

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高層建築氣彈力行為之風洞試驗研究 (三)

Wind Tunnel Investigations on The Aeroelastic Behavior of High-rise Buildings (3)

計畫編號：NSC 88-2211-E-032-007

執行期限：87年8月1日至88年10月31日

主持人：鄭啟明 淡江大學土木工程系

中文摘要

本文主要是以順風向、橫風向及扭轉向三軸向之氣彈模型實驗，藉由兩種淺矩形 $B/D=0.4$ 、 0.6 斷面模型、兩種流場（開闊地形、都市地形）及一系列的結構 Scruton No. 參數為控制變因，觀察其氣彈力模型在順風向和橫風向的位移反應，求出橫風向氣動力阻尼，並與方形、深矩形 $B/D=2.0$ 模型氣彈力實驗作一相對的探討。

淺矩形和方形斷面結構於開闊地形流場中 Scruton No. 參數較低（約為 3.5）時，會有顯著的氣彈力現象，且於斷面長寬比 $B/D=0.6$ 時，氣彈力實驗之橫風向擾動位移反應有最大的峰值產生；又當 Scruton No. 參數較高（約為 6.0）時，氣彈力現象減弱，且方柱之氣彈力實驗之橫風向擾動位移反應有最大的峰值產生。

於都市地形流場中，Scruton No. 參數較低（約為 3.5）時，僅有淺矩形 $B/D=0.4$ 、 0.6 斷面結構有顯著的氣彈力現象，方形和深矩形 $B/D=2.0$ 斷面結構由於正值氣動力阻尼作用，橫風向擾動位移較小；又當 Scruton No. 參數較高（約為 6.0）時，氣彈力現象減弱，淺矩形 $B/D=0.6$ 斷面結構之氣彈力實驗之橫風向擾動位移反應有最大的峰值產生。

隨著 Scruton No. 參數的增加高層建築逐漸趨於穩定，在開闊地形流場下淺矩形斷面與方形斷面之氣動力阻尼分佈相似；而在都市地形流場下淺矩形斷面較方形與深矩形危險，其反應行為伴隨著負值氣動力阻尼。

關鍵詞：氣彈力，風洞，高層建築

Abstract

Triple-mode, two sway modes and one torsional mode, model were built to carry out the aeroelastic tests. Two kinds of width-to-depth ratio, $B/D=0.4$ and 0.6 , characteristics of flow field, and many kinds of Scruton No. were chosen to be the experimental parameters. The building's alongwind and acrosswind displacement were measured. Then, the acrosswind aerodynamic damping was evaluated and compared with square, depth-rectangular section $B/D=2.0$ model's aeroelastic experiment results.

Experimental results show that, when Scruton No. is about 3.5, the shallow rectangular cross-section $B/D=0.6$ building exhibited noticeable aerodynamic instability in the open terrain flow field. In the city flow field, similar behavior was observed for buildings with width-to-depth ratio of 0.6. When the Scruton No. is close to 6, the aeroelastic experiment results agreed well to the analytical predictions which includes the aerodynamic damping effect. And the square section model in the open terrain flow field has the maximum acrosswind displacement, the width-to-depth ratio of 0.6 rectangular model in the city flow field has the maximum acrosswind displacement. Increase of Scruton No. tends to cause aerodynamic stability on buildings.

