

建築結構所受風力之數值模擬與 風洞實驗比較驗證研究



內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 97 年 12 月

(國科會 GRB 編號)

PG9702-0426

(本部計畫編號)

097301070000G1015

建築結構所受風力之數值模擬與 風洞實驗比較驗證研究

受委託者：社團法人中華民國風工程學會

研究主持人：方富民

協同主持人：陳若華

研究員：陳鉅昌

研究助理：林金賢

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 97 年 12 月

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究內容與方法.....	3
第三節 研究流程與預定進度.....	7
第四節 執行進度說明.....	9
第二章 文獻回顧.....	11
第一節 Fluent 軟體概述.....	11
第二節 Star-CD 軟體概述.....	13
第三節 WCF 軟體概述.....	16
第三章 風洞試驗.....	19
第一節 來流風場規劃.....	19
第二節 試驗規劃.....	21
第三節 試驗結果.....	25
第四章 數值模擬.....	41
第一節 數值模擬規劃.....	41
第二節 WCF 軟體模擬結果.....	44
第三節 Fluent 軟體模擬結果.....	52
第四節 Star-CD 軟體模擬結果.....	60
第五節 數值模擬格網數與最小格網尺寸之檢討	68

第六節 數值模擬計算區域之檢討.....	76
第五章 研究結果與檢討.....	79
第一節 研究結果.....	79
第二節 Star-CD 與 Fluent 軟體操作說明.....	80
第三節 問題檢討與對策.....	88
第四節 工程實務上可接受計算流體動力學模擬 準則的建議.....	90
第六章 結論與建議.....	93
第一節 結論.....	93
第二節 建議.....	94
附錄一 期中會議意見回覆.....	95
附錄二 期末會議意見回覆.....	97
附錄三 專家諮詢會議意見回覆.....	99
參考書目.....	103

表次

表 3-1 風洞試驗量測總阻力係數與總水平昇力係數試驗統計結果.....	33
表 3-2 風洞試驗量測柱頂等值阻力與等值水平升力係數統計結果.....	37
表 4-1 WCF 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	51
表 4-2 WCF 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	51
表 4-3 WCF 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	51
表 4-4 Fluent 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	59
表 4-5 Fluent 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	59
表 4-6 Fluent 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	59
表 4-7 Star-CD 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	67
表 4-8 Star-CD 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	67
表 4-9 Star-CD 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較.....	67
表 4-10 格網系統說明.....	68
表 4-11 不同格網數值計算方柱結果比較.....	69
表 4-12 不同柱體兩側淨空數值計算方柱結果比較.....	76

表 4-13 不同柱體頂側淨空數值計算方柱結果比較77

表 4-14 不同柱體下游淨空數值計算方柱結果比較78



圖次

圖 1-1 風洞試驗幾何形狀.....	4
圖 1-2 研究流程圖.....	7
圖 1-3 研究甘特圖.....	8
圖 3-1 C 地況地表粗糙元設置照片圖.....	19
圖 3-2 C 地況地表粗糙元設置簡示圖.....	20
圖 3-3 錐形渦流產生器簡示圖.....	20
圖 3-4 地表粗糙元擺設簡示圖.....	20
圖 3-5 恆溫流速儀.....	21
圖 3-6 熱線探針.....	22
圖 3-7 模型柱體照片圖.....	22
圖 3-8 電子式壓力掃描器.....	23
圖 3-9 壓力訊號處理系統.....	24
圖 3-10 柱體位置平均風速與風速均方根值剖面.....	25
圖 3-11 柱體上游 3H 處平均風速與風速均方根值剖面.....	26
圖 3-12 風洞試驗量測淺矩柱表面平均風壓係數等值圖....	27
圖 3-13 風洞試驗量測淺矩柱表面風壓係數均方根值等值 圖.....	28
圖 3-14 風洞試驗量測方柱表面平均風壓係數等值圖.....	29
圖 3-15 風洞試驗量測方柱表面風壓係數均方根值等值圖	30
圖 3-16 風洞試驗量測深矩柱表面平均風壓係數等值圖....	31
圖 3-17 風洞試驗量測深矩柱表面風壓係數均方根值等值 圖.....	32

圖 3-18 風洞試驗量測淺矩柱阻力係數時序列變化	34
圖 3-19 風洞試驗量測淺矩柱水平升力係數時序列變化...	34
圖 3-20 風洞試驗量測方柱阻力係數時序列變化	35
圖 3-21 風洞試驗量測方柱水平升力係數時序列變化.....	35
圖 3-22 風洞試驗量測深矩柱阻力係數時序列變化	36
圖 3-23 風洞試驗量測深矩柱水平升力係數時序列變化...	36
圖 3-24 風洞試驗量測淺矩柱柱頂等值阻力係數時序列變化	38
圖 3-25 風洞試驗量測淺矩柱柱頂等值水平升力係數時序列變化.....	38
圖 3-26 風洞試驗量測方柱柱頂等值阻力係數時序列變化	39
圖 3-27 風洞試驗量測方柱柱頂等值水平升力係數時序列變化.....	39
圖 3-28 風洞試驗量測深矩柱柱頂等值阻力係數時序列變化	40
圖 3-29 風洞試驗量測深矩柱柱頂等值水平升力係數時序列變化.....	40
圖 4-1 計算域平面簡示圖.....	41
圖 4-2 計算域立面簡示圖.....	42
圖 4-3 來流風速均方根值剖面比較圖.....	43
圖 4-4 WCF 模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	45
圖 4-5 WCF 模擬淺矩柱表面風壓係數均方根值等值圖...	46
圖 4-6 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖....	47
圖 4-7 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖...	48
圖 4-8 WCF 模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	49

圖 4-9	WCF 模擬深矩柱表面風壓係數均方根值等值圖...	50
圖 4-10	Fluent(RNG)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	53
圖 4-11	Fluent(RNG)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖	54
圖 4-12	Fluent(RNG)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	55
圖 4-13	Fluent(standard)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	56
圖 4-14	Fluent(standard)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖.....	57
圖 4-15	Fluent(standard)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	58
圖 4-16	Star-CD(RNG)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	61
圖 4-17	Star-CD (RNG)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖.....	62
圖 4-18	Star-CD (RNG)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	63
圖 4-19	Star-CD (standard)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	64
圖 4-20	Star-CD (standard)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖.....	65
圖 4-21	Star-CD (standard)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖.....	66
圖 4-22	WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 2).....	70

圖 4-23 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 2).....	71
圖 4-24 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 3).....	72
圖 4-25 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 3).....	73
圖 4-26 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 4).....	74
圖 4-27 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 4).....	75
圖 5-1 STAR-Design 建構模型圖示.....	80
圖 5-2 pro-STAR/suf 圖示.....	81
圖 5-3 pro-STAR/amm 圖示.....	82
圖 5-4 STAR-CD 導引視窗圖示.....	82
圖 5-5 STAR-CD 邊界條件設定表.....	84
圖 5-6 GAMBIT 圖示.....	85
圖 5-7 Fluent 求解條件設定.....	86
圖 5-8 Fluent 紊流模試型參數設定視窗.....	86
圖 5-9 Fluent 來流邊界值設定視窗.....	87

摘要

關鍵詞: 建築研究、數值模擬、風洞試驗

一、研究緣起

在傳統的建築風力研究中，採用風洞試驗量測的方法需要較高之實驗成本且相對地費時。隨著計算機軟硬體之長足進步，藉其高速運算與大量處理資料之能力，運用計算流體動力學的方法進行風場之解析，並與風洞試驗相互配合已成為國際風工程界的重要趨勢。

使用數值模擬的方法具有高效率與經濟性的特點。分析者在沒有縮尺效應的顧慮下，得以系統化地從事各種來風條件(雷諾數、風向)與幾何條件(建築結構外形狀、尺度)下問題的探討，並獲得整場與所有風場變數之全時資料。誠然，數值計算並非毫無缺點，如針對複雜結構外形或地貌的風場預測，以目前的模擬能力仍有一些課題(如紊流模型)亟待解決即為一例。因此，國際著名的大型風洞實驗室多另設有計算風工程試驗室，以達相輔相成的效果。

二、研究方法及過程

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上單一方/矩柱為基準問題，先以風洞建築模型試驗量取風場與柱體之風力係數作為數值模擬結果驗證之基本資料；繼針對不同數值模式之計算結果，比較其間之差異性與優缺點，進而評估其適用性與可行性。最後，再依據數值模擬結果與風洞實驗數據之比對與探討，初步研擬工程實務上可接受的 CFD 模擬準則。

三、重要發現

本研究獲得如後之重要發現：

- (1) 建立了高寬比為 4 的方/矩柱情況風洞試驗量測資料庫。
- (2) 彙整 Fluent、Star-CD 與 WCF 計算流體動力學相關軟體之理論基礎、解

析能力與適用條件。

- (3) 發掘 Fluent、Star-CD 與 WCF 數值方法在解析本研究課題時衍生的問題。
- (4) 採用三個計算流體動力學紊流模式模擬分析建築結構所承受之動態風力，比較評估柱體受風效應預測之準確性。
- (5) 初步完成數值模擬結果與風洞實驗數據之比較驗證與探討。
- (6) 針對數值模擬中計算區域之大小、計算格網數與最小格網尺寸進行數值模擬結果進行比較。
- (7) 初步提出工程實務上可接受的計算流體動力學模擬準則。

四、主要建議事項

本研究建議事項分述如後：

建議一

增加應用數值模式分析風工程建築研究相關問題：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：行政院其他相關部會

研究中使用之微可壓縮流風場模擬軟體具有不錯之精確度，依據專家諮詢會議中委員之意見，建議爾後能多提供相關之研究案，以更進一步發揮本 CFD 軟體之效益。

建議二

於建研所風洞試驗室增設 CFD 實驗室或研究團隊之配置：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：行政院其他相關部會

國際知名的大型風洞試驗室多有 CFD 實驗室或研究團隊之配置，除了在試驗上提供服務能量外，亦配合數值計算以建立數值風洞的機制，在風場分析上達到相輔相成之功效。建議未來歸仁風洞試驗室應作 CFD 實驗室或研究團隊設置之規劃。

ABSTRACT

Key Words: Building Study, Numerical Simulation, Wind Tunnel Test

1. Background

In wind-related building studies, the method of wind tunnel experiments is adopted traditionally and its execution is generally considered costly and time-consuming. Due to recent significant progress of computer hardware and software, on the other hand, the method of computation of fluid dynamics (CFD), taking the advantages of the capability of high-speed computation and large-scale data treatment, has been recognized as a second important tool by international wind-engineering researchers for wind field analyses.

Essentially, the adoption of numerical simulation in wind field analysis brings about two prevailed features: high efficiency and save in cost. Without suffering from the scale-effect problem in wind tunnel model tests, the CFD execution can proceed systematic analysis to achieve whole-field time-series results of all the related variables based on prescribed approaching-flow conditions (Reynolds number, wind orientation) and geometric conditions (shapes and dimensions of buildings). However, several tasks in CFD are still needed to overcome. For example, problems may occur when the flow around a structure with a complex shape and/or in a complex territory is predicted. The accuracy of the numerical results can be improved by further improvement of the adopted turbulence model. Accordingly, in most of the internationally well-known large-scale wind-tunnel laboratories, a CFD unit is set in the program to facilitate the research capability beside the experimental group

2. Research Methods

In the study, a single square/rectangular building in a flat territory is set as the benchmark problem. Wind tunnel experiments were firstly performed to measure the wind field and the associated wind force coefficients. These fundamental data were used as the basis for verification of the numerical results. Numerical computations by using three CFD methods and turbulence models were then

carried out. The numerical results were then compared to assess the accuracy and validity of the methods. Finally, preliminary acceptable application guidelines of CFD in dealing with practical wind engineering analyses were proposed.

3. Major Achievements

The major achievements of the study are illustrated as follows:

- (1) Establishment of an experimental database for square/rectangular buildings with an aspect ratio of 4 .
- (2) Acquisition of the theory, capability and applicability of three CFD software, including Fluent, Star-CD and WCF.
- (3) Exploration of the problems encountered during the applications of the three CFD software.
- (4) Assessment of the accuracy of the predicted wind load results based on various turbulence models.
- (5) Accomplishment of verifications and evaluations of numerical results.
- (6) Suggestions of numerical simulations in the aspects of the spatial domain, computational mesh and minimum grid size.
- (7) Preliminary proposition of acceptable application guidelines of CFD in dealing with practical wind engineering analyses.

4. Major Suggestions

The major suggestions of the study are illustrated as follows:

- (1) Encouragement of additional funding to similar projects regarding the application of CFD.

It has been emphasized by the members of the consulting committee meeting that in order to promote the benefits from the applications of CFD, future funding to similar projects regarding the application of CFD is encouraging.

- (2) Development of CFD program in ABRI wind tunnel laboratory

In most of the internationally-well-known wind tunnel laboratories, there is always a CFD program responsible for numerical analyses. The ABRI wind tunnel laboratory should further develop a CFD group to promote its research capability and service level.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

近五十年來隨著電腦運算速度及技術的提升，利用計算流體動力學(computational fluid dynamics ; CFD)的方法來求解流體各種物理現象之變化不再是那麼遙不可及。數值模擬技術也因電腦的提升，發展更上了一層樓。利用數值方法為運算基礎，使得不易求解之流體力學理論，藉由高速電腦之便利，得以快速並達到模擬流體於各種邊界條件下的運動方式。同時，配合以影像後處理，可將其運動過程及結果顯示出來。其應用的範圍非常的廣泛。舉凡機械、土木、航太、電子、車船、醫工、大氣、化材甚至於軍事領域，以往進行環境風場評估及風洞試驗，都需耗費龐大的金錢、時間及人力。近年來，計算流體力學運用在鈍體空氣動力學、建築風環境的評估、街谷污染擴散分析模擬，都有不錯的結果。

之前相關的 CFD 研究，Murakami 等[2]曾利用 $k-\varepsilon$ 及大渦模擬 (large eddy simulation; LES)兩種紊流模式進行預測，結果顯示 $k-\varepsilon$ 模式計算結果與實驗結果有明顯差距，而 LES 模式則與實驗結果較為符合。Delaunay 等[3]及 Mikkelsen 與 Livesey[4]則利用修正後之 $k-\varepsilon$ 模式進行短矩柱表面風壓預測，結果顯示在背風面風壓部分，數值模擬有低估之趨勢。Murakami 與 Mochida[5]針對方形突出物的流況來比較應用 $k-\varepsilon$ 、ASM (algebraic stress model)及 LES 模式之預測結果，發現 LES 模式有較其他模式精準的表現。Gomes 等[6]亦針對多種規則斷面之鈍體表面風壓進行風洞實驗及數值模擬計算之比較。而國內學者之相關研究，典型者如 Fang[7]與 Fang 等[8]。

在傳統的建築風力研究中，採用風洞試驗量測的方法需要較高之

實驗成本且相對地費時。隨著計算機軟硬體的長足進步，藉其高速運算與大量處理資料之能力，運用計算流體動力學的方法進行風場之解析，並與風洞試驗相互配合已成為國際風工程界的重要趨勢。

使用數值模擬的方法具有高效率與經濟性的特點。分析者在沒有縮尺效應的顧慮下，得以系統化地從事各種來風條件(雷諾數、風向)與幾何條件(建築結構外形狀、尺度)下問題的探討，並獲得整場與所有風場變數之全時資料。誠然，數值計算並非毫無缺點，如針對複雜結構外形或地貌的風場預測，以目前的模擬能力仍有一些課題(如紊流模型)亟待解決即為一例。

目前內政部頒布的「建築物耐風設計規範及解說」[1]第五章中有「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」之規定，並針對風洞試驗之主要項目、應遵守之模擬要求與設計時風洞試驗報告之引用等方面提出了相關之建議。然而，在數值模擬方法應用於耐風設計方面並無著墨，此與國際主流趨勢相較確有遺珠之憾。此外，國際間著名的大型風洞實驗室多另設有計算風工程實驗室或研究團隊以配合風洞試驗分析而達相輔相成之效。就建研所歸仁國家級風洞試驗室的規模而言，倘能在 CFD 的分析能力上有所增進，將更能提昇其在工程與產業界之主導性與服務之能量。

第二節 研究內容與方法

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上單一矩柱為基準問題 (benchmark problem)，首以風洞建築模型試驗量取風場與柱體之風力係數作為數值模擬結果驗證之基本資料；繼針對不同數值模式之計算結果，比較其間之差異性與優缺點，進而評估其適用性與可行性。最後，再依據數值模擬結果與風洞實驗數據之比對與探討，初步研擬工程實務上可接受的 CFD 模擬準則。研究中風洞試驗部份係於建研所歸仁風洞進行；在數值計算上擬選定兩個典型的商業軟體與主持人發展多年的 CFD 軟體，針對三種典型的紊流模型進行模擬，以進行比較與分析。

一、研究內容

1. 風洞試驗

風洞試驗中量測內容主要為矩形斷面高層建築在邊界層流場之風壓與風力。建築模型尺寸如圖 1-1 所示。其中，高度(H) 為 40 cm；高寬比(H/\sqrt{BD})為 4；深寬比(B/D)分別為 1/2、1/1、2/1。大氣邊界層性質則選用符合風力規範之地況 C (α 值約為 0.15，邊界層高度 δ 約為 120 公分)。

2. 數值模擬計算

到目前為止，國際間有四套廣為工程界與學術界使用的泛用型商業計算流體動力學軟體，分別為美國 Ansys 公司的 Ansys CFX 與 Fluent、奧地利的 Swift 及日本的 Star-CD，均可有效預測流場現象。而本研究將採用美國 Ansys 公司所開發的計算流體動力學軟體 Fluent、日本的 Star-CD 與主持人發展多年的 CFD 軟體。三套軟體皆以有限體積法(finite-volume method)為架構所建置出來的計算流體動

力學程式，以解析連續與動量方程式，據以獲得動態風場與柱體表面風壓的時序列(time-series)結果。

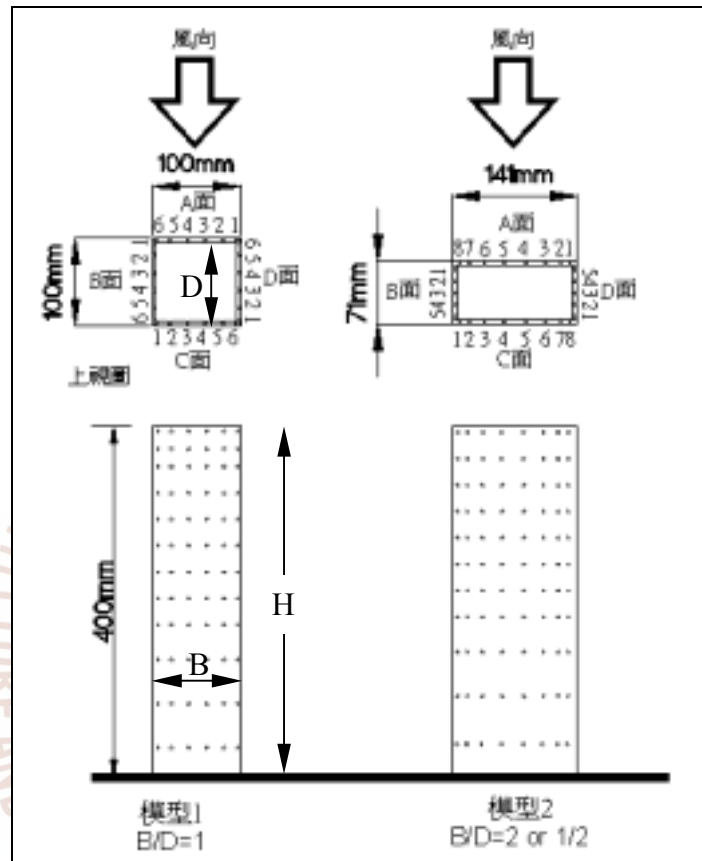


圖 1-1 風洞試驗幾何形狀

(資料來源：本研究整理)

3. 紊流模式之選用

目前廣為大眾使用的紊流模式(turbulence model)可分成兩大類：

- (1) 雷諾平均納維爾—史脫克(Reynolds averaged Navier-Stokes ; RANS)紊流模式

此係採用時間平均(time-averaging)的觀點，典型者如 k- ϵ model、k- Ω model、algebraic model、Reynolds stresses model 等。

- (2) 大渦模擬 (large eddy simulation ; LES)紊流模式

此係採用空間平均(space-averaging)的觀點，典型者如次網格(subgrid-scale)與動態次網格(dynamic subgrid-scale)紊流模型。

在計算流體力學的數值分析過程中，紊流模式的不同將直接影響模擬結果的準確性與計算所需的時間。計畫中將探討如何的從各種不同紊流模型進行適當的選擇，並考慮到每一個應用範例的目的、與各種紊流模式的優缺點。

在上述文獻中曾提及，與 RANS 紊流模式比較，LES 紊流模式對於複雜流場之預測更為準確。但因為運用 LES 紊流模式，所得為暫態解(transient)與三維空間的計算值域，需經過長時間計算方能求得穩定且可運用之流場資料。

本次研究乃針對 standard k- ϵ 、RNG(re-normalized group) k- ϵ 與 LES 三個模式，進行數值模擬分析。

4. 計算域規劃

依據 Rodi [9]在 k- ϵ 紊流模式中所使用計算區域(computation domain)規劃，分別取入流段為障礙物上游 3H (H 為柱高)，下游段為 6H，障礙物左右邊界為 7H。在 LES 紊流模式中，入流段為障礙物上游 3.5H，下游段為 10H，障礙物左右邊界為 9H。本研究將合理之計算域列為研究參數之一，建議不同數值模式下之合理之計算域。

5. 合理邊界層來流條件

過往的眾多學者在利用數值模擬來模擬大氣邊界層時，大多是使用已知的風速剖面、紊流動能(turbulence kinetic energy)及紊流消散率(dissipation rate)作為模擬時風速初始邊界的設定。但在這些模擬範例中可看出，紊流動能消散速度遠大於風洞試驗的結果，此乃造成數值模擬失真的主要原因。因此，如何克服紊流動能衰減，成為數值模擬相當重要的一環。於近幾年發表於各國際期刊中皆可見到眾多學者對

此付出的成果展現。經由整理後，可概分成三類[10]：

- (1) 利用牆壁函數(wall function)，以調整壁面粗糙高度(roughness height)。
- (2) 設定壁面的正向應力(wall shear stress)，以減少紊流動能衰減的情形。
- (3) 在上游入流端增加粗糙元素(roughness element)。

探討建築風工程的流場必須是具有特定紊流特性之邊界層。因此，穩定紊流邊界層之數值模擬亦為本研究工作項目之一。

6. 數值模擬結果與風洞試驗進行比較

數值模擬結果與風洞試驗案例說明如後：

- (1) 模型尺寸：高寬比(H/\sqrt{BD})為 4；深寬比(B/D)分別為 1/2、1、2(淺矩柱、方柱、深矩柱)。
- (2) 風洞試驗大氣邊界層性質：C 地況(平坦空曠地形)。
- (3) 使用模擬軟體：Fluent、Star-CD 和 WCF。
- (4) 紊流模式：standard κ - ϵ 、RNG(renormalized group) κ - ϵ 與 LES。
- (5) 數值模擬入流段風場特性：C 地況。

本計畫擬針對上述案例，比較數值模擬與風洞實驗之方/矩形建築物之風壓分佈與整體風力係數。

第三節 研究流程與預定進度

本計畫執行步驟如圖 1.2 所示，研究工作中包括了風洞試驗與數值模擬兩項主體工作。前者係提供風場與柱體受風效應之基本資料以為後者比較與驗證之依據；而後者則針對不同軟體與紊流模型之應用探討其間之優缺點與適用性。最後，在參酌專家諮詢意見後，研擬出工程實務上可接受的 CFD 模擬準則，以為未來風工程相關規範修訂之參考。本研究進度及預期完成之工作項目詳見圖 1.3。

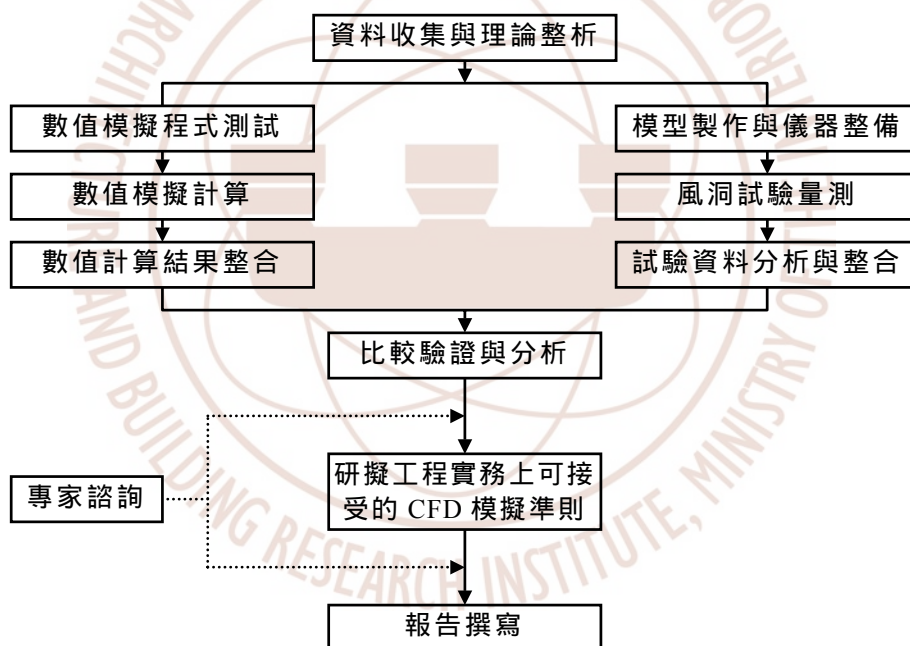


圖 1-2 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

建築結構所受風力之數值模擬與風洞實驗比較驗證研究

月次 工作項目	第一 月	第二 月	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月
資料收集	■									
理論整析	■	■								
數值模擬程式測試		■	■							
模型製作與儀器 整備		■	■							
風洞試驗量測				■	■			■	■	
數值模擬計算			■	■	■	■	■	■	■	■
期中報告						■	■			
專家座談						■	■			
比較驗證與分析							■	■	■	■
研擬工程實務上 可接受的 CFD 模 擬準則									■	■
期末報告										■
預定進度 (累積數)	9 %	19 %	28 %	38 %	47 %	57 %	69 %	80 %	90 %	100 %

圖 1-3 研究甘特圖

(資料來源：本研究整理)

第四節 執行進度說明

研究中既定之風洞試驗量測包括三個深寬比(1/2、1/1、2/1)之情況，繼以三個選定之軟體(Fluent、Star-CD 與 WCF)從事模擬與比較以探討各 CFD 方法與紊流模型(standard κ - ϵ 、RNG κ - ϵ 與 LES)在預測上的準確度與優缺點，進而初步研擬完成工程實務上可接受的計算流體動力學模擬準則。

本計畫已完成之工作計有：

1. 風洞試驗部份
 - (1) 來風風場特性量測。
 - (2) 方柱(深寬比 1)與兩個矩柱(深寬比 1/2 與 2)情況柱體表面風壓量測與受風效應(阻力與水平升力)結果之獲取。
2. 數值模擬部份
 - (1) 針對三個柱體，應用 Fluent、Star-CD 與 WCF 三個 CFD 軟體之風場模擬。
 - (2) 三個 CFD 軟體模擬結果與風洞試驗結果之比較與驗證。
 - (3) 三個紊流模型(standard κ - ϵ 、RNG κ - ϵ 與 LES)模擬結果準確度之評估。
3. 工程實務上可接受 CFD 模擬準則
 - (1) 依據本計畫中應用 Fluent、Star-CD 與 WCF 三個 CFD 軟體風場模擬之經驗，評估應用商用軟體與研究型軟體分析建築物鄰近風場與受風效應之準確度，並比較其間在應用性方面之優缺點，進而提出相關之建議。
 - (2) 針對數值模擬中紊流模型之採用提出建議。
 - (3) 針對 CFD 方法在建築風力分析時應使用計算區域(computation domain)之大小提出初步建議。

- (4) 針對 CFD 方法在建築風力分析時應採用之格網(mesh)數目與最小格網之大小(minimum mesh size)提出初步建議。



第二章 文獻回顧

本研究擬採用 Fluent、Star-CD 與 WCF 三個典型的 CFD 軟體進行問題之探討；其中前二者為商業軟體，後者為學術研究自行發展的數值模式。茲分別說明如後。

第一節 Fluent 軟體概述

Fluent 是美國 Ansys 公司所開發的計算流體力學軟體。此套軟體係以有限體積法(finite-volume method)為架構所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如下之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

其中， u 、 v 、 w 為速度在 x 、 y 、 z 三個方向之分量； t 為時間； f_x 、 f_y 、 f_z 為場加速度在 x 、 y 、 z 座標上之分量； p 為壓力； ρ 與 ν 分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。

Fluent 的開發基礎是採用有限體積法為主要架構，進而求解連續方程式與動量方程式在流場的速度及壓力，以克服對於複雜幾何形狀計算值域的適用性問題。

在求解納維爾—史脫克方程式時概時有四種方法，即理論分析、直接數值求解、雷諾平均納維爾—史托克方程式(RANS)及紊流模式、以及 LES 模式。其中，直接求解法為最準確的數值模式；它不引入任何的紊流模式，但在利用電腦進行求解一個三維空間的問題時，其運算的速度及所需計算時間目前在效益上尚未達到實用的階段。在時間域上的紊流流場中，須將平均流速與壓力併入流速與壓力擾動量。由於問題中的未知數目較控制方程式來的多，沒有辦法直接進行運算求解，須藉由建立紊流動量通量(turbulent momentum fluxes)的模式來補足所需的方程式，此即雷諾平均納維爾—史托克方程式。Fluent 在黏性流場(viscous flow)計算提供了 Spalart-Allmaras model、k- ϵ model、k- Ω model、Reynolds Stress model 與 LES model 等紊流模式之應用。

第二節 Star-CD 軟體概述

Star-CD 是一種採用有限體積方法作為核心解算器之泛用型計算流體力學商用軟體，其使用的前後處理套裝軟體稱為 PROSTAR，核心解算器稱為 STAR。PROSTAR 包含了建構模型、求解與後處理所必需的各種工具，主要包含下列功能：

- (1)幾何外型讀入與資料修改
- (2)網格生成
- (3)設定邊界條件
- (4)設定流體或介質特性
- (5)設定計算內容（多相流、化學反應或燃燒）
- (6)設定控制參數（格式，時間，輸入輸出參數）
- (7)計算過程監控
- (8)計算結果後處理。

在建構幾何外型及生成網格的功能上，Star-CD 可以使用任意形狀的網格，如六面體、四面體、棱柱體、金字塔形甚至多面體網格。運用網格單元與任意的交界面技術和局部加密技術相結合可以產生非連續的、完全非結構化網格。利用自動網格生成器即可快速生成完全非結構化網格。其幾何處理能力包括：

