

山區地形中風速壓剖面之檢討

方富民* 鍾政洋** 梁琮琪** 楊峻**

關鍵字：風力規範，數值模擬，風洞試驗

摘 要

本研究針對現行風力設計規範中有關山區三個基本特殊地形(懸崖、山脊與山丘)之風場進行探討，據以建立相應之風場資料庫，繼而評估規範中建議風速壓剖面之適宜程度。研究中先首應用風洞試驗量取相對低雷諾數情況下模型地形之風場，以為數值模擬結果驗證之基準。待風場數值模式確立後，再以系統化的數值模擬獲取與實際情況相符合的高雷諾數風場資料。除了細部檢視此三種特殊地形之風況特性外，本研究再藉數值結果與規範中建議風速剖面飽滿程度之比較檢討其間之差異。主要結果顯示，在山脊與山丘的情況，其背風面會因分流的發生而導致迴流的現象，而此非恆定流的風速變化呈現近似常態分佈的形式。此外，研究中亦發現規範中有關此三個基本特殊地形之設計風速壓剖面，在部份的區域中規範的建議的風速壓剖面上低估之情形。

Assessment of Wind Velocity Profiles in Mountain Areas

F. M. Fang* C. Y. Chung** T. C. Liang** J. Yang**

KEYWORDS: Wind Design Code, Numerical Simulation, Wind Tunnel Test

ABSTRACT

The flow characteristics in cases of an escarpment, a ridge and a hill were investigated systematically to establish the wind flow data base and to assess the validity of the related code in terms of velocity pressure profiles. In the study, velocity profiles of models were measured in a wind tunnel and the results were used to confirm the accuracy of the numerical simulations. After the applicability of the numerical method was assured, a series of numerical simulations were performed to predict the flows of the three unique topographical cases. Accordingly, not only the flow features were examined in detail but the validity of the code suggestions was evaluated. Major results show that in the ridge and hill cases, reverse flow exists in the leeward region due to the occurrence of separation and the local velocity fluctuations behave in a manner close to a normal distribution. Moreover, the velocity profiles suggested by the present code appear somewhat non-conservative.

* 國立中興大學土木工程學系教授(通訊作者 Email: fmfang@nchu.edu.tw)

Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan

**國立中興大學土木工程學系研究生

Graduate students, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan

一、前言

台灣屬島嶼地形，平地面積相對少。隨著都會區之發展，可供使用之建地漸不敷需求，高樓之構築有移向郊外坡地或山區之趨勢。由於在高層建築物的設計上需作風力評估之考量，以確保建物之表面風壓與風荷重不致造成帷幕牆破壞或引起住民不舒適性等問題，在規範中已有相關之規定與建議。

由於受到地形之影響，在山區或山坡地中風場之基本形態與平坦地有所差異。隨著地形變化而使得風產生加速或減速的效果，其複雜度更隨著地形變化之程度增加。尤其在背風面或山凹處常見因渦流(vortex)引起之非恆定(unsteady)風場現象，在風力分析的準確度上更不易掌握。

在以往典型之相關研究中，以風洞試驗檢視二/三維(two-/three-dimensional)山丘之風場特性者如 Ferreira 等(Ferreira, et al., 1995)、Kim 等(Kim, et al., 1997)、Carpenter 與 Locke(Carpenter and Locke, 1999)、Ishihara 等(Ishihara, et al., 1999)，關注的重點除了風速剖面的時均值(mean)外，亦包括風場的紊流特性。探討丘陵地面粗糙度(roughness)對風速剖面之影響者如 Cao 與 Tamura (Cao and Tamura, 2006)、Takahashi 等(Takahashi, et al., 2002)，研究中指出地面粗糙度對產生之分流(separation)會有相當程度之影響，也因此導致氣流加/減速度之改變。Takahashi 等(Takahashi, et al., 2005)依據風洞試驗結果評估三維山丘中氣流之穩定度。Lubitz 與 White(Lubitz and White, 2007)則討論山區中氣流方向之變化對風場之影響。Miller 與 Davenport(Miller and Davenport, 1998)依據風洞試驗結果提出了於多重山丘地形中設計風速(design wind speed)之簡易估算準則；Weng 等(Weng, et al., 2000)則根據數值模擬結果整合出一套在複雜地形中設計風速之參考準則。

在國內現行建築物耐風設計規範(內政部建築研究所，2006)中有關風速壓之估算係基於在 A、B、C 三種地況下平坦地形中平均風速剖面為冪數律(power law)形式之假定，依據準穩定原理(quasi-steady theory)推算而得。針對非平坦地形的情況，現頒規範的建議中乃引入一個地形係數(topographic factor)，針對懸崖(escarpment)、山脊(ridge)與獨立對稱山丘(axisymmetrical hill)等三種基本情況加以修正。此修正的方法係沿用美國 ANSI/ASCE 規範(American Society of Civil Engineers, 2002)，而建議之地形係數則主要由風洞模型試驗之風場資料庫結果整理而得。相對之下，台灣之地形特性之複雜程度遠較大陸型地區高，在缺乏原始風場資料庫之情況下直接沿用此相關規範是否能滿足本國耐風設計之需求實有進一步探討之必要。

二、目的

本研究針對 C 地況，以風洞試驗與數值模擬兩個方法交相配合應用的方式進行特殊地形中風場問題的分析。其中，風洞試驗可以提供數值模擬風場結果驗證之基本數據；待數值模式預測結果之精準度確立後，則藉系統化的數值模擬獲取和實際情況相符合的高雷諾數紊流風場結果，進而建立完整之風場資料庫，以為後續規範評估與建議提出之依據。

研究中之試驗部份係於內政部建築研究所風洞試驗室之低速風洞進行；在數值計算上則選定微可壓縮流(weakly-compressible-flow method；Song and Yuan, 1988)的 CFD 數值方法，配合以空間平均(space averaged)的大渦模擬(large eddy simulation；LES)與次網格紊流模型(sub-grid scale turbulence model)從事風場之計算，以進行比較與分析。

三、背景

基本上，目前國內規範中有關順風向(along-wind direction)風力之計算係引用自美國 ASCE 規範。在「建築物耐風設計規範及解說」(內政部建築研究所，2006)中有關風速壓(velocity pressure)之計算係考慮地況、地形、建築物重要性等因素，依據準穩定原理提出如後之建議計算式：

$$q(z) = 0.06 K(z) K_{zt} [I V_{10}(C)]^2 \quad (1)$$

其中， $K(z)$ 為風速壓地況係數； I 為用途係數； $V_{10}(C)$ 為任一地點之基本設計風速，係假設該地點之地況種類為 C 類，離地面 10 公尺高，相對於 50 年回歸期之 10 分鐘平均風速。此值為離地面 z 公尺之風速壓與標準風速壓(地況 C ，離地面 10 公尺處)之比值，依下式計算：

$$\begin{aligned} K(z) &= 2.774 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} ; \quad z > 5m \\ &= 2.774 \left(\frac{5}{z_g} \right)^{2\alpha} ; \quad z \leq 5m \end{aligned} \quad (2)$$

而 α 與 z_g 分別為地況係數及梯度高度(z_g ; gradient height)。此外， K_{zt} 為地形係數，乃反映在獨立山丘或山脊之上半部或懸崖近頂端處之局部加速效應。國內現有風力規範乃沿用美國 ASCE 規範，針對山區中三個典型的地形——二維懸崖、二維山脊與三維軸對稱之山丘(參見圖 1)建議了地形係數(K_{zt})的推算方法。若獨立懸崖、山脊或山丘高度(H)較上風側 3.22 公里內地形高度超過兩倍以上，且 H 大於 4.5 公尺(地況 C)或 18 公尺(地況 A 或 B)，且此獨立懸崖、山脊或在山丘上風側 $100H$ 或 3.22 公里（兩者取小值）內沒有類似高度之障礙物，且 $H/L_h \geq 0.2$ 時，則 K_{zt} 可依後式計算：

