

計算風工程與其應用

方富民^{1*}

^{1*}國立中興大學土木工程學系 教授

一、前言

「計算風工程」(computational wind engineering ; CWE)始見於第一屆國際計算風工程研討會(First International Symposium on Computational Wind Engineering)。為了要因應「計算流體動力學」(computational fluid dynamics ; CFD)在風工程領域中之快速發展，並突顯數值模擬(numerical simulation)計算在風工程問題解析上漸形重要之大勢所趨，於1992年日本東京舉辦的研討會中，邀集了世界各國之學者專家，除就CWE相關之研究成果作經驗之交換外，並對CWE未來之應用與展望作一確立。

二、計算流體力學(CFD)與計算風工程(CWE)之基本異同

一、專注對象與範疇

CFD與CWE都是應用數值解析的方法探討工程問題的途徑。但在專注的範疇上，CFD著重於所有流體動力學(航空、熱傳、化工、空氣動力、水力等)問題之解析，對象為流體，屬科研與應用與並重；CWE則偏重於與風力相關實際工程問題之探討，對象不僅限於流體(風)，甚而包括流體(風)與結構振動互制效應(interaction)等相關動力學問題之探討。在現階段，CWE應較著重於工程應用。

二、流體特性上之假設

不似CFD面對的是所有流體動力學的問題，CWE在目標上是圍繞著所有與風相關的議題。在以「風」為主題之前提下，氣流之壓縮性常被忽略，而多採用不可壓縮、紊流之流況(incompressible turbulent flows)進行問題之剖析。

三、流場分析空間與形態

在CFD的探討中可為如管流(pipe flow)等之內部流場(internal flows)或是開放空間之外部流場(external flows)問題。另一方面，除了如室內通風(ventilation)外，CWE大多探討在大氣邊界層(atmospheric boundary layer)中的外部流場問題。因此，鈍體流(bluff-body flows)常成為CWE之典型流況形態。

三、CFD/CWE在工程分析方法上之比較

一般而言，在分析流體動力學相關問題常用的方法有三，即數學解析法(analytical method)、實驗法(experimental method)與數值模擬法(numerical simulation method)三大系統。在電腦尚未被廣泛應用前，數學解析的方法常與實驗方法並列為研究方法的兩大主流。對一個流場問題而言，其求解係以一個足以正確描述流場變數(流速、壓力、溫度、

濃度等)對時間與空間變化的微分方程式(亦稱控制方程式；governing equation)為本，配合以適當的起始與邊界條件(initial/boundary condition)後，應用數學工具推行出相應之流場數學解(mathematical solution)。然而，一個動力問題相應的控制微分方程式往往是非線性(non-linear)的，對此類問題數學解之尋求並非易事。更何況在實際問題中，隨著流場區域邊界幾何或動力條件複雜程度之增加，欲獲取一個精確的流場結果往往有頗高的難度。因此，在古典的解析方法中，常將區域邊界予以簡化以利求解，甚至沿用簡化但對真實流況描述能力較差之控制方程式以獲得流場的結果。在採取此雙重簡化的情況下，雖然達成了問題解析的目的，但是結果的真確度卻可能大打折扣。有幸，隨著近年來電子計算機軟、硬體方面的快速進步，以往在數學解析方面可能遭遇的各種困難，在運用數值解析(numerical analysis)的方法後，多已迎刃而解(此即所謂 CFD 的方法)。值得一提的是，在古典數學解析的方法中，流場結果是以時間與空間函數的數學形式表示出來，其在時空方面之變化均具有連續性；而在數值解析方法中，則為離散化(discretized)數值形態時空分佈的流場結果。

另一方面，實驗方法包括實場量測(field measurement)與模型試驗(model experiment)兩類。通常實驗方法在執行上所費不貲，除了因設施之建構以及量測儀器與設備之整合上需要相當之空間與經費外，相對地亦會耗費人力與時間。尤其在鈍體流模型試驗研究中，因縮尺效應(scale effect)對結果可能會造成相當程度之誤差。因此，在近期風工程的研究中，常以風洞試驗量測(wind tunnel measurement)配合風場數值模擬，交相進行問題之探討。