- (1) 運用六面體、四面體、多棱柱、多面體可任意組合，適用於高度靈活的非結構化網格技術。
- (2) 任意網格相交的不連續網格連接技術(COUPLE)。
- (3) 嵌入式網格加密用來增強局部的網格密度。

此外，在邊界條件的設定上 Star-CD 提供多種邊界條件，包括：

- (1)入口條件(INLET)
- (2)出口條件(OUTLET)

- (3) 壓力條件(PRESSURE)
- (4) 駐點條件(STAGNATION)
- (5) 週期性條件(CYCLIC)
- (6) 對稱條件(SYMMETRY)
- (7) 自由流無反射條件(FREE-STREAM TRANSMISSIVE BOUNDARY)
- (8) 動態波動無反射條件 (TRANSIENT-WAVE TRANSMISSIVE BOUNDARY)
- (9) 動態附著條件(ATTACHMENT)
- (10) 壁面邊界條件(WALL)
- (11) 平板邊界條件(BAFFLE)。

在建構數值模型的能力部分，Star-CD 將在各種網格類型(六面體、四面體與混合體)上解算的各種數值模式融於一體。同時，它對不同類型的應用提供經過修正的解算過程。其模擬範圍包括如下狀況：

- (1) 恆定與非恆定流動
- (2) 層流與紊流 (包含各種紊流模式)
- (3) 不可壓縮流與可壓縮流
- (4) 對流、傳導與輻射傳熱 (包括固體內導熱、太陽輻射、透明固體輻射及可穿透介質中輻射的傳播)
- (5) 化學反應 (包括氣體、液體與固體燃料燃燒)
- (6) 分散式阻力 (多孔隙介質與熱交換器)
- (7) 多流體流動
- (8) 歐拉及拉格朗日多相流 (稀密相氣固、氣液、固液、液液系統)
- (9) 自由表面流動。

在紊流模式部分，Star-CD 提供了方程模式、標準 k- ϵ 模式、RNG

模式、高階非線性及 Chen 氏系列 $k-\varepsilon$ 模式、 $k-L$ 、LES 大渦模型等紊流模式，同時提供了用於解算高精度流動的 $k-\Omega$ 模式和雷諾應力模式。此外，Star-CD 能計算各向同性或異性的多孔介質(porous media)。多孔介質的特性還可當入流參數的函數來輸入。

在數值運算能力部分，Star-CD 使用單一、具有高效能的解算器來求解流場。此通用解算器適用於所有的流動情況與物理現象，並可與最新的時間空間離散格式相結合。在時間離散格式(temporal discretization)部分，Star-CD 採用隱性(implicit)法，同時提供二階精度的時間離散格式來求解高精度動態計算問題。在空間離散(spatial discretization)格式部分，Star-CD 提供了從高階到混合離散格式的多種選擇。最近在眾多選擇中又加入了一種新的 TVD 格式(MARS)，不僅提高了劇烈梯度變化時的計算精度，還減少了對網格的依賴性。另外，Star-CD 更發展了最新的隱式代數多重網格解算器(AMG)，針對非結構化網格的多重網格演算法，比早期的解算器更快且更穩定。

在硬體的利用方面，Star-CD 對記憶體使用有極高的效率，此因它對平均每 100,000 個計算元素只需要 40M 記憶體，讓使用者可以以最少的計算資源來解算較大的模型，甚而在 1G 記憶體的單處理器的機器上求解多達 200 萬個單元的複雜流況。

第三節 WCF 軟體概述

除了前述兩個商業套裝軟體外，研究中也採用主持人自行發展的微可壓縮流(weakly-compressible-flow; WCF[11])計算流體動力學數值方法進行風場模擬。

一、數值方法概述

本模式係以有限體積法求解如下之連續與動量方程式：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + K \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{V}} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \nabla \cdot [(v + v_t) \nabla \bar{\mathbf{V}}] \quad (2.4)$$

其中， p 與 $\bar{\mathbf{V}}$ 為經過空間平均後之壓力與速度向量； K 與 ρ 分別為流體之整體彈性模數(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[12]提出的動態次網格紊流模型(dynamic subgrid-scale turbulence model)，依據如下(2.5)式獲得：

$$v_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.5)$$

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

本程式在非恆定紊流流場計算過程中，(2.3)式與(2.4)式之求解係以隱式(implicit scheme)的方式進行。除了可從事於低馬赫數(low-Mach-number)與不可壓縮(incompressible)流況下三維(three-dimensional)非恆定(unsteady)紊流流場(turbulent flows)中流速與壓力分佈之預測外，亦可用以進行濃度(concentration)場之計算。當併入結構動力方程式後，本模式亦可處理流體與結構與互制

(fluid-structure interaction)問題之探討。主持人應用本軟體已發表之SCI 期刊論文詳見參考文獻[13]至[22]。

二、邊界條件

風場模擬中在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，柱面與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。





第三章 風洞試驗

研究中首先進行風洞試驗，針對模型之來流(approaching flow)紊流風況特性進行量測，作為數值模擬中入流邊界條件(inflow boundary condition)之輸入資料。繼而依據該來風情況下建築氣動模型表面風壓之時序列(time-series)量測結果，統計分析模型柱體之受風效應，以為數值模擬計算結果比較與驗證之依據。

風洞試驗係於內政部建築研究所歸仁風洞試驗室的建築風洞進行，相關試驗設施規劃敘述如後。

第一節 來流風場規劃

研究中風洞試驗量測是在建築風洞之第一測試區執行，其試驗段長 30 m，斷面為 4.0 m(寬)× 2.6 m(高)，最大風速為 37 m/s。為針對符合風力規範之地況 C 為探討之基準風況進行柱體受風效應之比較與探討，乃於風洞測試段中適當佈設錐形渦流產生器(spire)與地表粗糙元(參見圖 3-1 至圖 3-4)，以製造出預定之來流風況。



圖 3-1 C 地況地表粗糙元設置照片圖
(資料來源：本研究整理)

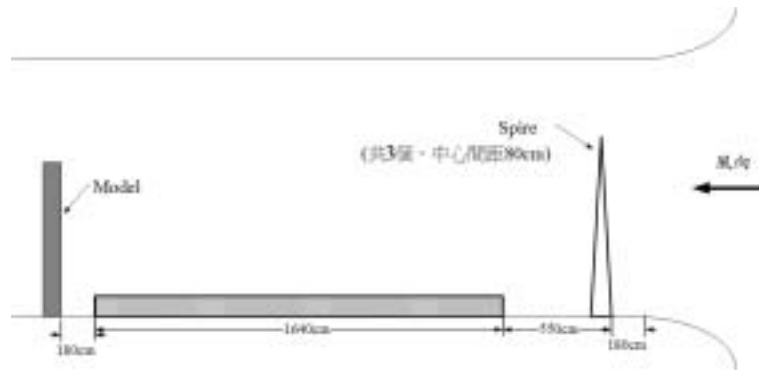


圖 3-2 C 地況地表粗糙元設置簡示圖
(資料來源：本研究整理)

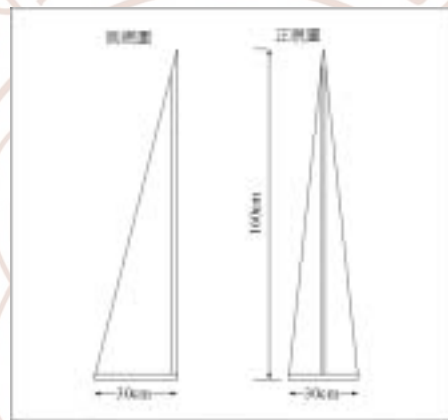


圖 3-3 錐形渦流產生器簡示圖
(資料來源：本研究整理)

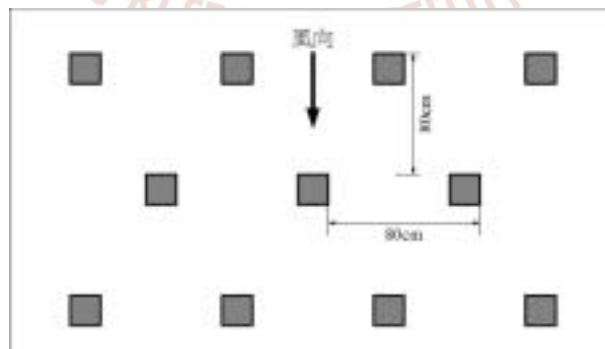


圖 3-4 地表粗糙元(6 cm x 10 cm x 4 cm)擺設簡示圖
(資料來源：本研究整理)

第二節 試驗規劃

一、來流風速量測

本風洞試驗來流風速之量測係使用 DANTEC 之恆溫流速儀 (constant temperature anemometer, 如見圖 3-5)。熱線探針(圖 3-6)的率定乃應用已率定的薄膜式壓力轉換器, 在風洞入口處地面架上皮托管 (平行中心線), 將其動靜壓接於薄膜式壓力轉換器上, 再利用熱線探針所得的電壓值與薄膜式壓力轉換器轉換後的風速得出一條四次方多項式的迴歸率定曲線, 以為後續流速儀風速轉換之依據。

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。



圖 3-5 恆溫流速儀

(資料來源：本研究整理)

二、建築模型表面風壓量測

風洞試驗柱體模型係以厚度為 2mm 之壓克力板粘合而成(參見圖 3-7), 模型表面於適當位置佈設 240 個間距為 0.5 至 3.5cm 之壓力量測孔。風壓孔以內徑 1mm 之 PVC 軟管將風壓訊號導入電子式壓力掃

瞄器，並將資料儲存於個人電腦以供分析。



圖 3-6 熱線探針

(資料來源：本研究整理)

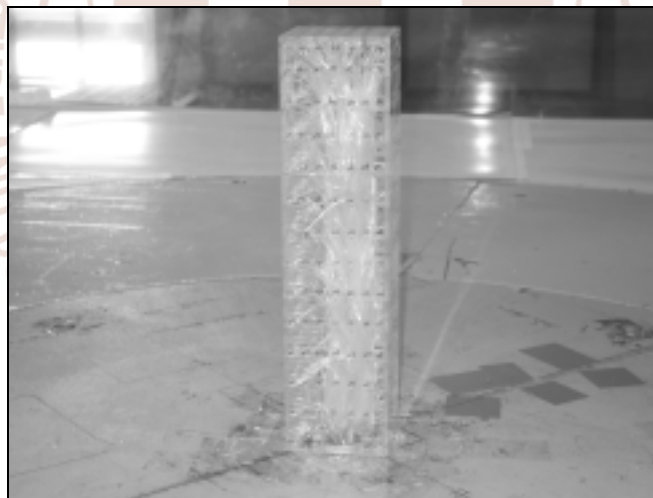


圖 3-7 模型柱體照片圖

(資料來源：本研究整理)

表面風壓量測使用之壓力掃描器(ZOC33/64 PX；圖 3-8)。本系統每個單一模組有 64 個壓力輸入管，對應 64 個壓電式壓力感應器，每一壓力感應器皆可單獨校正。輸入管藉由內徑 1mm 之 PVC 管連接至模型量測點以量測壓力。

壓力量測管線系統採用內徑為 1mm、長 20 公分之 PVC 管，實驗前經具白噪音(white noise)特性之擾動壓力信號進行率定，驗證無扭曲頻率可達 35Hz 以上。管線系統連接至 Scanivalve 模組上的壓力輸入埠，電子式壓力掃描器以 64 個量測孔為一模組，壓力量測模組安置於模型內部，模型規劃以鄰近 64 個孔位規劃為同一壓力模組，分別接入電子式壓力掃描器。



圖 3-8 電子式壓力掃描器

(資料來源：本研究整理)

各模組連接至壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200；如圖 3-9)，可支援類比數位之轉換，最高可支援 8 個模組，其解析度為 16 bits，最大採樣頻率為 500Hz，傳輸介面為 USB，具備網路控制及傳輸功能。擷取之資料轉換完成之後藉由此系統傳至個人電腦儲存分析。

模型表面風壓量測過程中，於模型架設完成後隨後啟動風機，待試驗區風速達到設定風速後則開始擷取壓力資料(取樣頻率為 250 Hz，時間為 300 秒)；壓力量測部分乃以模型側方頂高處之靜壓為參考壓力(p_0)。資料量測部分由個人電腦透過 USB 介面控制資料量測系統擷取各模組之量測資料，並將資料轉換為電子檔儲存。量測中使用

之電子式壓力掃描器具備歸零功能，因此每次實驗操作前皆先將各模組之壓力感測器歸零，以獲得正確之壓力變化。



圖 3-9 壓力訊號處理系統
(資料來源：本研究整理)

第三節 試驗結果

一、來風風況

依據風速量測資料，圖 3-10 顯示空流場(無設置建築模型)情況下柱體位置之平均風速與風速均方根值(root-mean-square)剖面結果 ($U_{\delta}=14.01$ m/s，為高度 120 cm 處之平均風速；邊界層厚度 δ 取 120 cm)。其中，前者相應之指數率 α 值為 0.14，符合本研究 C 地況來風之需求。此外，由三個方向均方根值速度的剖面分佈觀之，最大擾動量約發生於距地面高約 12 cm 處，其強度以大小順序排列依次為 u' (順風 X 方向)、 v' (水平橫風 Y 方向)、 w' (垂直 Z 方向)。

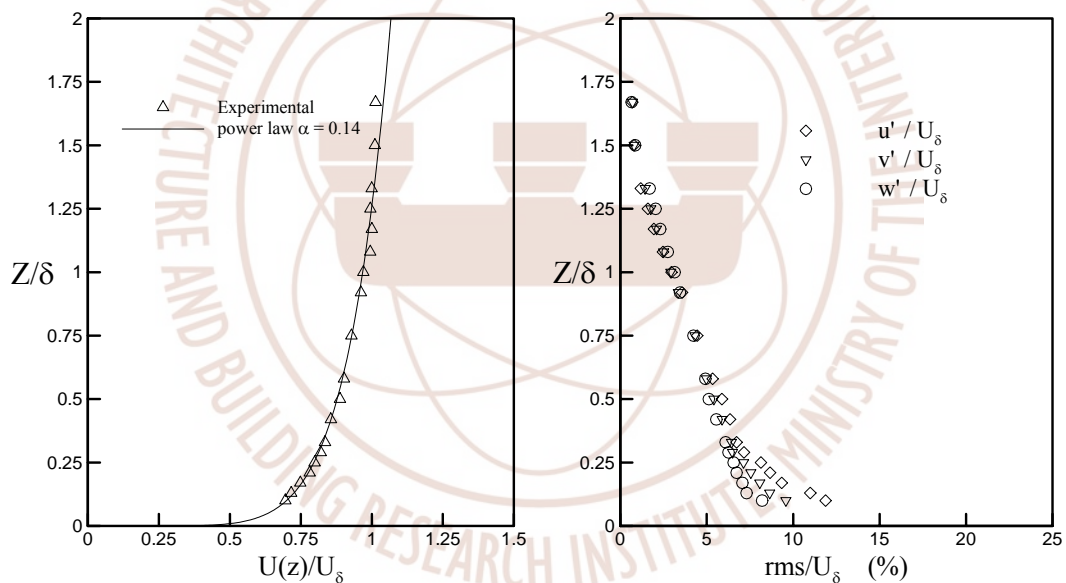


圖 3-10 柱體位置平均風速與風速均方根值剖面
(資料來源：本研究整理)

二、來風風況縱向變化

基於數值計算入流邊界條件(inflow boundary condition)之需要，試驗中亦量測了柱體上游 120 cm(3H)處之風速剖面(詳圖 3-11)。比較圖 3-10 與圖 3-11 得知，平均風速剖面之縱向變化極微；在風速均方

根值剖面方面，則有些許之衰減，然並不顯著。

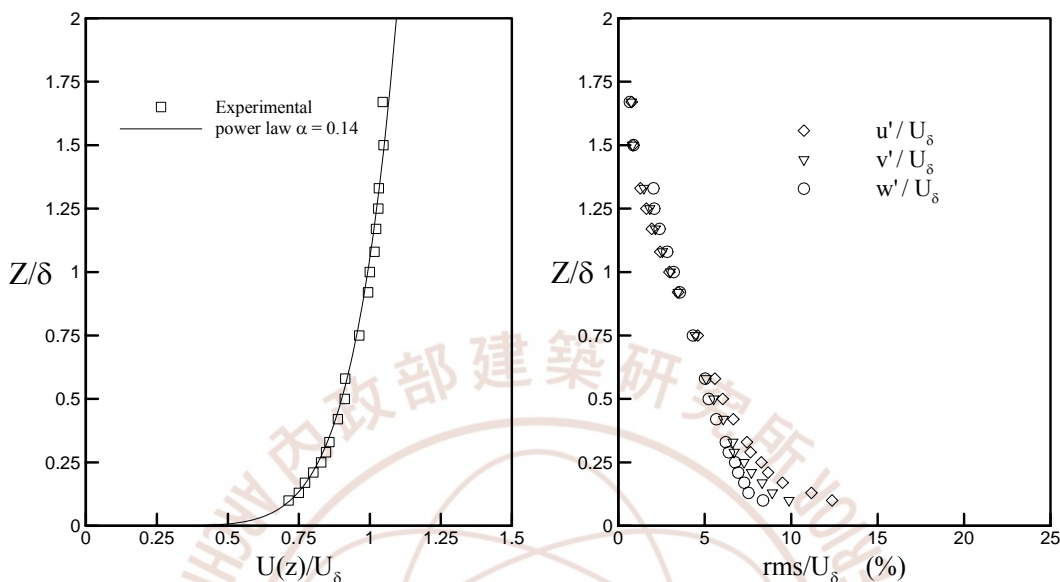


圖 3-11 柱體上游 3H 處平均風速與風速均方根值剖面
(資料來源：本研究整理)

三、柱體表面風壓分佈

根據量測結果，圖 3-12 與圖 3-13 為淺矩柱($B/D=1/2$, $B=7.1\text{ cm}$, $D=14.1\text{ cm}$)情況下相應之平均與均方根值柱面風壓係數($\overline{C_p}$ 與 C_p')分佈圖，其定義分別為：

$$\overline{C_p} = \frac{\overline{p} - p_0}{0.5\rho U_H^2} \quad (3.1)$$

$$C_p' = \frac{p'}{0.5\rho U_H^2} \quad (3.2)$$

其中， \overline{p} 與 p' 分別為平均壓力與壓力均方根值； p_0 為參考壓力； ρ 為空氣密度； U_H 為高度在 40 cm (H) 處之平均來流風速(12.04 m/s)。圖 3-12 至圖 3-13、圖 3-14 至圖 3-15 與圖 3-16 至圖 3-17 則分別為淺矩柱($B/D=1/2$, $B=7.1\text{ cm}$, $D=14.1\text{ cm}$)、方柱($B/D=1$, $B=D=10\text{ cm}$)與深矩柱($B/D=2$, $B=14.1\text{ cm}$, $D=7.1\text{ cm}$)情況相應之結果。

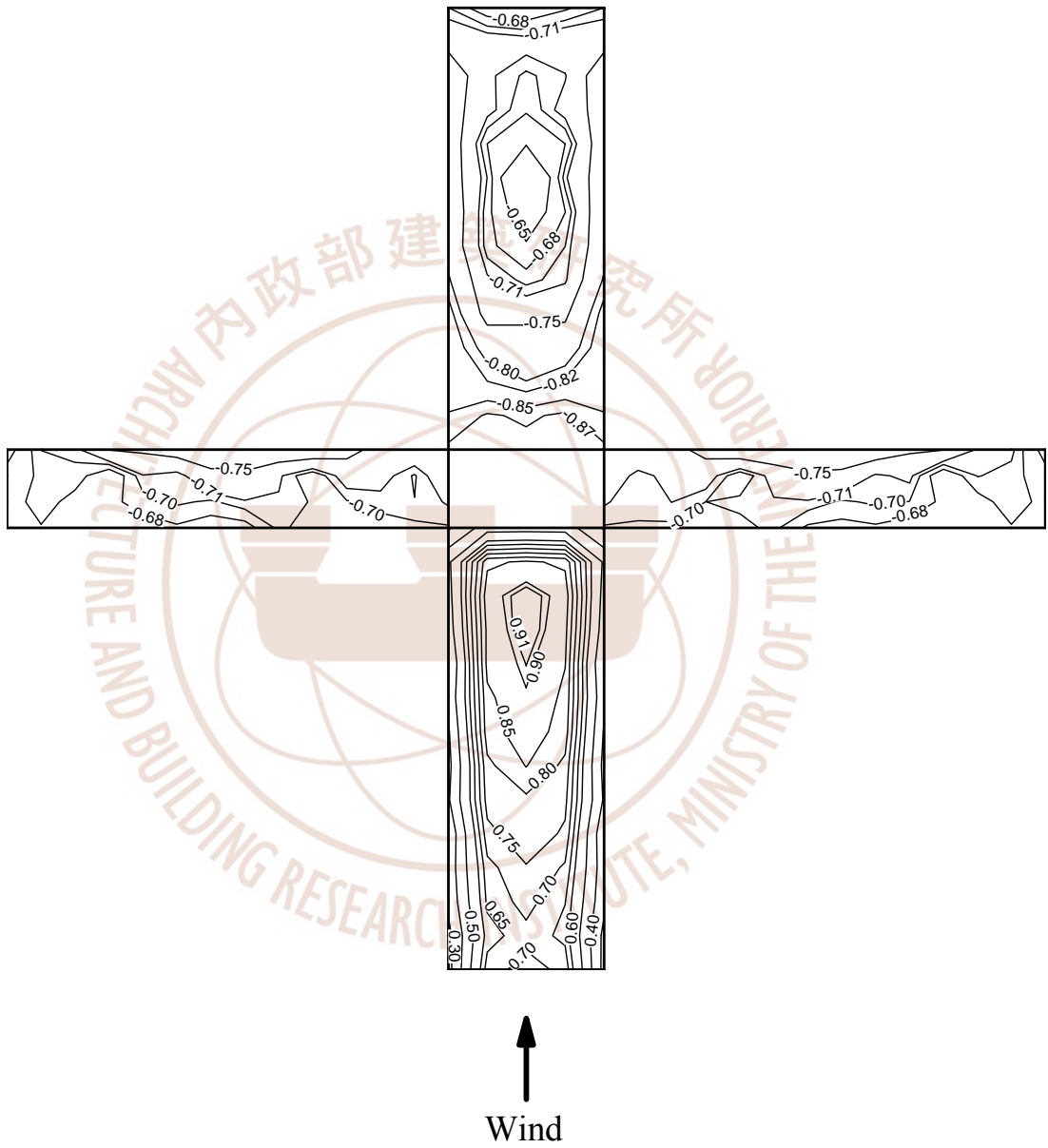


圖 3-12 風洞試驗量測淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

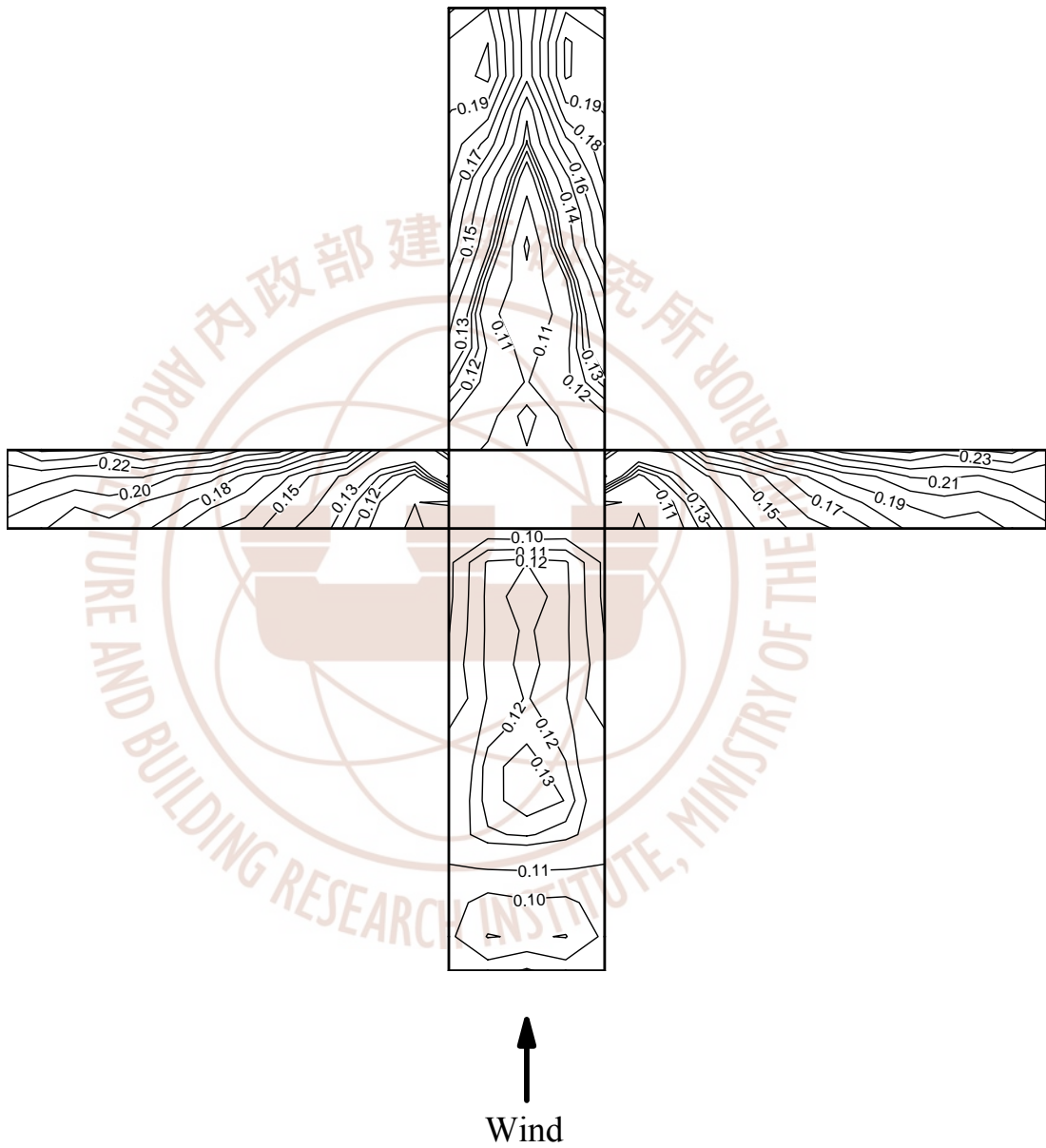


圖 3-13 風洞試驗量測淺矩柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)

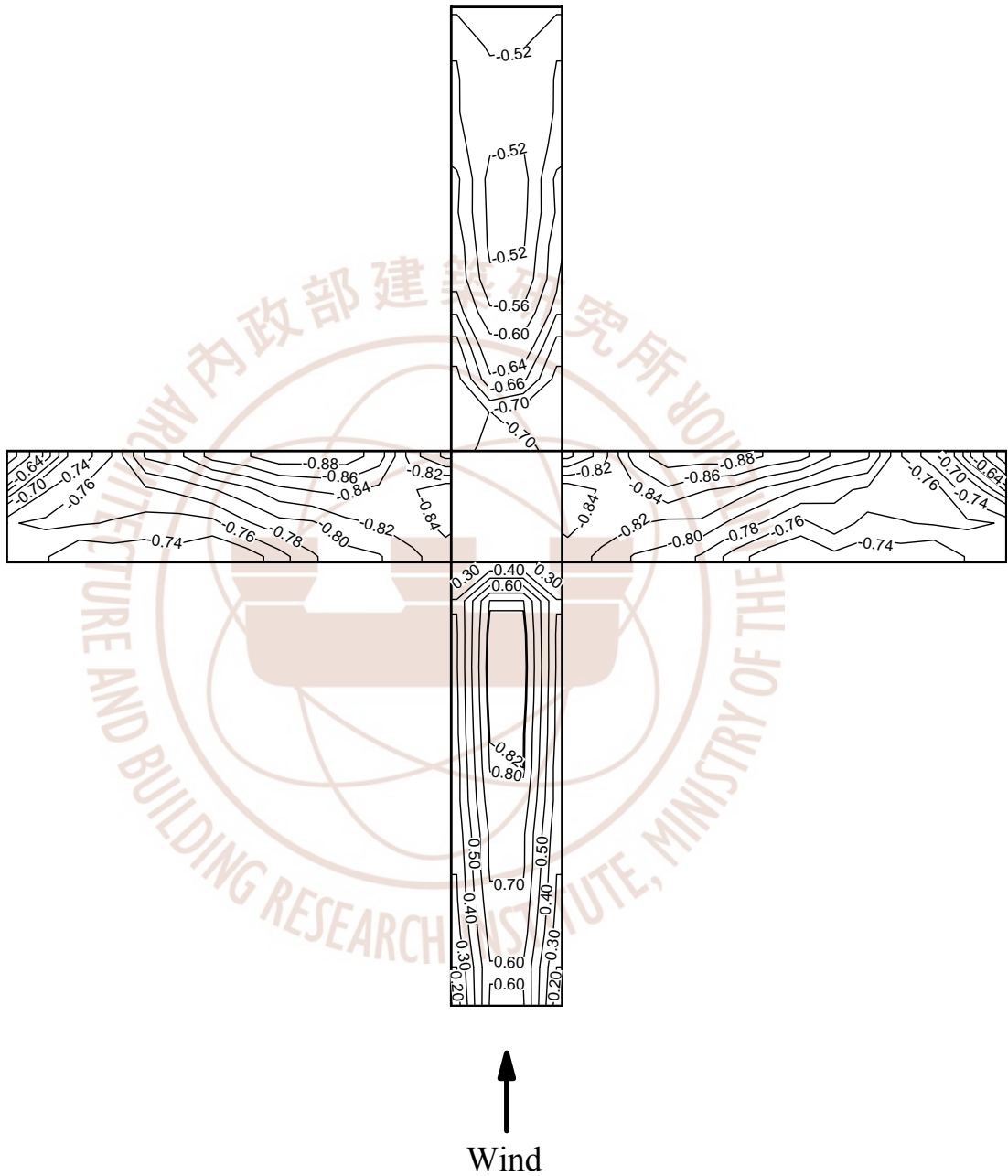


圖 3-14 風洞試驗量測方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

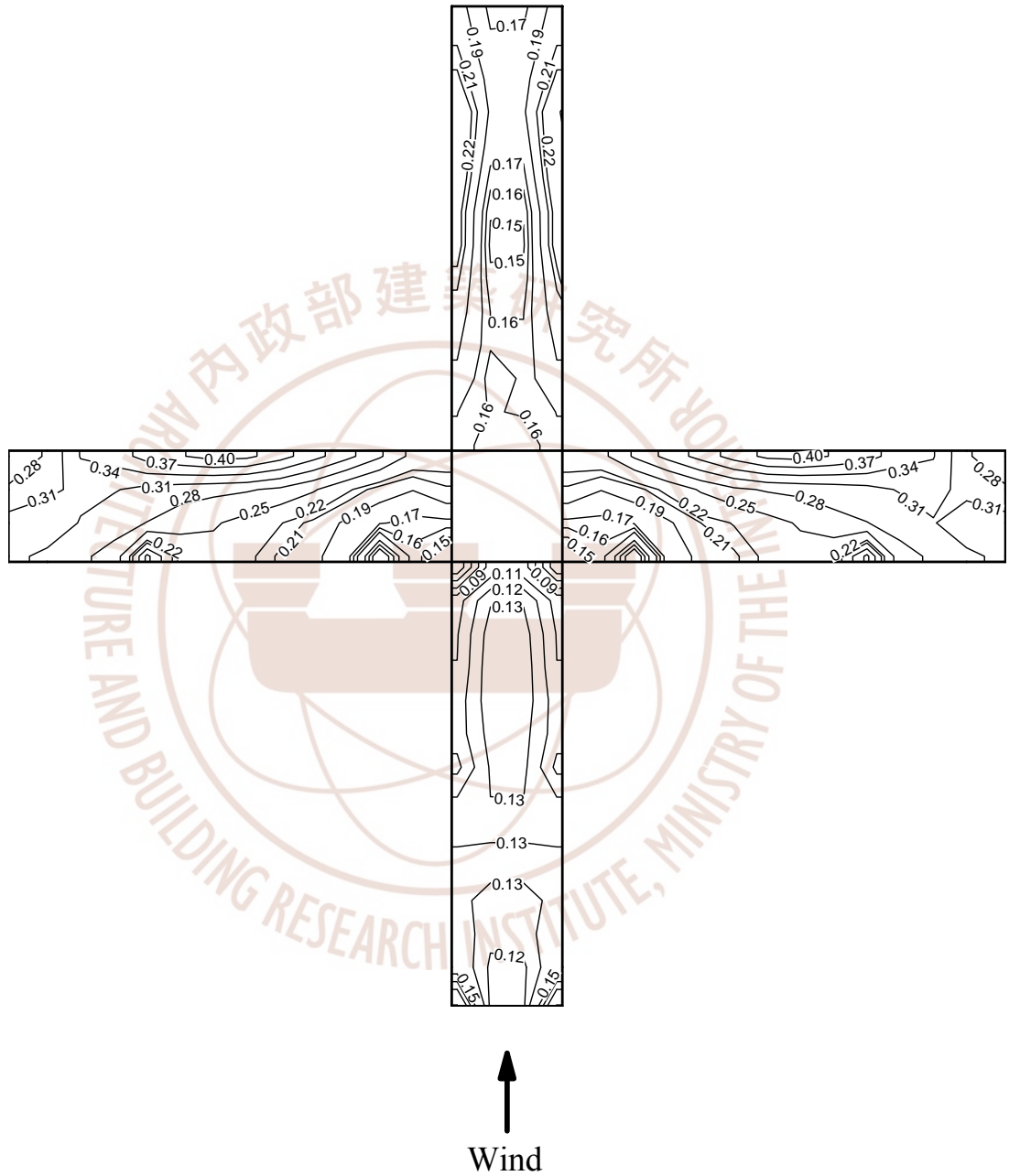


圖 3-15 風洞試驗量測方柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)