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (3)$$

其中，參數 K_1 與地形特徵和最大頂端加速有關；參數 K_2 與加速效應之水平衰減率有關；參數 K_3 與加速效應之垂直衰減率有關。依據此式，規範中針對不同之地形（二維懸崖、二維山脊與三維山丘）、地況(A 、 B 、 C)與坡度變化(H/L_h)，提出有關 K_1 、 K_2 與 K_3 之建議公式與表格。

四、方法概述

本研究針對現行規範中述及的懸崖、山脊與山丘等三種基本特殊地形(參見圖 1)，以風洞試驗與數值模擬兩個方法配合應用之方式進行問題的分析。研究中首先進行風洞模型試驗，就典型的的基本特殊地形情況量取風場速度剖面，以為數值模擬結果驗證之依據。然而，在風洞中相應之風場雷諾數(Reynolds number)較實際情況低了 2 至 3 個量級(order)，對地面具有曲度變化之地形而言，有因縮尺效應(scale effect)而引致誤差之虞。因此，待數值模擬的風場預測精準度確立後，研究則繼續針對高雷諾數的真實情況，藉地形變化坡度之改變系統化地進行風場模擬並建構資料庫，以為現行相關規範適用性度評估之依據，甚或提出可能之補強與建議。

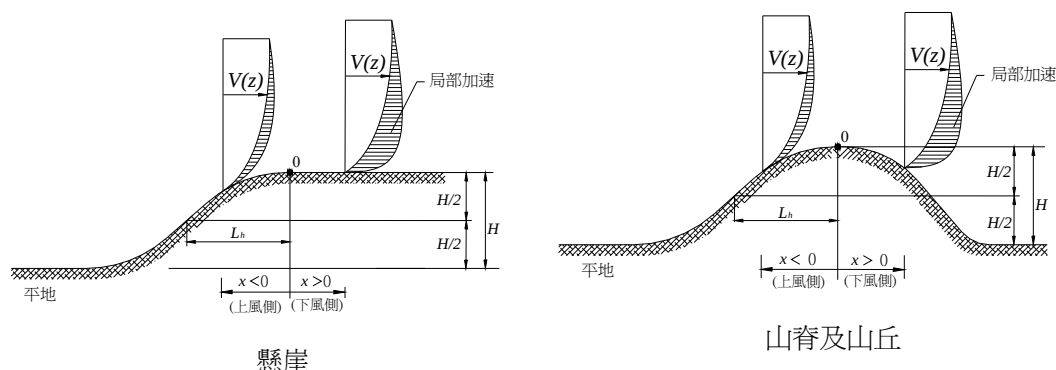


圖 1 三種基本特殊地形簡示圖 (內政部建築研究所，2006)

4-1 風洞試驗

研究中製作了三個典型之特殊地形模型(包括二維懸崖、二維山脊與三維山丘，每一情況之 H/L_h 值皆為 0.5；參見圖 2)，置於風洞中，並在符合 C 地況大氣邊界層來流中以 DANTEC 恆溫流速儀(constant temperature anemometer)配合熱膜探針(hot-film probe)量取不同截面之垂直風速剖面(時均值與擾動量)，以為數值模擬準確度驗證之依據。其中，懸崖情況之模型系統中必需於下游處加入一傾斜段(圖 2(a))，以確保風洞在地板面高度之連續性。另一方面，在使用恆溫流速儀進行來流風況量測時，採用之取樣頻率為 1000 Hz，每測點量測時間為 300 秒。由於實際現地之雷諾數較風洞模型試驗大 2 至 3 個量級以上，故本風洞試驗之結果尚不能用以建構描述實際高雷諾數情況之風場資料庫，僅能作為數值模擬結果驗證之用。

模型試驗中來流風況之製造係於試驗段上游應用適當佈設之錐形渦流產生器(spire)與地表粗糙元(roughness element)所產生。圖 3 顯示來流截面相應之平均風速剖面(幂數律 α 值為 0.14，邊界層高度 δ 為 150 公分，層緣風速 U_0 為 14.01 m/s)與均方根值(root-mean-square)風速剖面。其中， u' 、 v' 與 w' 分別為順風 x 方向、水平橫風 y 方向與垂直 z 方向之均方根風速擾動量。本來流之平均與均方根值風速剖面符合規範中 C 地況之特性。

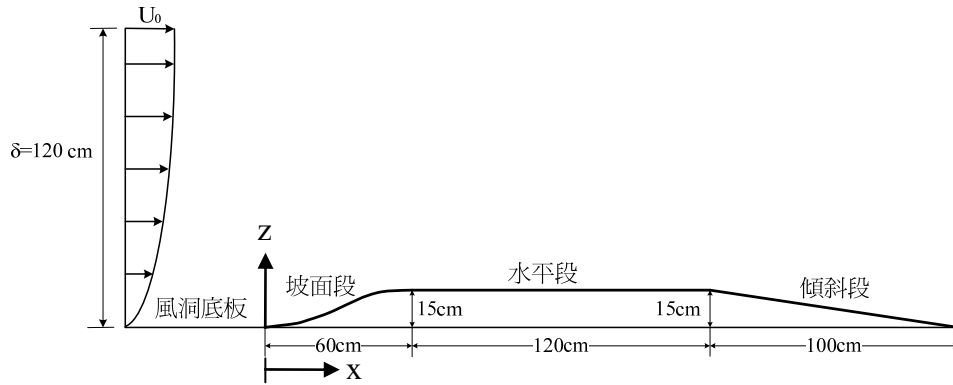
4-2 數值模擬

研究中之數值計算上係採用微可壓縮流的 CFD 數值方法，配合以空間平均的大渦模擬與次網格紊流模型進行風場之計算，以進行方柱受風效應之比較與分析。本數值模擬方法(Song and Yuan, 1988)為應用有限體積法(finite volume method)之研究型軟體，求解之連續與動量方程式分別為：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + K \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \nabla \cdot [(\nu + \nu_t) \nabla \vec{V}] \quad (5)$$

(a) 懸崖



(b) 山脊/山丘

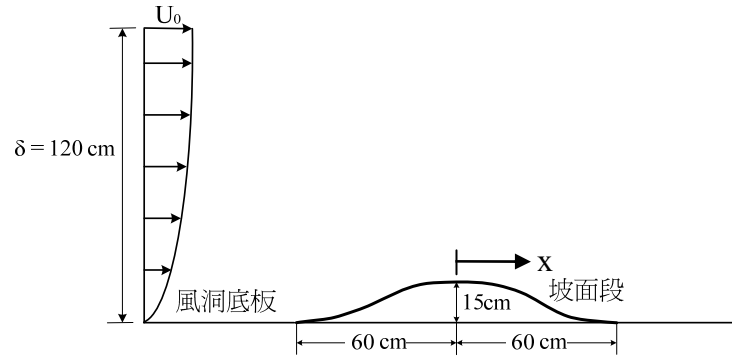
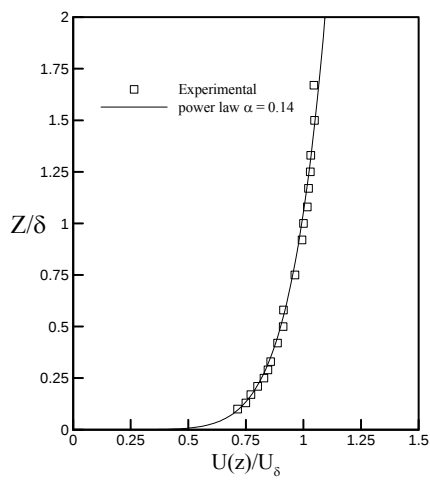