Keywords: High-rise, Aeroelastic, Wind

1. 前言

國內法規的高層建築結構設計關於風力工程的部份常以結構位移反應為分析的依據，在設計前期必須適當的評估結構物在使用年限內發生超過設計允許最大位移的機率，並在安全性與經濟性的評估下取得平衡點。分析時應對結構物在順風向、橫風向及扭轉向三者的反應作有效地預測。由於高層建築所受的風力作用具有強烈的散漫特性，無法單純以靜力視之，且高層建築受風力作用的位移計算中，除了順風向反應有大致可靠的預測模式外，橫風向與扭轉向反應由於流體現象的複雜性，至今未能提出可靠的數值預測方法，尤其在低質量、低阻尼的細長型高層建築受風力作用時，產生結構振動與流體交互作用所形成的不穩定現象，更只能由風洞試驗來取得大部分的資料。本文主要是以順風向、橫風向及扭轉向三軸向之氣彈模型試驗，考慮相同高寬比 ($H/D=7.0$)、兩種長寬比 ($B/D=0.4, 0.6$) 之高層建物模型，質量密度控制在低密度與高密度 ($150\sim 300\text{ kg/m}^3$)，多種阻尼比 ($1.5\sim 4.0\%$) 為控制變因，在兩種流場下 ($BL1$: 開闊地形, $BL2$: 都市地形)，觀察氣彈模型之順風向和橫風向的位移反應，推估氣動力阻尼。

2. 研究內容及方法

本文主要是在探討矩形斷面高層建築在大氣邊界層中受風力作用後的順風向和橫風向位移反應，剖析氣動力阻尼效應，而研究內容可分為下列五點：(1) 評估兩種長寬比 ($B/D=0.4, 0.6$) 之氣彈力模型受風力作用後，淺矩形斷面長寬比對氣彈力反應的影響。(2) 觀察氣彈模型在兩種不同邊界層流場下 ($BL1, BL2$) 受風力作用後的位移反應。(3) 利用對結構質量、阻尼大小的變化，來探討不同 $Scr. No.$ 的氣彈力現象。(4) 利用本研究的實驗資料與前人

的數據討論深、淺矩形、方形斷面結構體 ($B/D=2.0, 0.4, 0.6, 1.0$) 在兩流場下 (開闊地形 $BL1$ 、都市地形 $BL2$) 的氣彈力行為。(5) 探討不同長寬比 ($B/D=0.4, 0.6$) 之氣彈力模型在不同邊界層流場下 ($BL1, BL2$) 之氣動力阻尼。

本文是在淡江大學結構氣動力實驗室，以氣彈力實驗方式，進行三軸向氣彈模型在大氣邊界層流場中的位移反應分析，研究階段可分為：(1) 氣彈力模型的分析與建立：製作高寬比為 7、長寬比為 0.4、0.6 [兩種質量參數]，且建立具三軸向振動 (順風向、橫風向及扭轉向) 之氣彈力模型，可作順風向和橫風向及扭轉向三軸振動的控制。並且能變化不同頻率比、阻尼比之基座。(2) 實驗理論及分析程式的研究：以頻譜、頻率域中的相關函數等方法來探討三軸向位移擾動反應與尾跡渦散所具有的特性。(3) 風洞實驗中流場條件的模擬：以錐形擾流板、粗糙元素、阻牆等來模擬兩種流場條件 ($BL1$ 開闊地形及 $BL2$ 都市地形)。(4) 以前人在氣動力實驗所得之風力頻譜為外力函數及配合結構動力學、隨機振動理論，預測順、橫風向之動態位移反應變化情形，與本文所作的氣彈力實驗結果作比較。(5) 將實驗所得的結果依不同的實驗參數 (如長寬比、 $Scr. No.$ 及流場條件等) 分析討論之。(6) 推估氣動力阻尼，並比較其與文獻的差異。

3. 結果與討論

本文所探討的矩形斷面高層建築氣彈力現象，是根據風洞實驗的物理模擬方法，對建築結構物順風向、橫風向位移反應量測分析而得。本文所用的位移反應資料均是以柱體頂點之中心處位移為分析依據。本實驗於順風向所量測的平均位移，與藉由先前所得氣動力風壓實驗之拖曳力係數 C_D ，所計算出相同流場、相同風速下的平均位移，二者相近有不錯之一致性。而順風向位移之擾動值與氣動力風壓實驗的順風向風力頻譜，乘上機械轉換函數後的擾動位移比較，於低風速有不錯之一致