圖 3-16 風洞試驗量測深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

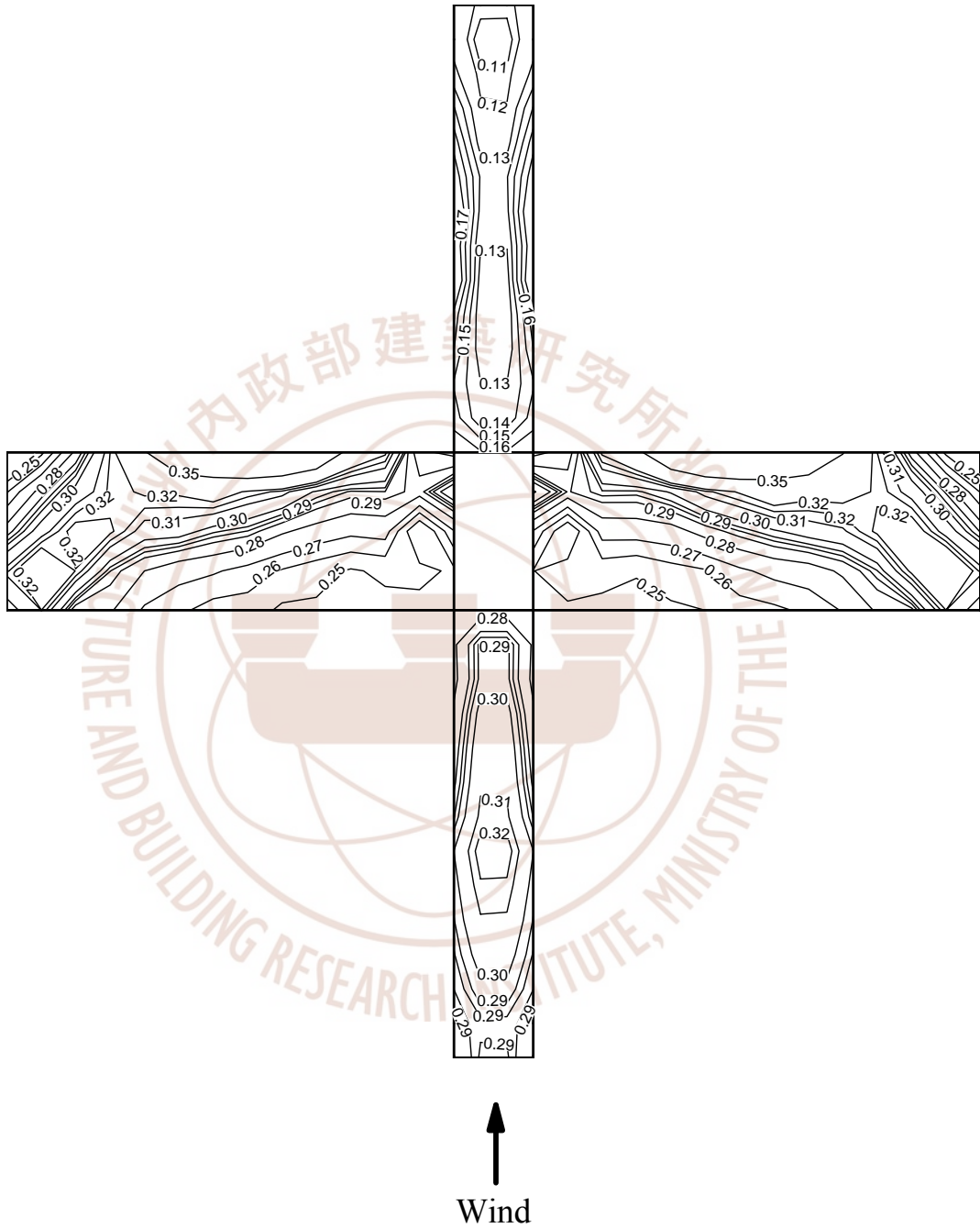


圖 3-17 風洞試驗量測深矩柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)

四、柱體阻力與升力

將表面壓力對面積積分後可以得到柱體在順風向(X 向)與橫風向(Y 向)之合力—即水平向阻力(drag)與升力(lift)，圖 3-18 至圖 3-19、圖 3-20 至圖 3-21 與圖 3-22 至圖 3-23 分別為淺矩柱、方柱與深矩柱情況下阻力係數(C_D)與水平升力係數(C_L)之時序列結果。定義如下：

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} U_H^2 D H} \quad (3.3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_H^2 B H} \quad (3.4)$$

其中， F_D 與 F_L 分別為順風向柱體承受的總阻力(drag)與橫風向柱體承受的水平總升力(lift)； U_H 為高度 40 cm (H)處之平均來流風速(12.04 m/s)。

經統計分析，表 3-1 顯示風洞試驗中三個柱體相應總阻/升力係數之平均值($\overline{C_D}$ 、 $\overline{C_L}$)與均方根值(C_D' 、 C_L')結果。

表 3-1 總阻力係數與總水平昇力係數試驗統計結果

	淺矩柱 (B/D=1/2)	方柱 (B/D=1)	深矩柱 (B/D=2)
$\overline{C_D}$	1.49	1.09	1.21
C_D'	0.18	0.16	0.11
$\overline{C_L}$	0.02	-0.06	-0.02
C_L'	0.21	0.31	0.23

(資料來源：本研究整理)

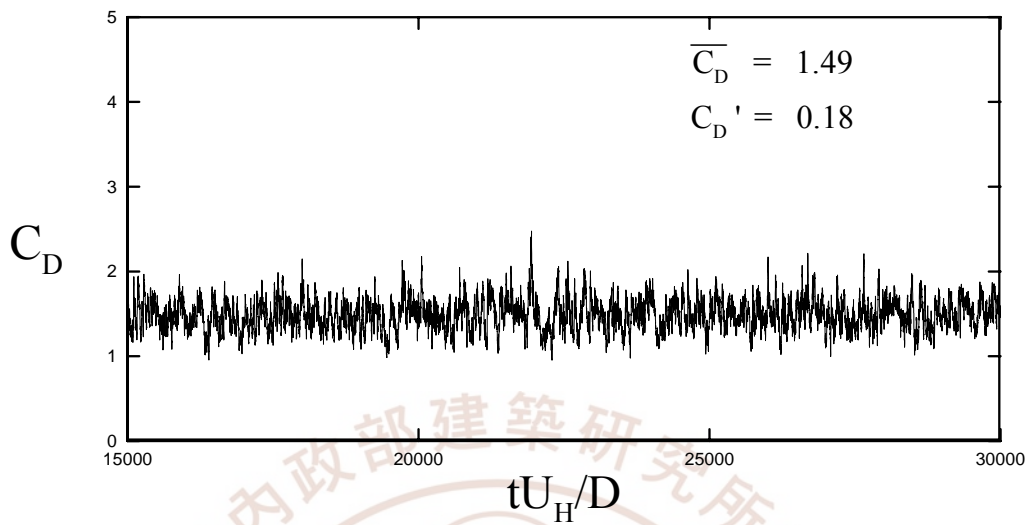


圖 3-18 風洞試驗量測淺矩柱阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

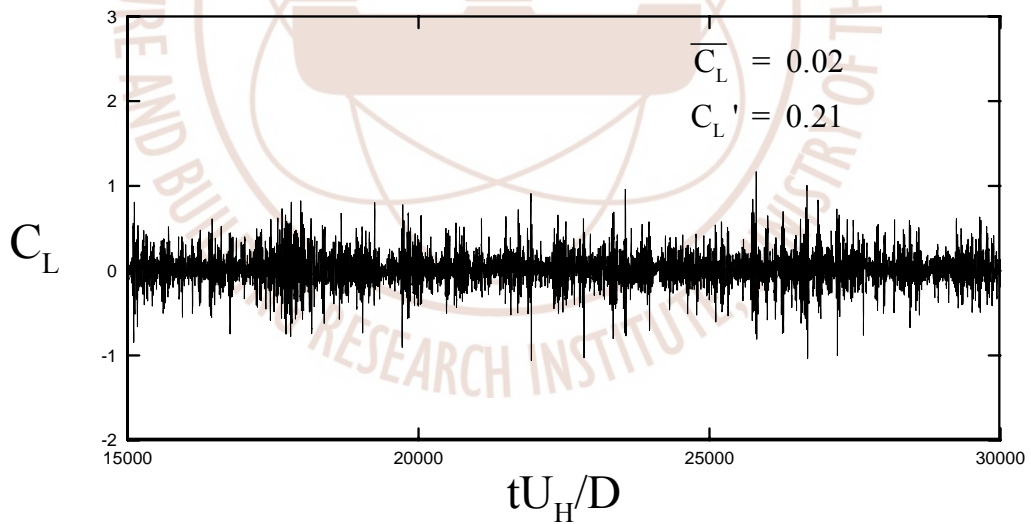


圖 3-19 風洞試驗量測淺矩柱水平昇力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

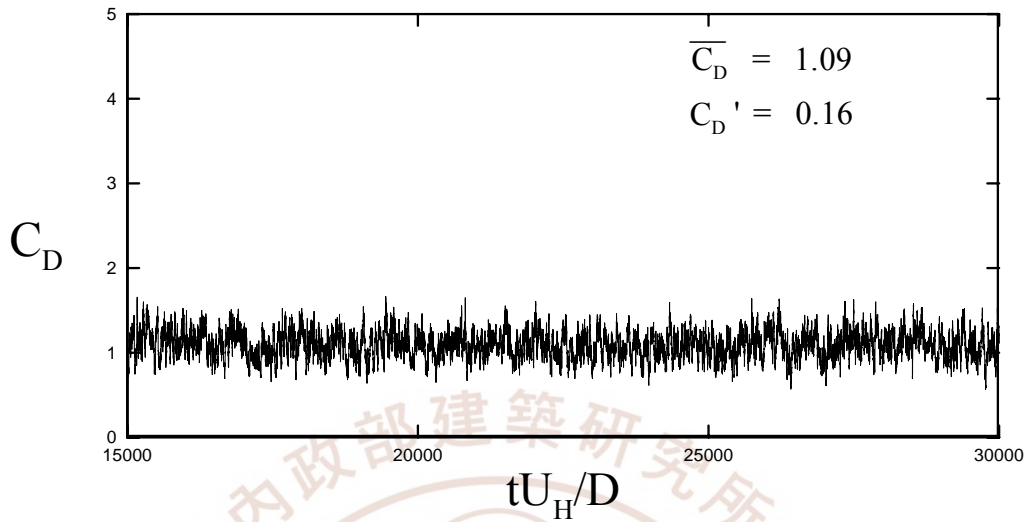


圖 3-20 風洞試驗量測方柱阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

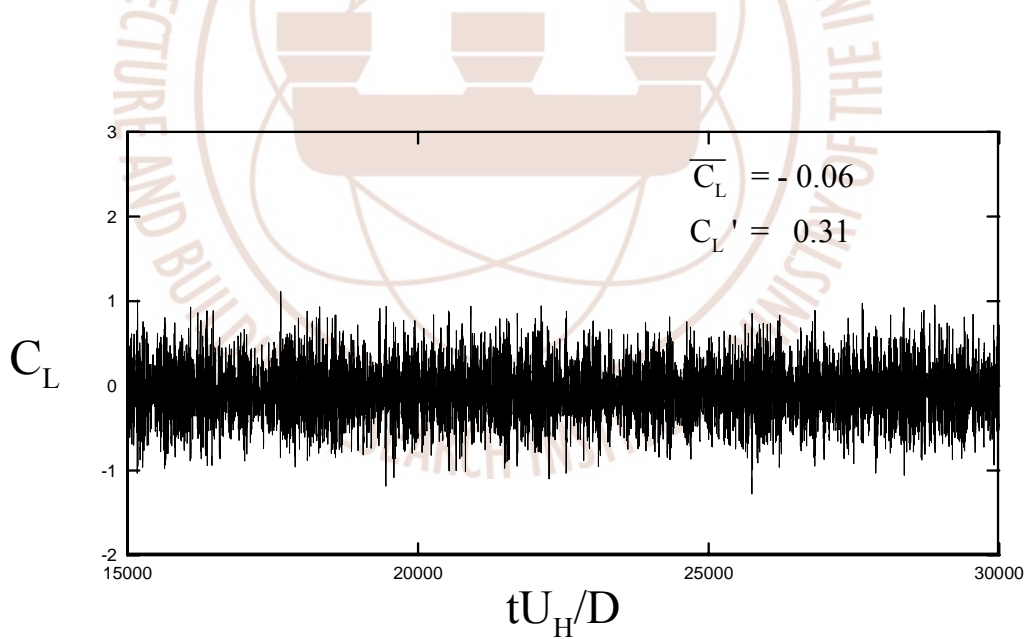


圖 3-21 風洞試驗量測方柱水平昇力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

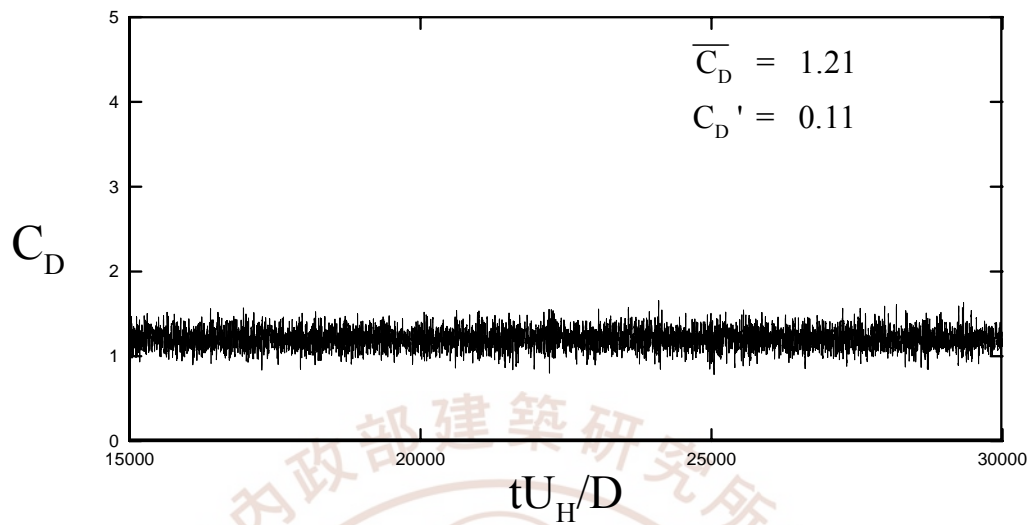


圖 3-22 風洞試驗量測深矩柱阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

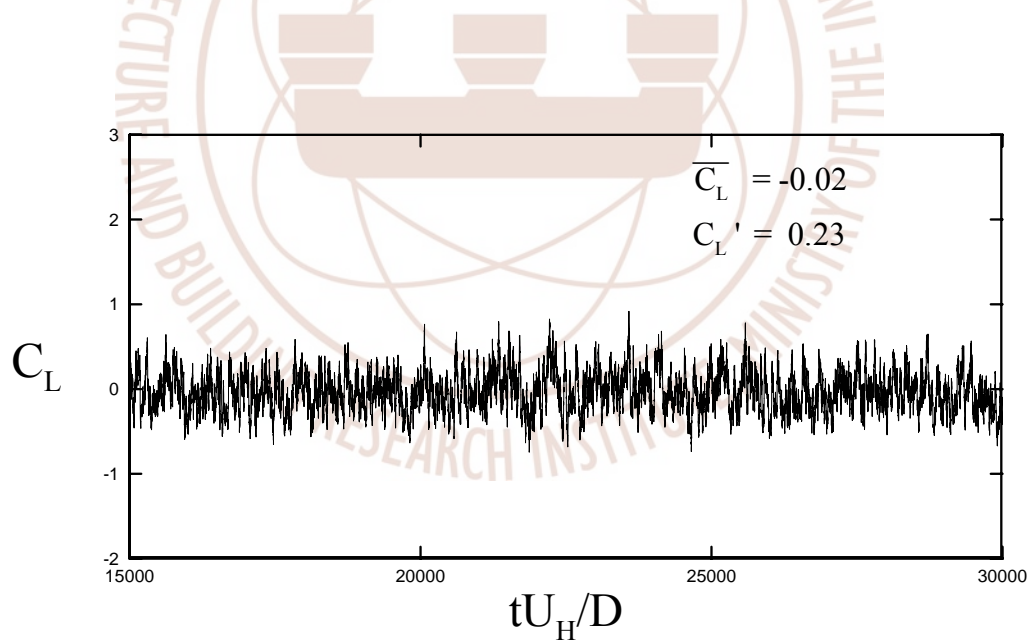


圖 3-23 風洞試驗量測深矩柱水平昇力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

五、柱頂等值阻力與升力

將表面壓力分佈對面積積分後再乘以相應之高度可以得到柱體在順風面與橫風面之總合力矩(moment)，此力矩若再除以柱高則為相應之等值柱頂阻力與柱頂等值水平升力。在受風效應的評估上，相較於柱體承受之阻力與昇力，等值柱頂風力可以表徵柱體承受力矩的情形或合力的作用位置。若將順風向與水平橫風向之值柱頂風力予以無因次化，圖 3-24 至圖 3-25、圖 3-26 至圖 3-27 與圖 3-28 至圖 3-29 分別為淺矩柱、方柱與深矩柱情況下柱頂等值阻力係數($C_{D,eq}$)與柱頂等值水平升力係數($C_{L,eq}$)之時序列結果。相關之定義如下：

$$C_{D,eq} = \frac{M_D}{\frac{\rho}{2} U_H^2 D H^2} \quad (3.5)$$

$$C_{L,eq} = \frac{M_L}{\frac{\rho}{2} U_H^2 B H^2} \quad (3.6)$$

其中， M_D 與 M_L 分別為順風面與橫風面之總力矩。

經統計分析，表 3-2 顯示風洞試驗中三個柱體相應等值阻/昇力係數之平均值($\overline{C_{D,eq}}$ 、 $\overline{C_{L,eq}}$)與均方根值($C'_{D,eq}$ 、 $C'_{L,eq}$)結果。

表 3-2 柱頂等值阻力與等值水平升力係數試驗統計結果

	淺矩柱 (B/D=1/2)	方柱 (B/D=1)	深矩柱 (B/D=2)
$\overline{C_{D,eq}}$	3.52	2.56	2.94
$C'_{D,eq}$	0.47	0.38	0.29
$\overline{C_{L,eq}}$	0.03	0.05	0.02
$C'_{L,eq}$	0.52	0.77	0.53

(資料來源：本研究整理)

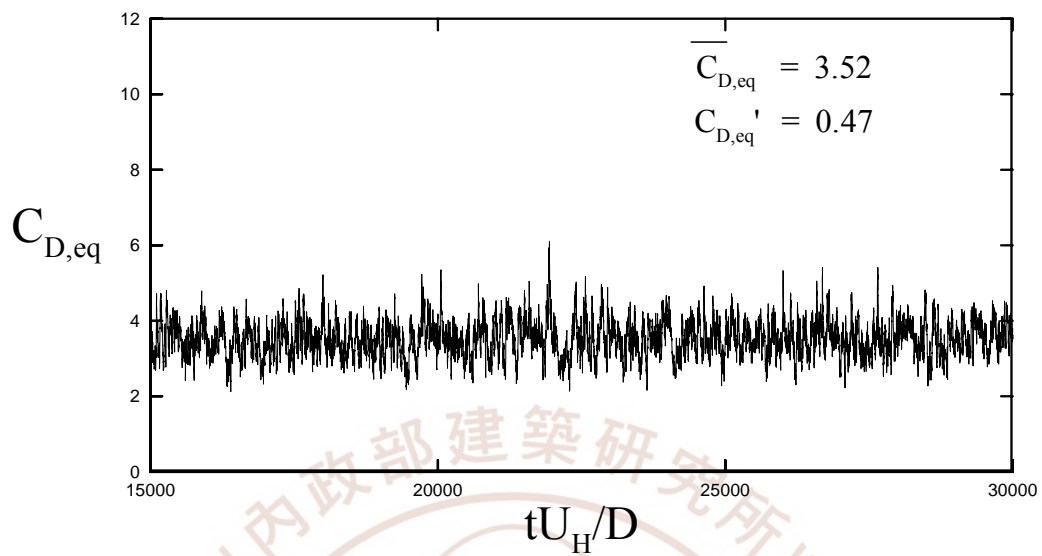


圖 3-24 風洞試驗量測淺矩柱柱頂等值阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

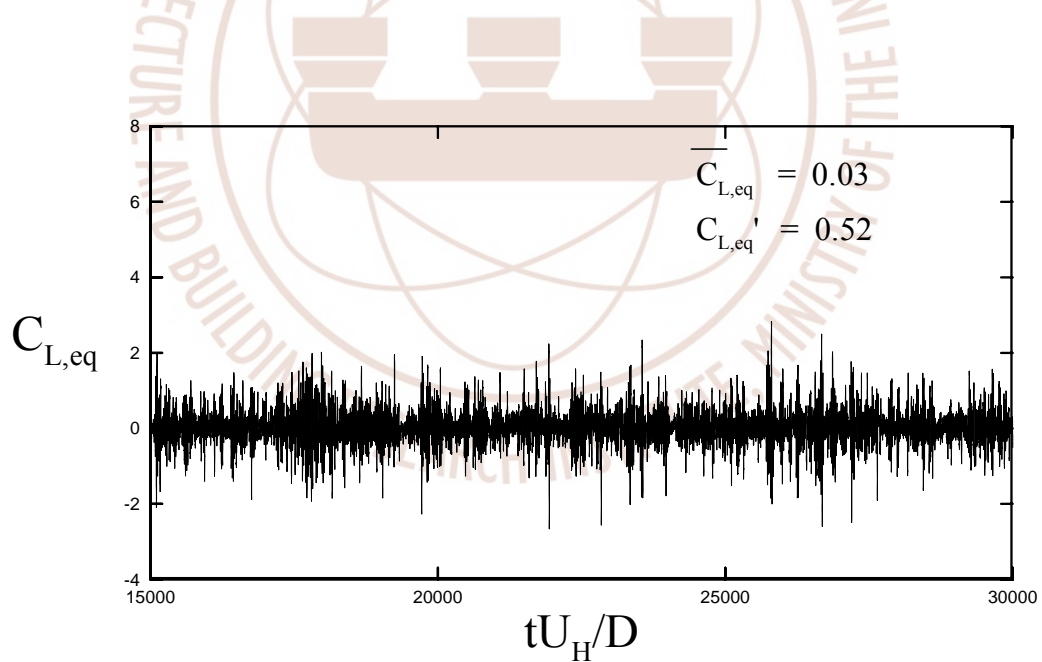


圖 3-25 風洞試驗量測淺矩柱柱頂等值水平升力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

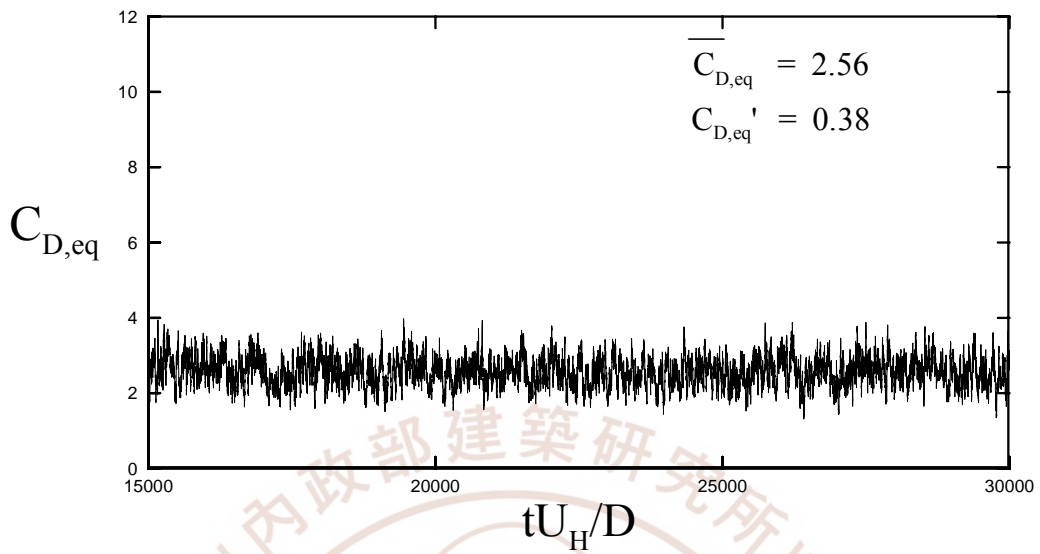


圖 3-26 風洞試驗量測方柱柱頂等值阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

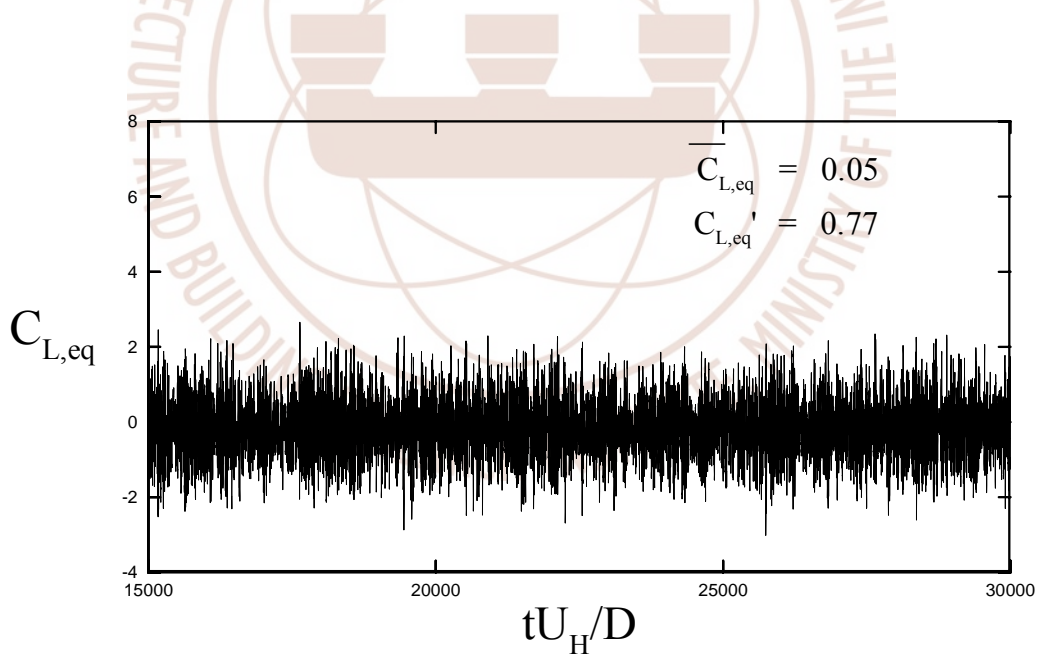


圖 3-27 風洞試驗量測方柱柱頂等值水平升力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

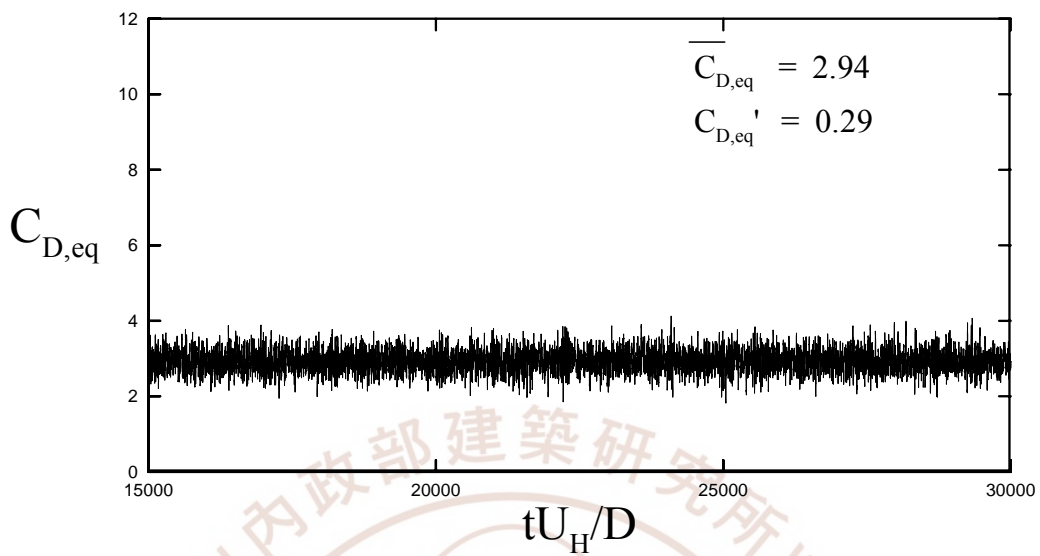


圖 3-28 風洞試驗量測深矩柱柱頂等值阻力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

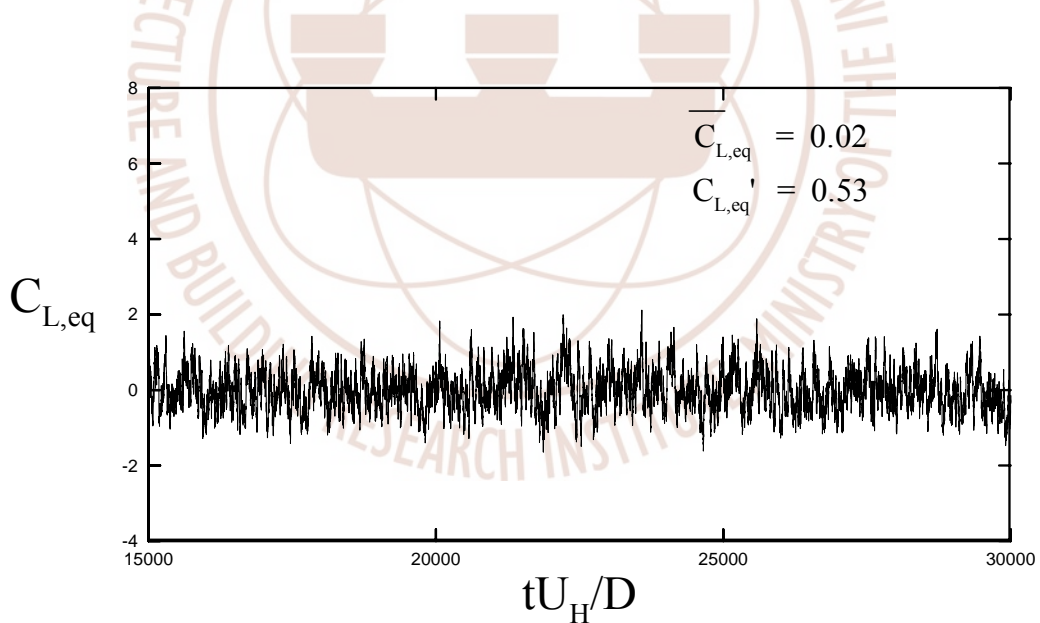


圖 3-29 風洞試驗量測深矩柱柱頂等值水平升力係數時序列變化
(資料來源：本研究整理)