四、CWE 與風洞試驗方法的互補關係

在近代風工程的研究中，風洞試驗與數值模擬已成為最常被使用的兩種解析工具。前者可提供局部量測結果以作為數值模式比較與驗證之依據，待後者模式確立後則可依數值計算所有變數、全區、全時之預測結果進行問題之細部檢視與分析。在應用的考慮上，茲將二者之優缺點說明如後。

一、經濟的考量

一般而言，以試驗量測的方法需要較高之成本(設施、設備、人力、電力等)且較為耗時。另一方面，數值模擬則較利於系統化之風場分析，分析者可以輕易地改變流場邊界的幾何與動力條件，以得到相應之結果。

二、需要的硬體設備

試驗量測需要的硬體設備包括設施本體(風洞)、模型、量測儀器(視量測項目而定，如測速計、壓力計、平衡儀、放煙設備、攝影與視化設備等)，並應配合以足夠大的試驗場地與量測空間。相對地，在執行數值模擬時所需要的實質空間需求並不大，但最重要的是要有運算快速且具大量資料儲存之電腦硬體設備。以一個三維(three-dimensional)真實流的模擬為例，通常要考慮使用工作站級以上或高速運算之電腦，以滿足大尺度計算之需求。

三、複雜幾何情況之處理

在實際問題中，其相應之幾何情況往往是複雜的。這在模型試驗中並不會造成太大的技術性問題，但在進行數值模擬時則經常會造成困擾。例如，人行道的植樹可以縮尺模型置於風洞內並進行風況量測，以評估其對人行道風(pedestrian wind)之減風效果，然欲以數值模擬來直接解析此類問題，現階段尚有一些困難有待克服。

四、結果之完整性

常受限於現有量測設備之數量或能力，或為了避免對流場之干擾，於試驗中往往僅能針對有限之變數作局部性之量測。尤其在處理非恆定(unsteady)的時變問題時，其困難度更形增加。相對地，應用數值模擬的方法，可以在不造成量測儀器干擾的情況下獲取所有變數整場的時空變化結果，提供設計者詳盡的流場資料以供細部分析之用。

五、結果之真確性

在從事試驗量測時，除了可能因為量測儀器對流場之干擾致使結果產生誤差外，模型試驗既有之縮尺效應(scale effect)對量測結果正確性之影響亦可能顯著。一般而言，風域中建物縮尺模型之製作常取決雷諾數(Reynolds number)，為確保模型與實場二者之風況滿足相似(similarity)的條件，理論上二者相應之雷諾數應一致。但事實上，在實場之雷諾數常在 107 或 108 以上，而在模型試驗中往往最高僅能達到 104 至 105。儘管在雷諾數夠大的情況下，無因次(dimensionless)之流場結果可能已不再受雷諾數改變之影響(即已發生所謂的高雷諾數之不變性；high-Reynolds-number invariance)，然在雷諾數差距三個量級(order)以上的情況下，模型中流場之紊流結構(turbulence structure)是否確實與實場相似，則成為獲得試驗結果準確與否之關鍵。另一方面，應用數值模擬的方法進行流場解析則無縮尺效應的問題，然其預測結果亦有誤差產生的可能。諸如離散化計算引致的截斷誤差(truncation error)以及對複雜幾何邊界簡化處理所造成之誤差等，均須於模擬中使用相當緻密的網格系統方能予以消弭；但另一方面，則可能大幅增加計算量與所需之資料儲存空間。此外，為了要正確地反應出真實風場中的紊流效應(turbulence effect)，數值模擬中使用紊流模型(turbulence model)的適切與否，更是影響結果精確程度的重要因素。以目前的情況而言，使用時間平均(time average)的紊流模型或空間平均(space average)的大渦流模擬(large eddy simulation；LES)對簡單或中度複雜的風況已有許多成功的模擬實例。但在複雜程度較高的流場模擬，此二紊流模型之應用在提供高精度風場結果上仍有相當待努力的空間。

