。同理，橋樑扭轉位移可用類似式 4-5 求得。

五、實驗及分析結果

1. 垂直向實驗結果

圖 2 為箱型斷面正規化垂直位移和無因次化風速關係圖。從圖 2 結果可發現，渦散現象除了寬深比 8 的斷面外，其餘大約隨寬深比增加而有遞減的趨勢。值得注意的是寬深比 8 的斷面渦散現象並不顯著，明顯與趨勢不符，其原因值得以後作進一步的探討。圖 3 為流線箱型斷面正規化垂直位移和無因次化風速關係圖。從圖 3 結果可發現，除了寬深比 6 的斷面外，大致隨寬深比增加而有遞減的趨勢。

2. 扭轉向實驗結果

圖 4 為箱型斷面扭轉位移和無因次化風速關係圖。從圖 4 結果可發現，當寬深

比從 10 增加為 12 時，渦流顫動隨寬深比增加而遞減；然而寬深比從 10 降為 6 時，渦流顫動卻隨寬深比降低而遞減。圖 5 為流線箱型斷面扭轉位移和無因次化風速關係圖。從圖 5 結果可發現，此斷面扭轉渦散現象隨不同寬深比並沒有一致的趨勢。寬深比 10 有最大的反應，其次依序為 8、12 最小為 6。

3. 箱型斷面與流線箱型斷面比較

本文所選用的兩種斷面模型，其主要差別是，流線箱型斷面為箱型斷面加上整流片。所以本節即就其位移反應來探討加不加整流片之影響。

由圖 2-3 比較可知，在寬深比為 12 和 10，加不加整流片對位移反應並沒有影響；寬深比為 6 時，加了整流片對位移反應有抑制效果。同時由比較結果也可發現，相同寬深比其鎖住現象卻發生在不同的無因次化風速，那是因為當寬深比大時，加裝整流片與否，對其尾跡特性並無明顯改變；然而寬深比較小時，其尾跡會因無加裝整流片而有所變化，以致於風速會較大。

由圖 4-5 比較可知，在寬深比為 12 和 10，加了整流片對位移反應有抑制效果，且寬深比 12 的效果較寬深比 10 佳；寬深比為 8 時，加不加整流片對位移反應並沒有影響；而當寬深比為 6 時，加了整流片反而使位移反應變的更大，此結果與規劃實驗時的預期結果不相符合，不過卻與 Nagao 等人的研究結果相同[2]。

4. 數值分析結果

採用類似高屏溪橋的結構模式，將實驗所得之氣動力參數代入數值模擬運算，即可求得橋樑在渦流顫動鎖住現象下，不同風速的位移反應。圖 6 與圖 7 分別為箱型斷面、流線箱型斷面在鎖住現象風速範圍內，垂直向最大位移反應圖。由圖可知，

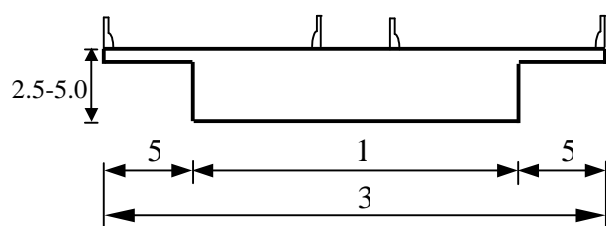
基本上隨寬深比越大，其位移反應越小。圖 8 與圖 9 則為扭轉向最大位移反應圖。由圖可看出，其發生鎖住現象的風速較垂直向大，約在 26 35 m/s 之間。對寬深比 6、8 和 10 而言，其結構扭轉向位移反應並沒有明顯的趨勢，不過整體而言，寬深比較大者其位移反應還是較小。

六. 結論

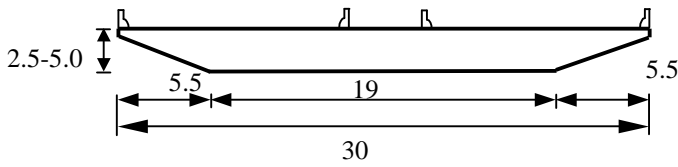
由本文所提及之實驗與數值分析結果，可得下列結論：(1)結構斷面形狀對渦流顫動的位移反應有很大的影響。(2)由氣動力阻尼參數的識別上可知，非線性氣動力阻尼 γ_1 對位移反應的影響較線性氣動力阻尼 γ_1 來的大。(3)基本上隨著斷面寬深比越大，其位移反應越小，也就是受到鎖住現象的影響越小。(4)整流片是用來減小流體對結構引發的氣動力效應，不同的整流片裝在不同的橋樑斷面上，都會有不同的效果產生，有的較佳，有的則沒有，有的甚至會出現反效果。

七. 參考文獻

1. Ehsan, F. and Scalan, R. H. (1990), "Vortex-induced vibration of flexible bridges," *J. Engrg. Mech.*, ASCE, Vol. 116(6), pp.1392-1411.
2. Nagao, F., Utsunomiya, H., Oryu, T., Manabe S. (1993), "Aerodynamic efficiency of triangular fairing on box girder bridge," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp.565-574.