性，且於高風速時實驗值有略低的現象，顯示有正值氣動力阻尼的效應。

3.1 橫風向位移反應

根據氣彈力實驗的結果，探討高層建築受風力作用的動態行為，可分為氣動力穩定區及氣動力不穩定區。一般而言，氣動力穩定區的特色是結構的 *Scr. No.* 較高，利用風力頻譜計算出的動態反應較小，且誘發出的氣動力阻尼有限，故此區段的氣彈力行為僅需考慮渦散現象，即經由風力頻譜計算其動態反應可得一保守結果。氣動力不穩定區的特色是結構的 *Scr. No.* 較低，利用風力頻譜計算出的動態反應較大並引發負值氣動力阻尼，故需考慮氣動力阻尼效應。

(1) B/D=0.4

在此斷面所進行的氣彈力實驗，所探討的參數有 *Scruton No.* 和流場條件，在 *BL1* 流場下 *Scruton No.* 參數計有八種：41SX[2.0]、41SB[2.5]、41SY[3.3]、41LB[3.6]、41SC[3.9]、41LC[4.9]、41SD[5.1]、41LD[6.9]，其中[]內為 *Scr No.*，在 *BL2* 流場下 *Scruton No.* 參數亦有八種：42SX[1.9]、42SB[2.4]、42SY[3.2]、42LB[3.5]、42SC[3.9]、42SD[5.1]、42LC[5.4]、42LD[7.0]，以下為其詳細的探討。

在 *BL1* 流場下，*Scruton No.* 參數以 *Scr*=2.5 為例，橫風向擾動位移，會在約化風速 8.9 出現極大值。當 *Scruton No.* 由 *Scr*=2.5 增加到 *Scr*=6.9，氣彈力位移反應 σ_{yc}/D 會由 18% 減少到 0.5%，這顯示 *Scruton No.* 的增加有抑制結構反應的趨勢。當 *Scr*=3.9、*Scr*=4.9、*Scr*=5.1、*Scr*=6.9 時，氣彈力實驗值低於風力頻譜計算值，顯示不再出現氣動力不穩定現象。整體而言，在 *BL1* 流場下，*Scruton No.* 參數在 *Scr*=2.0、2.5、3.1、3.6 為氣動力不穩定區，且發生負值氣動力阻尼；在 *Scr*=3.9、*Scr*=4.9、*Scr*=5.1、*Scr*=6.9 為氣動力穩定區，即為正值氣動力阻尼控制的區域；若以位移反應作分界， $\sigma_{yc}/D=1.5\%$ 為氣動力

阻尼由負值轉正值的分界。

(2) B/D=0.6

在此斷面進行的氣彈力實驗，所探討的參數有 *Scruton No.* 和流場條件，在 *BL1* 流場下 *Scruton No.* 參數計有七種：61SB[2.8]、61SY[3.3]、61SC[4.1]、61SZ[4.4]、61LB[5.2]、61SD[5.7]、61LC[7.3]，其中[]內為 *Scr No.*，在 *BL2* 流場下 *Scruton No.* 參數亦有七種：62SB[2.9]、62SY[3.7]、62SC[4.1]、62SZ[4.4]、62LB[5.2]、62SD[5.7]、62LC[7.6]，以下為其詳細的探討。

在 *BL1* 流場下，*Scruton No.*=2.8 的例子裡，氣彈力實驗的橫風向位移反應，會在約化風速 9.5 出現極大值。當 *Scruton No.* 由 *Scr*=2.8 增加到 *Scr*=7.3，氣彈力位移反應 σ_{yc}/D 由 33% 減少到 0.9%，這顯示 *Scruton No.* 的增加有壓抑結構反應的趨勢。當 *Scr*=5.7、*Scr*=7.3 時，氣彈力實驗值低於風力頻譜計算值，顯示氣動力穩定現象。整體而言，在 *BL1* 流場下，*Scruton No.* 參數在 *Scr*=2.8-5.2 為氣動力不穩定區；在 *Scr*=5.7、*Scr*=7.3 為氣動力穩定區；若以位移反應作分界， $\sigma_{yc}/D=2.0\%$ 為氣動力阻尼由負值轉正值的分界。