圖 2 模型簡示圖

(a)



(b)

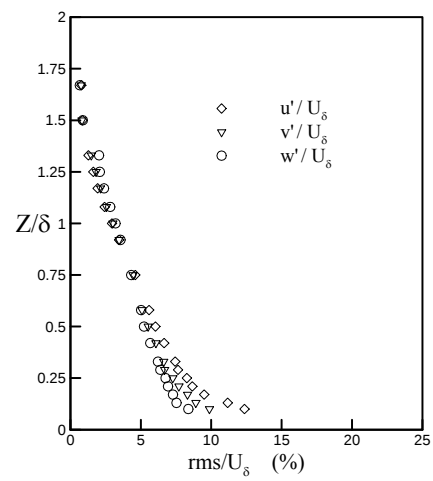


圖 3 來流截面之風速剖面：(a)平均值剖面；(b)均方根值剖面

其中， p 與 $\vec{V}$ 為經過空間平均後之壓力與速度向量； K 與 ρ 分別為空氣之整體彈性模數(bulk modulus of elasticity)與密度； t 為時間； v 與 v_t 分別代表流體之片流(laminar)與紊流黏滯度(turbulent viscosity)。此外，紊流黏滯度係應用 Germano 等(Germano, et al., 1991)提出的動態次網格紊流模型(dynamic subgrid-scale turbulence model)，依據如下(6)式獲得：

$$v_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (6)$$

其中， C_s 與 Δ 分別為 Smagorinsky 常數與濾格尺度(filter width)； S_{ij} 為應變張量(strain tensor)。

本數值方法在非恆定(unsteady)紊流(turbulent)流場計算過程中，(4)式與(5)式之求解係應用有限體積法(finite-volume method)針對各計算網格採用 MacCormack (1969)之顯隱格式，配合以 Crank-Nicolson 法(Crank and Nicolson, 1947)進行。

4-2-1 邊界條件處理

在風場模擬中數值邊界條件之處理上，對固定邊界(stationary boundary)而言，計算中係於計算區邊界外之鏡射點(phantom point)給定適當物理量的方式，以正確地反應出邊界之特性。在速度方面，入流截面之速度採用預定來流分佈之給定值以定義入流形態；地面之鏡射點則給予不可滑動條件(no-slip condition)，而在其他可穿透邊界(上邊界、側邊界與出流截面)之鏡射點則依據零梯度之物理特性給定之。在壓力方面，除將出流截面之平均壓力定為流場之參考壓力外，其餘邊界之壓力給定均基於零梯度之物理特性予以處理。

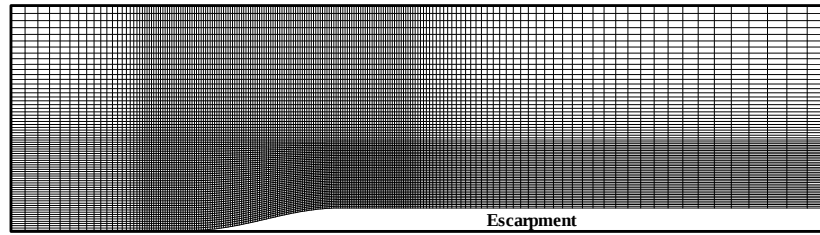
4-2-2 來流風速之數值模擬

採用大渦模擬方法時，由於針對的流場變數屬於空間平均的形式，故在入流邊界上動態條件給定之須作特別的處理，而當實際來流風況為紊流的形態時，在速度的呈現上除了包括平均值(mean)外也應考慮擾動量(fluctuation)。為了要模擬出一個與研究中風洞試驗匹配的紊流來流風場，研究中採用了 Kondo 等(Kondo, et al., 1997)建議之頻譜法(spectral method)，以產生所需非恆定形式的紊流來流風速情況。過程先於風洞中進行 C 地況來流剖面之風速量測以獲得各量測點擾動風速之交相關頻譜密度矩陣(cross-spectral density matrix)，接著經由傅立葉轉換求出符合在水平橫風(y)向與垂直(z)向之空間相關性(spatial correlation)後模擬出既定之風速剖面，以為後續計算中來流邊界條件之輸入資料。

4-2-3 數值計算區域與格網

針對懸崖、山脊與山丘之情況，典型(以 $H/L_h=0.5$ 為例)之流場計算區域(computation domain)如見圖 4。三個地形之坡面變化均以餘弦(cosine)曲線描述。在垂直(z)方向，計算區之高度取 $10H$ (H 為坡面高度)；在水平順風(x)方向，計算區之入流/出流截面與坡面段之間距則取足夠長度(分別為 $8H$ 與 $25H$)；而在水平橫風(y)方向，計算區之寬度取 $16H$ ，以確保因邊界引致之誤差降至極低。圖 4 亦顯示數值模擬中採用之典型計算格網，其最小格網之尺寸為 $0.05H$ 。在非恆定紊流計算過程中，無因次之時間增量(time increment)為 2.7×10^{-3} ，每計算個案之總無因次真時(real time)約為 800。研究中之所有風場模擬皆在三維計算空間中進行。

(a) 懸崖



(b) 山脊與山丘(中心縱斷面)

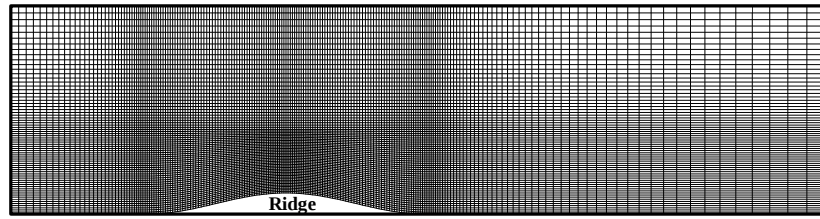
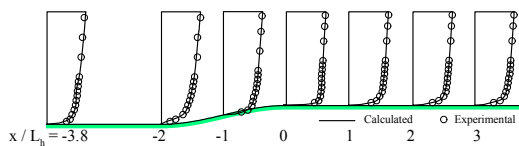


圖 4 典型計算區域與格網圖

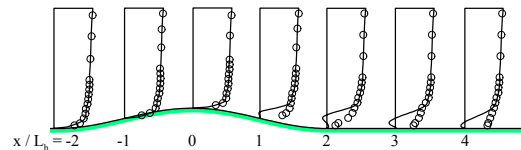
五、數值模式結果驗證

圖 5 顯示在 H/L_h 為 0.5 時，懸崖、山脊與山丘三個情況下模擬與量測平均風速剖面之比較。其中，在懸崖情況(圖 5a)之數值與量測結果有相當不錯之吻合度。另一方面，在山脊與山丘情況(圖 5b 與圖 5c)中，由於在坡頂後因分流(separation)之產生而導致非恆定的風場迴流(reverse flow)現象(進一步風洞試驗中以地面放煙的視化觀察中亦顯示本現象之存在)，而以熱線流速儀進行風速量測時尚無法正確地分辨出正/逆向之風速。因此，在坡頂後近地面處之量測結果並不能正確地反映出實際風場之行為。相對地，數值模擬在此近地面處風場之描述則較為真確。由圖 5b 與圖 5c 中亦見，在相對遠離地面之區域，數值與量測結果則有不錯之吻合度。