第四章 數值模擬

研究中採用了三套選定的數值計算軟體(Fluent、Star-CD 與 WCF)針對淺矩柱($B/D=1/2$)、方柱($B/D=1$)與深矩柱($B/D=2$)三種情況進行風場模擬，繼將數值計算結果與風洞試驗結果進行比對，以評估其準確度與優缺點。

第一節 數值模擬規劃

一、數值計算區域

數值模擬中在流場計算區域(computation domain)的選定上必須在兼顧計算結果之精確度與計算效率間作審慎之考量與抉擇。研究中採用的典型計算區域如圖 4-1 與圖 4-2 所示。在水平截面，柱體上、下游分別取 $3H$ 與 $6H$ 之淨空，柱體兩側均取 $2H$ 之淨空；在垂直截面，柱體頂側取 $2H$ 之淨空。計算格網採用直角正交格網，最小格網之尺寸(於柱體角落處)為 $0.025D$ 。

有關計算區域大小與之最小格網尺寸對計算結果之影響於本章第五、六節中另行檢討。

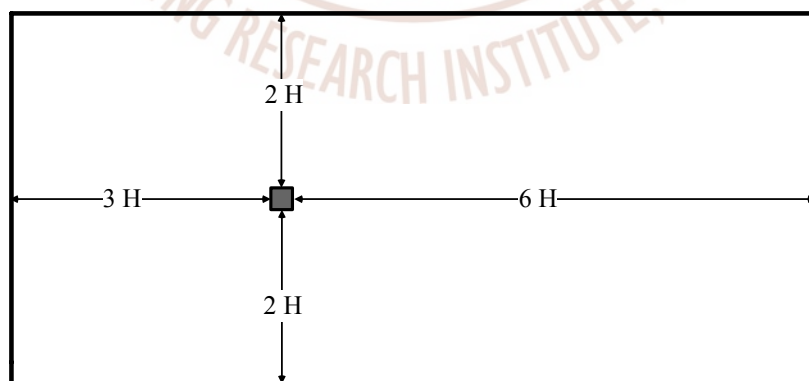


圖 4-1 計算區域平面簡示圖
(資料來源：本研究整理)

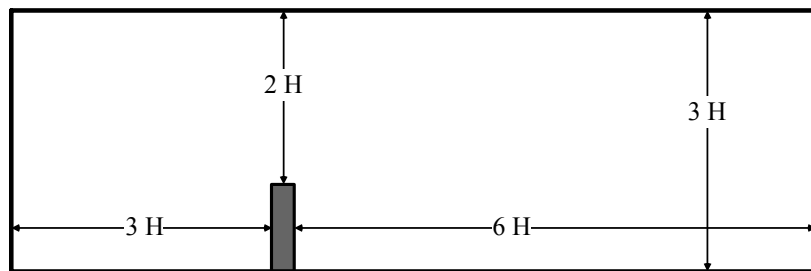


圖 4-2 計算區域立面簡示圖

(資料來源：本研究整理)

二、入流動態邊界條件之給定

為正確地反映出來流之風場特性，在數值模擬的來流邊界上除了須依據風洞試驗量測而得之平均風速剖面給定外，風速擾動量(u' 、 v' 與 w')亦應適當給定，以顯現來流風場之紊流效應。在使用 $k-\varepsilon$ 及 LES 兩種紊流模型時，基於觀點的不同(前者為時間平均，後者為空間平均)，在入流動態邊界條件之給定上亦有所差異。

當採用 $k-\varepsilon$ 紊流模型時，由於針對的流場變數為時間平均的形式，紊流引致之效應係以紊流應力(turbulent stress)反應在流場中。依據渦漩黏滯度假定(eddy-viscosity hypothesis)，流場中紊流應力的效應乃以紊流黏滯度(turbulent viscosity; ν_t)之模擬處理。在 $k-\varepsilon$ 方法中，則藉紊流動能(turbulence kinetic energy; k)與紊流消散率(turbulence dissipation rate; ε)傳輸方程式(transport equation)之解析獲取 k 與 ε 之空間分佈，進而得到紊流黏滯度 ($\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $c_\mu = 0.09$) 與紊流應力之結果。據此，在入流邊界上，速度係依據風洞試驗量測而得之平均風速剖面(參見圖 3-10)給定之，而紊流動能(k)亦須依據風洞試驗量得之風速均方根值剖面(參見圖 3-10)給定。至於在入流邊界紊流消散率(ε)之給定上，則依據來流屬於平衡之紊流邊界層(equilibrium turbulent boundary layer)之假定下，由後式獲得：

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z_w} \quad (4.1)$$

其中， u_* 為剪力速度(shear velocity)； z_w 為地面高； $\kappa(=0.41)$ 為 *von Karman* 常數。

另一方面，當採用大渦模擬(LES)方法時，針對的流場變數則屬於空間平均的形式，故在入流邊界上動態條件給定之並不相同，而須作不同方式的處理。由於實際來流風況為非恆定(unsteady)者，在速度的表現上除了包括平均值(mean)外也應考慮擾動量(fluctuation)，而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 [23]建議之頻譜法(spectral method)，以產生所需非恆定形式的來流風速情況。過程中係以試誤(try-and-error)的方式，於適當地選取來流風速在水平(Y)方向與垂直(Z)方向上之空間相關性(spatial correlation)後，先行於空流場中模擬出既定之風速剖面，以作為後續流場計算中來流邊界條件(boundary condition)之輸入資料。圖 4-3 顯示數值模擬而得之來流風速均方根值剖面，其與風洞試驗量測結果(圖 3-10)相較，有不錯之吻合度。

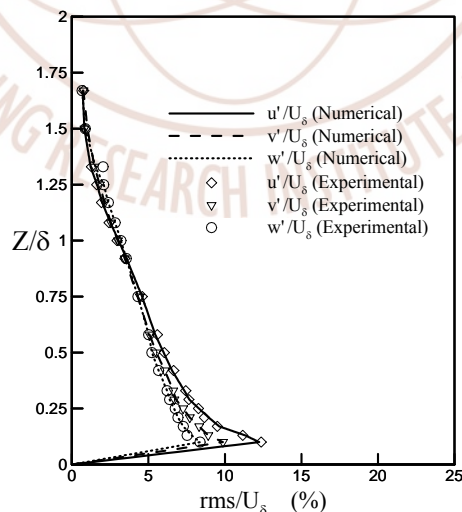


圖 4-3 來流風速均方根值剖面比較圖
(資料來源：本研究整理)

第二節 WCF 軟體模擬結果

本節之數值模擬採用空間平均之 LES 方法，來流動態條件之給定係依據 Kondo 等 [23]建議之頻譜法，風場計算區域如圖 4-1 與圖 4-2 所示，計算最小格網之尺寸(於柱體角落處)為 0.025D，格網數分別為 504×412×346(淺矩柱)、520×396×346(方柱)與 536×388×346(深矩柱)。

一、柱體表面風壓

依據數值模擬結果，圖 4-4 至圖 4-5、圖 4-6 至圖 4-7 與圖 4-8 至圖 4-9 分別為淺矩柱(B/D=1/2)、方柱(B/D=1)與深矩柱(B/D=2)情況柱面平均風壓係數($\overline{C_p}$)與風壓係數均方根值(C_p')等值圖。對照試驗量測結果(圖 3-12 至圖 3-13、圖 3-14 至圖 3-15 與圖 3-16 至圖 3-17)可見，數值模擬在柱面風壓分佈上有呈現出相當之預測能力。

二、柱體阻/升力與柱頂等值阻/升力

表 4-1 至表 4-3 列舉了數值模擬與試驗量測柱體阻力係數($C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} U_H^2 DH}$)、水平昇力係數($C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_H^2 DH}$)、柱頂等值阻力係數($C_{D,eq} = \frac{M_D}{\frac{\rho}{2} U_H^2 DH^2}$)與柱頂等值水平升力係數($C_{L,eq} = \frac{M_L}{\frac{\rho}{2} U_H^2 BH^2}$)之統計比較結果(平均與均方根值)。

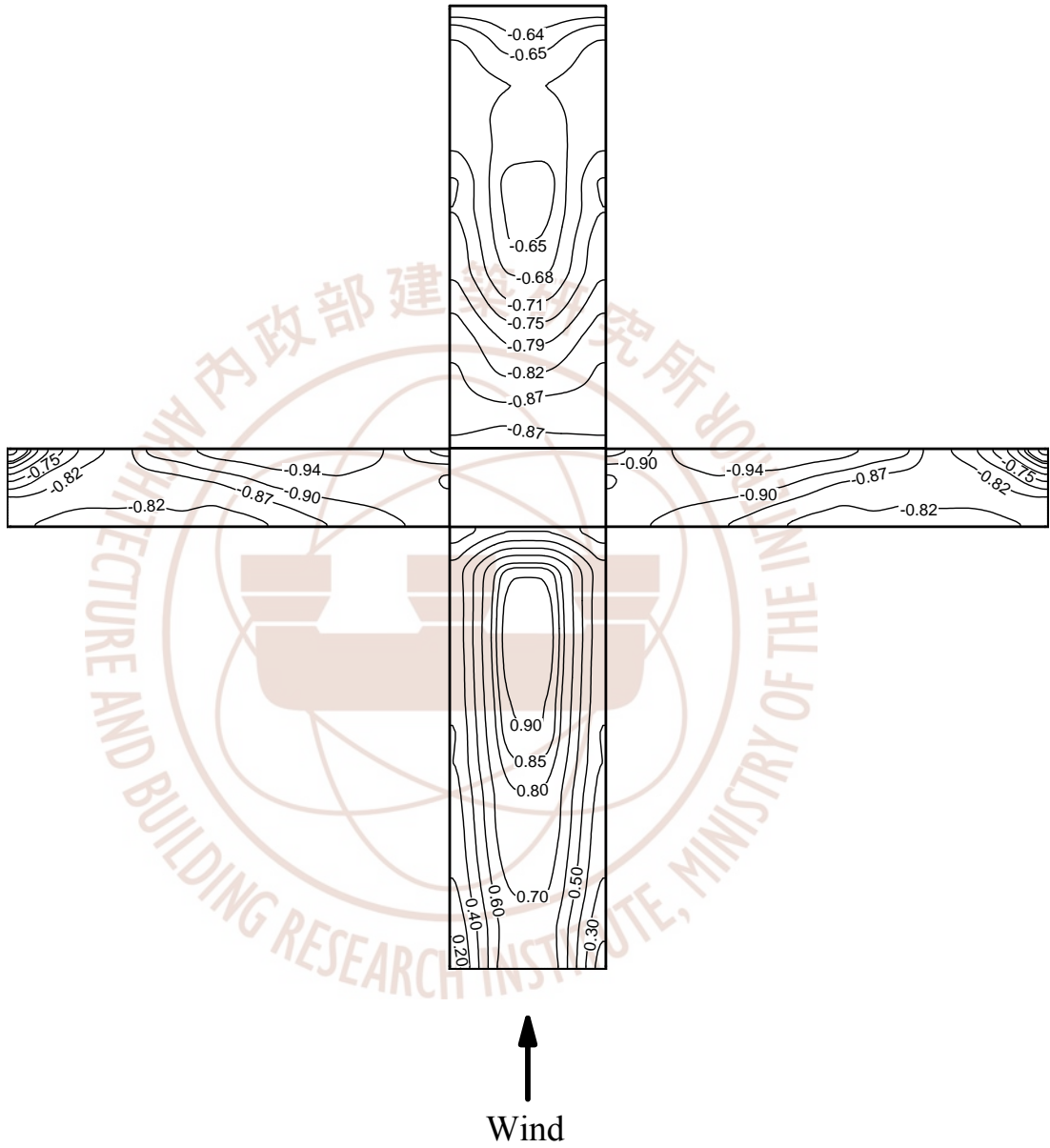


圖 4-4 WCF 模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

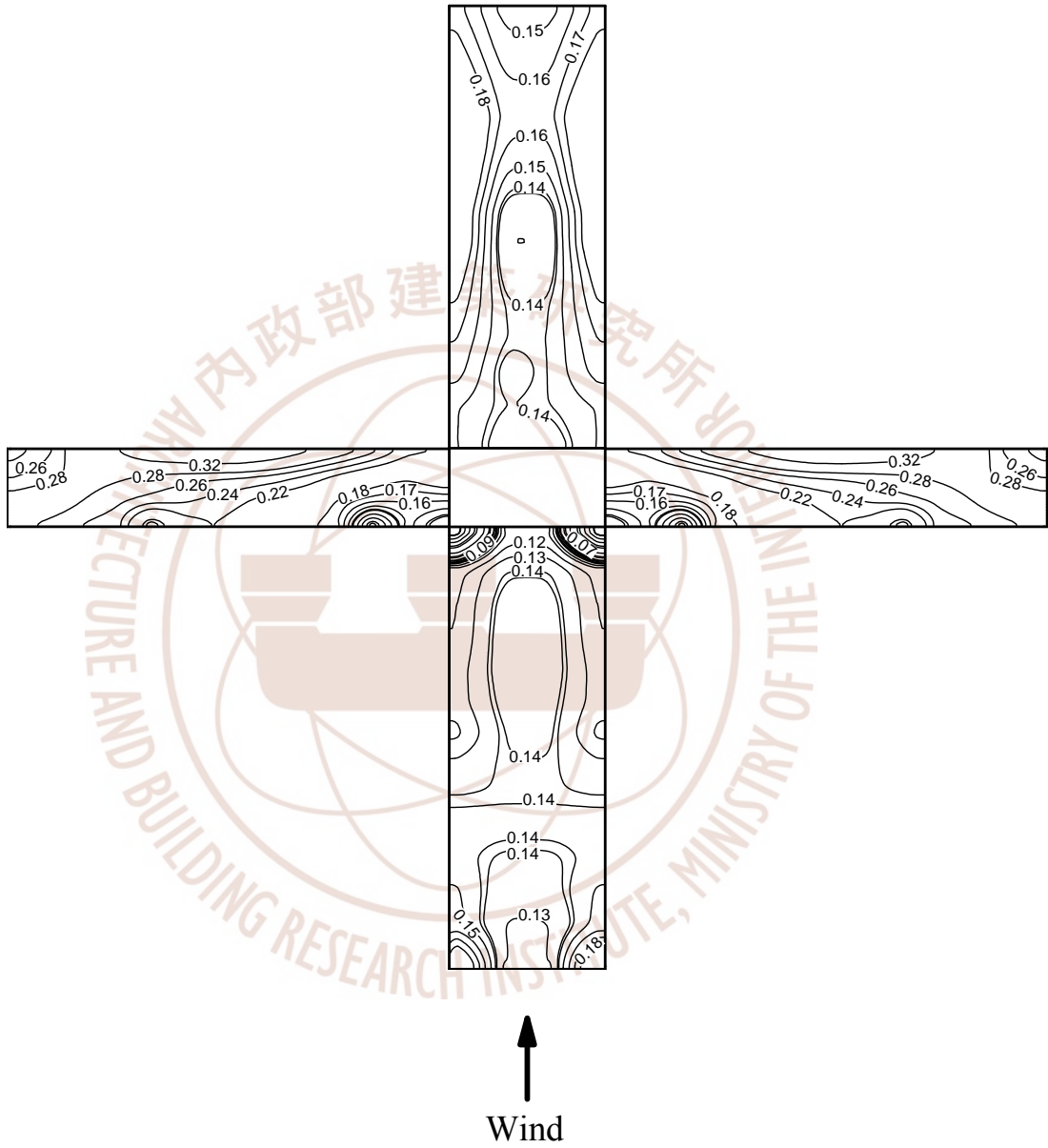


圖 4-5 WCF 模擬淺矩柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)

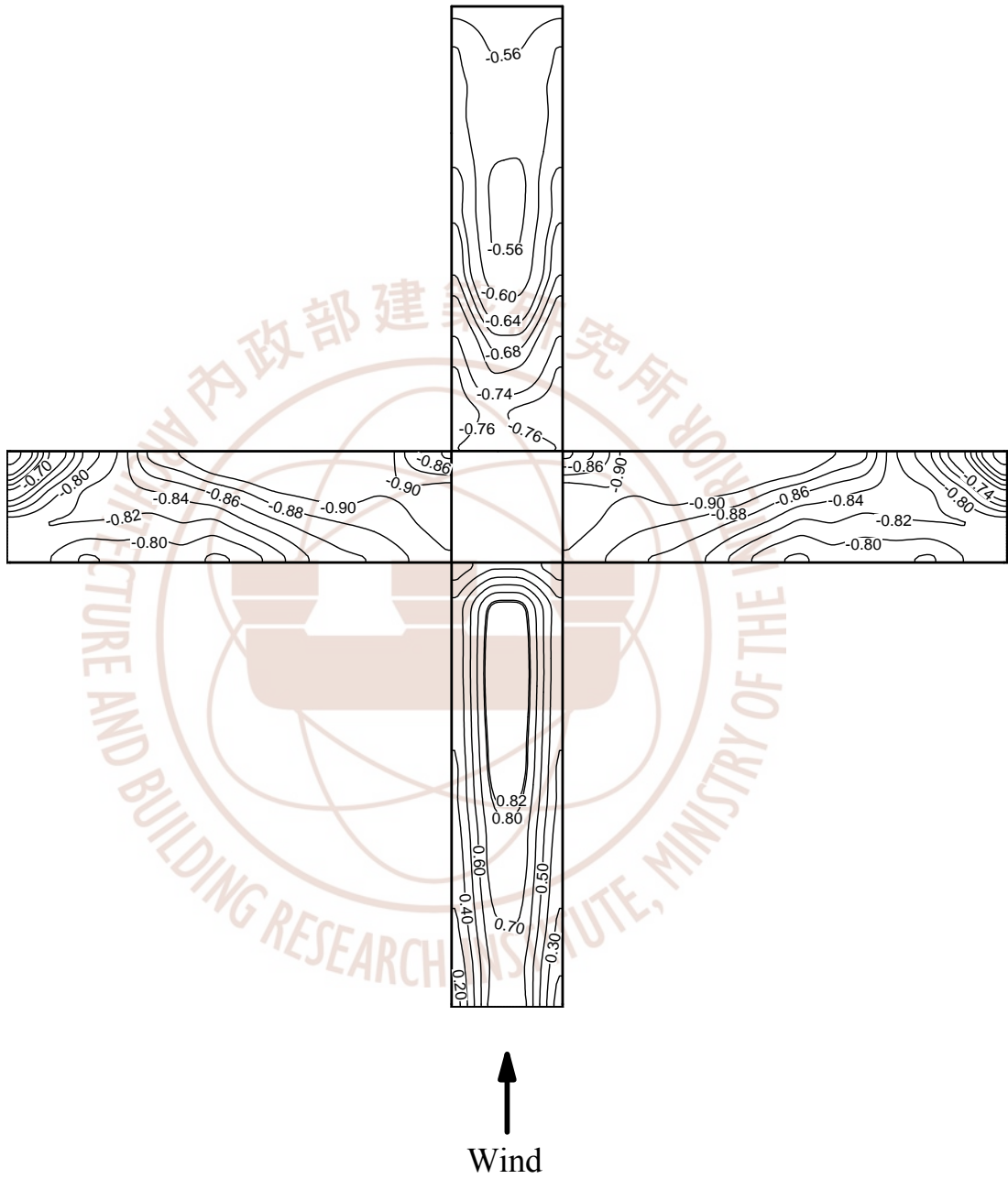


圖 4-6 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

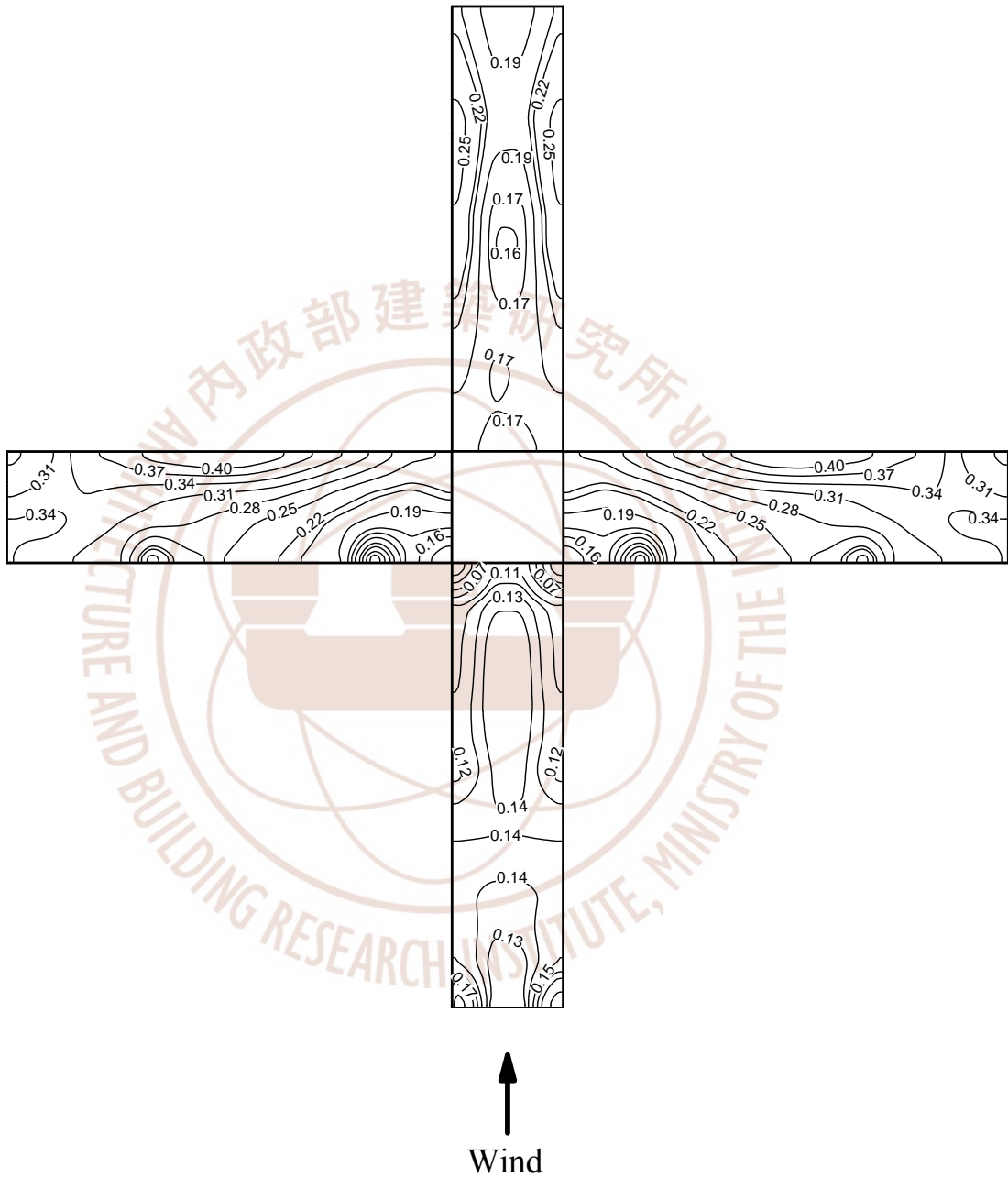


圖 4-7 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)



圖 4-8 WCF 模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

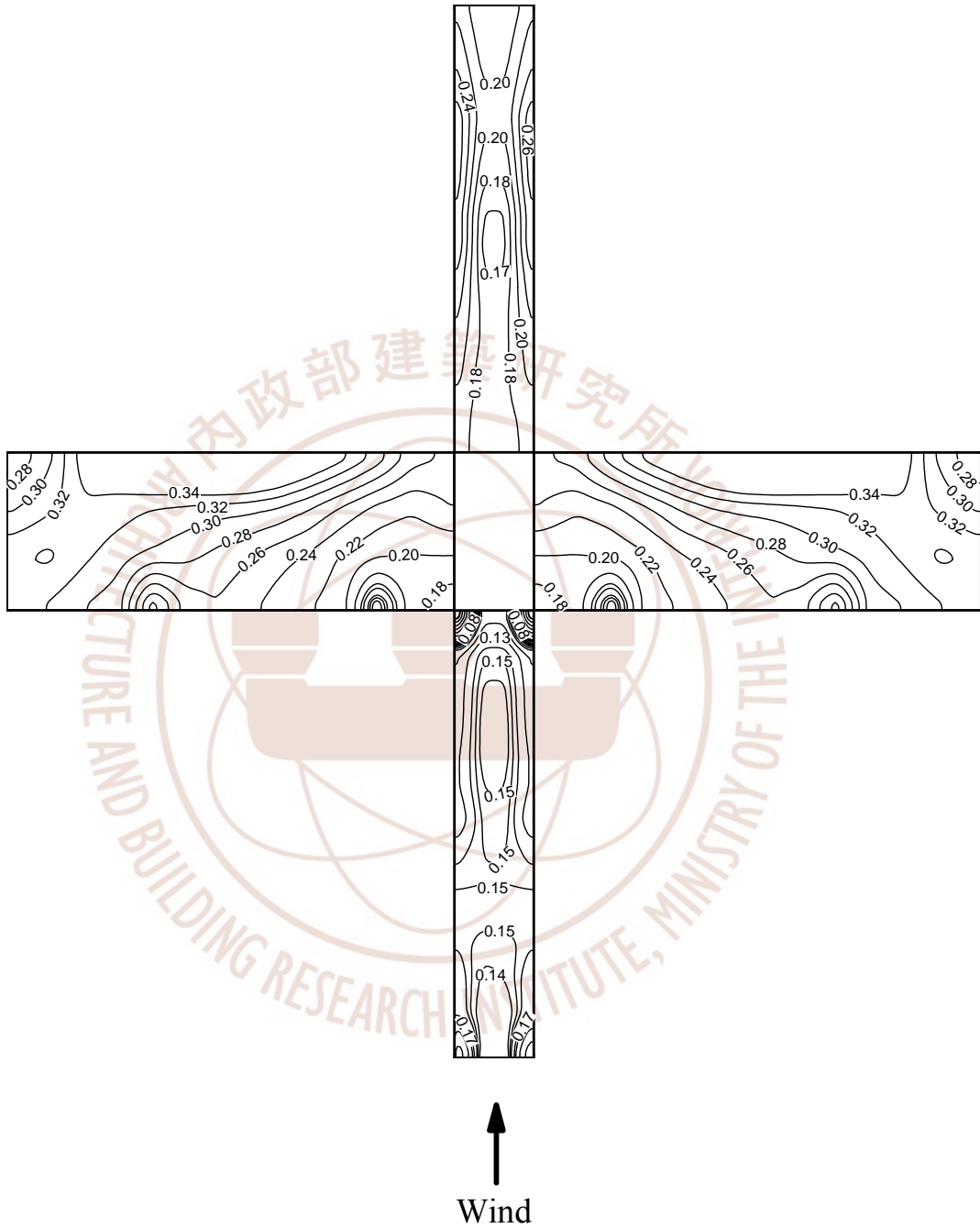


圖 4-9 WCF 模擬深矩柱表面風壓係數均方根值等值圖
(資料來源：本研究整理)

表 4-1 WCF 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	數值模擬結果
$\overline{C_D}$	1.49	1.63
C_D'	0.18	0.24
$\overline{C_L}$	0.02	0.004
C_L'	0.21	0.26
$\overline{C_{D,eq}}$	3.52	3.61
$C'_{D,eq}$	0.47	0.57
$\overline{C_{L,eq}}$	0.03	0.07
$C'_{L,eq}$	0.52	0.63

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 WCF 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	數值模擬結果
$\overline{C_D}$	1.09	1.17
C_D'	0.16	0.18
$\overline{C_L}$	-0.06	-0.004
C_L'	0.31	0.31
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	2.88
$C'_{D,eq}$	0.38	0.47
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.06
$C'_{L,eq}$	0.77	0.76

(資料來源：本研究整理)