由前述之比較可見，CWE 與風洞試驗都有一些限制與缺憾，但從另一個角度來看，兩者間實有互補之關係。以現階段之情況而論，若能將這兩個方法作適當地配合，在分析上常能達到相輔相成之功效。

五、CWE 的基本執行步驟

針對一個流體動力學的問題，典型數值解析方法的執行概分為如後四個步驟：

一、計算區域的選定

儘管在真實的情況中流場涵蓋的空間幅員可能是無限大的，然因電子計算機在運算與資料處理上能量與儲存空間之限制，基於經濟上的考量，數值計算往往僅能針對有限

的空間中進行。誠然，當選取的區間(domain)愈小時愈能降低運算所需之儲存空間、能量與時間，但另一方面則往往導致計算結果誤差的增加。因此，在計算效率與誤差的雙重考慮下，如何就計算區間作一個最佳的選定(妥協)，則取決於執行者的專業判斷(professional judgment)。

二、控制方程式的決定

針對待解的風場相關變數(速度、壓力、溫度、濃度等)，下一步則為相應動力方程式的決定。在風工程的範疇中，可以選擇的例如有簡化線性的拉普拉斯方程式(Laplace equation)、忽略流體黏滯性(viscosity)效應的尤拉方程式(Euler equation)與較複雜但較接近於真實流況的那維爾-史脫克斯方程式(Navier-Stokes equation)等。若想要將風場作更精確的描述或模擬，則須採用較高層次的控制方程式，而其耗費的電腦能量亦大，取捨之間執行者必須再次作專業性的判斷。目前就電腦可以提供的能量現況而言，絕大多數風工程的問題已使用基於那維爾-史脫克斯方程式的數值解析，並配合以紊流模型之應用，風場預測的結果一般皆有不錯之真確性。

三、數值離散化(discretization)

如前所述，數值方法係數學解析法的延伸。為了要應用計算機進行數值運算，就必須要將原有具時空連續性的問題轉化為離散化的狀況。換言之，在進行數值解析時，必須要把計算區域作網格式劃分，並針對所有網格(grid)幾何中心或網格節點(node)相應的離散位置進行流場變數之計算，以獲致風場的近似解(approximated solution)。理論上，如果取用的網格為無限小時，其計算的結果就會與真實的結果一致。此時，流場之模擬亦無需使用紊流模型。但事實上，由於此將會使得計算量變得過大而顯得極不經濟。故而，在從事數值計算時，應在確保計算結果精準度與節省計算量兩者間作一個適當的取捨，據以決定出計算網格的細密程度。

四、數值計算之執行

一旦網格系統建立後，接下來的工作則是數值計算方法的選取與執行。常見的數值計算方法如有限元素法(finite element method)、有限差分法(finite difference method)、有限體積法(finite volume method)等等。以有限差分法為例，則須先將連續性的微分方程式(differential equation)轉化為離散化的差分方程式(difference equation)，繼而進行流場近似解的計算與求取。

六、CWE 模擬實例

如後列舉幾個典型數值模擬的 CWE 應用實例。在這些例子中，紊流流場模擬係採用微可壓縮流的方法(weakly compressible flow method; WCF[4])，配合以 Smagorinsky[2] 之次網格紊流模型。其中，在 6-2 節中的案例為風與結構(橋體)振動的流場誘發振動(flow-induced vibration)問題，模擬中涉及流體動力與結構動力兩組控制方程式，係以交替解析的方式以反映出流場與結構振動間之互制效應(interaction)。