(a) 懸崖



(b) 山脊



(c) 山丘(中心縱斷面)

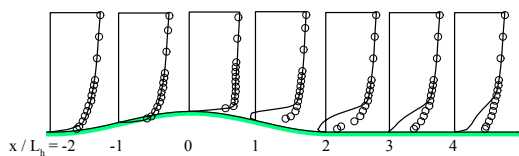


圖 5 數值模擬與風洞試驗量測平均風速剖面比較圖

六、風場系統化數值模擬

爲了要檢視現行建築物耐風設計規範中地形係數之建議值進而評估其適宜度，待數值模式之預測準確性確立後，本研究繼於典型高雷諾數(10^7)的情況下進行系統之風場數值模擬，據以建構在懸崖、山脊與山丘三種基本特殊地形中風速剖面之資料庫。依據「水土保持法」中有關山坡地之定義：『標高在一百公尺以上者；或標高未滿一百公尺，而其平均坡度在百分之五以上者』，爲著眼於本相關風力規範在配合國內相關法令之適用性，故將坡面高度(H)選定爲 100 公尺。研究中針對典型 C 地況之情形，大氣邊界層厚度(δ)爲 300 米，風場模擬包括 3 種地形(二維懸崖、二維山脊與三維山丘)與 6 個坡度比($H/L_h=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$)。數值模擬中相應於 C 地況採用的入流條件如圖 6 所示，平均風速剖面相應之冪數律 α 值分別爲 0.15，最大紊流強度約爲 14%。

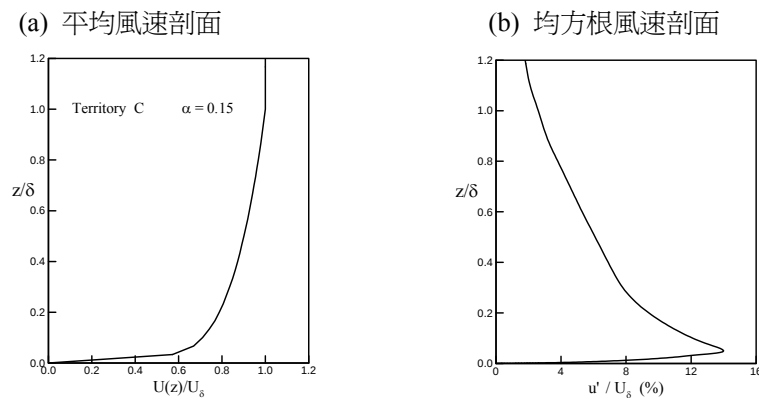


圖 6 數值模擬入流截面風速剖面

6-1 系統化數值模擬風場結果

6-1-1 懸崖情況之平均與均方根風速剖面

依據數值計算結果，圖 7 爲二維懸崖在 C 地況下平均風速剖面與規範建議剖面之比較。爲便於比對，相應於規範建議之風速剖面係依據風速壓計算式((1)式)中採用途係數(I 值)爲 1 之情況反推而得。平均風速剖面之比較顯示，數值結果與規範建議者大致相若。值得一提的是，在懸崖起始截面處($x=-2L_h$)，因地面坡度之改變而在順風向(x 方向)產生了些許程度之逆壓梯度，致使平均速度剖面在近地面處之飽滿度銳減。(類似之現象亦會發生在管道收縮段(contraction)入流截面(Fang, et al., 2001))。由圖 7 可見，數值模擬的結果呈現出此等減速效應，而在規範建議剖面中則無。儘管如此，由於風速剖面直接反映出風速壓之垂直分佈，規範建議之結果仍屬保守者。

研究中進一步地將非恆定之數值模擬速度場結果進行統計分析，圖 8 顯示 C 地況下風速均方根值剖面之數值模擬結果。和入流截面之順風 x 向均方根值剖面(詳圖 6)相較後得知，於圖中懸崖 $x=-2L_h$ 截面之紊流強度已有些許程度的降低。續往下游，在坡面變化的範圍內，紊流強度則略增。於坡頂後，紊流強度之縱向變化並不明顯，但垂直向分佈之範圍則漸增。