表 4-3 WCF 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	數值模擬結果
$\overline{C_D}$	1.21	1.32
C_D'	0.11	0.14
$\overline{C_L}$	-0.02	-0.003
C_L'	0.23	0.25
$\overline{C_{D,eq}}$	2.94	2.91
$C'_{D,eq}$	0.29	0.35
$\overline{C_{L,eq}}$	0.02	0.09
$C'_{L,eq}$	0.53	0.60

(資料來源：本研究整理)

第三節 Fluent 軟體模擬結果

本節之數值模擬採用時間平均之 κ - ϵ 紊流模型(包括 standard κ - ϵ 與 RNG κ - ϵ)，來流動態條件之給定係本章第一節有關 κ - ϵ 數值模擬所述之方式，分別針對淺、方、深矩柱之情況進行風場預測。

一、柱體表面風壓

依據數值計算結果，圖 4-10 至圖 4-15 分別為淺矩柱、方柱與深矩柱情況柱面平均風壓係數(C_p)等值圖。與試驗結果對照，儘管本數值模擬在柱面風壓分佈形態與變化驅趨勢上相若，但在準確性上則不如 WCF 之結果理想。

二、柱體阻/升力與柱頂等值阻/升力

表 4-4 至表 4-6 列舉了本數值模擬與試驗柱體受力係數之比較，在量化上二者間有相對較明顯之差異。

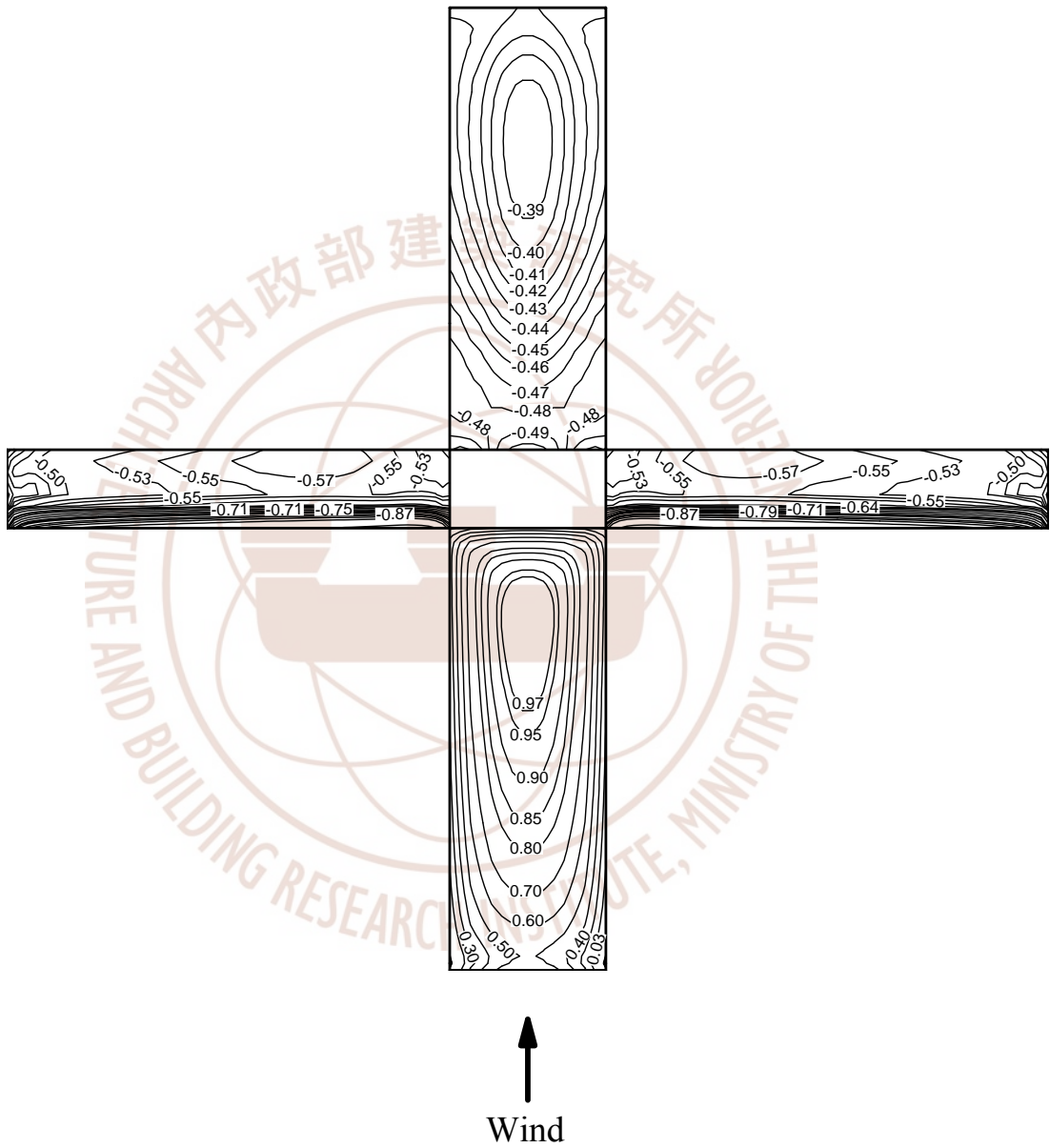


圖 4-10 Fluent(RNG)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

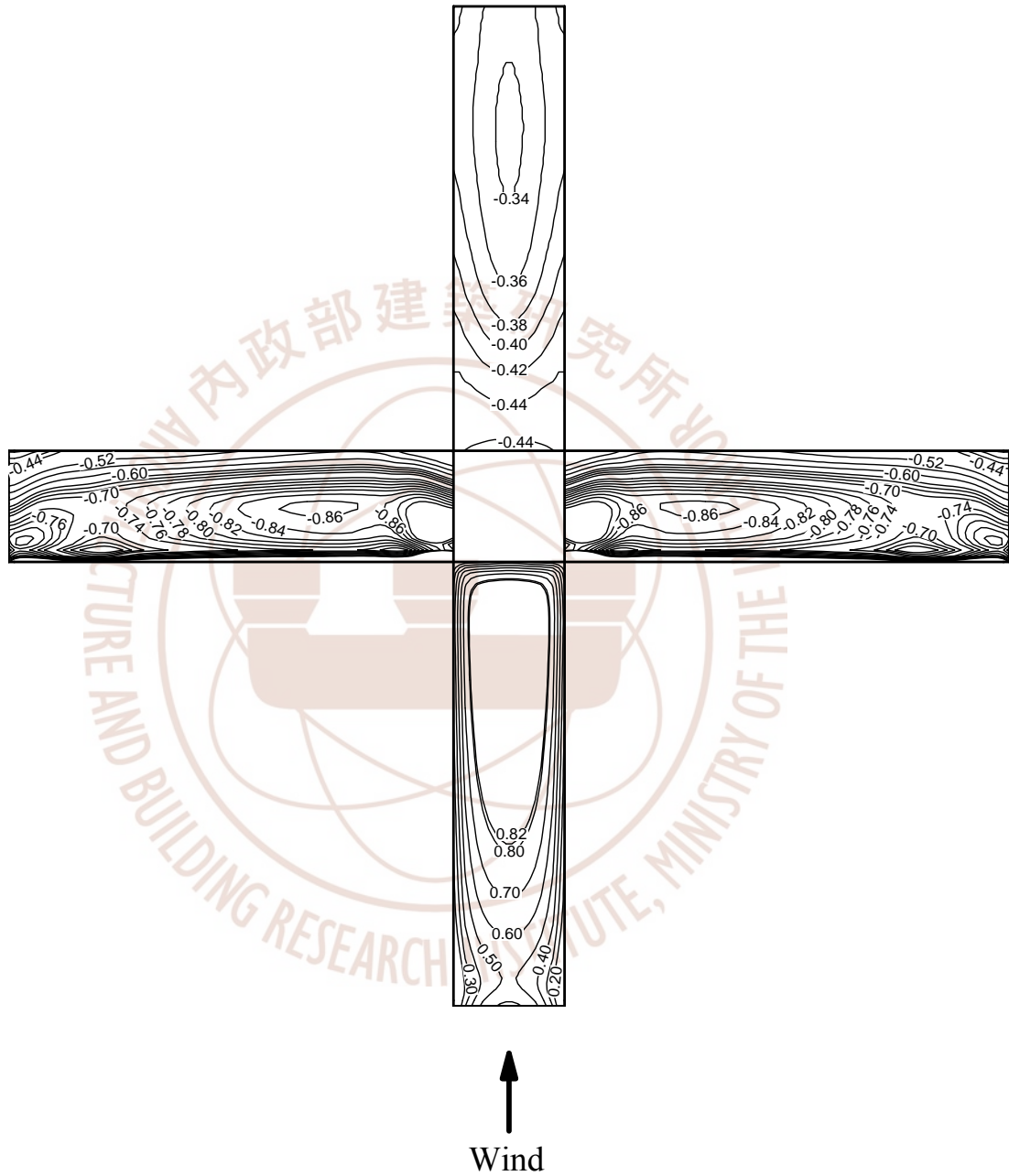


圖 4-11 Fluent(RNG)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

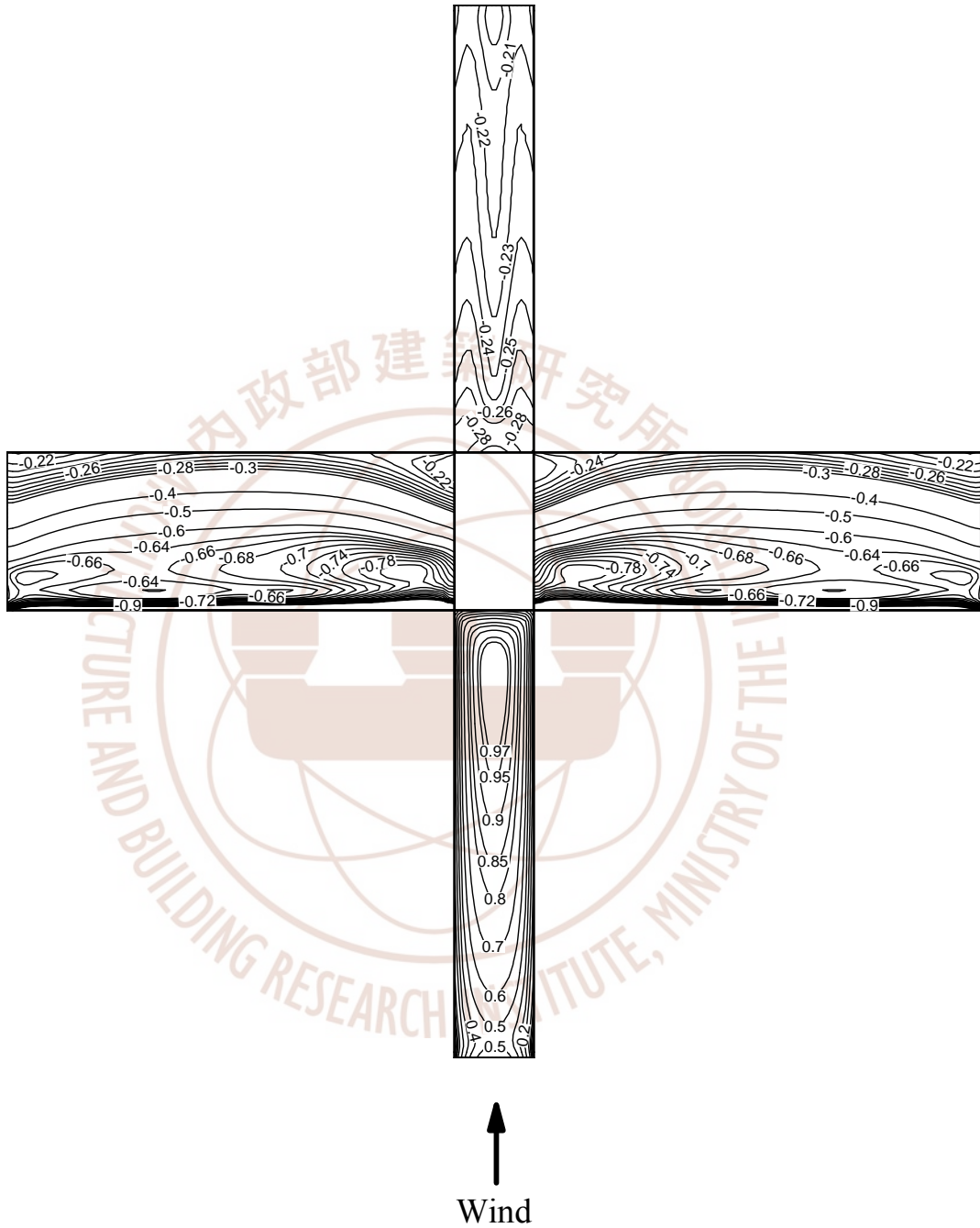


圖 4-12 Fluent(RNG)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

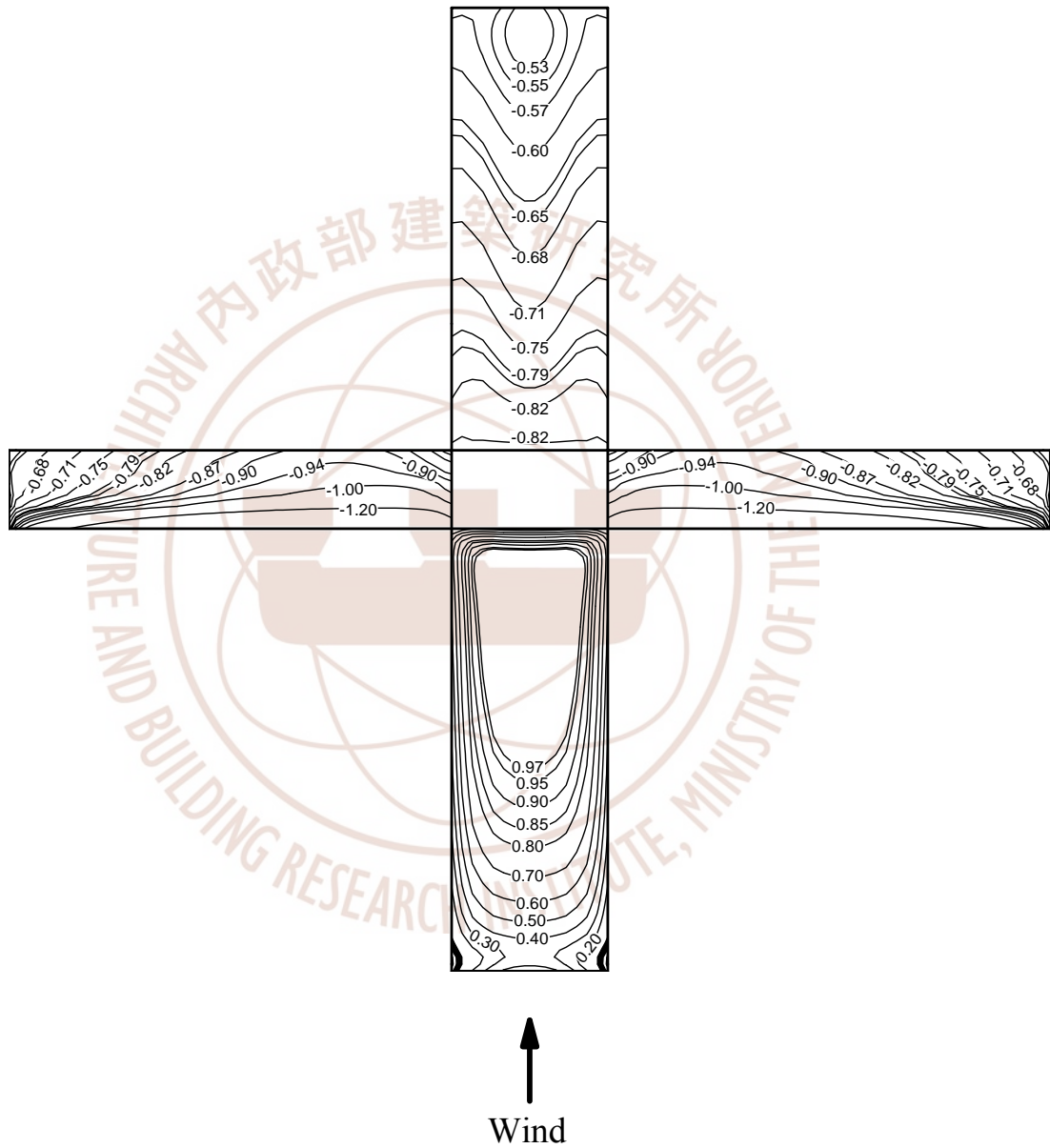


圖 4-13 Fluent(standard)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

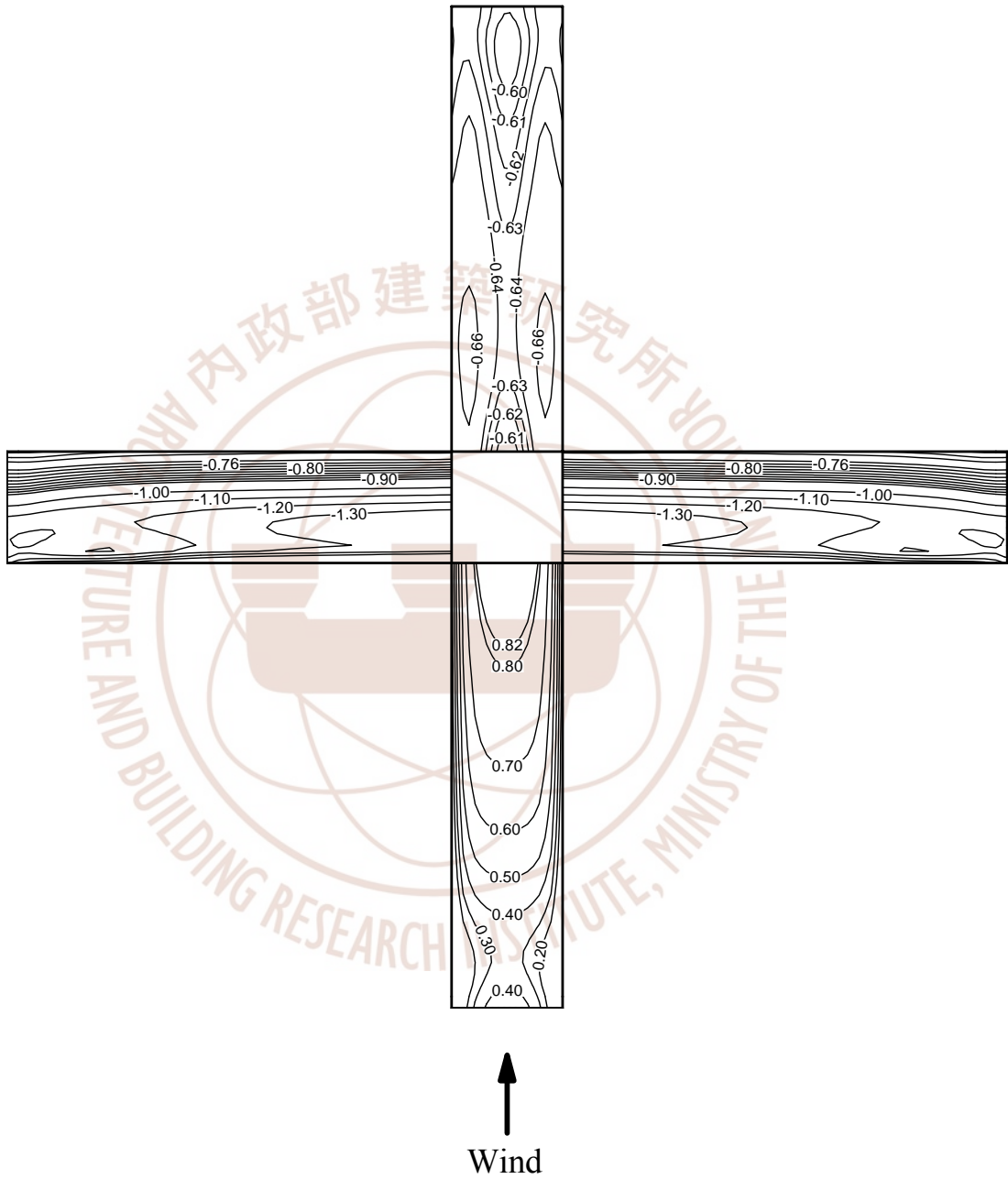


圖 4-14 Fluent(standard)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

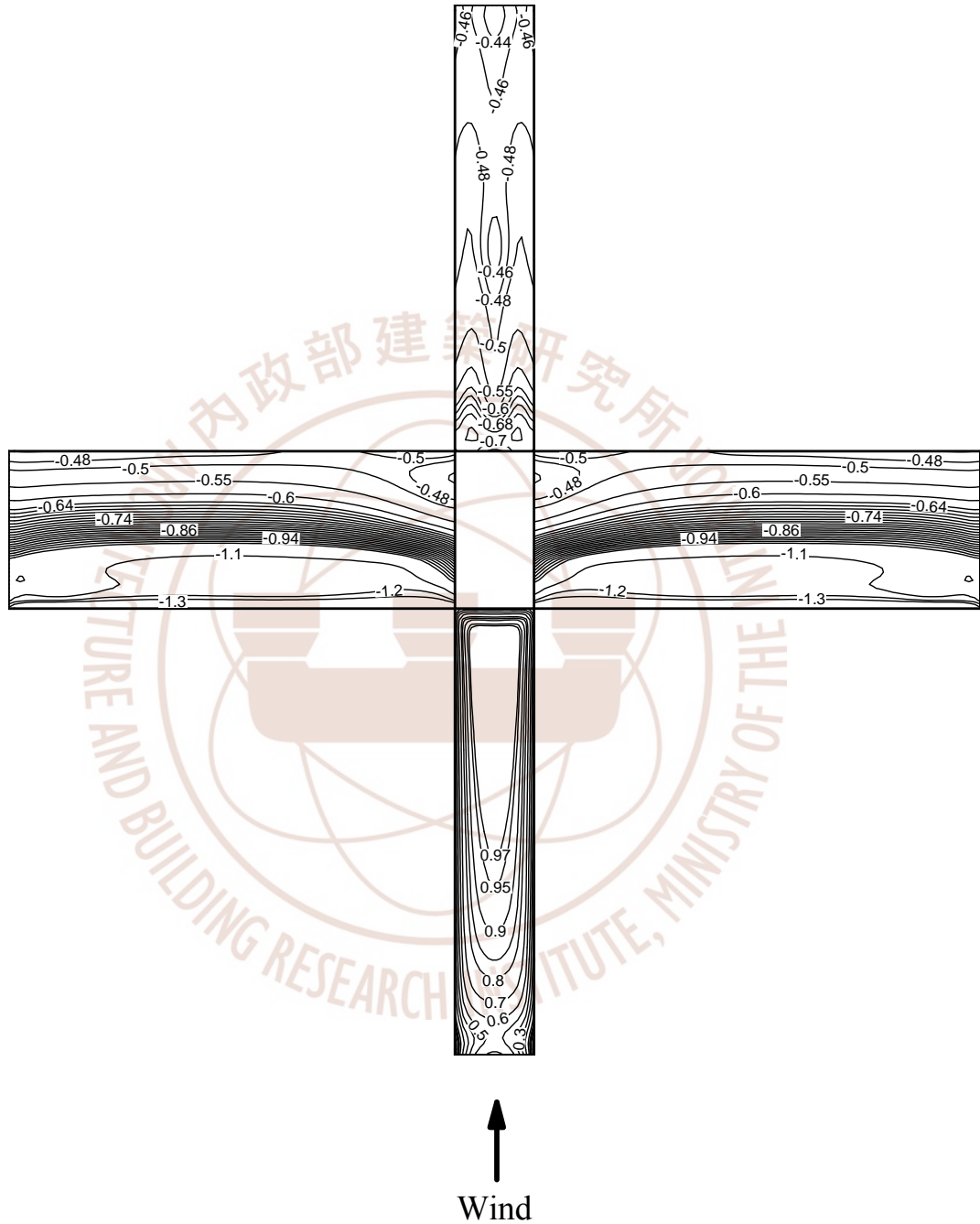


圖 4-15 Fluent(standard)模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

表 4-4 Fluent 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.49	1.15	1.37
$\overline{C_L}$	0.02	0.001	-0.001
$\overline{C_{D,eq}}$	3.52	0.62	0.88
$\overline{C_{L,eq}}$	0.03	0.001	-0.001

(資料來源：本研究整理)

表 4-5 Fluent 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.09	1.02	1.39
$\overline{C_L}$	-0.06	0.017	0.001
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	0.54	0.77
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.004	0.001

(資料來源：本研究整理)

表 4-6 Fluent 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.21	0.93	1.29
$\overline{C_L}$	-0.02	0.006	0.008
$\overline{C_{D,eq}}$	2.94	0.51	0.70
$\overline{C_{L,eq}}$	0.02	0.005	0.006

(資料來源：本研究整理)

第四節 Star-CD 軟體模擬結果

本節之數值模擬採用時間平均之 κ - ϵ 紊流模型(包括 standard κ - ϵ 與 RNG κ - ϵ)，來流動態條件之給定係本章第一節有關 κ - ϵ 數值模擬所述之方式，分別針對淺、方、深矩柱之情況進行風場預測。

一、柱體表面風壓

依據數值計算結果，圖 4-16 至圖 4-21 分別為淺矩柱、方柱與深矩柱情況柱面平均風壓係數($\overline{C_p}$)等值圖。與試驗結果對照，大致上數值模擬在柱面風壓分佈形態與變化驅趨勢上相若，但在準確性上則不如 WCF 之結果理想。