值得一提的是，儘管部份列舉問題涉及二維之基本流態，然因紊流屬三度空間之表現，故流場之模擬仍於三維空間中進行(第三個方向應選取足夠之長度)。

6.1 數值模擬典型鈍體流風場模擬

6.1.1 均勻來流通過二維方柱/矩柱

依據數值模擬結果，圖 1 顯示均勻來流通過一個二維方柱之無因次流場結果(雷諾數 $Re=UD/\nu=107$ ， U 為來流風速)。由圖 1(a-c)之瞬間渦度場(vorticity field)可見，當流體通過方柱時，於柱體之兩個前緣(leading edges)處發生了分流(separation)，上下兩條分流線續朝下游延伸，兩側之渦流並於中央對稱線區域產生相互干擾、襲捲(swirl)與剝離(detachment)的現象，繼於柱後尾流區(wake)內產生了非恆定之渦散(vortex shedding)。由方柱順風(along-wind)向阻力(drag)係數(C_D)與橫風(acrosswind)向升力(lift)係數(C_L)的歷時圖(圖 1d)可見，二者約略呈週期性之變化，且在升力的變化量(ΔC_L)明顯地大於阻力的變化量(ΔC_D)。此外，長時段平均流場相應之速度等值線分佈呈現上下對稱但左右不對稱(因有尾流區之存在)之現象(圖 1e)，故相應之平均升力係數(\bar{C}_L)為零，但平均阻力係數(\bar{C}_D)不為零。

至於在相對的矩柱($B/D=4$)情況中(參見圖 2)，非恆定之渦散現象亦於柱後發生。與方柱情況不同的是，自柱體前緣引發之分流線在柱體兩側發生了再接觸現象(re-attachment)，使得矩柱後尾流區之橫寬變窄。儘管相應之平均升力係數仍為零，但其平均阻力係數則較方柱情況為小。

6.1.2 邊界層來流通過地面二維方柱

在同等雷諾數下邊界層來流(boundary layer approaching flow)通過地面二維方柱情況中(參見圖 3)，分流線自方柱迎風面上緣向下游襲捲，產生了順時針方向的渦流列(圖 3a 至圖 3c)。長時段平均流場相應之速度等值線分佈結果顯示(圖 3d)，柱後低風速尾流區內存在一個常駐之分流泡(separation bubble)，但此和各瞬間呈現的流況是不盡然相同的。

6.1.3 均勻來流通過二維直列雙方柱

當均勻來流通過直列(tandem arrangement)雙方柱時，由於後柱存在於前柱的尾流區內，對前柱分流線向下游之延伸以及渦流之剝離與襲捲造成了相當程度之影響(圖 4a 至圖 4c)，使得流場之變化機制更形複雜。由長時段平均流場相應之速度等值線分佈(圖 4d)可見，較之於單柱情況(圖 4e)，後柱下游處尾流區之橫寬明顯增大。

6.1.4 均勻來流通過二維橫列雙方柱

當均勻來流通過橫列(side-by-side arrangement)雙方柱時(圖 5)，上柱下方與下柱上方產生之渦流會產生相互之影響，使得流場之時變程度增強。圖 5d 顯示，儘管長時段平均流場呈現上下對稱之情形，但此與各瞬間相應之流場情況(圖 5a 至圖 5c)顯有不同。