(a) Model_1-4



(b) Model_1f-4f

圖 1 橋樑斷面

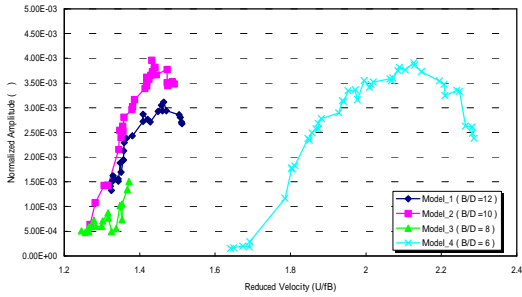


圖 2 箱型斷面垂直向位移反應圖

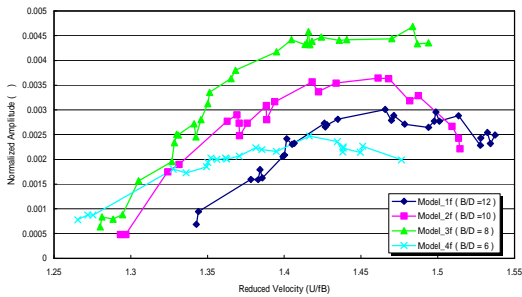


圖 3 流線型斷面垂直向位移反應圖

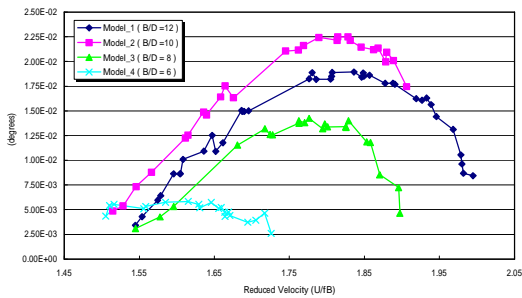


圖 4 箱型斷面扭轉向位移反應圖

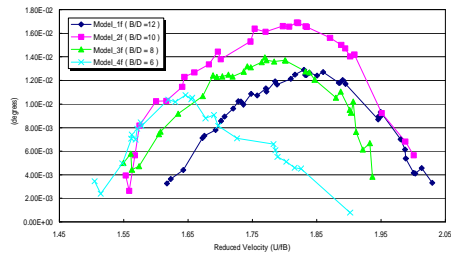


圖 5 流線箱型斷面扭轉向位移反應圖

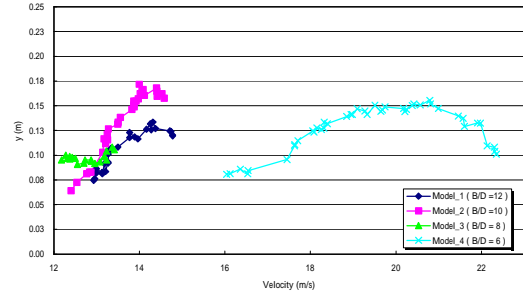


圖 6 箱型斷面垂直向數值計算之最大位移反應圖

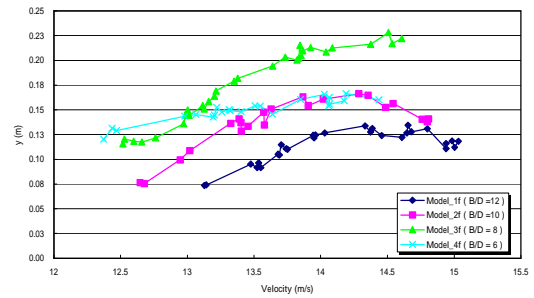


圖 7 流線箱型斷面垂直向數值計算之最大位移反應圖

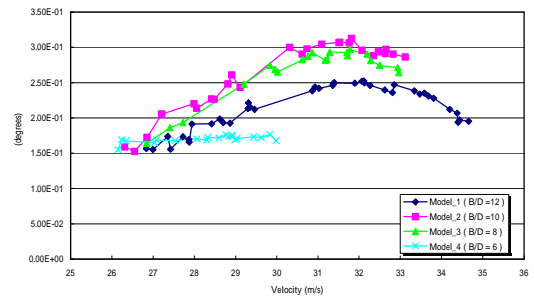


圖 8 箱型斷面扭轉向數值計算之最大位移反應圖

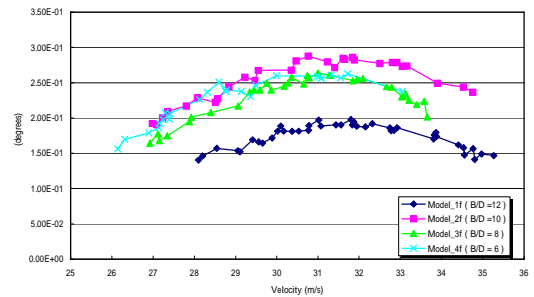


圖 9 流線箱型斷面扭轉向數值計算之最大位移反應圖