

後流中における高層建物の動的挙動

谷池 義人・稲岡 秀樹・桂 順 治

AERODYNAMIC BEHAVIOR OF RECTANGULAR BUILDINGS IN WAKES

By Yoshihito TANIKE, Hideki INAKA and Junji KATSURA

Synopsis

A wind tunnel experiment was performed to investigate the interaction effect between neighboring tall buildings in a boundary layer. Extensive wind tunnel studies of the interaction between two similar size structures were reported in previous publications. The increased response and its possible aerodynamic mechanism of a tall rectangular building under the interference excitation of several types of upwind buildings with different widths have been investigated in the paper.

The main results are as follows; 1) The increase in maximum response caused by an upwind building of smaller size could be 20 times as high as the cross-wind response of isolated building. 2) The along wind response found to be increased with the size of upwind buildings.

1. ま え が き

単独の高層建物の風による動的応答に関する実験及び解析は、これまでに数多く行われており、その発生機構もほぼ説明されつつある。これに対し、連立した高層建物の動的挙動に関しては、現象的に不明な点も多く、今後の耐風設計の課題の一つとして残されている。この種の研究は、鋼製煙突をモデル化した円柱に関して Cooper and Wardlaw¹⁾, Rusheweyh²⁾, 白石・松本・白土³⁾等により、高層建物をモデル化した角柱に関して Melbourne and Sharp⁴⁾, Reinhold・Tieleman・Maher⁵⁾, Saunders and Melbourne⁶⁾, Rusheweyh⁷⁾, Sykes⁸⁾, Blessman and Riera⁹⁾, Bailey and Kwok¹⁰⁾ 等により行われてきた。

従来の研究では同じ大きさをもつ構造物間の相互作用、中でも風下側の構造物に作用する風力あるいは振動の測定に重点が置かれており、異った大きさをもつ構造物間の相互作用について調べた例は少ない。本報では風下側建物の動的応答が風上側建物の大きさ（ここでは建物幅）によりどのように変化するかを一連の風洞実験により系統的に調べ、さらにその振動の発生機構についても考察することにした。

2. 実 験 方 法

風洞実験は Fig. 1 に示す京都大学防災研究所の境界層風洞を用いて行った。測定部の断面は幅 2.5 m, 高さ 2 m でその長さは 21 m である。実験時には天井を調節して測定部の静圧を一定に保った。接近流の風速分布と乱れ強さ $I(\%)$ の分布を Fig. 2 に示す。図中の $\alpha=0.14$ は巾法則の指数である。実験風速 V は角柱頂部の位置で $V=1.6\sim 10$ m/s とし、この風速の範囲では I 及び α の値は Fig. 2 の値と同じであった。

使用した模型は、風上、風下とも高層建物の代表的な形状である正方形断面角柱とした。Fig. 3 に示すよ

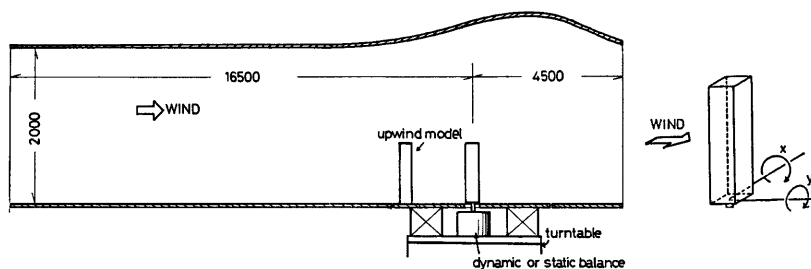


Fig. 1 Experimental set-up and positive rotational direction of the aeroelastic model.

うに風上角柱は風下角柱と同じ高さであるが、幅 B' は風下側の 2.5 倍 (Large モデルと呼ぶ)、1 倍 (Medium モデル)、1/2.5 倍 (Small モデル) の 3 種類を用いた。それぞれの角柱のストローハル数 S を Fig. 4 に示す。但し、代表風速は角柱高さ H の位置とする。ストローハル数 S はアスペクト比 H/B' の増加につれてわずかに大きくなる傾向にあり、Vickery¹¹⁾ の行った一様流中での実験結果とも一致する。