二、柱體阻/升力與柱頂等值阻/升力

表 4-7 至表 4-9 列舉了本數值模擬與試驗柱體受力係數之比較，在量化上二者間仍有相對較明顯之差異。

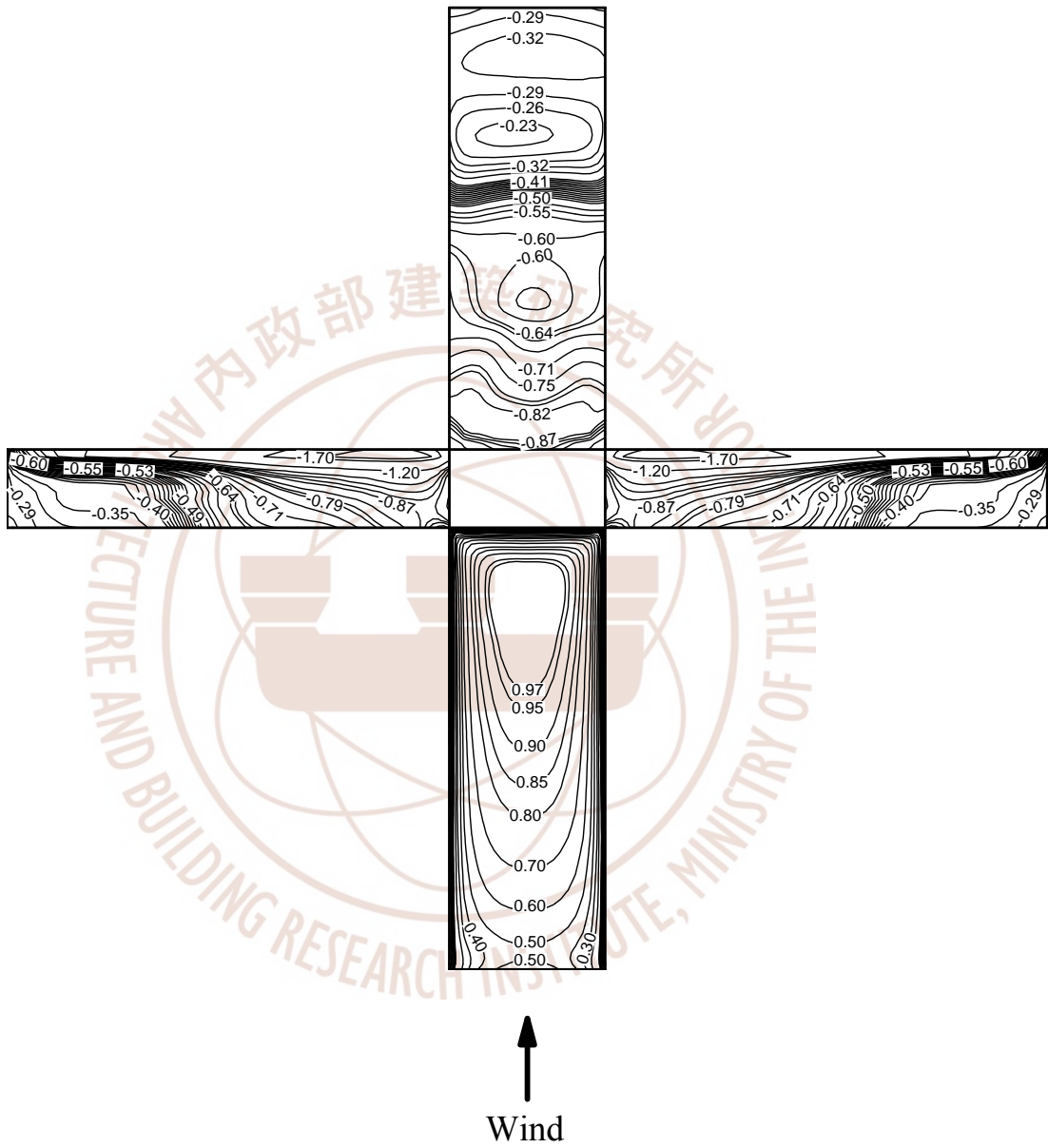


圖 4-16 Star-CD (RNG)模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

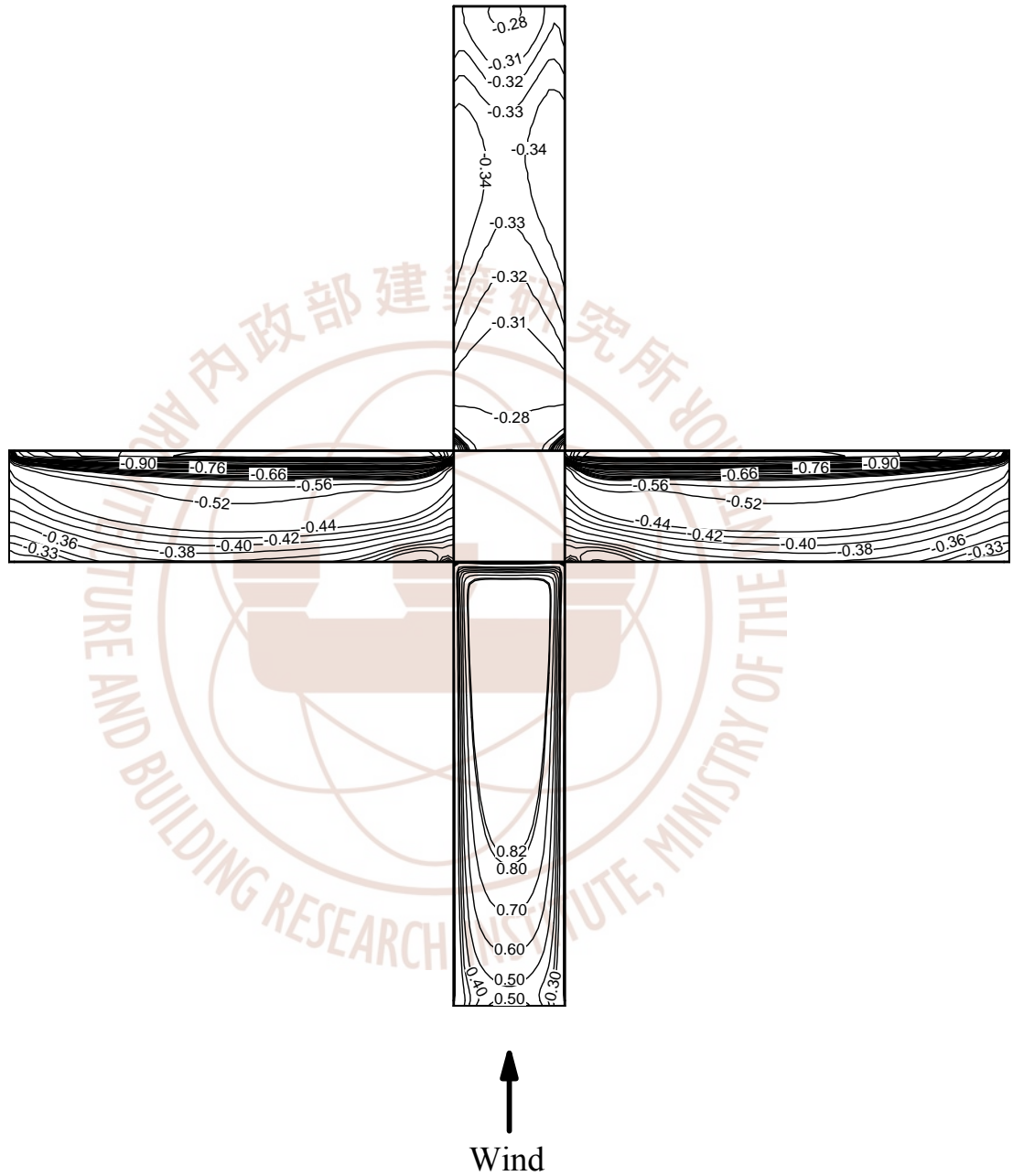


圖 4-17 Star-CD (RNG)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

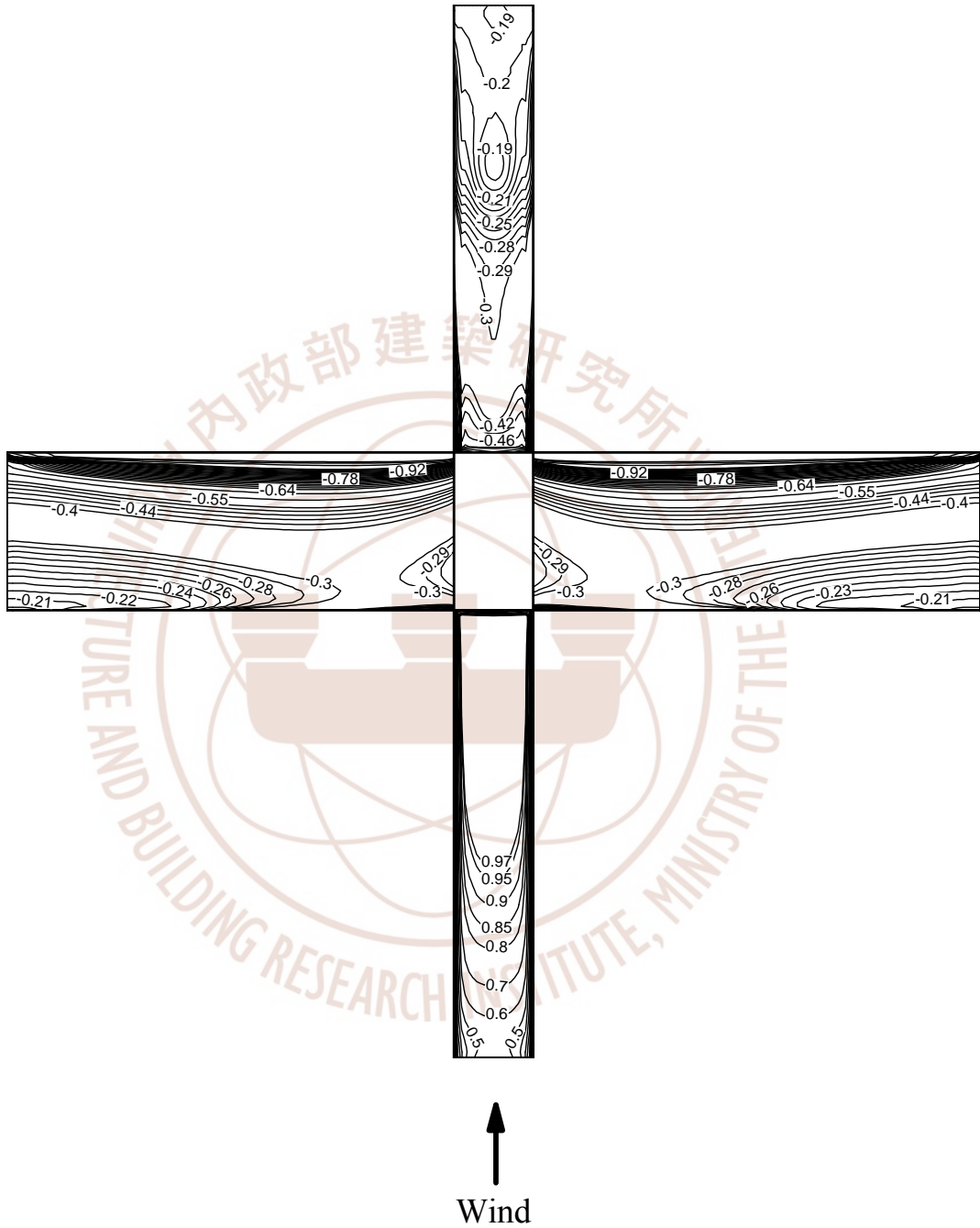


圖 4-18 Star-CD (RNG) 模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

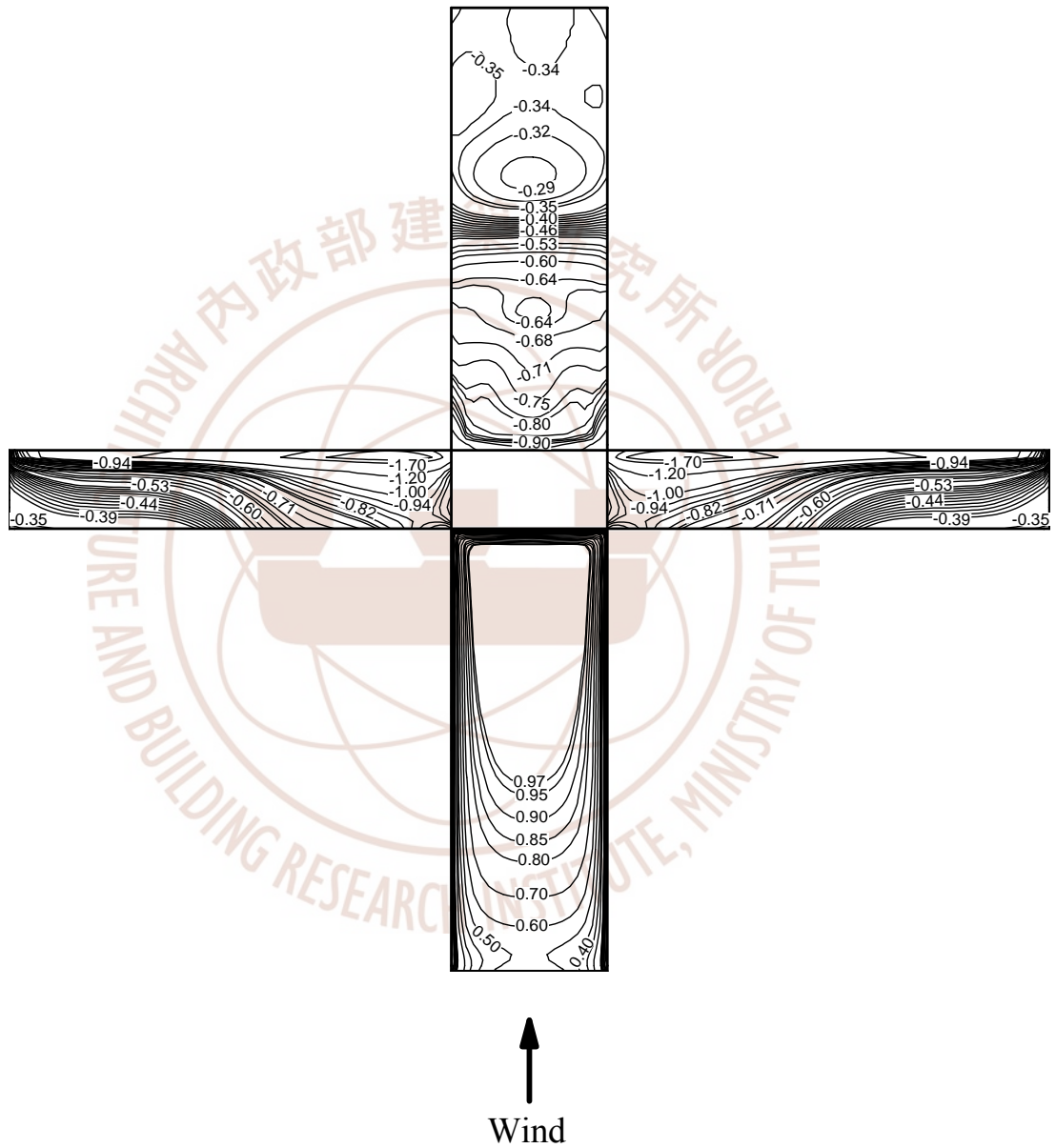


圖 4-19 Star-CD (standard) 模擬淺矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

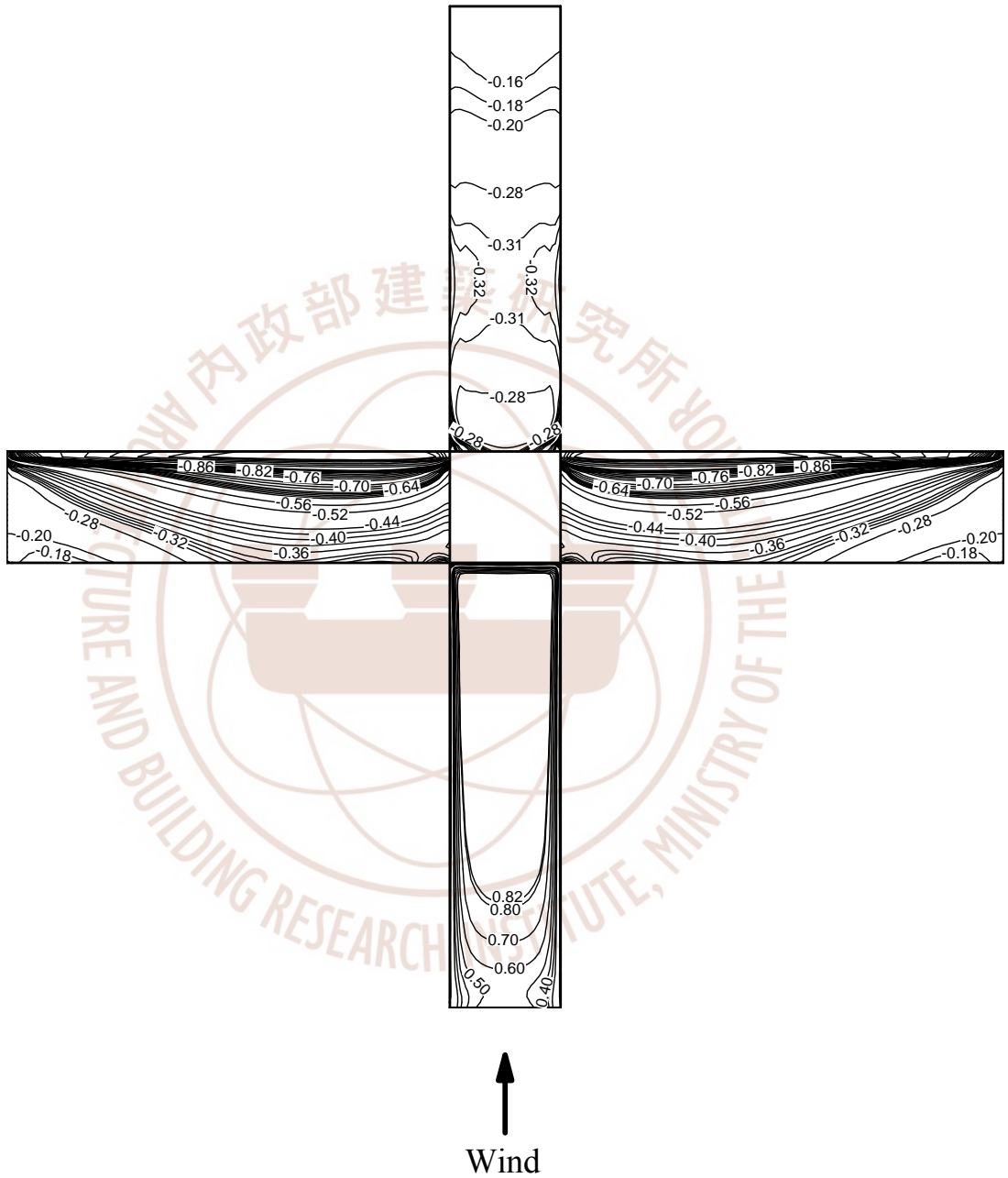


圖 4-20 Star-CD (standard)模擬方柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

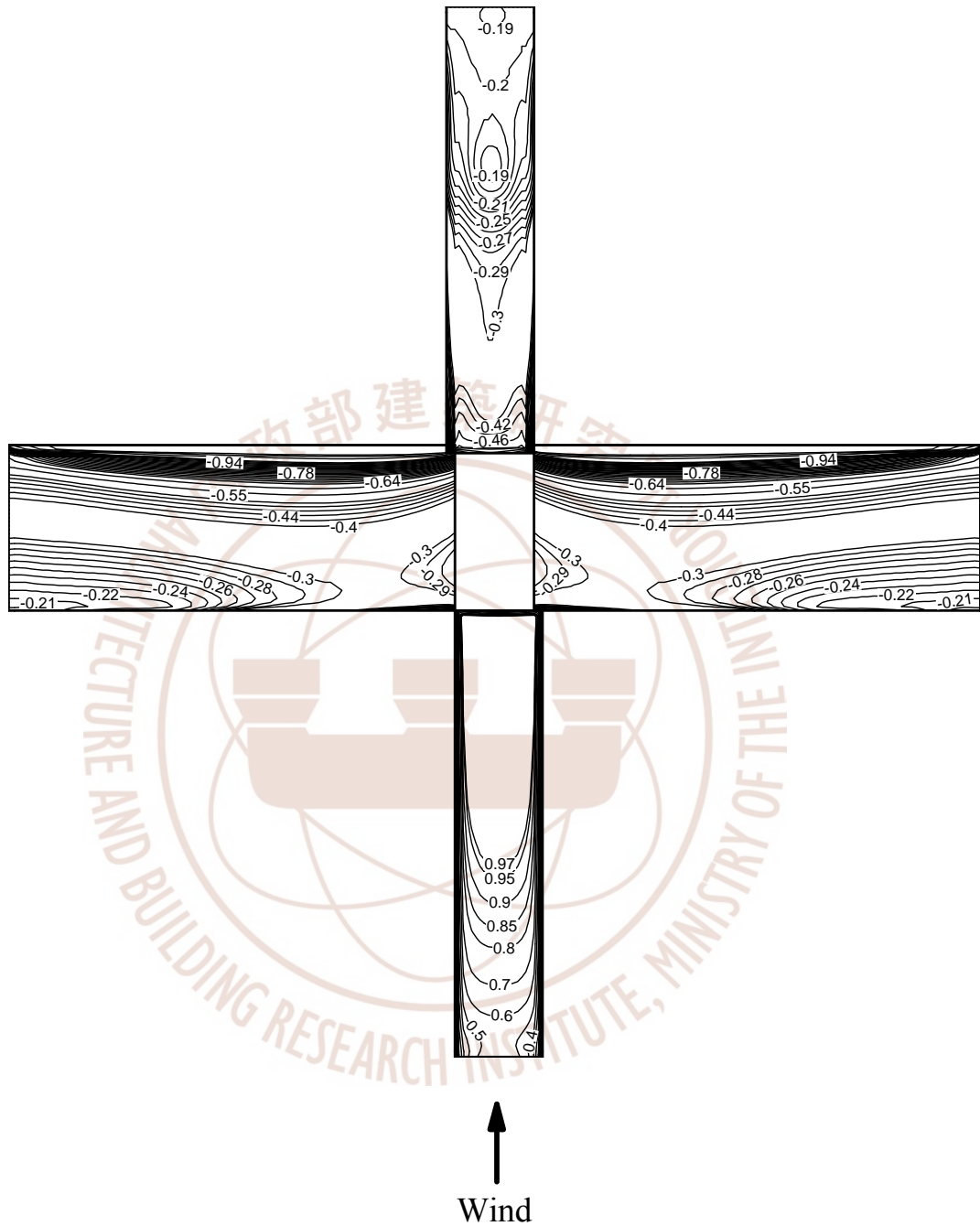


圖 4-21 Star-CD (standard) 模擬深矩柱表面平均風壓係數等值圖
(資料來源：本研究整理)

表 4-7 Star-CD 模擬淺矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.49	1.23	1.37
$\overline{C_L}$	0.02	-0.005	-0.003
$\overline{C_{D,eq}}$	3.52	0.72	0.82
$\overline{C_{L,eq}}$	0.03	-0.005	-0.001

(資料來源：本研究整理)

表 4-8 Star-CD 模擬方柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.09	1.01	1.10
$\overline{C_L}$	-0.06	0.001	0.001
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	0.55	0.61
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.001	0.001

(資料來源：本研究整理)

表 4-9 Star-CD 模擬深矩柱阻力係數與水平昇力係數統計值之比較

	試驗結果	RNG κ - ϵ 模擬結果	Standard κ - ϵ 模擬結果
$\overline{C_D}$	1.21	1.01	1.15
$\overline{C_L}$	-0.02	-0.002	0.002
$\overline{C_{D,eq}}$	2.94	0.58	0.66
$\overline{C_{L,eq}}$	0.02	-0.001	0.001

(資料來源：本研究整理)

第五節 數值模擬格網數與最小格網尺寸之檢討

為了要瞭解數值模擬格網數與最小格網尺寸對計算結果之影響並據以檢討個案模擬之採用準則，研究中以方柱情況為例，應用 WCF 軟體進行分析。

本節中模擬採用之流場計算區域仍如圖 4-1 與圖 4-2 所示。在水平截面，柱體上、下游分別取 3H 與 6H 之淨空，柱體兩側均取 2H 之淨空；在垂直截面，柱體頂側取 2H 之淨空。計算格網採用直角正交格網，並以四種疏密不同之格網系統(參見表 4-10)進行結果之比較。其中，應用格網 1 之結果業於本章第二節中敘述。

表 4-10 格網系統說明

格網編號	1	2	3	4
最小格網尺寸	0.025D	0.035D	0.05D	0.1D
格網數	520×396×346	496×368×332	448×328×320	412×296×284
側柱面格網數	36×144	24×84	18×72	8×36

(資料來源：本研究整理)

一、柱體表面風壓

依據數值模擬結果，圖 4-22 至圖 4-23、圖 4-24 至圖 4-25 與圖 4-26 分別為採用格網 2、格網 3 與格網 4 之平均風壓係數($\overline{C_p}$)與風壓係數均方根值(C_p')等值圖。與格網 1 之結果(參見圖 4-6 至圖 4-7)相較可見，當格網密度漸粗時，壓力分佈之趨勢大致相同，但在空間上的解析度則相對漸差。

二、柱體阻/升力與柱頂等值阻/升力

表 4-11 列舉了方柱阻力係數(C_D)、水平昇力係數(C_L)、柱頂等

值阻力係數($C_{D,eq}$)與柱頂等值水平升力係數($C_{L,eq}$)之統計比較結果(平均與均方根值)。誠然，理論上使用愈細密之格網會得到愈精準的數值結果，但相對地會顯著增加計算所需之時間。依表 4-11 之結果，仍以採用格網 1(格網數：520×396×346；最小格網尺寸：0.025D)為宜。

表 4-11 不同格網數值計算方柱結果比較

試驗結果		數 值 結 果			
格網編號		1	2	3	4
$\overline{C_D}$	1.09	1.17	1.14	1.09	1.06
C_D'	0.16	0.17	0.16	0.10	0.08
$\overline{C_L}$	-0.06	-0.004	-0.002	0.009	0.028
C_L'	0.31	0.31	0.30	0.28	0.26
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	2.88	2.74	2.63	2.58
$C_{D,eq}'$	0.38	0.47	0.44	0.42	0.48
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.06	0.08	0.06	0.09
$C_{L,eq}'$	0.77	0.76	0.73	0.67	0.55

(資料來源：本研究整理)

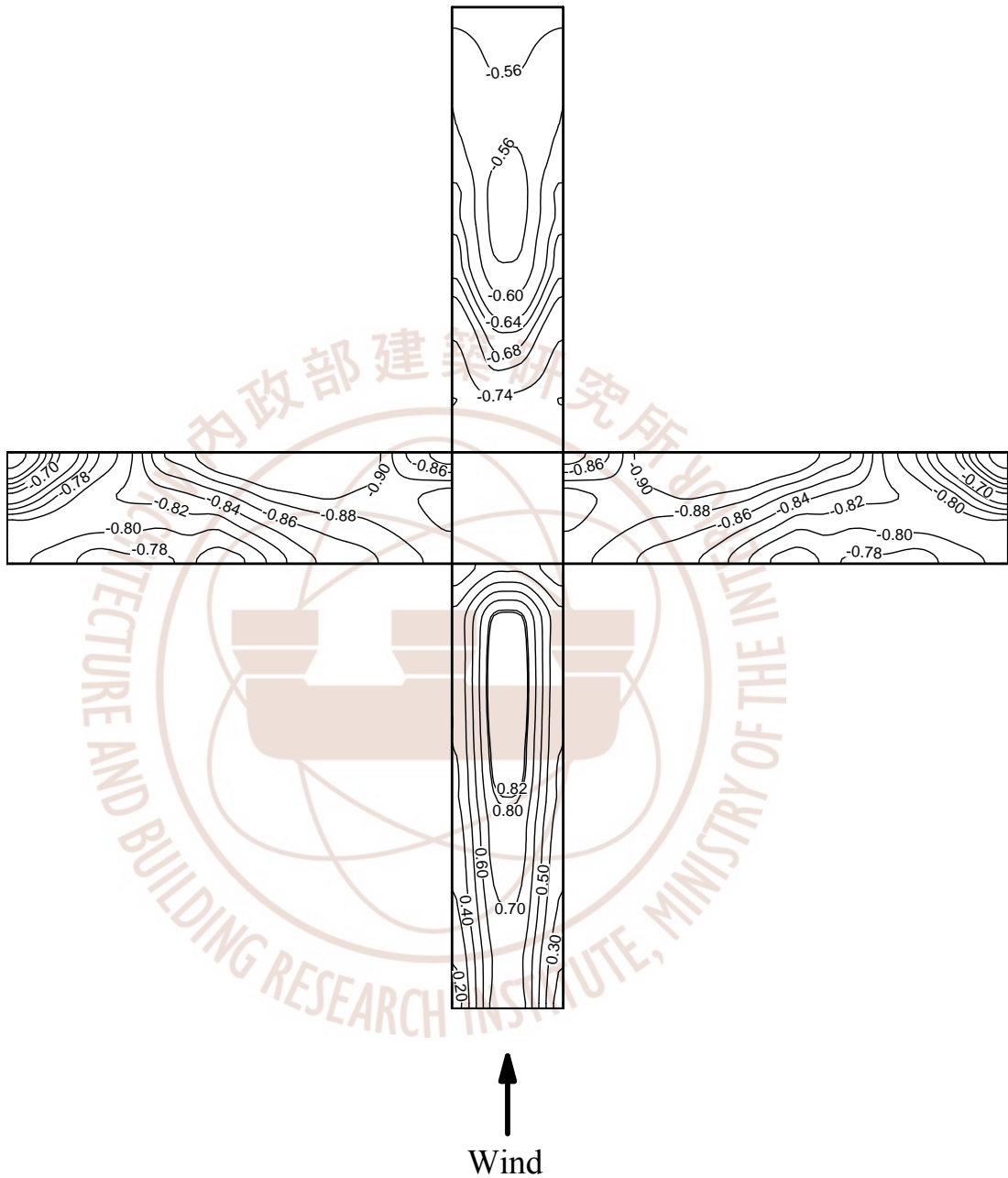


圖 4-22 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 2)
(資料來源：本研究整理)

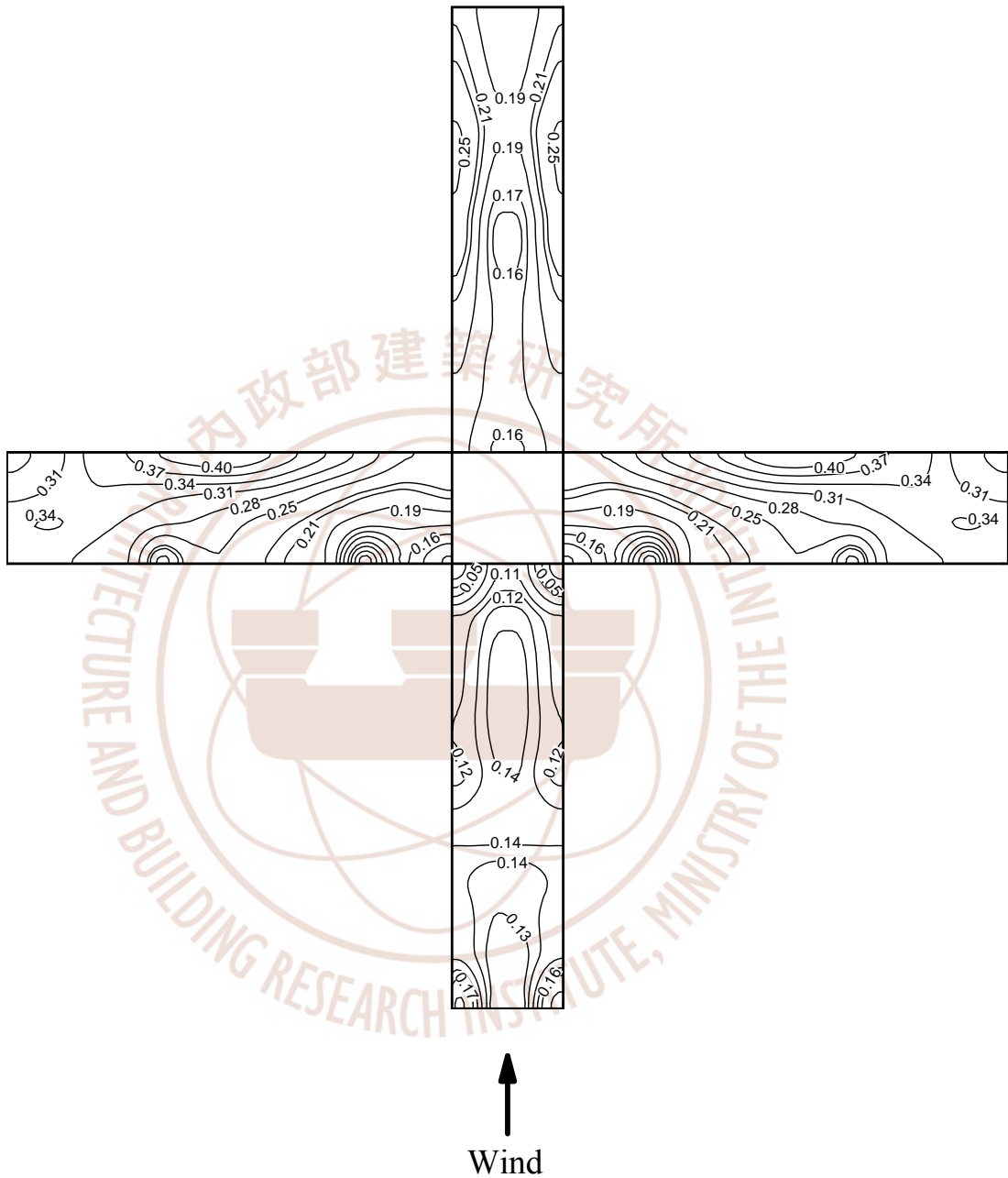


圖 4-23 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 2)
(資料來源：本研究整理)

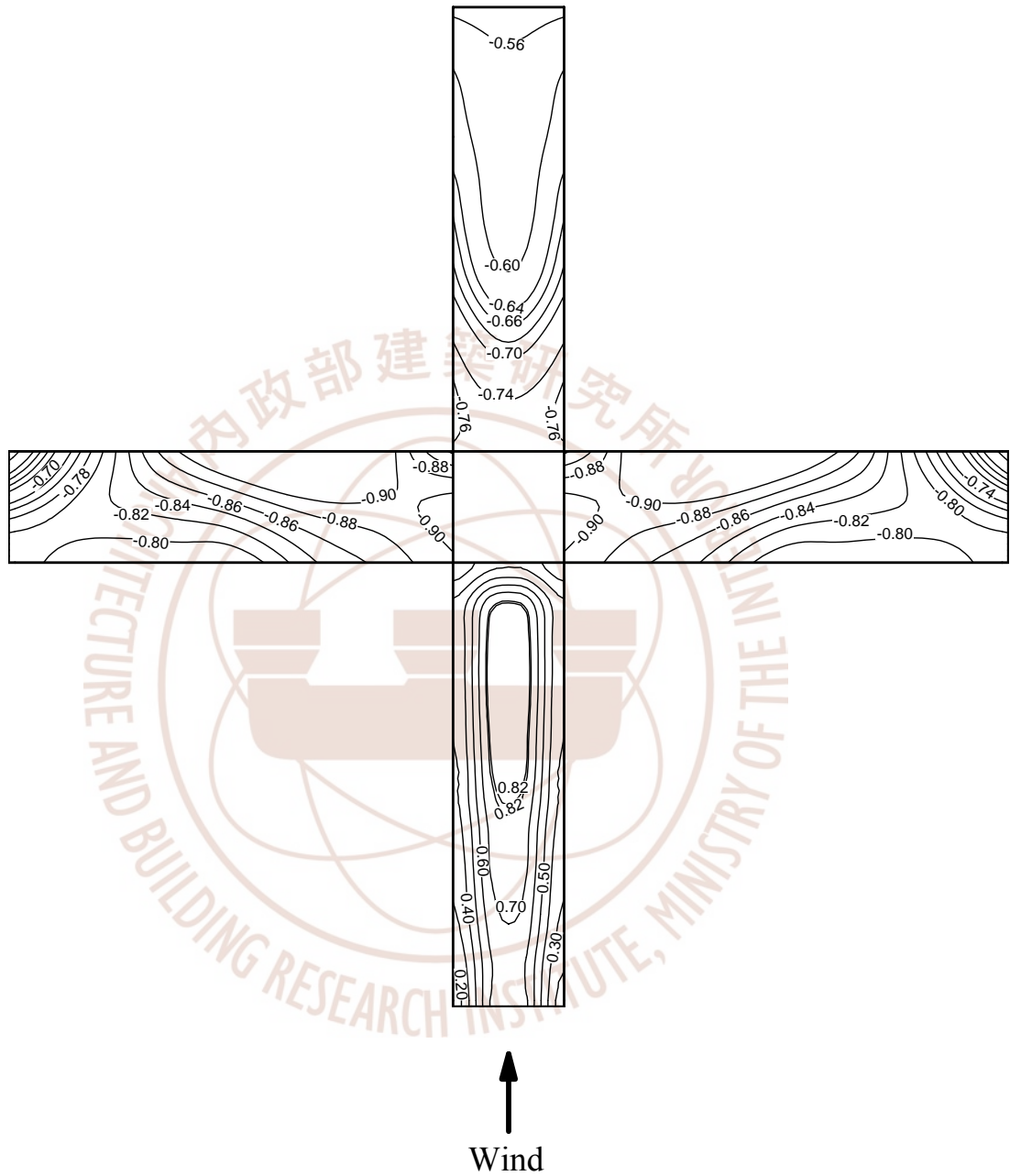


圖 4-24 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 3)
(資料來源：本研究整理)