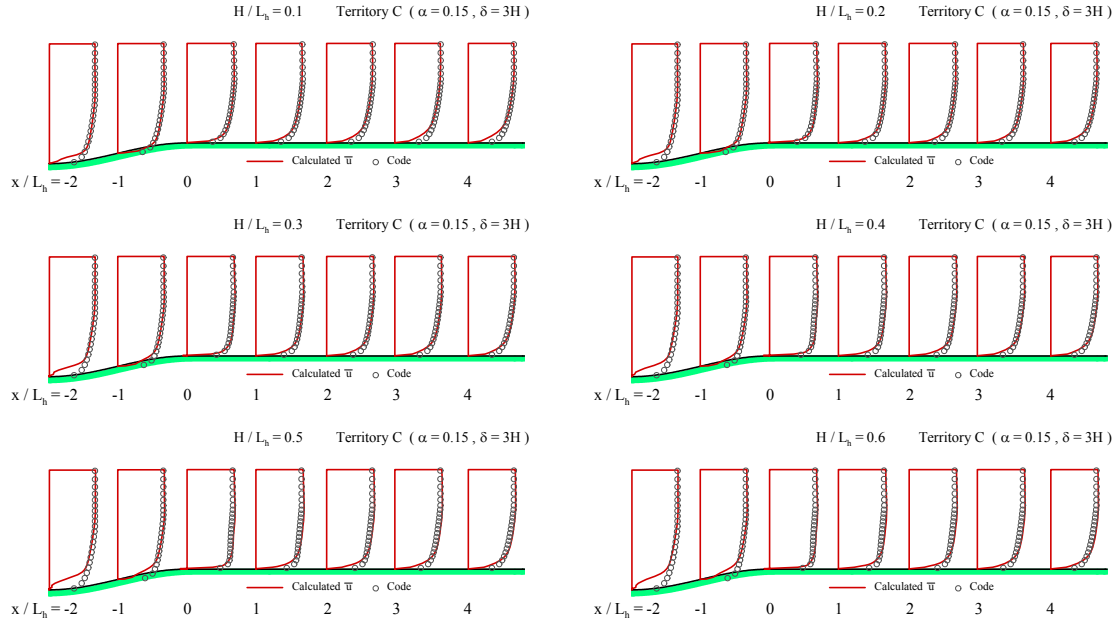


圖 7 懸崖情況數值與規範平均風速剖面比較圖

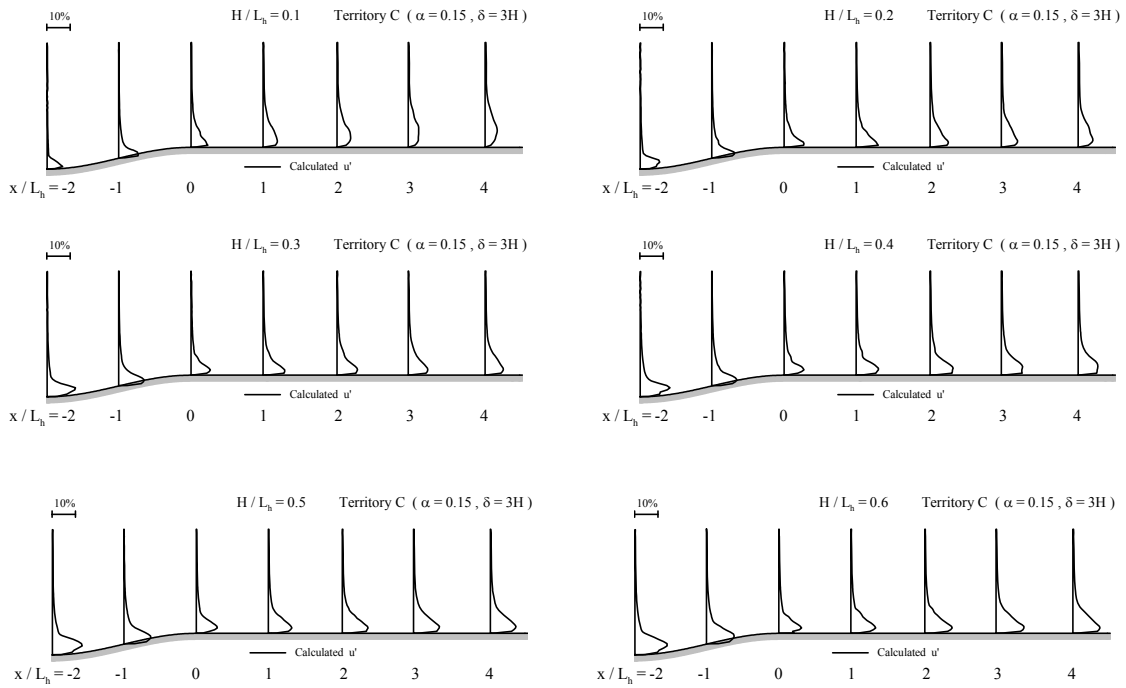


圖 8 懸崖情況數值與規範均方根風速剖面比較圖

6-1-2 山脊情況之平均與均方根風速剖面

圖 9 顯示二維山脊情況之平均風速剖面結果，比較中呈現平均風速剖面在坡頂後近地面處之不一致性。究其原因，應是坡頂後迴流產生之故。圖 10 為相應之順風 x 向均方根值風速剖面結果。大體上，風速均方根值於近山脊頂端截面($x/L_h=0$)前有略減之趨勢；然通過下降之坡面後，風速均方根值則隨下游漸增。細部檢視後發現，在起始坡面之前($x/L_h<0$)風速均方根值源自紊流，而當 $x/L_h>0$ 後風速均方根值則主要是流場中渦流引致之非恆定現象所造成。

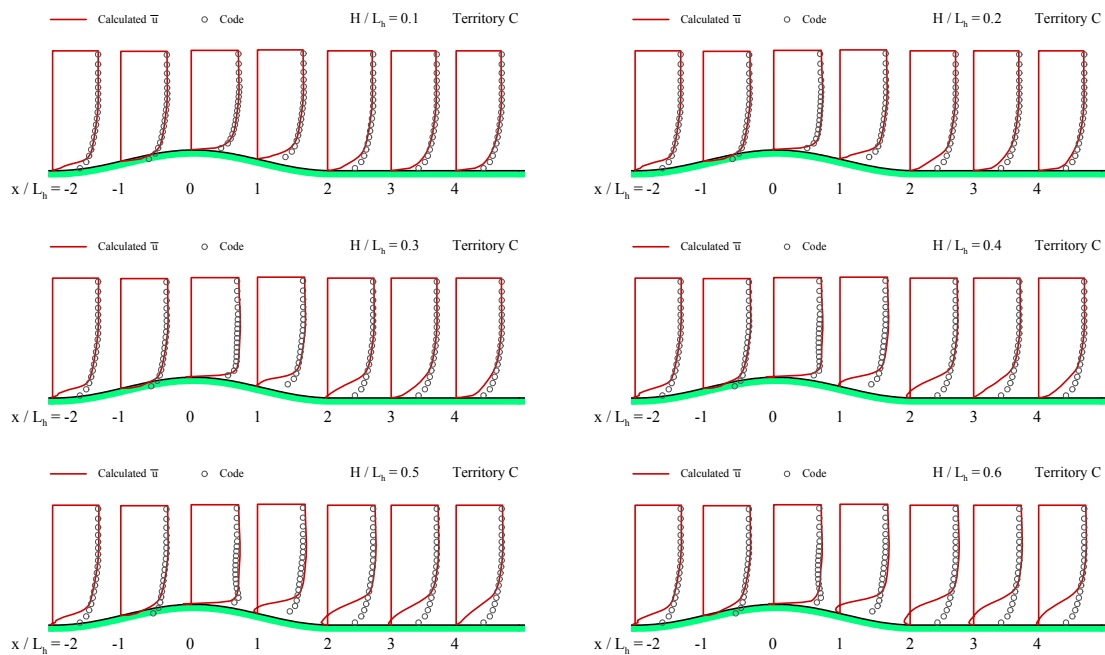


圖 9 山脊情況數值與規範平均風速剖面比較圖

6-1-3 山丘情況之平均與均方根風速剖面

圖 11 顯示三維山丘情況中央縱斷面之平均風速剖面結果。在山丘坡面上段($-2 < x/L_h < 0$)，計算而得之風速剖面略較規範建議值飽滿，呈現出規範不保守之情形；通過山丘頂後，則因迴流之產生，使得規範建議值又高於計算結果(此與二維山脊之情況類似)。

圖 12 為相應之縱向均方根值風速剖面結果。在起始坡面之前($x/L_h<0$)，風速均方根值主要仍源自來流挾帶之紊流；而當 $x/L_h>0$ 後，風速均方根值則多因流場中渦流引致之非恆定現象所造成。直至 $x=4L_h$ ，風速均方根值有往下游漸增之趨勢。

