1498

RRPA87012136 (4.P)

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

橫風向與扭轉向強制振動方柱體之氣動力及尾跡研究

Aerodynamics Forces and Wake of a Square Prism Oscillated in Transverse and Torsional Modes in an Uniform Flow

計畫編號：NSC 87-2211-E-032-024
執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日
主持人　：盧博堅 淡江大學水資源及環境工程所

一、中文摘要

高層結構物受風力作用後，所造成之橫風向與扭轉向振動會促使結構物產生複雜的氣動力現象，本研究將針對橫風向振動與扭轉向振動間發生耦合現象時結構物所產生之氣動力現象做深入之探討。透過風洞之氣動力模型，考慮純橫風向、純扭轉向及橫風向加上扭轉向之振動，藉由改變振動與扭轉之頻率及扭轉角度，來探討當耦合現象產生時，結構物所產生之氣動力變化狀況。
關鍵字：橫風向振動，扭轉向振動，氣動力，氣動力阻尼。

Abstract

Wind load, a very important factor that contributes to the stability and durability of a structure, could cause an interesting effect on high-rise buildings. Such an effect takes place when the frequency of across-wind vibration exerted on the high-rise building coincides with the frequency of torsional vibration, resulting in a complex aerodynamic phenomenon. This study was focused on the coupling of across-wind and torsional vibrations of a two-dimensional square prism. The experiments were carried out by placing the small-scale aerodynamic model in a laboratory wind tunnel that is capable of generating both across-wind vibration and torsional vibration. From the results of wind tunnel tests, the relationship between the aerodynamic coefficients and a set of variables including vibrating frequency, torsional frequency, and torsional angle, was established.

Keywords : Across-wind vibration , Torsional vibration , Aerodynamics , Aerodynamic damping .

二、計畫緣由與目的

今日之都市發展，超高建築為必然之趨勢質輕的高層結構物對風力作用具有高敏感度。風力對整體建築結構的位移反應大致可區分為順風向、橫風向及扭轉向三類。順風向位移反應來自逼進流場直接作用。至於橫風向及扭轉向反應主要來自氣流流經結構體的前緣銳角處後所產生的分離剪力層在結構體後兩側交替形成的渦漩及其分離的渦散作用 (vortex shedding)。此種渦散現象會對結構體產生週期性的擾動力，導致結構體橫風向及扭轉向的振動，而結構體的振動亦會反過來影響週期性的渦散作用。所以，結構體的振動與渦散作用間形成互為因果關係的交互作用。此交互作用在共振時達到最大，同時對建築結構體的影響亦達到最大。此種振動與流場間互制現象的探討大部份的作者均單獨探討橫風向振動及扭轉向的振動的機制[1-7]，至於橫風向振動與扭轉向振動間發生耦合(coupling)現象時，其複雜的氣動力行為以及尾跡的特性文獻上則甚少提及

[8]。本文的目的便在於以風洞之氣動力模型實驗，同時考慮了橫風向之振動與扭轉向之振動，藉由改變振動與扭轉之頻率與扭轉角度，來觀察當耦合現象產生時，結構物表面之壓力變化及其尾跡的狀況，並加以深入探討。

三、實驗設置與方法

本研究係使用淡江大學結構氣動力風洞實驗室來進行一系列的風洞模擬實驗。風洞之實驗段長18.0m×寬2.0m×高1.5m。風壓實驗所用之方柱模型以壓克力黏合製作，方柱尺寸 100cm(L)×8cm(D)×8cm(B)，模型長寬比(aspect ratio)為 12.5。圖 1(a)為昇力模型，壓力孔開於方柱模型軸向(spanwise , L)中心點，於方柱兩側等距各鑽八個壓力孔，並接上 PVC 軟管。量測昇力係數時，將兩側各管線分別接入兩個八孔合成器(manifold)作氣相平均(pneumatic averaging)，此合成器有一風壓輸出端，將上下兩面合成器之輸出端分別接於兩個壓力轉換器(pressure transducer)，計算此兩個壓力轉換器之差值，則可量測該層所受之昇力。

扭力模型如圖 1(b)所示，在模型中央柱體四面上，每面各分成相等兩半邊，每邊各由 10 個壓力孔組成，壓力孔的分佈是考慮其轉距。由距離中心遠近各為 4,3,2,1 個壓力孔，此 10 個壓力孔接入一個十孔合成器。四面中不相連接的 4 個半邊十孔合成器之輸出管線再接入一個四孔合成器。其輸出端再分別接上兩個壓力轉換器，計算此兩個壓力轉換器之差值，則可量測該層所受之扭力。