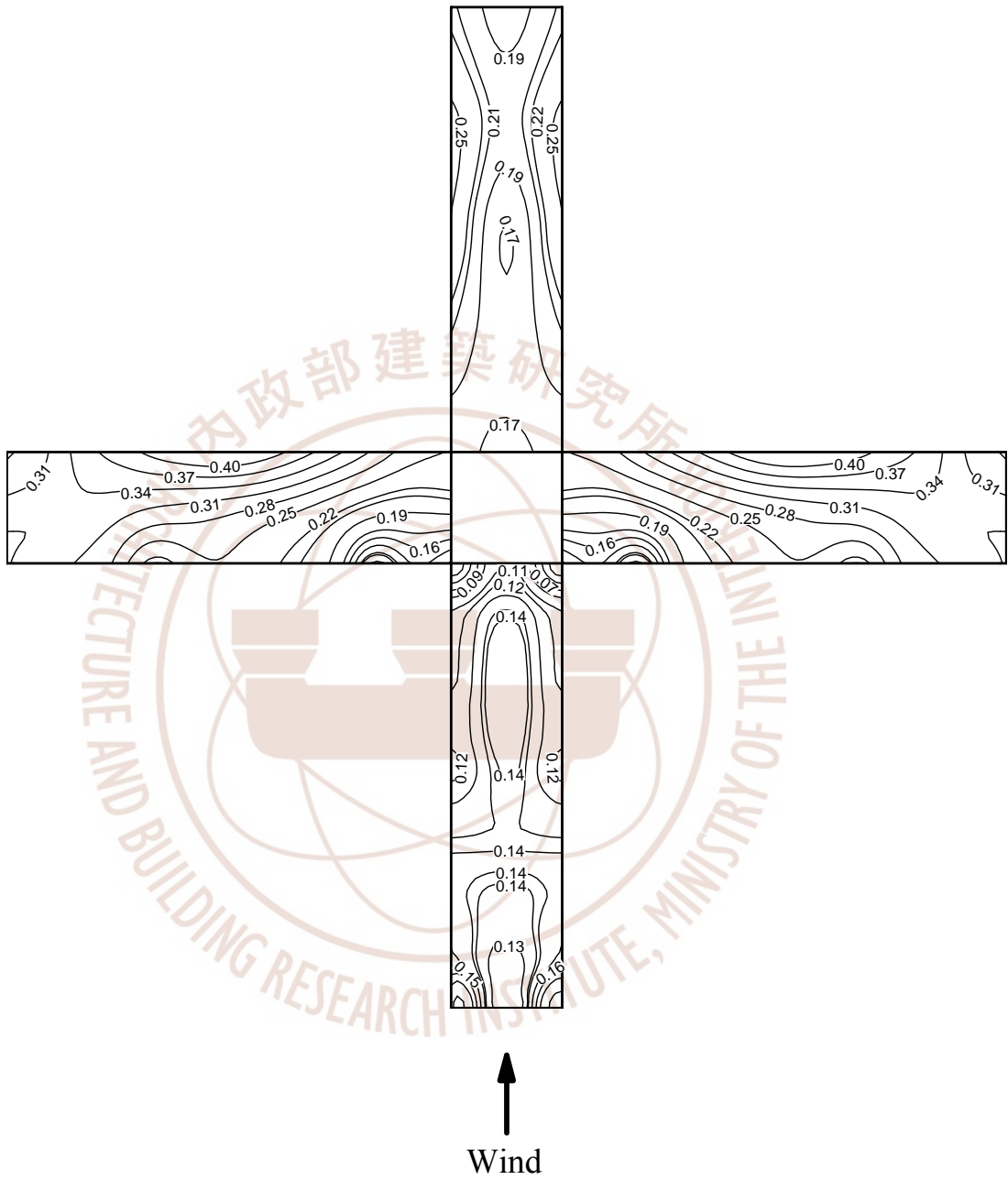


圖 4-25 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 3)
(資料來源：本研究整理)

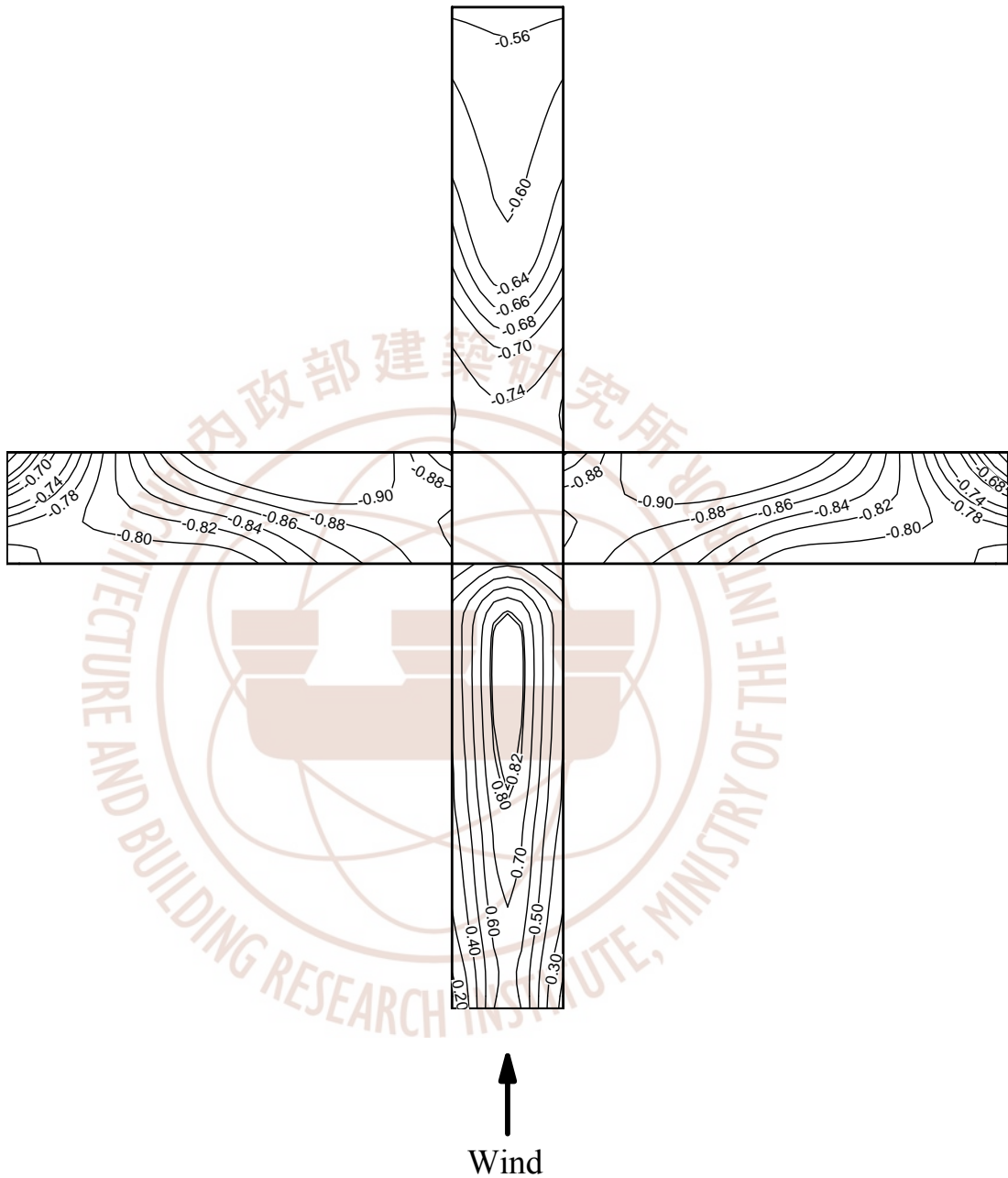


圖 4-26 WCF 模擬方柱表面平均風壓係數等值圖(格網 4)
(資料來源：本研究整理)

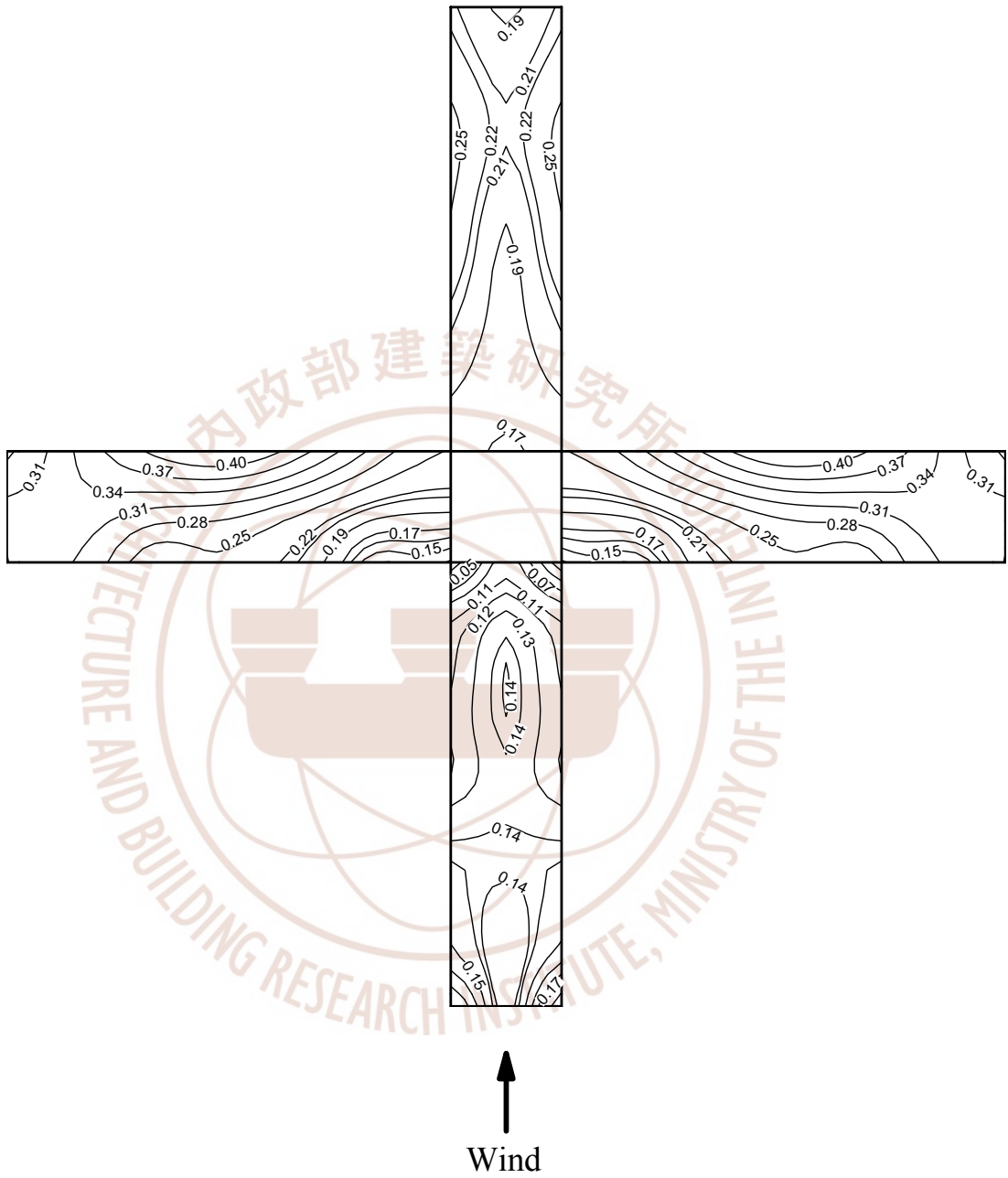


圖 4-27 WCF 模擬方柱表面風壓係數均方根值等值圖(格網 4)
(資料來源：本研究整理)

第六節 數值模擬計算區域之檢討

本節主要在探討流場計算區域對計算結果之影響，據以檢討個案模擬之採用準則，數值模擬亦以方柱情況為例，應用 WCF 軟體進行分析。

研究中以本章第二節採用之流場計算區域(仍如圖 4-1 與圖 4-2 所示；編號區域 1，柱體上游、兩側、頂側與下游之淨空分別為 3H、2H、2H 與 6H)為基準，分別改變柱體兩側、頂側與下游之淨空，繼依據數值結果進行比較。

一、改變柱體兩側淨空之影響

當柱體上游、頂側與下游之淨空保持不變的情況下，表 4-12 為三個不同柱體兩側淨空之比較結果。大體上，當兩側淨空由 2H 增加為 3H 時數值統計結果無明顯改變，但將兩側淨空由 2H 減為 1.5H 時數值統計結果之誤差則有增加之趨勢。

表 4-12 不同柱體兩側淨空數值計算方柱結果比較

試驗結果		數 值 結 果		
柱面兩側淨空		1.5H	2H	3H
$\overline{C_D}$	1.09	1.19	1.14	1.12
C_D'	0.16	0.12	0.16	0.16
$\overline{C_L}$	-0.06	-0.04	-0.002	0.001
C_L'	0.31	0.36	0.30	0.30
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	2.81	2.74	2.70
$C'_{D,eq}$	0.38	0.52	0.44	0.43
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.06	0.08	0.03
$C'_{L,eq}$	0.77	0.85	0.73	0.74

(資料來源：本研究整理)

二、改變柱體頂側淨空之影響

當柱體上游、兩側與下游之淨空保持不變的情況下，表 4-13 為三個不同柱體頂側淨空之比較結果。整體而言，當頂側淨空由 2H 增加為 3H 時數值統計結果略有改進然不顯著，然當頂側淨空由 2H 減為 1.5H 時數值統計結果之誤差則有增加之趨勢。

表 4-13 不同柱體頂側淨空數值計算方柱結果比較

試驗結果		數 值 結 果		
柱面頂側淨空		1.5H	2H	3H
$\overline{C_D}$	1.09	1.26	1.14	1.08
C_D'	0.16	0.23	0.16	0.14
$\overline{C_L}$	-0.06	-0.09	-0.002	0.002
C_L'	0.31	0.42	0.30	0.30
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	2.88	2.74	2.70
$C'_{D,eq}$	0.38	0.54	0.44	0.43
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.11	0.08	0.08
$C'_{L,eq}$	0.77	0.91	0.73	0.78

(資料來源：本研究整理)

三、改變柱體下游淨空之影響

當柱體上游、兩側與頂側之淨空保持不變的情況下，表 4-14 為四個不同柱體下游淨空之數值比較結果。由表中可見，下游淨空應至少為 6H 方能確保數值模擬結果之正確度。

表 4-14 不同柱體下游淨空數值計算方柱結果比較

試驗結果		數 值 結 果			
柱面下游淨空		3H	4H	5H	6H
$\overline{C_D}$	1.09	1.37	1.31	1.20	1.14
C_D'	0.16	0.08	0.12	0.19	0.16
$\overline{C_L}$	-0.06	0.010	0.03	0.01	-0.002
C_L'	0.31	0.22	0.24	0.29	0.30
$\overline{C_{D,eq}}$	2.56	3.03	2.96	2.81	2.74
$C'_{D,eq}$	0.38	0.27	0.31	0.45	0.44
$\overline{C_{L,eq}}$	0.05	0.04	0.04	0.09	0.08
$C'_{L,eq}$	0.77	0.56	0.54	0.69	0.73

(資料來源：本研究整理)

第五章 研究結果與檢討

第一節 研究結果

茲針對前章數值模擬之結果，逐項敘述如後：

一、風洞試驗方面

1. 現有歸仁風洞試驗室提供之量測設備具有極佳之整合度，可以提供使用者作風速與風壓之精確量度。
2. 研究中採用邊界層風況之人工粗糙物地面設置具有不錯之穩定度。在模型位置，由於紊流特性之縱向變化極微，故風況品質佳。因此，本 C 地況邊界層來流可推薦作為未來相關風洞試驗之用。

二、數值模擬方面

1. 研究中採用的頻譜法[23]已成功的製造出所需的人工模擬來流紊流風況，堪為未來類似數值模擬研究之借鏡。
2. 在高寬比 3 的方/矩柱模擬中發現，WCF 方法之預測準確度較其他兩個商業軟體(Fluent 與 Star-CD)高。
3. 檢討三個軟體在應用技術層面的問題(參見第三節)。
4. 在使用不同紊流模型進行數值模擬時得知，空間平均的 LES 方法對本研究個案結果之預測準確度較時間平均的 k- ϵ 方法高。此和 Murakami 等[2]、Murakami 與 Mochida[5]獲得之結論一致。
5. 針對本研究之個案數值模擬，有關流場計算區域之大小，柱體上游、下游、兩側與頂側淨空宜至少為 3H、6H、2H、2H(H 為柱體高度)。
6. 就研究中探討個案而言，模擬計算最小格網以 0.025D 為佳。

第二節 Star-CD 與 Fluent 軟體操作說明

研究中採用了 Star-CD 與 Fluent 兩個商業軟體進行了方柱與矩柱之風場數值模擬，其操作說明如後。至於此二軟體在應用時衍生之技術面問題，將於第三節中再予檢討。

一、STAR-CD 軟體操作說明

STAR-CD 使用的前後處理套裝軟體稱為 PROSTAR，核心解算器稱為 STAR。PROSTAR 包含了建構模型、求解與後處理所必需的各种軟體工具。

1. 建構模型

建構模型部分係採用 STAR 軟體中的 STAR-Design(詳圖 5-1)進行三維情況之模型繪製。其中，模型建構包括矩柱模型及計算域之設定。以方柱之情況為例，在計算域設定時，則將迎風面寬度設為 10cm (B)，高度為 40cm(H)，計算域上游邊界設為距柱體迎風面 3H(120cm)，下游邊界距背風面 6H(240cm)，兩側邊界距柱體側面 2H(80cm)，上方邊界距柱頂設為 2H(80cm)。STAR-Design 中有基本幾何造型(球體、矩柱體、椎體)可供選用，若定義中心座標及長、寬、高可將柱體模型及計算域繪製完成。待計算域繪製完成後，可輸出成 .iges 檔以供下後續繪製網格使用。

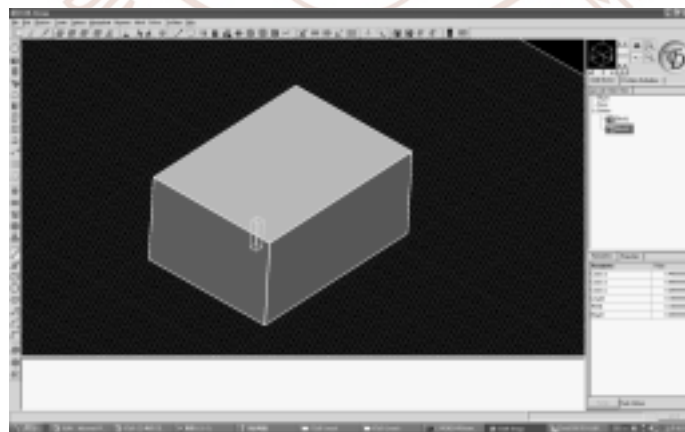


圖 5-1 STAR-Design 建構模型圖示
(資料來源：本研究整理)

2. 檢查 3D 模型及定義邊界

模型建構完成後，利用 pro-STAR/suf 軟體(如圖 5-2)，讀入前階段.iges 檔，並進行 3D 模型檢查工作，除了需確認 3D 模型是否建構完整與邊界是否完整等工作外，並應定義各邊界名稱，且進行邊界面網格之初步劃分。完成後，則輸出.dbf 檔以利後續處理之進行。

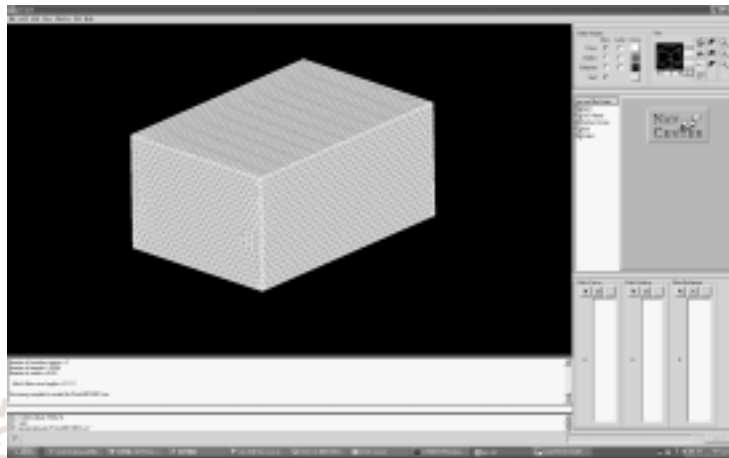


圖 5-2 pro-STAR/suf 圖示
(資料來源：本研究整理)

3. 建立網格

建立網格部分時採用 pro-STAR/amm，利用其 automesh 的功能，再依據程式指定步驟，進行定義計算域網格之工作。其步驟如後：

- (1) 首先讀入.dbf 檔案。
- (2) STAR-CD 軟體在進行網格劃分時，會在接近柱面處先定義一層近壁網格以供確認邊界是否封閉及計算壁面函數使用。研究中乃依照步驟先定義 subsurface 位置，作為近壁網格之上邊界。
- (3) 定義計算域內之網格分布。網格劃分採結構性六面體網格，採越靠近柱體周邊網格越密之原則以掌握速度梯度之變化情形。研究中依網格大小將計算域分為四層計算區域，越接近柱體處越密。
- (4) 網格條件設定完成後，pro-STAR/amm 將自動完成近壁網格及計

算域網格之劃分(如圖 5-3)。

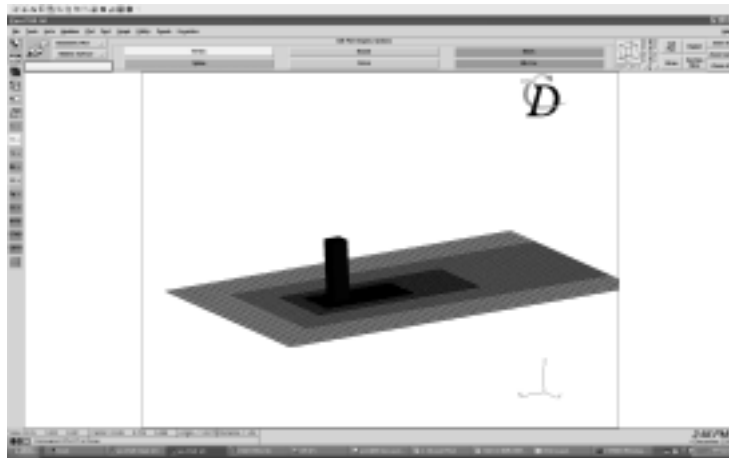


圖 5-3 pro-STAR/amm 圖示

(資料來源：本研究整理)

4. 進行計算

進行計算時，STAR 提供指引視窗，可隨著導引視窗進行設定(如圖 5-4)。其步驟如後：



圖 5-4 STAR-CD 導引視窗圖示

(資料來源：本研究整理)

- (1) 分析項目：恆定狀態(steady state)或暫態(transient)分析。
- (2) 讀入網格檔案：選擇 pro-STAR 格式之網格檔案輸入。
- (3) 設定邊界範圍：上游邊界設定為 inlet(入口邊界)，下游邊界設定為 outlet(出口邊界)，底部及矩柱壁面設定為 wall 並定義為 no slip(不滑動邊界)，兩側向及頂部設定為 symmetry 邊界。
- (4) 選擇紊流模式：研究中選擇 k-Epsilon\high reynolds 及 k-Epsilon\RNG 兩種紊流模式。k-Epsilon\high reynolds 中參數設定以預設值作為設定參數，主要參數包括 C_μ 、 $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_{\epsilon 3}$ 、 $C_{\epsilon 4}$ 與 β ，分別為 0.09、1.44、1.92、1.44、-0.33 與 0.419。另一方面，k-Epsilon\RNG 中參數設定也以預設值作為設定參數，主要參數包括 C_μ 、 $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_{\epsilon 3}$ 、 $C_{\epsilon 4}$ 與 β ，分別為 0.085、1.42、1.68、1.42、-0.387、0.4 與 0.012；近壁函數則選擇 standard wall function。
- (5) 定義邊界值：利用實驗量測結果，給定入流邊界上各位置之風速、k(turbulence kinetic energy)及 ϵ (dissipation rate)等資料。續利用程式預設表格，給定數個入流邊界座標點上之風速、k 及 ϵ 等資料，程式會將資料自動內差計算至邊界上所有網格點上(如圖 5-5)。
- (6) 流體性質：將流體性質設定為 AIR，則軟體將自動設定各項條件，包括密度、黏滯性等資料。
- (7) 離散方法：在 differencing scheme 於 STAR-CD 軟體設定為 UD(upwind differencing)。
- (8) 輸出項目：經計算後可選擇輸出項目包括風速、壓力、turbulence kinetic energy、dissipation rate、turbulence viscosity 等。

以上條件設定完成後即可進行 Star-CD 軟體運算。

The screenshot shows the 'Table Editor' window in Star-CD. It is divided into two main sections: 'Independent Variables' and 'Dependent Variables'. The 'Independent Variables' section has two columns, 'Y' and 'Z', with values ranging from -0.825 to 0.825. The 'Dependent Variables' section is a grid with 'Y-Z' as the first column and values ranging from -12.1785 to 3.12525. The interface includes buttons for 'Graph', 'Close', and 'Apply'.