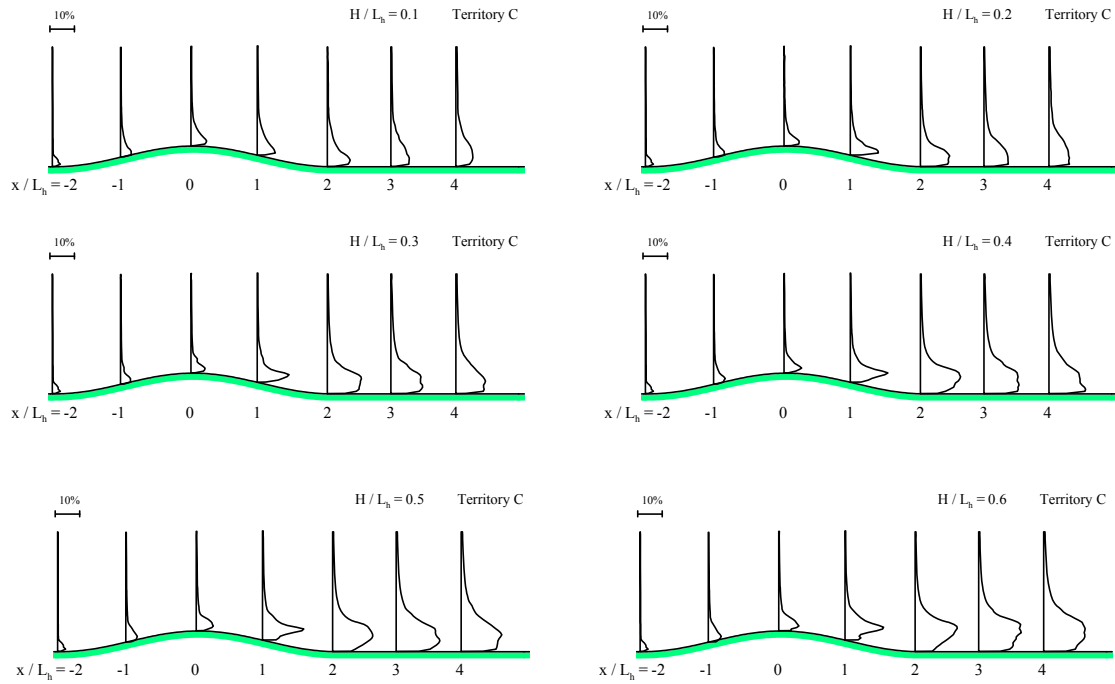


圖 10 山脊情況數值與規範均方根風速剖面比較圖

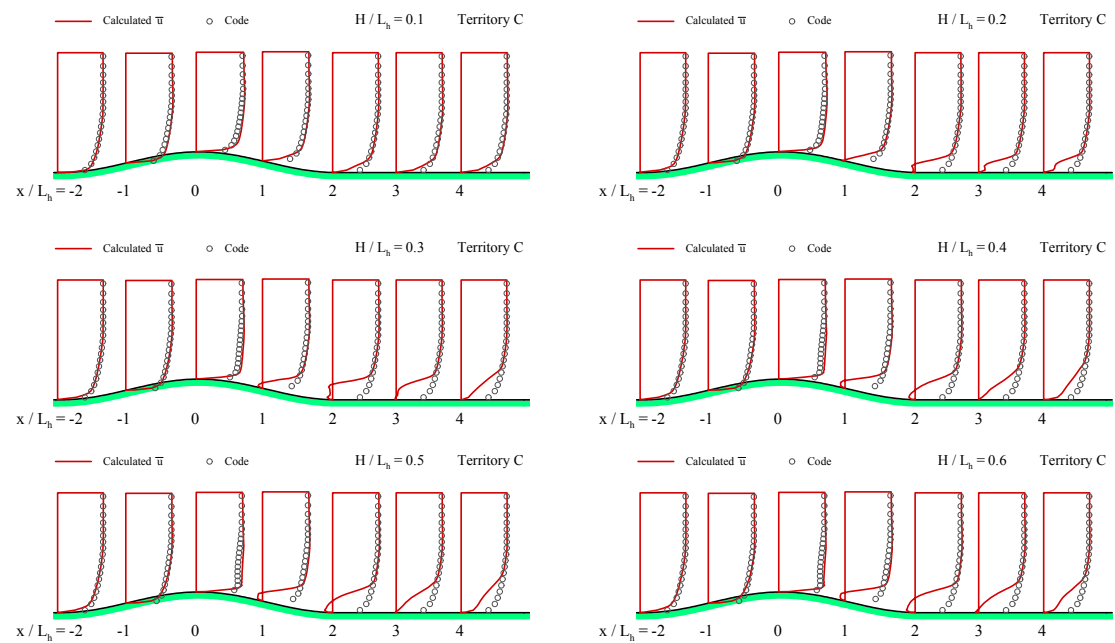


圖 11 山丘情況中央縱斷面數值與規範平均風速剖面比較圖

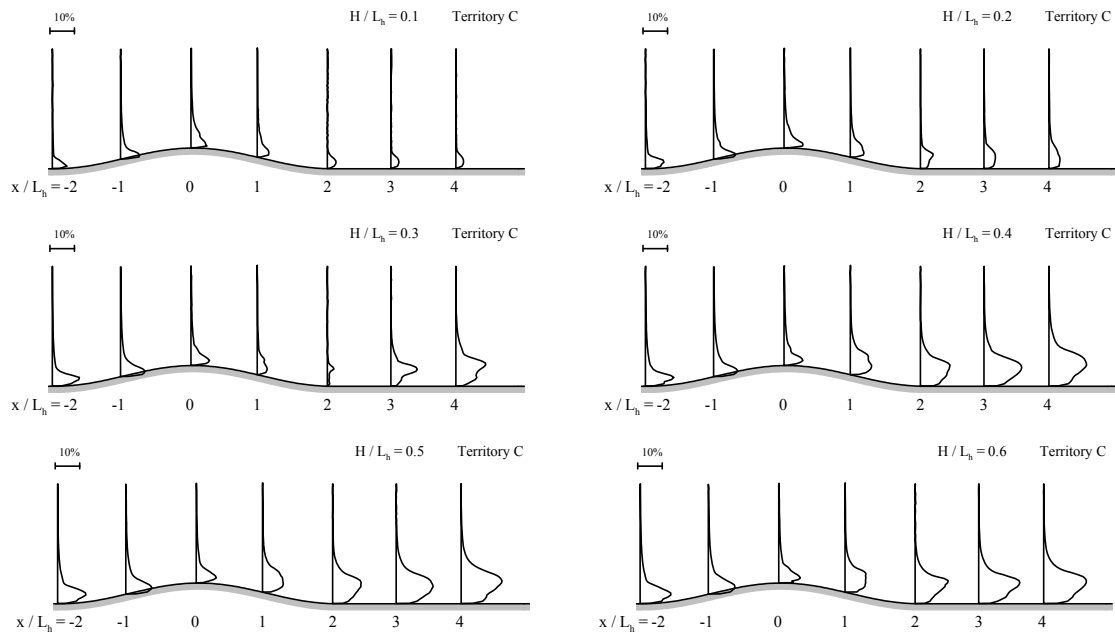


圖 12 山丘情況中央縱斷面數值與規範均方根風速剖面比較圖

6-2 二維山脊與三維山丘背風面迴流區內之風場非恆定特性

由於縱向逆壓梯度之作用，使得二維山脊與三維山丘之邊界層流在背風面產生分流並形成迴流。於此迴流區中，數值模擬結果所得之平均風速剖面在求得資料平均值的過程中因正負抵消而呈現較不飽滿之情形(相對於規範結果)。然而，數值模擬之結果另顯示，本區域內之風速具有高度之時間變異性。研究中於二維山脊與三維山丘情況平均風場之迴流區內選擇了 9 個位置，以檢視其時變風速相應之機率密度函數(probability density function; PDF)。依據數值模擬結果，圖 13 顯示二維山脊與三維山丘情況典型之結果($H/L_h=0.5$)。大體上，各點之風速變化約呈現常態分佈之形式。

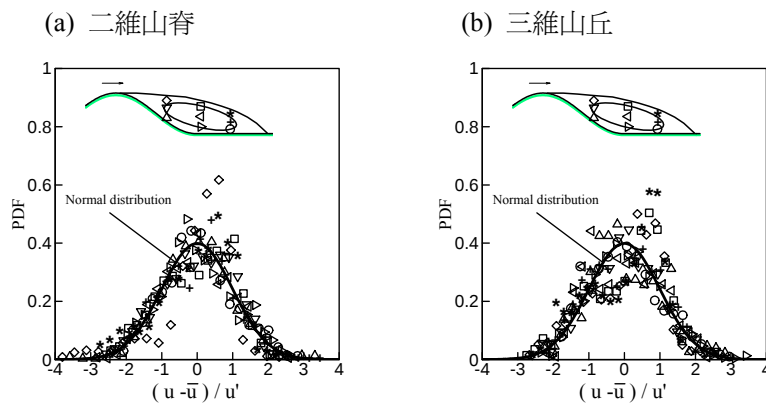


圖 13 典型山脊與山丘情況中迴流區內風速變化之機率分佈 ($H/L_h=0.5$)

七、風速剖面飽滿度之評估

由於風速剖面數量頗多而難以逐一地作細部比對，研究中將風速剖面作垂直積分，以獲得相應之位移厚度(displacement thickness； δ_1)，作為表徵風速剖面飽滿度之指標(位移厚度愈小代表風速剖面愈飽滿)。其定義為

$$\delta_1 = \int_0^{4H} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U_\delta}\right) dz \quad (7)$$

