

## 第五章 風洞試驗

### 5.1 適用範圍

建築物之耐風設計，依本規範無法提供所需之主要抗風系統設計風力或是外部被覆物之設計風壓風力資料時，得以風洞試驗作為耐風設計之依據。當建築物之高度超過 100 公尺，或風力效應明顯時，建議進行風洞試驗。凡施行風洞試驗之建築物，其設計風力、設計風壓與舒適性評估得以風洞試驗結果為準。

#### 【解說】

建築物與地上獨立結構物所受的風力基本上是鈍狀彈性體與流體之間的空氣動力現象或空氣彈力現象，由於建築結構的多樣性，目前無法以純理論模式或數值方法解析之。作用於建築主要抗風系統上的風力可分為順風向、橫風向與扭轉向風力，各個風向的風力又可區分為平均風力與擾動風力。順風向風力主要是由風場中的逼近流所造成，可以透過條狀定理(strip theorem)以及準穩態定理(quasi-steady theorem)得到合理的評估。建築設計上重要的橫風向擾動風力主要來自流體通過建築物時，發生的流體分離(separation)與渦散現象(vortex shedding)所造成的週期性作用力。當建築物的高寬比與柔度都很大時，有可能在設計風速之內發生結構共振現象，而造成過大的振動反應。然而此一現象，與建築物幾何造型有密切關係，目前並無妥善的分析模式可供解析。對於一般幾何造型規則的建築物而言，扭轉向風力的影響小於順風向及橫風向風力。由於扭轉向風力也是源自流體分離，故亦無分析模式，必須依賴風洞物理模型實驗。

本規範中的各項風力與風壓係數，大多根據單棟、規則造型建築物的風洞試驗數據，且未考慮可能出現的空氣彈力現象。建築物之幾何形狀特殊（明顯異於規則矩型柱體）者，或其橫風向與扭轉向周期接近者，或是建築物受到鄰近特殊地形、地物（鄰近大型建築物、山谷、山坡或峭壁等）影響者，或是經檢核可能發生渦散共振、鎖定或其他空氣動力不穩定現象者，得採行風洞試驗測算其設計風力。凡施行風洞試驗之建築物，其設計風力以風洞試驗結果為準。

建築物高度超過 100 公尺，其振動周期較長，受風的影響較顯著，尤其地震總橫力係數隨高度增加而降低，當風力總橫力大於地震總橫力後，建築物的結構設計將受風力控制，其時風力計算是否準確就變成很

重要的問題，如能輔以風洞試驗，將設計風力及其分布估計得準確一些，將可提高建築物的安全性。況且，建築物之高度超過 100 公尺時，其規模必較大，造價亦較高，萬一因風力產生損壞的損失也將較嚴重，因此建議進行風洞試驗。

風洞試驗所測得之主要抗風系統設計風力與建築被覆物之設計風壓，包括了標的建築物本身的空氣動力特性以及周圍建築物的遮蔽效應，一般多小於規範計算值。由於周圍建築物的遮蔽效應日後可能出現變化，因此在引用風洞試驗數據時應考慮這項不定因素。除非能夠確認風洞試驗時周圍建築物並無明顯遮蔽效應，否則引用風洞試驗之設計風壓風力時，以不低於規範計算值的 80% 為宜。

## 5.2 風洞試驗之主要項目

風洞試驗之項目宜包括提供主要風力抵抗系統之設計風壓及局部構件及外部被覆物之局部設計風壓。此外，亦宜包括半年回歸期風速下屋頂加速度尖峰值及建築物對其附近風場環境造成之影響。

### 【解說】

一般而言，建築設計規劃時應當列入考慮的風力影響包括下列四項：(1)建築主要結構系統所承受之整體風力，(2)局部構件及外部被覆物所受之局部風壓，(3)建築風擺所造成之舒適性問題，(4)環境微氣候—鄰近地表之風場環境。適用於土木工程相關實驗所需要的風洞，由於需求不同，與航太工程所常見的風洞有若干基本功能上的差異。最主要的差別即在於應用於土木工程的風洞需要足夠長度的試驗段，來發展實驗所需要的紊流邊界層。以下是一般建築物較常見的風洞試驗項目：