在 *BL2* 流場下，*Scruton No.*=2.9 氣彈力實驗的橫風向位移反應，會在約化風速 10 出現極大值，當約化風速超過渦散臨界風速後，會發生動態位移忽下忽上的氣動力不穩定現象，顯示有氣動力不穩定的發生。當 *Scruton No.* 由 *Scr*=2.9 增加到 *Scr*=7.6 時，氣彈力位移反應 σ_{yc}/D 由 25% 減少到 2%，這顯示 *Scruton No.* 的增加有壓制結構反應的趨勢。在 *Scr*=2.9 左右，當流場條件由 *BL2* 流場改為 *BL1* 流場，臨界風速附近的位移反應 σ_{yc}/D 會由 25% 增加到 33%，但當約化風速超過臨界風速後，*BL1* 流場的位移反應會較快減小，而 *BL2* 流場的位移反應則持續該值到約化風速 12 後才下降，此現象顯示：在高紊流場中，其鎖定範圍 (*lock-in range*) 似乎會有增長的趨勢。整體而言，氣彈力位移反應在 *BL2* 流場下，*Scruton No.* 參數在 *Scr*=2.9、*Scr*=3.7、*Scr*=4.2、*Scr*=4.6、*Scr*=5.2 為氣動力不穩定

區，在 $Scr=5.7$ 、 $Scr=7.6$ 進入氣動力穩定區；若以位移反應作分界， $\sigma_{yc}/D=2.0\%$ 仍為氣動力阻尼由負值轉正值的分界。

3.2 長寬比對橫風向位移的影響

本文並配合先前所得 $B/D=1.0$ 、 2.0 的氣彈力實驗結果，討論長寬比對橫風向位移的影響。歸納以上所討論的高寬比 $H/D=7.0$ ，長寬比 ($B/D=0.4$ 、 0.6 、 1.0 、 2.0) 之模型，其氣動力現象的表現可分為低 $Scr[3.5]$ 、高 $Scr[6.0]$ 結構參數和 $BL1$ 、 $BL2$ 流場條件來做一般性的探討。[在深矩柱 $B/D=2.0$ 的例子，因為其臨界共振約化風速為 16.9 、 18.2 ，又在共振點上無明顯峰值，故取約化風速 $Ur=12$ 作為比較值。

比較低 $Scr[3.5]$ ，於 $BL1$ 流場中當斷面為淺矩柱 $B/D=0.6$ 時，氣彈力實驗位移反應為最大，此顯示在 $BL1$ 流場中，淺矩柱 $B/D=0.6$ 的氣動力不穩定現象最為明顯，深矩柱 $B/D=2.0$ 最小；於 $BL2$ 流場下，淺斷面 $B/D=0.6$ 也為最大，深矩柱 $B/D=2.0$ 依然最小。

比較高 $Scr[6.0]$ ，於 $BL1$ 流場中，當斷面為方柱 $B/D=1.0$ 時，氣彈力實驗位移反應為最大，淺斷面 $B/D=0.4$ 為最小。於 $BL2$ 流場下，淺斷面 $B/D=0.6$ 為最大，深斷面 $B/D=2.0$ 為最小。歸納以上結論：在 $BL1$ 下的氣動力不穩定斷面有 $B/D=0.4$ 、 0.6 、 1.0 ，氣動力穩定斷面有 $B/D=2.0$ ；在 $BL2$ 下的氣動力不穩定斷面有 $B/D=0.4$ 、 0.6 斷面，氣動力穩定斷面有 $B/D=1.0$ 、 2.0 。整體而言，兩流場對淺矩柱 $B/D=0.6$ 斷面最為不穩定。

