

# 橋梁模型風洞試驗

林堉溢<sup>a</sup> 鄭詩穎<sup>b</sup> 陳正璋<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 淡江大學風工程研究中心

<sup>b</sup> 祺昌工程科技有限公司

<sup>c</sup> 祺昌工程科技有限公司

## 一、 前言

由於近年來國內的橋樑工程不斷地突破求新，再加上為配合橋樑外觀的美感，及世界潮流的環保概念，於是長跨徑的斜張橋也陸續地在台興建。由於橋梁跨徑長，橋梁斷面的設計趨於細長化發展，亦即橋梁斷面需使用較輕的材質且強度較佳的材料，因此採用輕薄流線的橋梁斷面乃基於時勢之所趨。因長跨徑的橋樑具有較大的柔度，所以其受風力而引發的不穩定現象的機率也大增，伴隨衍生的問題，首重於橋樑的受風反應現象。

橋梁的氣動力現象基本上是指大氣紊流邊界與橋梁結構體間之互制行為，因為橋梁所受之風力具有強烈的隨機特性，研究顯示橋梁受到風力作用後而產生的氣動力效應可分為：(1) 顫振效應 (Flutter)；(2) 抖振效應 (Buffeting)；(3) 扭轉不穩定現象 (Torsion Instability)；(4) 渦流顫振 (Vortex Shedding)；(5) 風馳效應 (Galloping)；一般而言以顫振及抖振兩效應對大跨徑橋梁之影響最為顯著。

因此在設計大跨徑橋梁時，必須對風力所造成的結構反應更加重視，由於橋梁斷面形狀對空氣動力效應具有很大的影響力，所以設計時，必須慎選其形狀以確保橋梁結構穩定與安全。

然而流體與結構體之間複雜的相互影響作用，目前並無理論模式可供解析，對於邊界問題複雜的氣動力現象乃至於氣彈力行為，尚且需藉由風洞模型實驗所量測的數據來了解橋梁的氣動力行為。

而一般長跨徑橋梁的風洞實驗主要分為兩種：斷面模型風洞試驗(Section model test)與全橋模型風洞試驗(Full model test)。其中，斷面模型風洞試驗採用主跨斷面的二維縮尺模型，局部模擬橋面版的氣動力反應，可得到橋梁斷面氣動力參數與風力係數，以了解橋梁斷面受風力影響的敏感度；且可利用實驗所得數據來作進一步的探討橋梁的臨界風速與設計風速下最大反應值。另，模型製作較容易，造價低。

全橋模型風洞試驗是為將流場、橋梁各項尺寸、勁度、質量...等都作詳細的縮尺模擬，實驗直接量測模型在流場下的受風反應，因此模型製作與實驗都相對的較為複雜，所需時間較長，造價也較昂貴。

## 二、長跨徑橋梁風力效應

一般長跨徑橋梁受風力後的效應可分為：

### (1) 顫振效應 (Flutter)

顫振是一種橋體振動引發的空氣彈力現象，橋體經由「結構--流體」互制現象，由流場中汲取與結構運動正相關的能量，改變原橋梁系統的勁度與阻尼。當風速到達某一臨界狀態時，橋體振動所引發之氣動力阻尼會抵消結構之阻尼，而使結構產生發散現象，此時所對應的風速即是橋梁的顫振臨界風速。顫振臨界風速代表了橋梁空氣不穩定的產生風速處，設計懸索支撐橋梁時，必須要避免發生顫振現象。

### (2) 抖振效應 (Buffeting)

抖振，是由於逼近流的擾動風速對結構系統造成一不穩定載重而產生的振動現象。一般抖振效應不僅與紊流特性有關，也和橋梁斷面之幾何形狀及橋梁動力特性有關。橋梁的抖振效應通常不會導致橋體的即時破壞，但在設計風速下，若橋梁斷面有太大的位移量，會引起車輛和行人感到不適，亦可能在長期作用下使得橋梁材料有疲乏 (fatigue) 之虞。

### (3) 扭轉不穩定現象 (Torsion Instability)

扭轉不穩定現象為一單自由度運動；其發生之原因為扭轉向風力隨風攻角的增加而遞增，當橋梁斷面承受風力而產生扭轉位移時，意謂著風攻角已增加了，所造成的扭轉彎矩亦將隨之增加，此時橋梁斷面必須以更大的抵抗彎矩來與之抗衡，如此反覆作用，當到達某一風速時，橋梁斷面所承受的扭轉彎矩超過橋梁斷面所能抵抗的能力時，將使橋梁結構產生不穩定之現象而破壞。此種不穩定現象類似結構物之挫屈破壞，故橋梁的設計風速內，必須避免此種破壞的發生。