(一) 建築主要抗風系統所承受之整體風力試驗：1980 年代初期，

Davenport & Tschanz 等人發展出高頻力平衡儀(high frequency force balance)，此後很快的形成各風洞實驗室量測結構物所受整體風力的標準程序。試驗的方法是將剛性的建築縮尺模型安置在一個高自然頻率之五分量力平衡儀上，量測建築模型基底彎矩及剪力。倘若高層建築的基本振態為線性，則剛性模型的基底彎矩與廣義座標之風力成一常數比例。將試驗量測所得之基底彎矩做成頻譜密度函數並予以適當的振態修正之後，即為廣義座標風力頻譜，再據以計算等值靜態設計風載重及舒適性評估。另一種建築主要抗風系統整體

風力的試驗量測方法是經由對表面風壓的積分過程取得整體風力。動態風力需根據同步量測之風壓數據，或採用合理可信的方法測算而得。

- (二) 局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗：表面風壓試驗是一種空氣動力試驗，受測試建築模型僅需遵守幾何縮尺，無須考慮其結構動力特性。一般風壓模型多由壓克力製成，在模型表面開設足夠的風壓量測孔，透過管線連接至壓力轉換器量測表面風壓。進行風壓實驗時，應適度考量風向的影響，將量測所得資料，利用統計方法，算得各風壓孔之極值風壓。將極值風壓配合該地區之設計風速，換算可得各點設計風壓。
- (三) 結構空氣彈力試驗：大多數的高層建築並沒有明顯的空氣彈力效應，無論是設計風載重，或是風擺的舒適性評估，都可以根據前述之高頻力平衡儀試驗數據計算而得。只有極少數的超高建築，或是根據計算結果顯示可能出現過大振幅的情況下，才需考慮採取進一步的結構空氣彈力模型試驗。進行結構空氣彈力試驗時，需適當考量建築結構的動力特性（質量、勁度、阻尼等）。
- (四) 環境風場舒適性評估：隨著經濟的發展高樓的設計除了居住以及商業的基本功能之外，生活與居住品質的重要性日益提昇。因此，興建一座建築除了需要考慮到風形成的結構安全性問題之外，影響地面行人舒適的微氣候變化等也應做適度的規劃與評估。由於一般都市地形、地況過於複雜以及流況之高度三維性，使得數值模擬在應用上有其極大的侷限性與困難度。因此以風洞物理模擬試驗，配合實場的氣象資料來作風場舒適性的評估，仍是目前較為可行及可信的方法。

### 5.3 風洞試驗應遵守之模擬要求

採用風洞試驗測算建築物設計風力及風力效應時，應遵守下列風洞試驗模擬要求：

1. 風洞試驗之設計應依照試驗項目性質，合宜的遵守建築結構與流場的各項模型縮尺。
2. 風洞試驗應適當模擬建築物位址所在之大氣邊界層流特性，包括邊界層高度、平均風速剖面以及紊流強度、紊流尺度等大氣紊流特性。
3. 風洞試驗時，對於建築物可能造成影響的鄰近地貌、地物，應作適當的模擬。

4. 風洞試驗時，建築物及鄰近地貌、地物模型超過風洞斷面積的 8%時，應採取合理的方法修正阻隔效應。
5. 風洞試驗時應妥善考慮雷諾數效應。
6. 風洞試驗時應考慮不同風向的影響，並根據各風向試驗的數據，以合宜的方法組成數個對結構最不利的風力載重。

### 【解說】

執行風洞試驗時，需妥善考慮縮尺模型與原型(proto-type)結構之間的模擬相似律(modeling similitude)，如此風洞縮尺實驗結果才能正確的應用於原型結構。設計高層建築風洞實驗時，需要滿足流場的模擬相似性以及結構空氣動力（或是結構空氣彈力）之模擬相似性。建築風工程探討的是建築物在強風作用下的結構反應，所需考量的風場屬於小範圍的中性邊界層流，以風洞進行縮尺模擬時，需要正確模擬下列幾項自然風場特性：

- (1) 逼近流在不同高度上的平均風速分布；
- (2) 逼近流在不同高度上的擾動風速（紊流強度）分布；
- (3) 逼近流擾動風速之頻率分布特性；
- (4) 標的建築物與鄰近建築物之模擬。

正確模擬高層建築之空氣彈力特性時，則需滿足下列模擬相似律：

(1) 慣性力比：
$$\frac{\rho_s}{\rho_a} = \frac{\text{結構慣性力}}{\text{流體慣性力}}；$$

(2) 彈性力比：
$$\frac{E}{\rho U^2} = \frac{\text{結構彈性力}}{\text{流體慣性力}}；$$

(3) 阻尼比： $\xi$  = 結構振動之能量耗損率；

(4) 雷諾數：
$$R_e = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{\text{流體慣性力}}{\text{流體黏滯力}}；$$