3.3 氣動力阻尼

(1) $B/D=0.4$, $BL1$ 流場

因為此斷面模型在開闊地況 $BL1$ 流場的運動行為，不像過去研究的數據易於分析：在低 Scr No. 之例子裡，橫風向渦散風速位移不在 $Ur=1/St$ ，故以傳統方法推算負值氣動力阻尼有困難。實驗結果可分成三區：(i) 發散區： $Scr[2.0]$ 為發散區，在

低約化風速區，橫風向反應比頻譜預測值大出數倍，可推測氣動力阻尼約等於結構阻尼的負值。(ii) 負值氣動力阻尼區： $Scr[2.5]$ 、 $Scr[3.1]$ 、 $Scr[3.6]$ 為同一種形式，在此區發生橫風向位移的最大值之約化風速不等於 $1/St$ ，所以以傳統方法求氣動力阻尼並不恰當，可尋求其他的改善方法。(iii) 正值氣動力阻尼區： $Scr[3.9]$ 、 $Scr[4.9]$ 、 $Scr[5.1]$ 、 $Scr[6.9]$ 為同一種形式。本區的氣彈力實驗值低於風力頻譜預測值，顯示有正值氣動力阻尼介入，氣彈力現象微弱。

(2) $B/D=0.4$, $BL2$ 流場

(i) 發散區： $Scr[1.9]$ 為發散區，由圖可發現氣動力阻尼幾乎為結構阻尼之負值，顯示結構物產生極大的變位，可視為發散區。(ii) 負值氣動力阻尼區： $Scr[2.4]$ 、 $Scr[3.2]$ 、 $Scr[3.5]$ 有同一種形式，在本區的結構物之氣動力阻尼，在約化風速 $Ur=5.0-12.0$ 均為負值，最大負值發生於 $Ur=8.5$ 。 $Scr[3.9]$ 、 $Scr[5.1]$ 亦有一種形式，這兩個 Scr No. 的氣動力阻尼較前一類型發生正值氣動力阻尼為多，且最大負值發生於 $Ur=9.5-10.0$ 。 $Scr[5.4]$ 、 $Scr[7.0]$ 有同一種形式，此區的負值氣動力阻尼發生於 $Ur=6.0-12.0$ ，最大負值發生於 $Ur=6.0-9.0$ ，較難掌握尖峰值。在 $BL2$ 流場下所進行之氣彈力實驗皆產生負值氣動力阻尼。

(3) $B/D=0.6$, $BL1$ 流場

配合靜止風力頻譜推得開闊地況 $BL1$ 流場之氣動力阻尼大體分成三區。(i) 發散區： $Scr[2.8]$ 為近似發散區，在臨界約化風速發生類似鎖定現象，鎖定範圍 $Ur=8.7-10.7$ ，並產生極大的變位，可視為發散區。(ii) 負值氣動力阻尼區： $Scr[3.3]$ 、 $Scr[4.1]$ 、 $Scr[4.4]$ 、 $Scr[5.2]$ 為同一種形式，在本區的結構物氣動力阻尼，在約化風速 $Ur=9.0-10.5$ 為負值，其餘為正值，顯示渦致振動對本區域影響甚大。(iii) 正值氣動力阻尼區： $Scr[5.7]$ 、 $Scr[7.3]$ 為同一種形式，本區的氣彈力實驗值低於風力頻譜預測值，顯示有正值氣動力阻尼