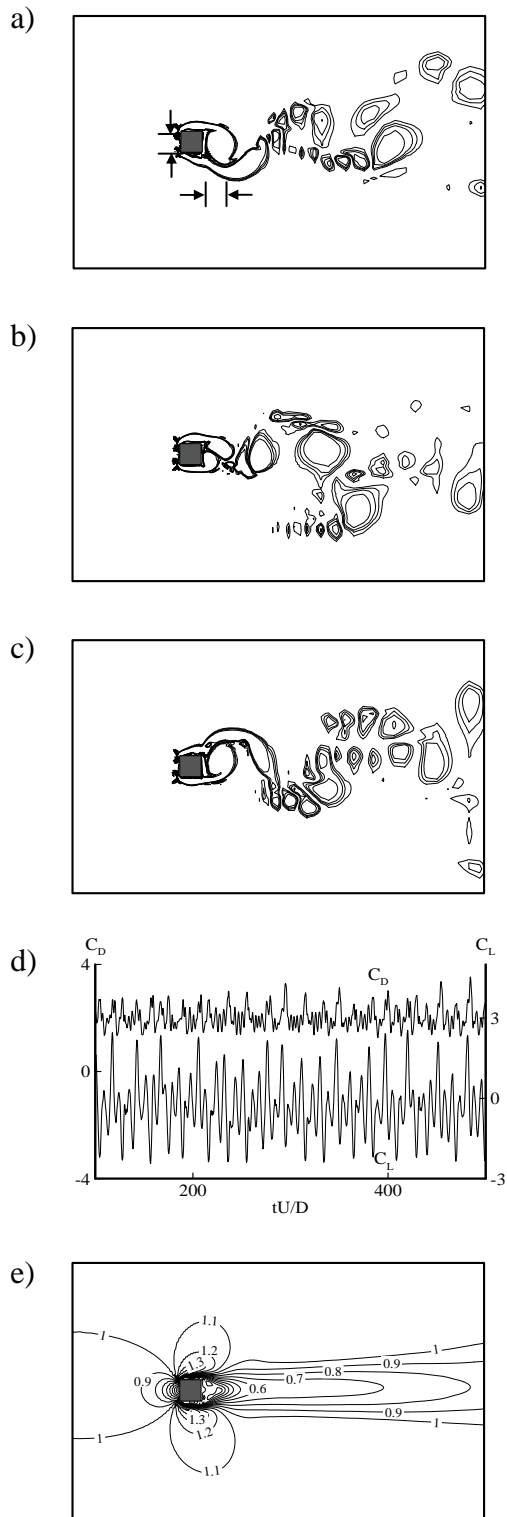


圖 1 均勻流通過二維方柱結果

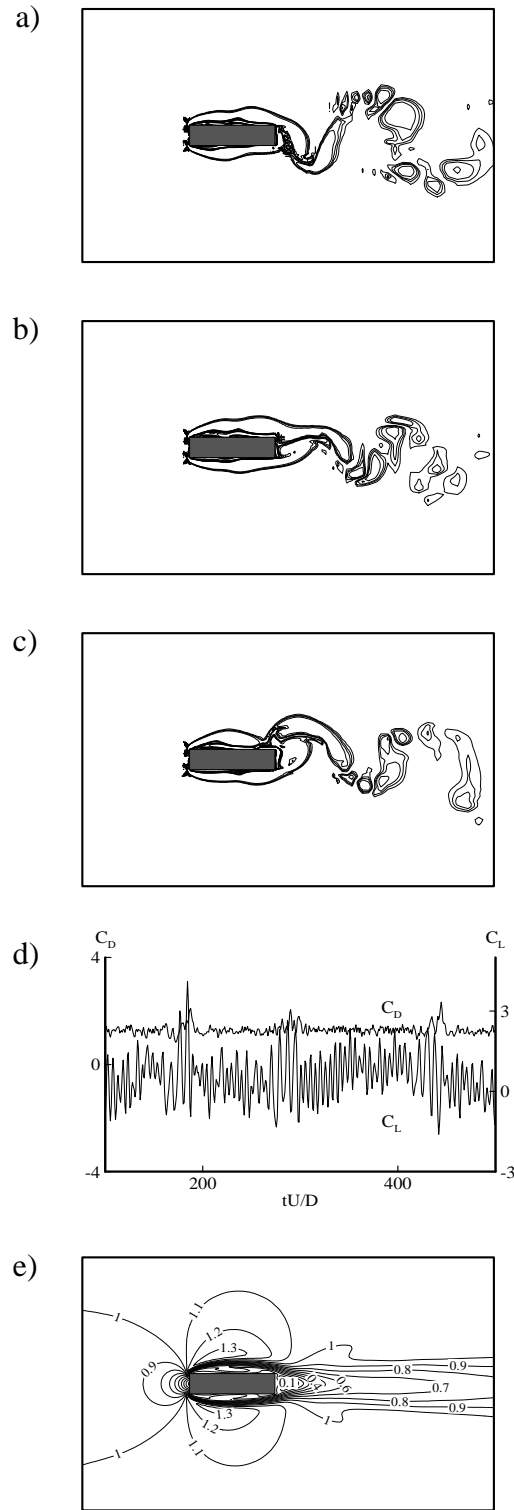


圖 2 均勻流通過二維矩柱結果

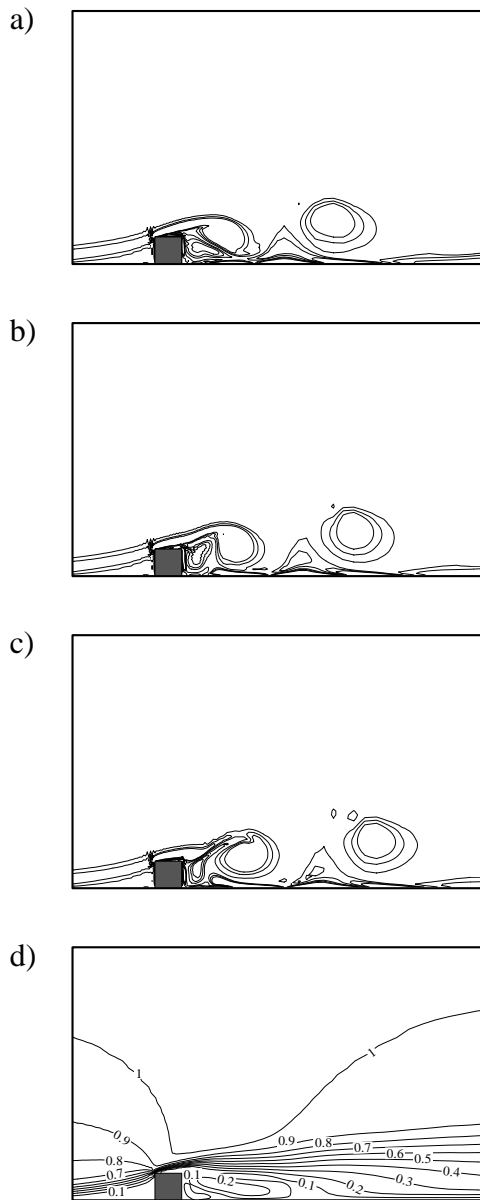


圖 3 邊界層來流通過地面二維方柱
方柱結果

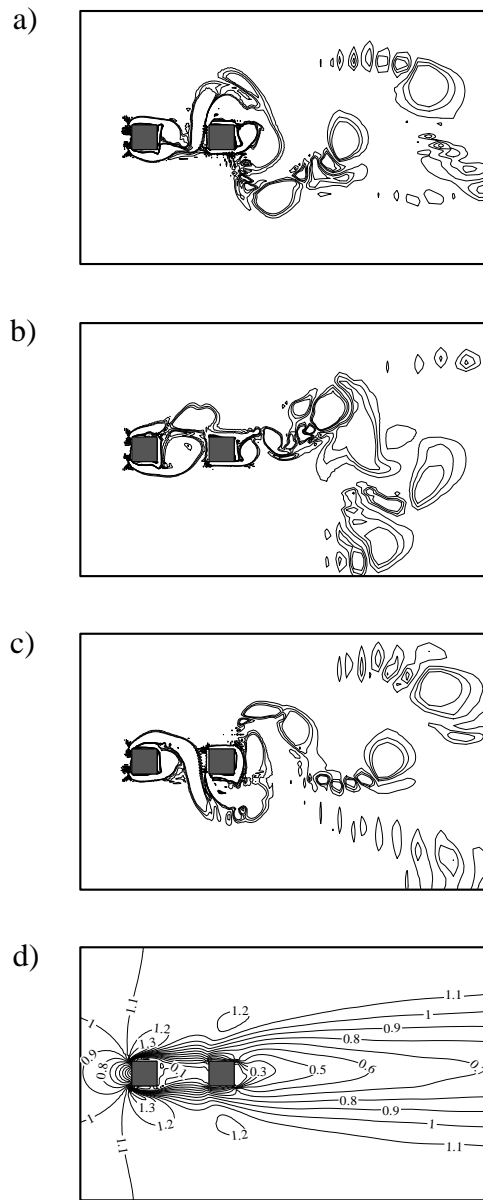


圖 4 均勻來流通過二維直列雙柱結果

6.1.5 邊界層來流通過地面三維單方柱

數值結果顯示(圖 6)，在邊界層來流通過地面上高寬比為 10 之三維單方柱的流況中，由於受到柱頂與柱底處產生之頂渦流(tip vortex)與馬蹄形渦流(horse-shoe vortex)之影響，使得流場呈現強烈的三維特性。於此較大的方柱高寬比情況中，長時段平均流場結果顯示，在相應於柱體半高的水平面上(圖 6a)，其平均速度等值圖之形態類似於均勻