實驗模型固定於強制振動扭轉基台，可做橫風向之強制振動及扭轉向之強制轉動，強制振動扭轉基台可藉由控制器對振動及扭轉頻率做變化調整，振幅比亦可調整。實驗用木製端板，高 150cm、長 130cm、厚 1.3cm，固定於風洞之天花板及底部，兩端板之間的間距為 100cm。

本實驗利用熱膜探針（hot film probe）量測逼近流場風速及尾跡流場速度，也就是使用 TSI 定溫式一維熱膜探針於模型前方量測逼近流場風速；於方柱模型上方 0.5D、後方 1D 量測尾跡流場之變化。模型的橫風向及扭轉向之位移量測，藉由兩組置於模型基部之雷射測距儀，量測而得。

此次實驗風速控制於 6m/s，相對應之雷諾數(Re = UD/ν)為 3.15×10^4。實驗量測段之紊流強度分別為 0.75%(S 流場)及在上游加裝網格之 10%(B 流場)。本實驗中之阻塞比約為 4 %。強制橫向振動振幅(A)以迎風面寬度(D)予以無因次化，得強制振幅比為 0.125、0.1、0.05。強制振動頻率(fv)控制在 6Hz～11Hz，以逼近流場風速（U=6m/s）及模型迎風面寬度（D=0.08m）無因次化，可得約化速度（reduce velocity , Ur = U/D·fv ）範圍在 6.82～12.5。扭轉向振動將以柱體橫切面中心為軸作往返振動。扭轉向的振動頻率(f_θ)為橫風向振動頻率之 1.1 倍(fv/f_θ=1.1)，扭轉角度(θ)分別為 1°及 3°。

四、結果與討論

圖 2(a)顯示當單獨橫向振動在鎖定範圍內時，即渦散頻率等於振動頻率，此時週期性渦散頻率由強制振動主導，振動所導致的流體捲增會加強週期性渦散的強度。由於紊流強度增加使得更多的流體捲增入剪力層中，渦漩強度減弱。

單獨扭轉時隨扭轉頻率的增加，扭轉角度 3 度時，由扭轉效應所引發的擾動量使 S 流場與 B 流場之 C_L'值隨扭頻而有所增加，S 流場 C_L'之變化又較 B 流場來的大。而扭轉加上橫向振動方柱於 S 及 B 流場之各振頻條件下 C_L'值相較於單獨橫向振動所量測得之 C_L'值並無明顯的變化。

圖 2(b) 顯示在 S 流場，氣動力阻尼係數先由零值上升達一極大值後即急速下降為負值極小，當氣動力阻尼係數值為正值時，代表系統之整體阻尼減小，而結構物

在此氣動力條件下會有大位移之反應，此種狀態屬於氣動力不穩定區(aerodynanic instability)，相反的當氣動力阻尼為負值時，系統之阻尼會增大，而會抑制結構物的位移，此種狀態屬氣動力穩定區。

圖 2(c) 氣動力勁度係數在共振點處皆為負數之極值，且隨振幅比增大其絕對值愈大，然而真實結構物之勁度相當大，陳[8]指出氣動力勁度係數對結構物之影響只有 1%，故氣動力勁度對實際結構物影響甚小，有時甚至將其忽略。

在B流場之狀況下，當紊流強度增加時氣動力阻尼係數正值部份完全消失，其所代表的意義是：紊流會消減氣動力阻尼係數，抑制結構之位移，使氣動力效應所產生的位移反應進入穩定區。

單獨扭轉於S及B流場條件下，其氣動力阻尼係數於鎖定範圍前後皆有小幅的增加，當扭轉角度 3° 時，S流場隨扭頻之增加由負值轉正。氣動力勁度係數於B流場中之兩種扭轉角皆接近零，唯S流場於共振點處有些許增加。整體而言，單獨扭轉對於結構物之影響應並不大，因扭轉而引發之共振現象並未產生，由此可知，單獨扭轉對結構物之位移反應影響有限。

於S流場下扭轉加上橫向振動之氣動阻尼，在扭轉角度 1° 及 3° 條件下，其整體之趨勢與單獨振動相符，也就是當振頻進入鎖定範圍時，由於氣動力效應所產生之位移反應已進入穩定區，而隨扭轉角增加時，在共振點前各振頻下之氣動力阻尼係數有減小之趨勢，代表扭轉振動之扭轉角增加時於共振點前有抑制結構位移的趨勢，在共振點之後各振頻之氣動力阻尼係數確有回升的現象，其所代表的意義是當振動機制加入扭轉效應後，會讓原本趨動結構物處於穩定狀態的力量增強，而使結構物的穩定性更佳。