其中， U_δ 為邊界層之層緣風速，而在系統化數值模擬中 $H=100$ m。

圖 14 為懸崖情況平均風速剖面($\bar{u}$)、平均值加上 2 倍均方根值風速剖面($\bar{u} + 2u'$)以及規範建議風速剖面相應之位移厚度變化比較圖。在 C 地況於懸崖範圍中($-2 < x/L_h < 0$)，除了在懸崖前段區域($-2 < x/L_h < -0.7$)規範值大致上滿足風速壓計算適宜度之需求外，後段區域略呈不夠保守之結果。圖 15 為山脊情形相應之位移厚度變化比較圖。當坡度比(H/L_h)為 0.1 時，規範值尚稱保守。然隨著坡度比之增加，在坡頂($x/L_h=0$)附近區域之規範建議風速剖面飽滿度則較數值模擬結果低(不保守)。至於在山丘情況(詳圖 16)，規範建議值不保守之情況大致與山脊情況類似，風速剖面飽滿度低估的範圍約於 $-1 < x/L_h < 1$ 之間。在坡頂附近區域，低估的程度甚至較山脊情況更為明顯。

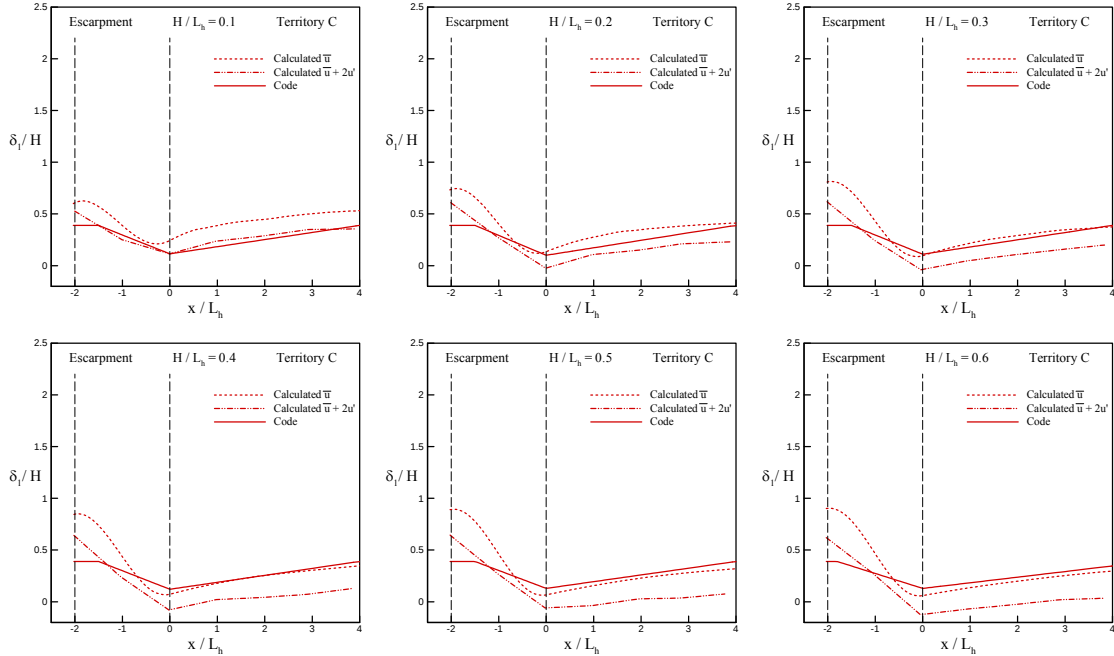


圖 14 懸崖情況數值與規範位移厚度比較圖

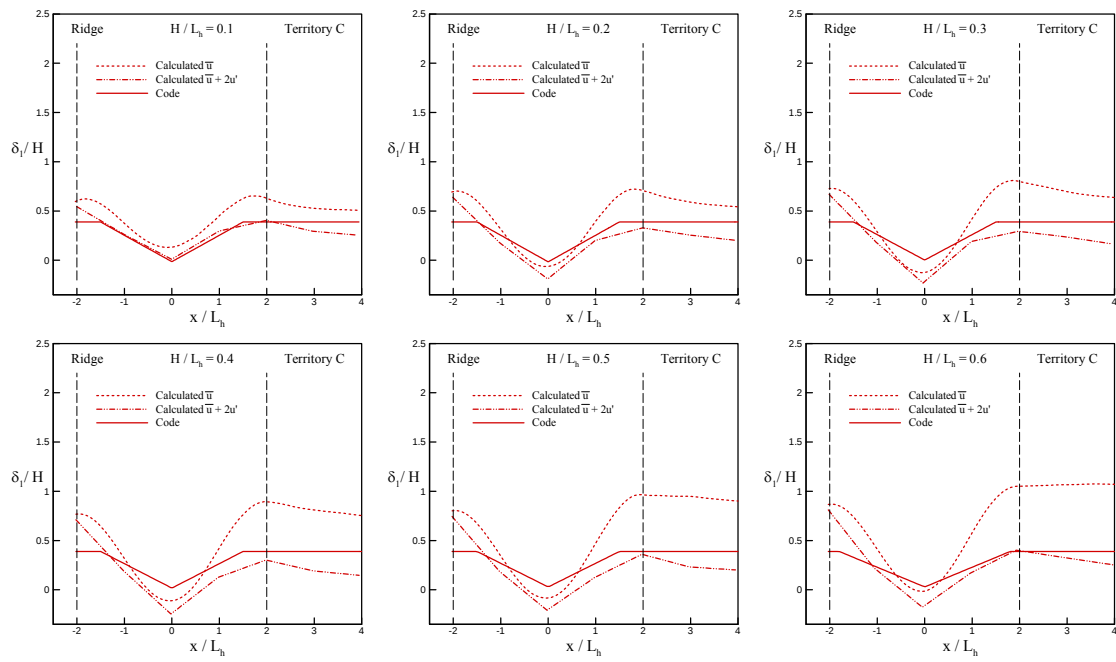


圖 15 山脊情況數值與規範位移厚度比較圖

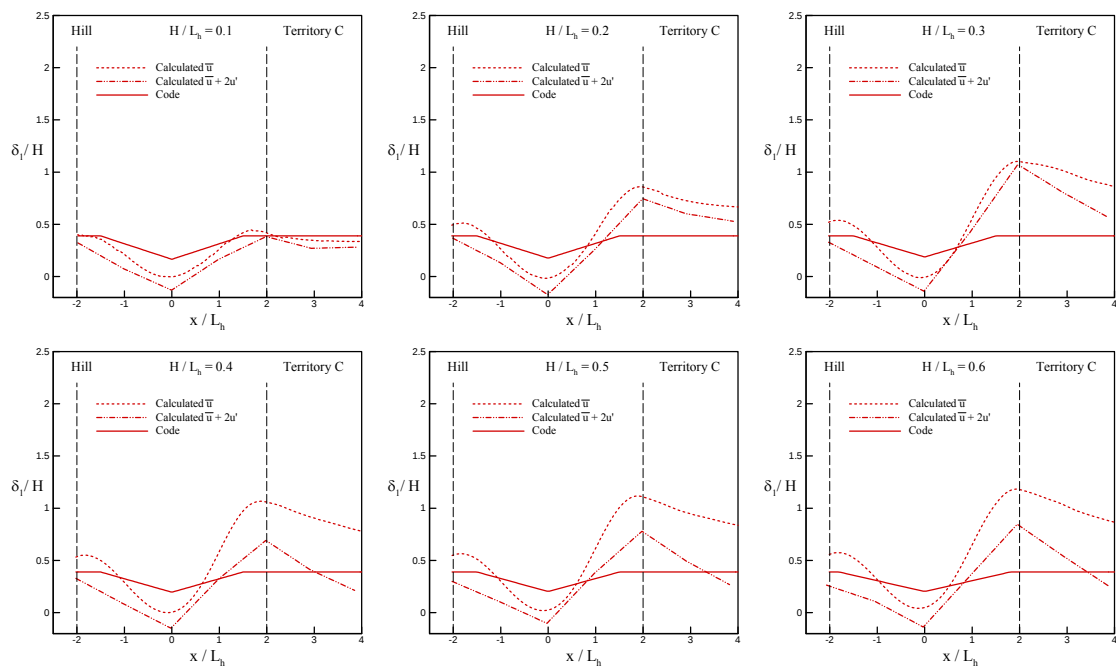


圖 16 山丘情況數值與規範位移厚度比較圖

七、結論

本研究針對現行風力設計規範中有關山區三個基本特殊地形(懸崖、山脊與山丘)在典型 C 地況下之風場以數值模擬的方法進行風速剖面之探討，據以建立相應之風場資料庫(包括平均與均方根值風速剖面)，繼而評估規範中建議風速壓剖面之適用程度。研究中首先應用風洞試驗量取相對低雷諾數情況下模型地形之風場，以作為數值模擬結果驗證之基準。待數值模式確立後，再以系統化的數值模擬獲取與實際情況相符合的高雷諾數風場資料。除了細部檢視此三種特殊地形之風況特性外，研究中再藉數值結果與規範中建議風速剖面飽滿程度之比較檢討其間之差異。

由於現行相關規範係供風力評估初步設計(preliminary design)階段所使用，並未考慮坡面地表粗糙度與坡頂高度變化等相對次要因子(minor factor)產生之影響。據此，本研究進行之數值風場計算乃沿用同樣之假定，以確保結果比較是在一致之比較基礎下進行。若基於實際分析結果精度之特殊需求而規範未能涵蓋設計之重要考量時，國內現行建築物耐風設計規範(內政部建築研究所，2006)第五章中亦有「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。」之提示。

在未考慮坡面地表粗糙度與坡頂高度變化等產生影響之前提下，茲將主要結果總結如後：

1. 在山脊與山丘的情況，其背風面會因分流的發生而導致回流的現象，而此非恆定流的風速變化呈現近似常態分佈的形式。
2. 依據數值模擬結果，研究中建構了 C 地況中懸崖、山脊與山丘三個基本特殊地形風速剖面。
3. 當以位移厚度作為風速剖面飽滿度之表徵指標時，規範中有關此三個基本特殊地形之設計風速壓剖面，在部份的區域中有不夠保守的建議值。因此，基於設計之考量，現行規範中有關風速剖面之建議應進一步地予以修正，以提供更為適宜之風力設計結果。其中，自地形係數(K_d)著手修正應是最為直接的方式，而如何將影響地形係數的參數(K_1 、 K_2 與 K_3)作適當的調整以符合風力設計之需求應是未來在相關規範修訂時之重點。

誌謝

本研究承蒙內政部建築研究所研究計畫 098301070000G1014 補助研究經費，特此申謝。

參考文獻

- 內政部建築研究所(2006)《建築物耐風設計規範及解說》，營建雜誌社編印，台北。
- American Society of Civil Engineers (2002) *Minimum design loads for buildings and other structures*, ANSI/ASCE7-02.
- Cao, S. and T. Tamura (2006) Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94:

1-19.

- Carpenter, P. and N. Locke (1999) Investigation of wind speeds over multiple two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83: 109-120.
- Crank, J. and P. Nicolson (1947) A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 43: 50-64.
- Fang, F. M., J. Chen, and Y. Hong (2001) Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square contraction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89: 247-262.
- Ferreira, A., A. Lopes, D. Viegas, and A. Sousa (1995) Experimental and numerical simulation of flow around two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54/55: 173-181.
- Germano, U., P. Piomelli, and W. H. Cabot (1991) A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids*, Vol. 3:1760-1765.
- Ishihara, T., K. Hibi, and S. Oikawa (1999) A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83: 95-107.
- Kim, H., C. Lee, H. Lim, and N. Kyong (1997) An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 66: 17-333
- Kondo, K., S. Murakami, and A. Mochida (1997) Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67/68: 51-64.
- Lubitz, W. and B. White (2007) Wind-tunnel and field investigation of the effect of local wind direction on speed-up over hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95:639-661.
- MacCormack, R. (1969) The effect of viscosity in hyper-velocity impact cratering, *AIAA paper No. 69-354: AIAA Hypervelocity Impact Conference in Cincinnati, Ohio*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C.
- Miller, C. and A. Davenport (1998) Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76:189-197.