### (4) 渦流顫振 (Vortex Shedding)

渦致振動發生的原因為流體流經鈍體產生分離後，使得結構體的上下側交互產生週期性的渦流，由於上下側的渦流形成時間具週期性，造成結構體上下側壓力的週期性變化，而導致結構物在垂直方向振動，即為渦致振動現象。

渦散頻率( $f_s$ )會隨風速而改變，當渦散頻率與結構物的自然頻率相近時，便會形成共振；渦致共振現象會使結構物產生較大的位移反應，導致結構物安全性及舒適性的疑慮。

### (5) 風馳效應 (Galloping)

風馳效應是由於結構垂直向的振動速度與氣流速度的合成，造成風攻角的改變，而此改變造成結構體運動的不對稱，進而影響垂直向的外力，此垂直向外力的變化引發氣動力阻尼，而因此又改變結構垂直向的振動速度，使得攻角再度改變。如此反覆的相互作用造成結構的不穩定現象。

一般橋面板其實並不受風馳效應影響，需要考慮風馳效應的橋梁元素，如鋼纜 (cable)、吊索 (hanger)、或桁架桿件等。

### 三、 全橋模型風洞試驗 ( Full Model Test )

由結構的運動方程式中可知：結構物的質量、勁度以及阻尼是整個結構系統中的重要變數。因此，結構氣彈性模型的模擬必須以這三項變數為基礎才能達到良好的模擬，才能以模型的模擬反應出能符合實際結構物的動力行為。因此，全橋模型實驗往往需要較多的費用、較複雜也較費時。

全橋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、橋體彈力、流體慣性力、黏滯力與重力等影響。上述物理特性經由因次分析，可歸納為下列幾項模擬相似率參數：雷諾數 ( Reynolds Number ( $Re$ ))、福祿數 ( Froude Number)、密度比 ( Density Ratio)、彈性比 (或稱 Cauchy Number) 跟阻尼比 ( Damping Ratio ) 等。

在滿足以上的條件下去模擬橋體之基本振態、自然頻率、質量以及阻尼等。

#### 1. 全橋模型風洞試驗項目

全橋模型風洞試驗主要量測目標為：在紊流邊界層流場下，量測橋面版與橋塔 (或橋拱) 之振動，檢核抖振反應是否有太大的位移量，同時可檢核是否會發生結構體的過致共振現象。一般來說，抖振反應的量測風速最高以 100 年回歸期設計風速為標的。

另外，會於平滑流場評估橋梁結構體是否會產生顫振發散現象，由於顫振會使橋體結構有產生破壞之顧慮，故一般來說都會採用較高之回歸期設計風速，一般使用 500 年回歸期設計風速來作為最高量測風速，以判別橋體結構是否有發散之虞。

#### 2. 全橋模型設計

全橋模型的設計，需滿足前述模擬相似率，包含長度縮尺、時間縮尺、速度縮尺、頻率縮尺、勁度縮尺...等等。模型主要分為三大部分，包含主梁的模擬、橋塔的模擬與纜索的模擬。一般來說，模型是以一連續之核心鐵架模擬橋體基本振態，再將正確的質量分佈在橋面版上，最後再使用壓克力板做出橋體之正確造型。完成之全橋模型需進行基本振態之頻率、振態等參數之識別與率定，確認模型性能符合原有之實驗設計規劃。

除了模型設計須符合各項縮尺外，橋梁現地的風場也需模擬。依據建築物耐風設計規範及解說，按照結構物所在位置及其附近地表特性，地況分為 A、B、C 三種地況；根據橋梁所在位置選擇地況類型，使用不同的錐形擾流板和配套之粗糙元及龍齒組合，同時在圓盤上利用保麗龍模型模擬周遭的建築物，以使得在風洞之試驗段內建立一組與現場情況相當之模擬大氣邊界層逼近流場。

### 四、 斷面模型風洞試驗 ( Section Model Test )

斷面模型的形狀通常是真實模型的縮影，只是其具有較高的勁度 ( stiffness )，所以真實結構系統振動的自然頻率需經由數條的線性彈簧支撐系統來加以調整和模擬。在從事斷面模型試驗時，所需之模擬條件往往受限於資料和模型的使用，而無法完全符合理論之要求，例如試驗模型之阻尼並無法真正模擬真實橋樑之阻尼，原則上試驗模型之阻尼將儘可能小，一般試驗模型阻尼之對數遞減值約 2% 以內，比實際之阻尼為小，如此可使結果偏向保守。其