Independent Variables		Dependent Variables						
Y	Z	Y-Z	0.0025	0.01315	0.0425	0.0925	0.1225	0.1625
-0.825	0.0025	-0.825	-3.12525	-3.12525	-3.12525	-3.12525	-3.12525	-3.12525
-0.78	0.01315	-0.78	-6.81172	-6.81172	-6.81172	-6.81172	-6.81172	-6.81172
-0.74	0.0425	-0.74	-7.82246	-7.82246	-7.82246	-7.82246	-7.82246	-7.82246
-0.7	0.0925	-0.7	-9.84054	-9.84054	-9.84054	-9.84054	-9.84054	-9.84054
-0.66	0.1225	-0.66	-9.71488	-9.71488	-9.71488	-9.71488	-9.71488	-9.71488
-0.62	0.1625	-0.62	-10.1933	-10.1933	-10.1933	-10.1933	-10.1933	-10.1933
-0.58	0.1925	-0.58	-10.5655	-10.5655	-10.5655	-10.5655	-10.5655	-10.5655
-0.54	0.2425	-0.54	-10.6792	-10.6792	-10.6792	-10.6792	-10.6792	-10.6792
-0.5	0.2825	-0.5	-11.1293	-11.1293	-11.1293	-11.1293	-11.1293	-11.1293
-0.46	0.3225	-0.46	-11.3529	-11.3529	-11.3529	-11.3529	-11.3529	-11.3529
-0.42	0.3625	-0.42	-11.3893	-11.3893	-11.3893	-11.3893	-11.3893	-11.3893
-0.38	0.4025	-0.38	-11.3291	-11.3291	-11.3291	-11.3291	-11.3291	-11.3291
-0.34	0.4425	-0.34	-11.0095	-11.0095	-11.0095	-11.0095	-11.0095	-11.0095
-0.3	0.4825	-0.3	-12.006	-12.006	-12.006	-12.006	-12.006	-12.006
-0.26	0.5225	-0.26	-12.1785	-12.1785	-12.1785	-12.1785	-12.1785	-12.1785

圖 5-5 Star-CD 邊界條件設定表
(資料來源：本研究整理)

二、Fluent 軟體操作說明

Fluent 使用的前處理套裝軟體稱為 GAMBIT，核心解算器與後處理係在 FLUENT 5/6 執行。

1. 建構模型及網格劃分

Fluent 軟體均使用 GAMBIT 進行建構模型及網格劃分(如圖 5-6)，而在 3D 模型繪製及計算域設定部分則與 Star-CD 相同。待 3D 模型繪製完成後，同樣在 GAMBIT 中產生網格。此時，可依據求解的需求產生部分疏密的網格形式。在邊界條件設定上，柱體的迎風面、背風面、側風面、柱頂皆設為 wall。在計算域部分：底部設為 wall，其餘如左側、右側、及頂部皆設定為對稱邊界條件(symmetry)，而在出口邊界部分，採用 outflow 邊界類型。其後則輸出一個.msh 的

檔供求解器 FLUENT 5/6 求解。

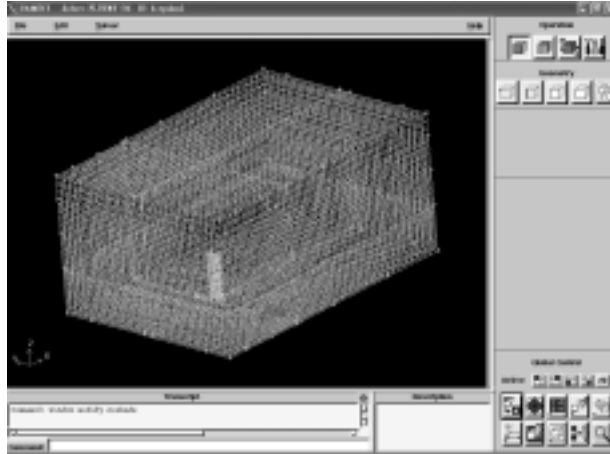


圖 5-6 GAMBIT 圖示

(資料來源：本研究整理)

由於在 GAMBIT 中只能選擇邊界條件的形式，並無法定義邊界值，其細節須在 FLUENT 5/6 設定。此外，如果沒有事先在 GAMBIT 中選定邊界條件的形式，FLUENT 5/6 會將所有邊界預設為具有 wall 之特性，極易造成求解與後處理上的麻煩。於此，待模型建構完成後，續應開啟 FLUENT 5/6，讀入 .msh 檔。

2. 檢查 3D 模型及檢核網格

儘管先前已在 GAMBIT 建構好網格，但若有需要，仍可在 Fluent 中進行網格加密的動作。本研究有關計算域內之網格分布定義，網格劃分採結構性六面體網格，並以越靠近柱體周邊處網格越密為原則，以掌握速度梯度之變化情形。研究中依網格大小將計算域分為四層計算區域，越接近柱體網格則越密。

3. 求解(solver)設定

在進行 Fluent 計算前，須進行軟體中各項設定(參見圖 5-7)。

(1) 分析項目： steady state 或 unsteady 分析。



圖 5-7 Fluent 求解條件設定

(資料來源：本研究整理)

(2) 選擇紊流模型(k- ϵ model)

本研究於 Fluent 軟體中選用 k-Epsilon\ Standard 及 k-Epsilon\RNG 兩種紊流模型。在 k-Epsilon\ Standard 中 Fluent 參數預設值 C_μ 、 C_1 、 C_2 分別為 0.09、1.44 與 1.92，而在 k-Epsilon\RNG 中參數預設值 C_μ 、 C_1 、 C_2 分別為 0.0845、1.42、1.68，近壁函數則選擇 standard wall function(參見圖 5-8)。



圖 5-8 Fluent 紊流模型參數設定視窗

(資料來源：本研究整理)

(3) 定義邊界值

在來流邊界上研究中依據風洞試驗量測結果找出依高度變化的迴歸式，再利用 FORTRAN 程式，輸入來流邊界上所有網格座標點相應之風速、 k 及 ε 等資料作為來流邊界值(參見圖 5-9)。

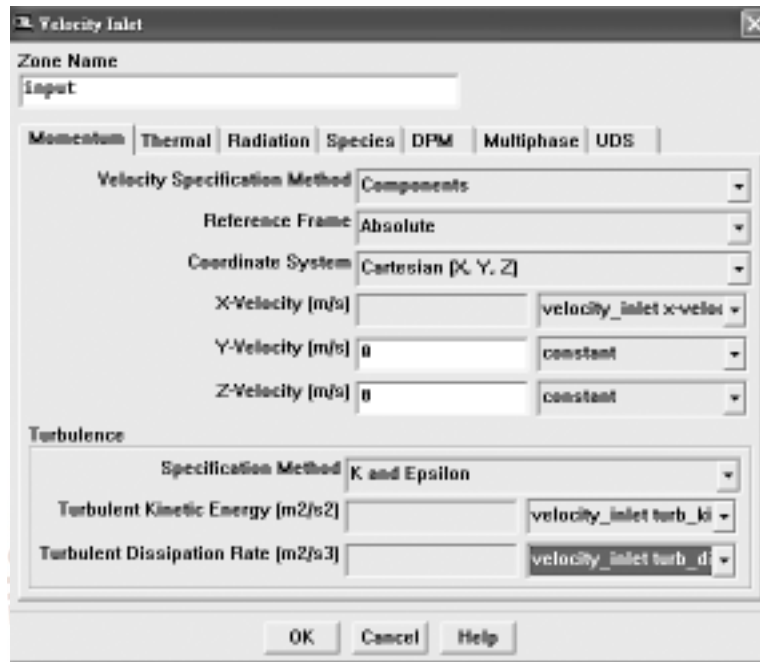


圖 5-9 Fluent 來流邊界值設定視窗
(資料來源：本研究整理)

(4) 流體性質

針對研究個案之特性，將流體性質設定為 AIR，則軟體將自動設定各項條件，包括密度、黏滯性等資料。

(5) 數值模擬離散方法

於 Fluent 中係採用二階上風法。

(6) 輸出項目

Fluent 本身可做後處理，計算完成後可將每個時間點資料(包括風速、壓力、turbulence kinetic energy、dissipation rate、turbulence viscosity)輸出，並做整理。

第三節 問題檢討與對策

研究過程中發現若干軟體應用技術層面的問題，條列敘述如後：

一、WCF 軟體風場計算耗費時間

由於 WCF 軟體係自行發展者，為原程式(source code)之形式，乃使用包含 8 個中央處理器整合而成的簇型個人電腦(PC cluster)進行數值計算。由於程式中採用 LES 紊流模型較為耗時，在研究初期每一計算個案需約 20 天方能完成。然值程式測試與發展的階段，數值計算個案數量多，確實造成相當程度之困擾。

研究中已將程式作了若干改進以加速成果之獲取，包括：

1. 將風場計算自原來的顯式(explicit)改成隱式(implicit)解法，提高非恆定流場計算中時間增量(time increment)的上限，以減少計算疊代(iteration)次數。
2. 運用動態記憶，加快運算速度。
3. 採用向量化(vectorization)的平行處理(parallel treatment)。

二、Fluent 與 Star-CD 軟體在應用層面的不便性

研究中 Fluent 與 Star-CD 兩個軟體主要專注在 $k-\varepsilon$ 紊流模型的應用，故其在計算耗費時間的問題上較 WCF 輕微。然而，Fluent 與 Star-CD 並非以原程式的形式供使用者應用，也導致了一些硬體與介面上的問題，包括：

1. 硬體記憶容量的限制

兩個商業軟體的運算能量取決於計算機的記憶容量，儘管使用目前的 HP ProLiant BL460c 工作站級的刀鋒伺服器計算機從事數值計算，在計算格網數目(mesh size)上仍有其限制。

2. 程式中預設值可能導致錯誤的結果

在商業軟體程式中常給定一些預設(default)值或條件，以避免結

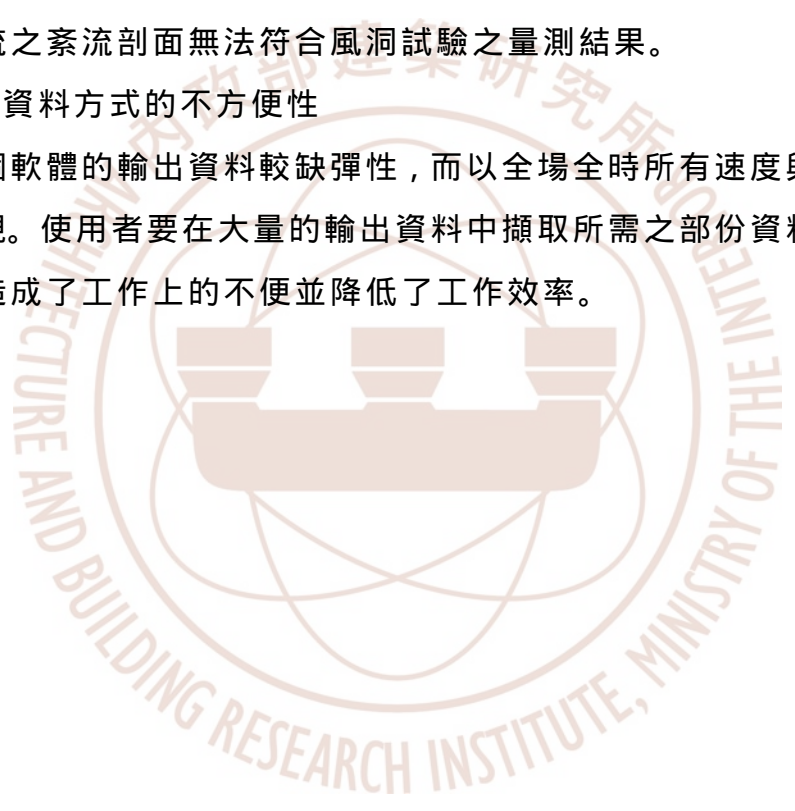
果的發散(divergence)。若使用者未能仔細檢查各預設條件是否適用於既定之情況，可能會獲得不正確的計算結果。研究中經多次計算演練，對此二軟體之操作業以熟稔，獲得不正確計算結果的情況已不再發生。

3. 入流邊界紊流風速條件之給定

兩個軟體在入流邊界條件的給定上具有固定的輸入模式，但在針對本研究中入流邊界紊流風速條件之給定上則難以適用，導致數值模擬中來流之紊流剖面無法符合風洞試驗之量測結果。

4. 輸出資料方式的不方便性

兩個軟體的輸出資料較缺彈性，而以全場全時所有速度與壓力之形態呈現。使用者要在大量的輸出資料中擷取所需之部份資料進行後處理，造成了工作上的不便並降低了工作效率。



第四節 工程實務上可接受計算流體動力學模擬準則的建議

依據本研究獲得之經驗，謹提出工程實務上可接受計算流體動力學模擬準則之初步建議如後：

1. CFD 在分析建築鄰近風場與評估結構受風效應上扮演之角色

與風洞試驗相比，在分析上計算流體動力學在人力、物力與時效上具有優勢，具有重覆性，且沒有因雷諾數(Reynolds number)引致之誤差。同時，所有變數全時、整場資料之獲得有利於系統化與細部之檢視與評估。研究中發現，在一個單純地況與建築外形的問題中，隨著採用軟體與方法之不同，其得到的數值模擬結果優劣互見。就技術面而言，應用 CFD 以分析建築鄰近風場與評估結構受風效應是可行的。然而，分析者數值分析之能力需經肯定，使用之軟體應有足夠之可信度，最好部份或局部變數能有試驗數據或理論值之佐證，以確保分析結果之正確性。隨著計算硬體、軟體與處理技術之快速發展，CFD 方法應用之成熟度當日益精進。至少，現階段 CFD 之應用可以配合風洞試驗進行分析，達到相輔相成之效。

2. 紊流模型之選擇

無論是依據本研究或相關研究(Murakami 等[2]、Murakami 與 Mochida[5])之結果，針對屬於鈍體流(bluff body flows)類型之建築風場問題，使用 LES 之模擬結果明顯較 $k-\varepsilon$ 佳。在工程實務分析上，應採用 LES 為宜。

3. 計算區域之選取

當主體建築之鄰近區域存在不可忽略之地物或地形變化(如山區、峭壁、懸崖、河谷等)時，CFD 之計算區域應比照風洞試驗之選定原則。若經專業認可的判定，鄰近區域地物或地形變化在可忽略之前提下，依據本研究之結果，主體建築上游、下游、兩側與頂側淨空

應至少為 3H、6H、2H、2H(H 為主體建築高度)。

4. 計算格網之採用

應用 CFD 分析建築鄰近風場與評估結構受風效應時，應證明或經專業認可所採用計算格網之細密度已足以提供正確之結果(或格網細密度引致之誤差在可接受範圍內)。以本研究應用 LES 之結果為例，最小計算格網之尺寸應不超過 0.025D。

5. 數值模擬邊界條件之給定

應用 CFD 分析建築鄰近風場與評估結構受風效應時，數值計算採用之邊界條件應合理並經專業認定。入流邊界條件之給定需符合現地大氣風況，此與風洞試驗之考量相同；應用 LES 進行分析時，亦應在風速擾動量上作合理之給定。

6. 數值模擬時間增量

針對非恆定風場情況之模擬，時間增量(time increment)應小，以確保數值結果之收斂度，並需證明此時間增量已不致造成物理現象失真之結果。

7. 數值模擬運算真時

在數值模擬運算中，為獲得正確之統計結果，其真時(real time)應足夠長，此需經數值結果之證明。



第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究以大氣邊界層中平坦空曠地形上單一方/矩柱為基準問題，先以風洞建築模型試驗量取風場與柱體之風力係數作為數值模擬結果驗證之基本資料；繼針對不同數值模式之計算結果，比較其間之差異性與優缺點，進而評估其適用性與可行性。最後，再依據數值模擬結果與風洞實驗數據之比對與探討，初步研擬工程實務上可接受的 CFD 模擬準則。現階段獲得的結論計有如後七項：

- 一、建立了高寬比為 4 的方/矩柱情況風洞試驗量測資料庫，除了提供計畫中後續數值模擬來風紊流風速入流輸入條件外，亦為數值預測準確度驗證之依據。
- 二、彙整 Fluent、Star-CD 與 WCF 計算流體動力學相關軟體之理論基礎、解析能力與適用條件。
- 三、發掘 Fluent、Star-CD 與 WCF 數值方法在解析本研究課題時衍生的問題，其中獲得的經驗將作為相關數值模擬工作之參考。
- 四、採用三個計算流體動力學紊流模式(standard $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 與 LES)模擬分析建築結構所承受之動態風力，比較評估柱體受風效應預測之準確性。
- 五、初步完成數值模擬結果與風洞實驗數據之比較驗證與探討。
- 六、針對數值模擬中計算區域之大小、計算格網數與最小格網尺寸進行數值模擬結果進行比較。
- 七、初步提出工程實務上可接受的計算流體動力學模擬準則。

第二節 建議

本研究建議事項分述如後：

建議一

增加應用數值模式分析風工程建築研究相關問題：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：行政院其他相關部會

研究中使用之微可壓縮流風場模擬軟體具有不錯之精確度，依據專家諮詢會議中委員之意見，建議爾後能多提供相關 CFD 應用之研究案，以更進一步發揮本 CFD 軟體之效益。

建議二

於建研所風洞試驗室增設 CFD 實驗室或研究團隊之配置：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：行政院其他相關部會

國際知名的大型風洞試驗室多有 CFD 實驗室或研究團隊之配置，除了在試驗上提供服務能量外，亦配合數值計算以建立數值風洞的機制，在風場分析上達到相輔相成之功效。建議未來歸仁風洞試驗室應作 CFD 實驗室或研究團隊設置之規劃，以更提昇本試驗室之研究能力。

附錄一 期中會議意見回覆

審 查 意 見	回 覆
<p>一、內政部營建署 陳威成先生：</p> <p>1. 有關 CFD 分析方法於建築物耐風設計之應用，請提供具體條文供未來規範修訂之參考。</p> <p>二、王亭復技師：</p> <p>1. 本研究案似在以風洞試驗結果，驗證以 Star-CD、Fluent 二商業軟體及 WCF 自行開發軟體之 CFD 分析結果，一般商業軟體應已經過理論、實驗及使用驗證，且應為多功能之通用軟體，可靠性較強，而自行研發者則可能受限人力、財力、使用群較少及限於特定模型，故較不受使用者歡迎。若欲自行發展 WCF，除應於同條件下與 Star-CD 及 Fluent 相互驗證各種模型分析結果，並與風洞試驗結果作一比較，方可成為同等級(Level)之軟體。</p> <p>2. 以研究案而言，為使 CFD 應用之經驗傳承，於使用 Star-CD、Fluent 之過程，宜予要點註記。而自行研發之 WCF，則應先針對建研所風洞實驗室所能適用之試驗模型，如方形、矩形、圓形體等先予驗</p>	<p>除遵照審查委員意見外，本計畫將於期末舉行專家座談，在綜合各方意見後，初步提出對未來規範修訂有建設性之具體建議。</p> <p>依照委員之建議，期末報告中業於第三章「風洞試驗」中針對淺矩柱、方柱與深矩柱三個基準個案分別進行試驗量測，並以試驗結果作為比較驗證之依據。其後，繼於第四章「數值模擬」中分別進行三個案柱體受風效應之模擬。比較結果顯示，WCF 研究型軟體在預測之準確度較高，而另兩個商業軟體(Fluent 與 Star-CD)之應用則相對地較不理想。</p> <p>基本上，三個軟體均係針對流場預測而設計，故應適用本研究三個案之風場模擬。其中，Fluent 與 Star-CD 為商業軟體，並不包含原程式(source code)，除了既設之功能外，其他則難以擴充。WCF 為主持人自行發展之研究</p>

<p>證，並發展其前、後處理程式，以增加軟體本身之親和力及使用效率。</p> <p>三、胡總監銘煌：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 針對預期成果第 3 項，方柱模型試驗結果，柱體表面風壓在”迎風面”之預測風壓分布結果不錯，但在”側面”及”背風面”仍待進一步改進。2. 針對預期成果第 4 項，在研擬工程實務上可接受之 CFD 模擬準則時，對最高居室樓層側向加速度控制方面，宜適當加註說明。 <p>四、陳遠斌教授：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 頗符合需求。 <p>五、蕭教授葆義</p> <ol style="list-style-type: none">1. 期中報告內容皆已符合預期成果。2. 未來期末報告評估 3 個 CFD 方法與紊流模式之預測能力精準度，建議補充說明係依何種條件(比如方柱)下比較所獲得之結果。	<p>型軟體，多年來亦朝著增加軟體本身親和力及使用效率之目標持續努力。</p> <p>經改進，WCF 軟體在柱體表面風壓分佈之預測上已獲致不錯之精確度。然而，Fluent 與 Star-CD 之預測結果相對地較不理想。</p> <p>本研究主在針對柱體之氣動力(風場)效應進行模擬，既定工作中未包括柱體結構動力或氣彈力方面之探討。有關最高居室樓層側向加速度控制方面，建議宜於與柱體氣彈力之相關研究中再予著墨。</p> <p>謝謝指正。</p> <p>謝謝指正。</p> <p>已依照委員意見，於期末報告中敘述評估依據之條件。</p>
--	--

附錄二 期末會議意見回覆

審 查 意 見	回 覆
<p>一、王技師亭復：</p> <p>1. 本案除使研究人員增加相關軟體之使用熟悉度外，建議在進行數值模擬分析及風洞實驗結果之比較後，能與現行耐風設計風載重之順風向、橫風向風力及扭轉向扭矩等之各因子進行比較，最好各因子代表符號均能與風力規範一致。</p> <p>2. 建議能詳細說明各商業軟體於使用時之應注意事項。</p> <p>二、胡總監銘煌：</p> <p>1. 本案數值模擬之研究仍僅止於與風洞實驗結果進行比較探討，如何提供工程界應用仍有待未來繼續努力。</p> <p>三、張教授景鐘：</p> <p>1. 由於計算機的快速發展，以及風力計算理論與方法的進步，CFD的確是未來趨勢，本計畫相當有前瞻性與價值。</p>	<p>本研究主要針對 CFD 在建築研究風力分析之準確度進行探討，除了將 CFD 目前與未來在風工程應用之角色上予以界定外，亦初步研擬了工程實務上可接受的計算流體動力學模擬準則。由於是屬於基礎研究，其著眼點與實務設計觀點相異。因此，故檢視的風力變數項目與現行規範中使用設計因子的定義並不相同。</p> <p>感謝委員之建議，已於報告第五章第二節中增補相關內容。</p> <p>誠如委員所述，本研究因屬基礎研究，既定目標設定於 CFD 在工程分析上目前角色與未來展望之探討。未來應朝著提供工程界應用的目標繼續努力。然而，隨著計算機軟硬體性能的快速提昇，相信 CFD 在不久的將來，定能有實質上的貢獻。</p> <p>謝謝委員對本案目標之肯定。</p>

<p>2. CFD 軟體程式之取得與執行操作人員之素養，是未來推廣發展之最大因素，建議本案未來能朝向大眾化與普及化努力。</p> <p>四、蕭教授葆義：</p> <p>1. 報告內容皆已達成預期成果所列項目。</p> <p>五、本所曹副研究員源暉：</p> <p>1. 期末報告書 p.27 圖 3-12 及 p.31 圖 3-16 中，建築模型側面及背面之平均風壓係數值偏低，請檢核是否有誤。</p> <p>2. 針對各 CFD 軟體之應用，除於成果報告中顯示比較計算結果之異同與優劣外，建議能再詳加說明軟體操作、分析過程應注意事項及應用心得等，俾便於經驗傳承。</p>	<p>主持人對委員的建議深表贊成，期許建研究在未來能積極支持與本目標相關之研究。</p> <p>謝謝委員對本案成果之肯定。</p> <p>感謝委員之細心指正。研究團隊再度至歸仁風洞進行試驗後發現，前次針對淺矩柱與深矩柱表面風壓量測時因皮托管之管線有漏氣之情形，導致所有壓力量測點參考壓力之失真，造成了表面風壓平均與擾動係數分佈不合理之結果。相應之圖 3-12、3-13、3-16 與 3-17 業已更正。另一方面，因為阻力與水平升力之獲得與參考壓力無關，故對相應之受力係數並無影響。經比對，重覆試驗而得的阻力與水平升力係數與初稿中之結果幾無差異。定稿報告第三、四章中表 3-1、3-2 與表 4-1 至 4-9 所示之受力係數試驗值，亦一併更換為最新之試驗結果。</p> <p>感謝委員之建議，已於報告第五章第二節中增補相關內容，並於第三節中敘述應用心得。</p>
--	--

附錄三 專家諮詢會議意見回覆

內政部建築研究所委辦計畫專家諮詢會議

計畫名稱：建築結構所受風力之數值模擬與風洞實驗比較驗證研究

日期：97年12月10日下午2時

地點：國立中興大學土木環工大樓328室

主持人：方富民

出席專家：

台灣省土木技師公會 吳泳信 技師 吳泳信

高雄大學 陳振華 教授 陳振華

逢甲大學 鄭仙偉 教授 鄭仙偉

逢甲大學 廖清標 教授 廖清標

建國科技大學 彭思顯 教授 彭思顯

中興大學 黃玉麟 教授 黃玉麟

專 家 意 見	回 覆
<p>一、高雄大學 陳振華教授：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 較之於風洞試驗中壓力點分佈，使用 CFD 進行計算時由於使用較密之格網，其結果在空間上之解析度高於實驗。因此，當 CFD 應用於建築物風場分析時，對風洞試驗結果有極大之互補性。 2. 使用風洞試驗與 CFD 進行高樓風力分析時各需時多久？是否未來在進行高樓風力分析時有可能僅使用 CFD 而不採用風洞試驗？ <p>二、逢甲大學 鄭仙偉教授：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 儘管 CFD 之應用目前尚需配合實驗結果之驗證，但具有極佳之遠景。期盼建研所未來能繼續支持類似之研究案，以提昇 CFD 在風力分析之能力。 <p>三、台灣省土木技師公會 吳泳信技師：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 規範中顯示，建築物之風力在橫風向多大於順風向，其原因為何？ 	<p>誠如委員所述，CFD 在空間上之解析度的確高於實驗結果，且無縮尺效應。經 CFD 與風洞試驗結果驗證無誤後，將可提供更詳細與完整之資料，以供建築物風力分析之用。</p> <p>視建築物造型、地況之複雜程度而異，一般而言，應用 CFD 在工作時程上較為減省。至於需要多久時間方能完成風力分析的工作則須視工作執行單位之經驗與能量而定。依目前之情況，應用 CFD 進行高樓風力分析尚未普遍地被一般工程界接受，但在諸多學術研究中已見其案例。</p> <p>主持人深具同感，將積極地向建研所反應。</p> <p>當風吹襲建築物時，由於渦散之作用，導致建築物所受之風力呈非恆定之結果。其中，在引起結</p>

<p>2. 本研究中並未考慮建築物結構特性(如勁度、週期)之影響。</p> <p>四、逢甲大學 廖清標教授：</p> <p>1. 在提昇個人電腦計算速度方面，採用 PC Cluster 與平行處理確為有效之途徑。配合目前個人電腦硬體之發展，建議配合 Core 2 Quad 之推出，採用 OMP 之平行處理方式，將更能增進電腦計算之速度。</p> <p>五、中興大學 黃玉麟教授</p> <p>1. 本案中應用 WCF 方法而得之數值模擬結果與風洞試驗頗為一致。較之於其他兩個商用 CFD 軟體，明顯地優越。建議未來能藉本研究型軟體之長，再作持續性之相關研究，並在本國風力規範之改進上有所助益。</p> <p>六、建國科技大學 彭思顯教授</p> <p>1. 未來應可考慮其他外型建築物</p>	<p>構物振動的風力擾動量上，橫風向明顯大於順風向。由於規範中所考量的重點為建築物因振動而引致之舒適性，即以風力擾動量作為依據，故在橫風向之風力往往大於順風向。</p> <p>研究中專注於環境風場之探討，不包括因建築物振動而引致之互制效應，故未考慮建築物之結構特性。</p> <p>本研究中目前使用雙 CPU 主機板之聯結之 PC Cluster 配合 MPI 之平行處理。未來將依委員之意見持續改善電腦設施，以因應需求。謝謝委員之建議。</p> <p>謝謝委員之鼓勵，也期盼未來建研所能提供相關之研究案，以更進一步發揮本 CFD 軟體之效益。</p> <p>確如委員所述，現行耐風設計規</p>
---	--

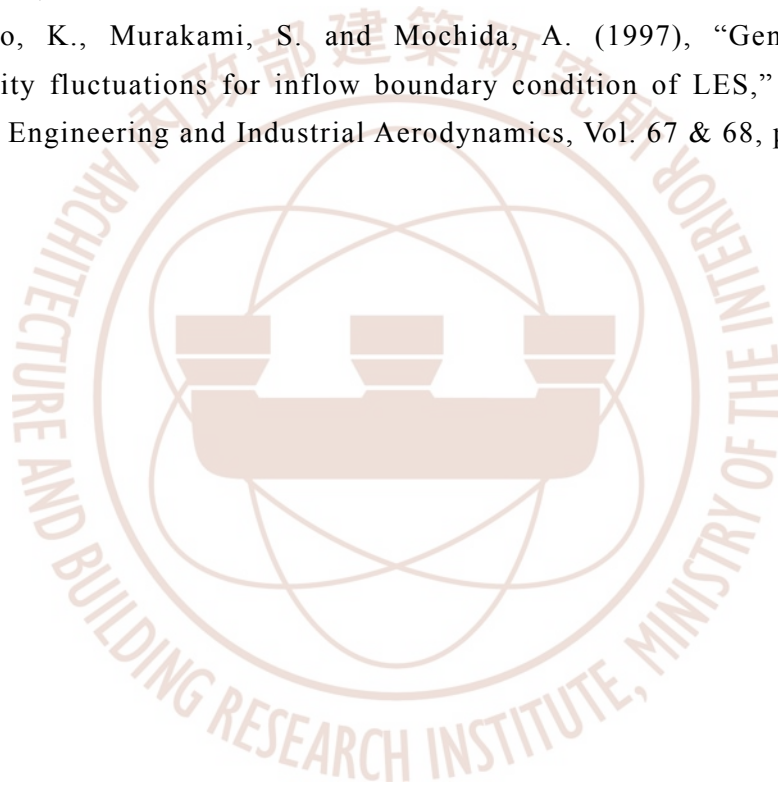
<p>之分析。</p> <p>2. 目前有許多商用 CFD 軟體，並經認證，是否可用來進行風力分析？</p>	<p>範中亦有其他外型建築物之相關規定。未來希望能有持續性的研究案，以支持相關問題之探討。</p> <p>本研究以較具國際知名度的兩套商用 CFD 軟體 (Fluent 與 Star-CD) 進行風力分析，結果顯示其在風場形態的預測方面尚可接受，然在結果之精確度方面並不理想。</p>
--	--

參考書目

- [1] 「建築物耐風設計規範及解說」, 2004, 內政部建築技術審議委員會, 建築物耐風設計規範審查專案小組。
- [2] Murakami, S., Mochida, A., Hayashi, Y. and Sakamoto, S. (1992), “Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by $k-\epsilon$, ASM and LES,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 41-44, pp. 2841-2852.
- [3] Delaunay, D., Lakehal, D. and Pierrat, D. (1995), “Numerical approach for wind loads prediction on buildings and structure,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 57, pp.307-321.
- [4] Mikkelsen, A.C. and Livesey, F.M. (1995), “Evaluation of the use of the numerical $k-\epsilon$ model Kameleon, for predicting wind pressures on building surface,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 57 pp. 375-389.
- [5] Murakami, S. and Mochida, A. (1995), “On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54, pp. 191-211.
- [6] Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. and Mendes, P. (2005), “Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93 pp. 741-756.
- [7] Fang, F.M. (2006), “Some CFD applications in bluff-body aerodynamics,” *Symposium on Future Development for Environment Restoration and Disaster Reduction Technologies*, Taichung, Taiwan, pp. 79-84.
- [8] Fang, F.M., Li, Y.C. and Liang, T.C. (2003), “CWE development in Taiwan,” *The 2003 International Wind Engineering Symposium*, Tansui, Taiwan, pp. 107-122.
- [9] Rodi, W. (1997), “Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71, pp. 55-75.
- [10] Blocken, B., Stathopoulos, T. and Carmeliet, J. (2007), “CFD simulation

- of the atmospheric boundary layer: wall function problems,” *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 238-252.
- [11] Song, C.C.S. and Yuan, M. (1988), “A weakly compressible flow model and rapid convergence methods,” *Journal of Fluids Engineering Transactions ASME*, Vol. 110, pp. 441-455.
- [12] Germano, U., Piomelli, P. and Cabot, W.H. (1991), “A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model,” *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 1760-1765.
- [13] Fang, F.M. and Farrell, C. (1996), “Turbulent boundary layer characteristics along the centerline of a contracting wall,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 61, pp. 131-151.
- [14] Fang, F.M., Hsieh, W.D., Jong, S.W. and She, J.J. (1997), “Unsteady turbulent flow past solid fence,” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, pp. 560-565.
- [15] Fang, F.M. (1997), “A design method for contractions with square end sections,” *Journal of Fluids Engineering, Trans ASME*, Vol. 119, No. 2, pp. 454-458.
- [16] Fang, F.M. and Wang, D.Y. (1997), “On the flow around a vertical porous fence,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67-68, pp. 415-424.
- [17] Fang, F.M., Ueng, J.M. and Soong, P.S. (1999), “Dynamic response of an elastic fence under wind action,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 469-478.
- [18] Fang, F.M., Chen, J.C. and Hong, Y.T. (2001), “Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square wind tunnel contraction,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 247-262.
- [19] Fang, F.M., Ueng, J.M. and Chen, J.C. (2002), “Numerical investigations on the along-wind response of a vibrating fence under wind action,” *Wind and Structures*, Vol. 5, No. 2-4, pp. 329-336.
- [20] Fang, F.M., Li, Y.C., Liang, C.C. and Chen, J.H. (2005), “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.
- [21] Fang, F.M., Li, Y.C., Liang, T.C. and Chen, C.C. (2007), "Investigation on the aerodynamic instability of a suspension bridge with a hexagonal cross-section," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 30, No. 6, pp. 1009-1022.
- [22] Chen, C.C., Fang, F.M., Li, Y.C., Huang, L.M. and Chung, C.Y. (2008), "Fluid Forces on a Square Cylinder in Oscillating Flows with Non-zero Mean Velocities," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. (in print)
- [23] Kondo, K., Murakami, S. and Mochida, A. (1997), "Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67 & 68, pp. 51-64.







建築結構所受風力之數值模擬與風洞實驗比較驗證研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：方富民、陳若華、陳鉅昌、林金賢

出版年月：97 年 12 月

版(刷)次：初版

ISBN：978-986-01-6905-5 (平裝)