流通過單一二維方柱之結果(圖 1e)；另一方面，相應於垂直對稱面上之平均速度分佈形態(圖 6b)亦與邊界層來流通過地面單一柱體(如見圖 3d)雷同。

6.2 均勻來流中橋體受風作用之互制振動模擬

相對於一般橋梁，懸索橋或斜張橋有著輕軟之結構特性，儘管其上部結構較具抗震性，然在抗風方面則存在著敏感的氣動力不穩定性(aerodynamic instability)考量，而此流場誘發振動問題則依橋梁斷面幾何形狀等因素之改變而呈現不同之氣動力行為。

當風吹襲非流線外形之橋體時，於下風處將因橋體兩側產生渦流之交互作用而引致渦散(vortex shedding)現象之發生，而流場中非恆定的外力將使得橋體產生振動。當橋體振動顯著時，其運動將對鄰近風場造成影響進而導致橋體受風效應之二次改變，此風與橋體間的互制效應即反映出橋體之氣彈力行為(aero-elastic behavior)。

模擬中需處理描述流體動力與結構動力的兩組控制方程式，乃以交替解析的方式以反映出流場與結構振動間之互制效應。換言之，在初始預設橋體幾何與動力條件下先進行瞬間風場之模擬計算，以獲得橋體之瞬間受力，進而求得橋體在下一個瞬間之振動反應。至於在下一個瞬間之風場模擬中，則將橋體之振動(位移與速度)納入流場計算中邊界條件之考量，依此交替解析。

在一個均勻來風中梯形斷面橋體的問題中(圖 7)[5]，表 1 列舉相關之橋體特性。案例中乃以此斷面模型(section model)之風洞試驗資料為基準，平行地進行在各風速(U)下的數值模擬動力計算。

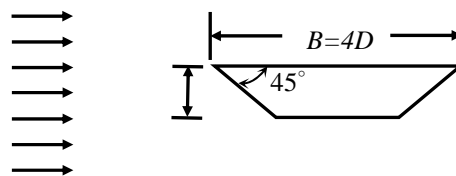


圖 7 均勻流通過梯形斷面橋體簡示圖

表 1 橋體斷面特性

Mass (kg / m)	Moment of inertia (kg-m ² / m)	Fundamental frequency (Hz)		Damping ratio (%)	
		Heaving (f_v)	Torsional (f_t)	Heaving (ξ_v)	Torsional (ξ_t)
0.472	6.31×10^{-4}	14.8	28.4	0.80	0.70

依據數值計算結果，圖 8 顯示在零風攻角(attack angle)時橋體質心在垂直(heaving)