- Song, C. C. S. and M. Yuan (1988) A weakly compressible flow model and rapid convergence methods, *Journal of Fluids Engineering, Transactions ASME*, Vol. 110: 441-455.
- Takahashi, T., T. Ohtsu, M. Yassin, S. Kato, and S. Murakami (2002) Turbulence characteristics of wind over a hill with a rough surface, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90:1697-1706.
- Takahashi, T., S. Kato, S. Murakami, R. Ooka, M. Yassin, and R. Kono (2005) Wind tunnel tests of effects

of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93:155-169.

Weng, W., P. Taylor, and J. Walmsley (2000) Guidelines for air flow over complex terrain: Model developments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86:169-186.

REFERENCES in English

American Society of Civil Engineers (2002) *Minimum design loads for buildings and other structures*, ANSI/ASCE7-02.

Architecture and Building Research Institute (2006) *Wind-resistant design code*, Construction magazine, Taipei.

Cao, S. and T. Tamura (2006) Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94: 1-19.

Carpenter, P. and N. Locke (1999) Investigation of wind speeds over multiple two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83: 109-120.

Crank, J. and P. Nicolson (1947) A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 43: 50-64.

Fang, F. M., J. Chen, and Y. Hong (2001) Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square contraction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89: 247-262.

Ferreira, A., A. Lopes, D. Viegas, and A. Sousa (1995) Experimental and numerical simulation of flow around two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54/55: 173-181.

Germano, U., P. Piomelli, and W. H. Cabot (1991) A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids*, Vol. 3: 1760-1765.

Ishihara, T., K. Hibi, and S. Oikawa (1999) A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83: 95-107.

Kim, H., C. Lee, H. Lim, and N. Kyong (1997) An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 66: 17-333

Kondo, K., S. Murakami, and A. Mochida (1997) Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67/68: 51-64.

Lubitz, W. and B. White (2007) Wind-tunnel and field investigation of the effect of local wind direction

- on speed-up over hills, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95:639-661.
- MacCormack, R. (1969) The effect of viscosity in hyper-velocity impact cratering, *AIAA paper No. 69-354: AIAA Hypervelocity Impact Conference in Cincinnati, Ohio*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C.
- Miller, C. and A. Davenport (1998) Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76:189-197.
- Song, C. C. S. and M. Yuan (1988) A weakly compressible flow model and rapid convergence methods, *Journal of Fluids Engineering, Transactions ASME*, Vol. 110: 441-455.
- Takahashi, T., T. Ohtsu, M. Yassin, S. Kato, and S. Murakami (2002) Turbulence characteristics of wind over a hill with a rough surface, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90:1697-1706.
- Takahashi, T., S. Kato, S. Murakami, R. Ooka, M. Yassin, and R. Kono (2005) Wind tunnel tests of effects of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93:155-169.
- Weng, W., P. Taylor, and J. Walmsley (2000) Guidelines for air flow over complex terrain: Model developments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86:169-186.