它可能造成誤差之原因，如此實驗無法模擬所有橋樑之振態，則可能會低估某些效應。

斷面模型風洞試驗的幾個基本原則為：

- (1) 橋樑原型之振態無法在斷面模型中完全被複製，換言之，振態間的相互影響並不存在，故一般在斷面模型設置時，通常僅考慮兩個理想結構物的基本振態（即基本垂直和扭轉兩振態）。
- (2) 不考慮結構的非線性行為（non-linear behavior）。
- (3) 不考慮鋼纜（cable）系統。
- (4) 在求取顫振導數時，結構阻尼不尺度化（scaled）。由於結構阻尼受振態及振幅（amplitude）之影響，故真實橋樑之阻尼很難實際反應於模型上，所以原則上模擬時應儘量調低模型阻尼比，以期求得最大之效應。

### 1. 斷面模型風洞試驗項目

斷面模型試驗主要實驗內容分為：(I) 風力係數、(II) 顫振導數、(III) 相似率模擬。

#### I. 風力係數

風力係數係為結構物受風力大小的指標。風力係數實驗是於平滑流場，不同攻角的架構下，利用力平衡儀量測托曳向、垂直向與扭轉向三方向之各方向所受的平均風力。

#### II. 顫振導數

顫振導數代表此斷面的橋面版結構之氣動力阻尼與氣動力勁度項，實驗時需將模型連接於 Y 型桿上，再利用 Y 型桿上的 8 跟彈簧連接風洞兩側的圓盤架構，此彈簧為模擬結構的自然頻率。

橋梁斷面模型之顫振導數實驗於平滑流場中進行，取得在  $0^\circ$  風攻角下之橋面版各項顫振導數：垂直向（ $H_1^*$ 、 $H_2^*$ 、 $H_3^*$ 、 $H_4^*$ ）與扭轉向（ $A_1^*$ 、 $A_2^*$ 、 $A_3^*$ 、 $A_4^*$ ），並據此初步評估橋面版之空氣動力穩定性。一般水平向導數採用 Scanlan 提出之經驗式。

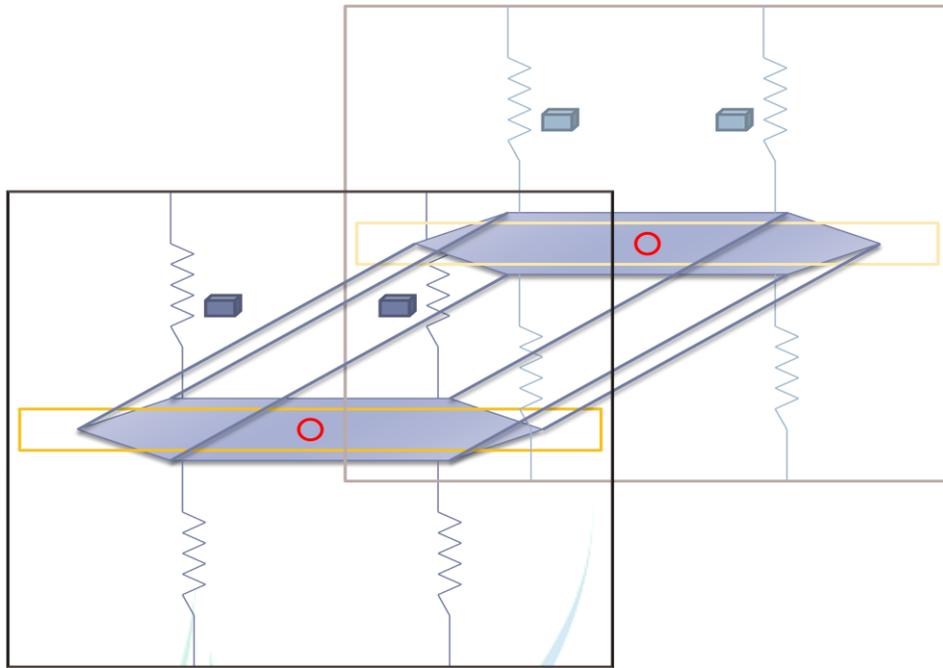


圖 1. 斷面模型風洞實驗架設圖

### III. 相似率模擬

相似率模擬實驗則是符合原型橋梁之幾何縮尺比例與頻率比，進而直接量測橋面版的位移反應。其實驗架構如同耦合向顫振導數實驗，同時考慮到垂直向與扭轉向的結構反應；量測到的位移量經由縮尺轉換可大略預估全橋反應，亦可藉由風速與位移反應的關係圖來評估顫振臨界風速可能發生的地方。