B流場型態之氣動阻尼，扭轉角 1° 及 3° 條件下，其值都是在屬於穩定區的負值，其因為渦散共振現象受到紊流強度增大之影響而消失殆盡。由以上可知當紊流強度增強時，扭轉振動所引發之氣動力會使抑制結構物位移之能力增強。

圖 3(a)顯示單獨橫向振頻於鎖定範圍前B流場之Ct'值較S流場為大。由圖3(b)(c)於高振頻時氣動力勁度係數與阻尼係數之變化總量皆大於S流場，代表此時B流場之導納外力作用較大，更易於造成方柱表面壓力分配不均勻的程度，促使擾動性扭力係數的增加程度較S流場來的大，單獨扭轉並不會引發導納外力，對整體結構物沒有任何的影響產生。

由圖 3 顯示單獨橫向振動所引發之振動導納外力隨著扭轉的加入與否，並不會有太大的改變，換句話說，由於振動扭轉效應的加入相對於單獨振動，氣動力阻尼與勁度係數並沒有任何的改變，而 Ct' 值也是同樣的，所以振動導納外力皆無變化。

尾跡中所受擾動的大小程度可由速度頻譜得知(圖 4)。由於尾跡頻譜中受到擾動速度的影響而造成之峰值可用來代表規則性之渦散強度大小，換言之，當能量愈大、峰值愈集中，代表此狀態下之流場其渦散結構緊密且強度大。

單獨扭轉之尾跡發現，扭轉角 3° 條件下，隨扭轉頻率的增加，S與B流場下之尾跡頻譜並無明顯改變，這也驗証了前述 C_L'及 Ct'的量測結果。而在 B 流場下由於流場本身屬紊流，擾動性本來就較大，故扭轉所造成的尾跡變化較S流場來得不明顯。

於S流場下橫向振動加上扭轉方柱之尾跡頻譜，在扭轉 1°及 3° 條件下，尾跡頻譜和單獨橫向振動條件下之狀況相近，並無明顯變化。相同的B流場於扭轉角之尾跡頻譜，顯示不出其供獻量，此外由於紊流強度增強，破壞了規則性的渦散作用，故由渦散所引發之擾動峰值較S流場來的不明顯。

五、結論

橫向振動與扭轉振動方柱體於均勻紊流場中，其擾動扭力係數皆隨振動頻率與振幅比的增大而逐漸增加。而當流場之紊流強度增加，會造成整體方柱表面風壓分佈更不均勻，不平衡力增強了擾動扭力，促使流場之擾動扭力係數與頻譜提升；相反地由於紊流削減了規則性之渦散，致使高紊流場下之擾動昇力係數及頻譜皆較平滑流場小。單獨扭轉條件下之各流場，由於模型橫向之擾動並不明顯，且扭轉向之振動頻率與渦散頻率之間並無共振現象，導致單獨扭轉對擾動昇力係數及擾動扭力係數無任何之貢獻。當橫向振動機制加入扭轉效應後，對昇力整體之導納外力並無貢獻，但會改變導納外力中同向與反向外力間的分配情形，而隨扭轉角的增加其昇力氣動力阻尼係數會減小，代表抑制結構物位移之能力隨扭轉角的增加而漸強。

六、參考文獻

1. Bearman, P.W., "Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies," Ann. Rev.Fluid Mech.16, 195-222. (1984)
2. Beneke, D.L. and Kwok, K.C.S. "Aerodynamic Effect of Wind Induced Torsion on Tall Buildings," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.9, No.3, pp. 270-279, (1993)
3. Griffin, O.M., "A Universal Strouhal Number for the 'locking-on' of Vortex Shedding to the Vibrations of Bluff cylinder," J.Fluid Mech.85, 591. (1978)
4. Isyumov, N. and Poole, M. "Wind Induced Torque on Square and Rectangular Building Shapes," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p183-196 , (1983)
5. Lu, P.C.,Chen, R.H.,Chang, C.M. and Hunag,J.H., "Aerodynamics of a Vibration Square Prism in Homogeneous Turbulent Flow," J. Chinese Institute Eng. 19(3),353-361(1996).
6. Nakamura, Y. and Yoshinwra, T." Flutter and Vortex Excitation of Rectangular Prisms in Pure Torsion in Smooth and Turbulent Flows," J. of Sound and Vibration, 84(3), 305-317. (1982)
7. Zhang, W.J., Xu, Y.L., and Kwok, K.C.S., "Torsional Vibration and Stability of Wind-excited Tall Buildings with Eccentricity," J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 50, p299-308.(1993)
8. 陳若華,「結構振動與流場互制現象之風洞實驗研究」, 淡江大學水資源及環境工程研究所博士論文, (1996)。