(5) 風場與高層建築應有相同之模型幾何縮尺。

此外，結構主要振態之頻率比以及振態函數都是重要的模擬參數。對於大多數的高層建築，空氣彈力現象並不顯著，結構空氣動力模型試驗便能提供足夠的抗風設計相關資料，此時前述有關結構動力相關的模擬相似律便可忽略。

風洞中的自然風場的模擬可區分為遠場與近場模擬等兩項。遠場模擬的是逼近紊流邊界層的特性。風洞試驗常以錐形擾流板、粗糙元素、阻牆等邊界層元素的組合，模擬各種大氣邊界層流場。所謂近場模擬指的是標的建築物與鄰近建築物之模擬，藉由近場模擬可以得到標的建物鄰近的地形與建物對於風場的影響。一般而言，建築物對於下游的影響範圍，大約是尾跡寬度的 6~8 倍。因此合宜的模擬範圍是以基地主建築物為中心，半徑大於鄰近高度超過 60 公尺之建築物最大寬度的 8 倍，或者 300 公尺之較大者。在此半徑內之鄰近建築物全依縮尺比例製成模型置於風洞試驗段之轉盤上。

風洞試驗時，使用之建築物及鄰近地貌、地物模型過大時，會造成風洞內流場明顯的加速現象，進而造成實驗量測的誤差，稱之為阻隔效應 (blockage effect)。因此，當風洞試驗使用之建築物及鄰近地貌、地物模型超過風洞斷面積的 8% 時，應採取合理的方法修正阻隔效應，使量測試驗段之縱向壓力維持為一定值。

風洞模擬使用縮尺模型，一般多在經過適當縮尺的較低風速來進行試驗，縮尺模型試驗的雷諾數通常比實體結構物小 2~3 個量級 ( $10^2 \sim 10^3$ )。進行風洞試驗時應使得縮尺模型與原型之間具有雷諾數相似性 (Reynold's Number similarity)。一般而言，對於紊流邊界場的模擬，適當的風洞雷諾數為  $10^5$  以上；具有銳角的建築物縮尺模型，適當的雷諾數為  $10^4$  以上；具有曲面的建築物則需採取適當的方式考量雷諾數的影響。

風洞試驗時建築物受到鄰近地形地物的影響，正向來風未必是最不利狀況，應考慮不同風向的影響。根據各風向試驗的數據，以合宜的方法組成數個對結構最不利的風力載重。

#### 5.4 設計時風洞試驗報告之引用

根據風洞試驗計算主要風力抵抗系統之設計風力與局部構件之設計風壓時，應依據 2.5 節之規定，採用 50 年或 100 年回歸期之設計風速；計算屋頂尖峰加速度時，應採用半年回歸期之設計風速。風洞試驗時應考慮不同風向的影響，計算風力時，除了規範另有規定，不得使用具有方向性的設計風速。

建築物的設計風力應考慮數種最嚴重的風向，設計風力組合應同時包括各層的二水平主軸方向風力以及扭矩。局部構件之設計風壓應採用風洞試驗在各風向下測算所得的最

大極值風壓。舒適性評估則以半年回歸期風速為基準，檢核屋頂加速度。

【解說】

本節說明在設計階段如何充分引用風洞試驗報告，使其對設計的幫助發揮最大的效用。風洞試驗通常會包括很多風向，報告中也應建議幾個最嚴重的風向要納入設計中考慮。當然這幾個風向的風力要與其他載重做組合，要按照其他規範載重組合的規定。

建築物的風洞試驗，一般採用剛性模型，以高頻力平衡儀或是風壓量測，測得模型的瞬時風壓與風力，再配合建築結構的動力特性，計算各層之動態風力，加上靜態風力後便得極值風力，是為建築物之等值靜態設計風力。風洞試驗報告中應明示其順風向、橫風向與扭矩設計風力及設計風壓所對應之風速回歸期（50年或100年），並明示結構設計者各項設計風力的施加方式，或其對應之座標。測算屋頂尖峰加速度時，通常亦是根據模型測得的廣義風力歷時，配合結構動力特性求算而得，因此風洞試驗報告也應明確表示，屋頂尖峰加速度係對應半年回歸期的風速。