下二圖為風攻角與風力座標之示意圖：

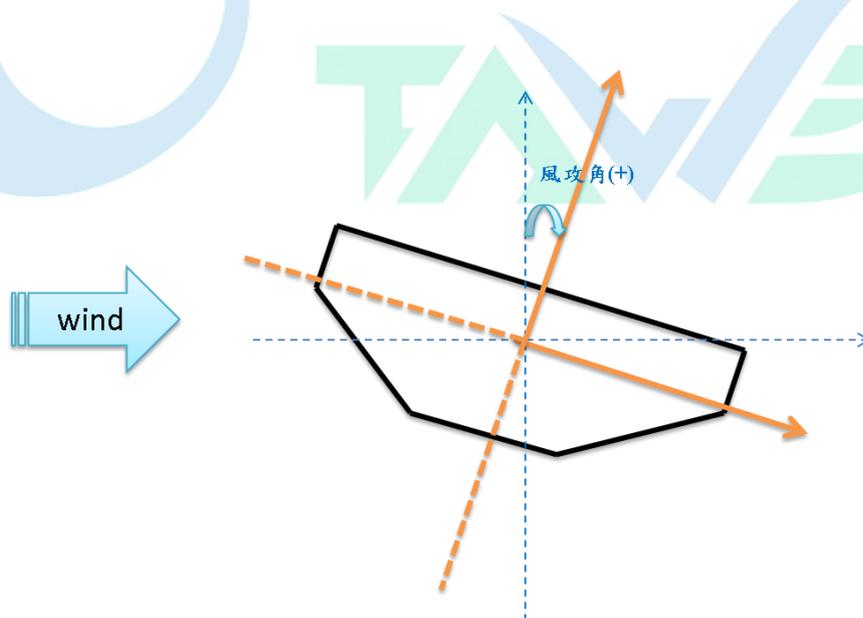


圖 2. 風攻角示意圖

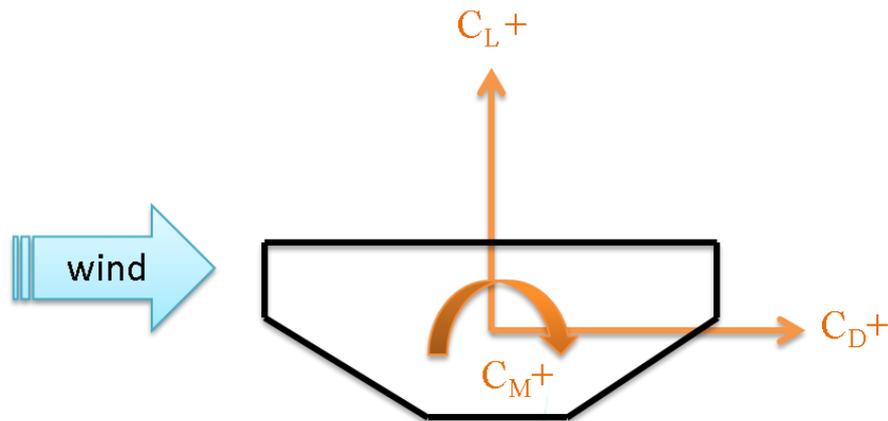


圖 3. 風力座標圖

## 2. 斷面模型設計

對於顫振導數以及風力係數實驗，斷面模型只需滿足幾何外型縮尺即可；但若是相似率實驗，則尚須滿足相似率之質量比與頻率比，此模型才可直接求得位移反應。

首先，模型製作需考慮到頻率的調整空間，所以模型大多設計比實際縮尺質量輕，以留調整空間於彈簧以及砝碼來進行調頻的動作。另，橋樑斷面模型製作大多以鋼梁為主體勁度來源，外部再以珍珠板包覆製作橋面版斷面外型，以求得橋樑斷面在風場內的相關反應特性。

## 五、 參考文獻：

1. 「建築物風力規範之研究」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，2002。
2. 「風洞實驗技術於土木建築構造物之應用與驗證計畫—橋梁風洞試驗」，內政部建築研究所研究報告，2005。
3. Simiu, E. and Scanlan, R. H. " Wind Effects on Structures ", *John Wiley & Sons.*,N.Y. , 1996 。
4. 「斜張橋斷面模型與全模型風洞實驗之比較研究」，蘇佳禾，2004。