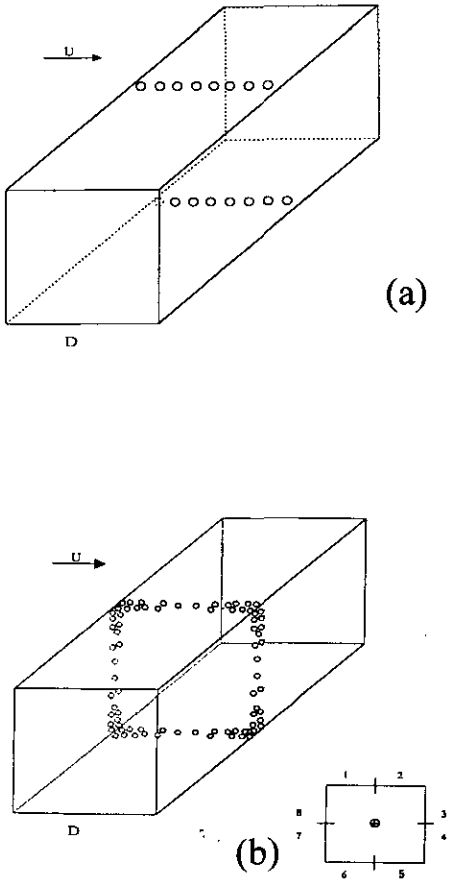


圖 1 (a)昇力模型壓力孔位置示意圖。(b) 扭力模型壓力孔位置示意圖。

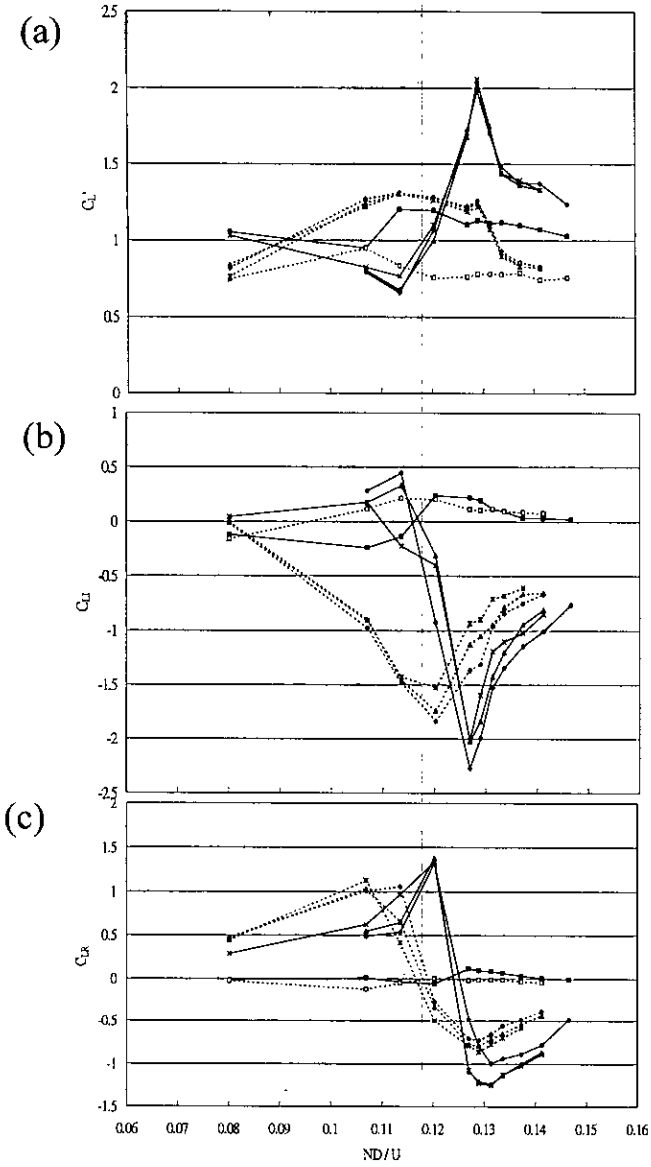


圖 2　(a)擾動昇力係數 Cl', (b)昇力氣動力阻尼係數 C_{LI}, (c) 昇力氣動力阻尼係數 C_{LR}，實線部份爲 S 流場,虛線部份爲 B 流場：-◆-,-◇-爲純橫向振動。-■-, -□-爲 3° 純扭轉。-▲-,-△-爲橫向振動加 1° 扭轉。-x-,-＊-爲橫向振動加 3° 扭轉。振幅比 A/D=0.125。