介入，氣彈力現象微弱。

(4) B/D=0.6, BL2 流場

都市地況 BL2 流場之氣動力阻尼大體分成二區，如同 B/D=0.4 的情況，在此地況下每個例子皆會有負值氣動力阻尼的發生。(i) 發散區：Scr[2.9] 為近似發散區，由圖可發現 $Ur \geq 8.0$ 後，氣動力阻尼幾乎為結構阻尼之負值，顯示結構物產生極大的變位，可視為發散區。(ii) 負值氣動力阻尼區：Scr[3.7]、Scr[4.1]、Scr[4.4]、Scr[5.2] 有同一種形式，在本區的結構物之氣動力阻尼，在整個約化風速範圍 $Ur=6.0-14.0$ 均為負值，最大負值發生於 $Ur=9.2$ 。Scr[5.7]、Scr[7.6] 亦有一種形式，此區的負值氣動力阻尼發生於 $Ur=6.0-10.5$ ，最大負值發生於 $Ur=9.2$ ，但是超過臨界渦散風速後，氣動力阻尼偶而不穩定，有跳躍的情形。

4. 結論

本文主要的研究結論如下：

- (1) 氣彈力實驗中量得的順風向位移反應平均值與由靜定氣動力實驗所得之拖曳力參數計算值，二者有不錯的一致性。
- (2) 橫風向位移：矩形斷面長寬比 B/D=0.4、0.6 結構體之氣彈力實驗，在高 Scruton No. 時，在 BL2 流場，橫風向渦散臨界位移均比 BL1 流場大，但在低 Scruton No. 時，BL1 流場橫風向渦散臨界位移比都市地況 BL2 流場來的大，此時 BL1 流場激發了負值氣動力阻尼勝過 BL2 流場。
- (3) 在相同流場條件下，B/D=0.6 的矩柱，不論在任何同等 Scruton No.，臨界橫風向位移反應均較長寬比 B/D=0.4 大。
- (4) 在兩流場下，矩柱 B/D=0.4 若以位移反應作分界， $\sigma_{yc}/D=1.5\%$ 為氣動力阻尼由負值轉正值的分界。B/D=0.6 若以位移反應作分界， $\sigma_{yc}/D=2.0\%$ 為氣動力阻尼由負值轉正值的分界。
- (5) 在開闊地形 BL1 流場所進行的淺矩形斷面實驗發現與方形斷面有類似的氣動力阻尼分佈，而在都市地形 BL2 則發現淺矩

形為危險段面，在預測位移時應考慮負值氣動力阻尼所帶來的氣彈力不穩定現象。

(6) 在 BL1 下的氣動力不穩定斷面有 B/D=0.4、0.6、1.0，氣動力穩定斷面有 B/D=2.0；在 BL2 下的氣動力不穩定斷面有 B/D=0.4、0.6 斷面，氣動力穩定斷面有 B/D=1.0、2.0。整體而言，BL1、BL2 流場對淺矩形 B/D=0.6 斷面最為不穩定。

5 重要參考文獻

1. Kwok, K.C.S. and Melbourne, W.H., "Wind-induced Lock-in Excitation of Tall Structures", J. of the Structural Division, Vol. 107 (1981), No. ST1, p57-72
2. Takeo Matsumoto, "On the Across-wind Oscillation of Tall Buildings", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 24 (1986), p69-85
3. Kawai, H., "Bending and Torsional Vibration of Tall Buildings in Strong Wind", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.50 (1993), p281-288.
4. Kawai, H., "Effect of angle of attack on vortex induced vibration and galloping of tall buildings in smooth and turbulent boundary layer flows", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.54/55 (1995), p125-132.
5. Vickery, B.J. and Steckley, A., "Aerodynamic Damping and Vortex Excitation on an Oscillating Prism in Turbulent Shear Flow", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.49 (1993), p121-140.
6. 鄭啟明，盧博堅，蔡明樹，"正方斷面高層建築的橫風向氣彈力行為"，中華民國第三屆結構工程研討會，(1996)，p1263-1272.
7. 陳景昇，"長寬比對矩形斷面高層建築氣彈力現象之風洞研究"，1999，淡江大學土木工程研究所碩士論文
8. 江益彰，"舉斷面高層建築氣動力阻尼評估"，1999，淡江大學土木工程研究所碩士論文