與橋面在扭轉(torsional)兩個方向之均方根值振動量(與結果)。其中， U_r 為以無因次形式表示的約化風速(reduced velocity; $U_r = fVD$)。當風速(U)自低速漸增時，流場對橋體作用力之時變量亦增，導致橋體之均方根值振動量變大。另一方面，渦散頻率(shedding frequency)也會隨著來流風速之增加而增加，而當 U 達到約 7.4 與 10.6 m/s 時因渦散頻率分別與橋體垂直向與扭轉向之基本頻率(fundamental frequency)相同，致使橋體振動量發生局部尖峰(peak)值。然而，當此共振(resonance)發生時，振動行為之總阻尼(結構阻尼值與因互制效應引致氣動力阻尼值(aerodynamic damping ratio)之和)仍為正值，儘管橋體振動量大，但仍為有限值。

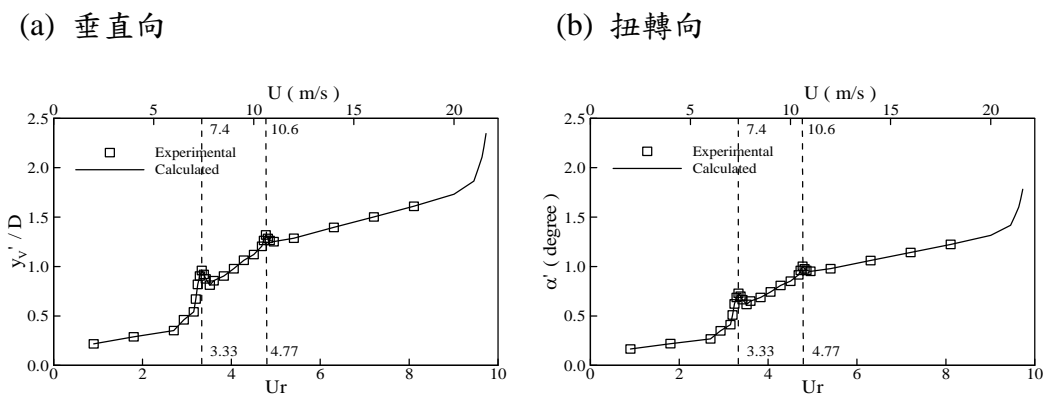


圖 8 橋體均方根值振動量結果

當 U 自共振風速繼續增加時，橋體振動量除了在初期因脫離了鎖定(lock-in)風速範圍而有稍許降低外，大致上仍呈現遞增之趨勢。數值結果顯示，當 U 達到約 21.6 m/s 時，橋體振動量呈現出急遽增加之發散現象，此乃因振動行為之總阻尼值已由正轉負而發生了顫振(flutter)現象之故。至於在從事風洞試驗時，為避免因振動量過大而導致模型之毀損，並未進行在此高風速下之量測，因此在圖 8 中並未呈現相應之試驗結果。

參考文獻

- [1] Murakami, S., Mochida, A. and Hayashi, Y., "Examining the k- ϵ Model by Means of a Wind Tunnel Test and Large-Eddy Simulation of the Turbulence Structure around a Cube," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 35, pp. 87-100, 1990.
- [2] Smagorinsky, J., "General Circulation Experiments with Primitive Equations," Month Weather Review, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164, 1963.
- [3] Germano, U., Piomelli, P. and Cabot, W.H., "A Dynamic Subgrid-scale Eddy Viscosity Model," Physics of Fluids, Vol. A, No. 3, pp. 1760-1765, 1991.
- [4] Song, C. and Yuan, M., "A Weakly Compressible Flow Model and Rapid Convergence Method,"

Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol. 110, No. 4, pp.441-455, 1988.

[5] Fang, Fuh-Min, Li, Yi-Chao, Chen, Chu-Chang, Liang, Tsung-Chi and Chen, Jwo-Hua, "Numerical Predictions on the Dynamic Response of a Suspended Bridge with a Trapezoidal Cross-section," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 28, No. 2, pp. 281-291, 2005.

[6]