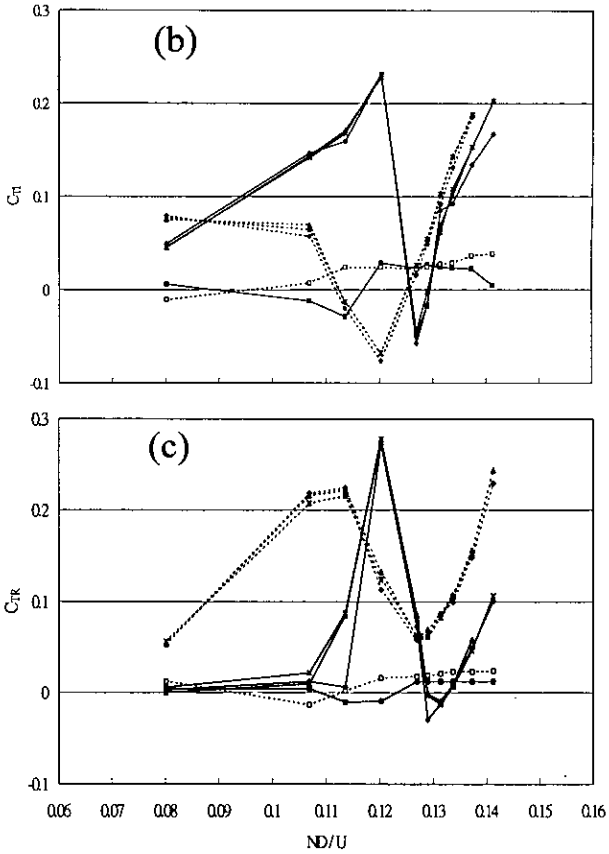
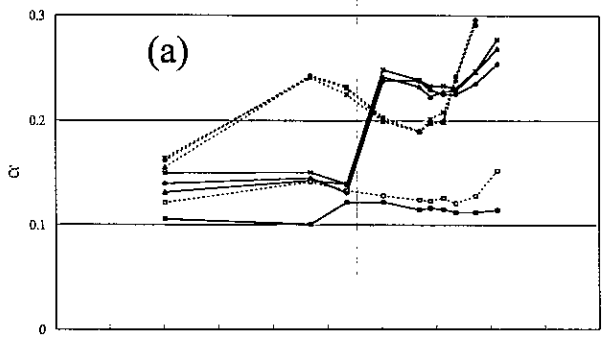


圖 3　(a)擾動扭力係數 Ct', (b) 扭力氣動力阻尼係數 C_{TI}, (c) 扭力氣動力阻尼係數 C_{TR}，實線部份爲 S 流場,虛線部份爲 B 流場：-◆-,-◇-爲純橫向振動。-■-, -□-爲 3° 純扭轉。-▲-,-△-爲橫向振動加 1° 扭轉。-x-,-＊-爲橫向振動加 3° 扭轉。振幅比 A/D=0.125。



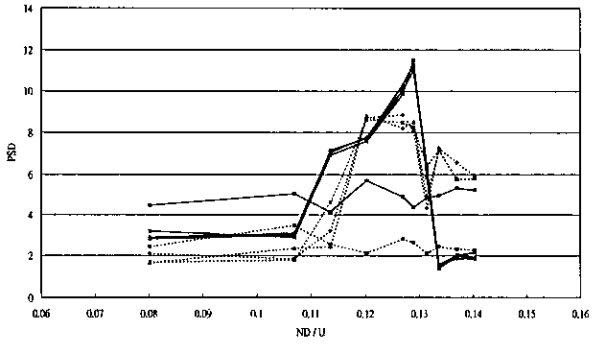


圖 4　尾跡頻譜鋒值 ,實線部份爲 S 流場,虛線部份爲 B 流場：-◆-,-◇-爲純橫向振動。-■-, -□-爲 3° 純扭轉。-▲-,-△-爲橫向振動加 1° 扭轉。-x-,-＊-爲橫向振動加 3° 扭轉。振幅比 A/D=0.125。