風下角柱を弾性支持し、この位置を原点にとり、風向方向を X/B 、風向直角方向を Y/B とする座標上の様々な位置に風上角柱を配置した。なお、両角柱とも風が一面に直角にあたるように置いた。風下角柱はパルサ材で作り軽くて剛なものとし、これを振動実験装置に取り付けた。この装置¹²⁾は風向方向 (X 方向) と風向直角方向 (Y 方向) の振動変位 (ここでは回転角) を同時に検出できるものであり、それらの正方向を Fig. 1 に示す。変位はストレインゲージで検出し、FM テープレコーダーに記録した。50Hz のローパスフィルターに通した後、波形解析装置を用いて 15 sec のデータを読み取り間隔 3 msec で解析した。

弾性支持した風下角柱の固有振動数 f_0 は $f_0 = 11.4$ Hz、減衰定数 μ は $\mu = 1.52\%$ とし、いずれも X, Y 両方向に等しくした。本実験では高層建物の一次の振動モードを線形と仮定しているため、次式で定義するスクルーン数を用いた。

$$\delta = \frac{16\pi^2 I_0 \mu}{\rho B^3 H l} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は回転中心まわりの質量慣性モーメント、 ρ は空気密度、 l は回転中心より角柱高さの半分までの距離で本実験では $l \approx H/2$ とした。本実験では $\delta \approx 300$ としたが、この値は一般的高層建物の δ より若干小さい。

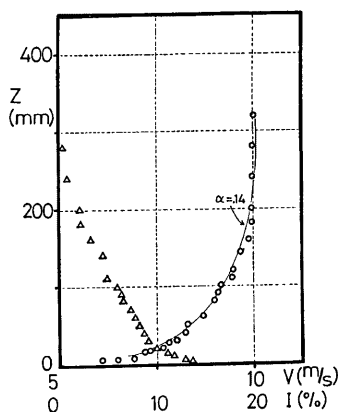


Fig. 2 Properties of approaching wind.

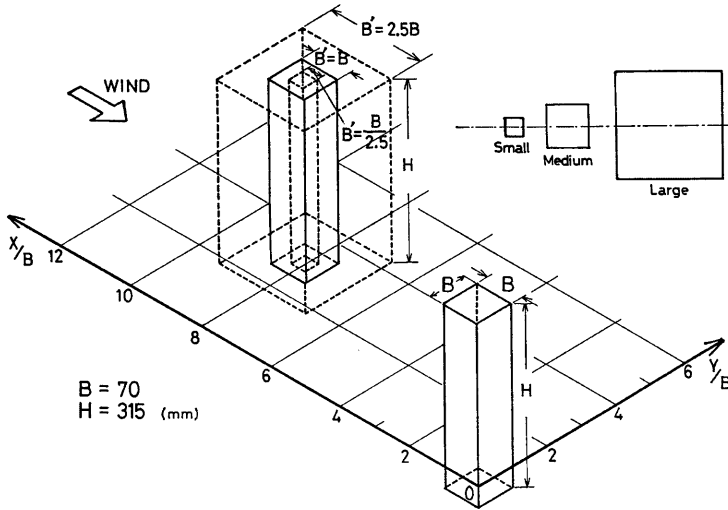


Fig. 3 Test arrangement of three types of interfering building models.

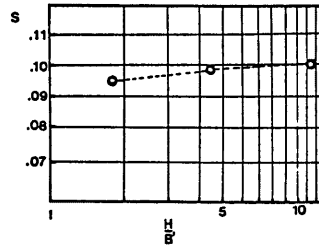


Fig. 4 Strouhal number of upwind building models.

3. 実験結果と考察

3.1 応答曲線

風下角柱の振動変位が、風上角柱の種類とその位置によりどのように変化するかを Fig. 5～8 に示す。図の縦軸は角柱頂部の水平変位の *r.m.s* 値 (X_{rms} , Y_{rms}) を高さ H で割った値、横軸は無次元風速 $V_r (= V/f_0 B)$ を示す。図中の破線は角柱単独のときの応答曲線である。

Fig. 5 を見ると、風上に角柱があると、風下角柱の風向方向振動は増加する。風上角柱の剝離流線上に風下角柱があるときに、その振動は一層大きくなる (Fig. 5 b)。これは、風上角柱により生じる剝離渦が接近流の乱れを増加させ、乱れによる強制的な振動が単独柱に比べてより大きく生じることと、接近流の風速が剝離により増加することのためであろう。

Fig. 5 a, c を見ると、風上角柱の風下角柱に及ぼす影響範囲は、風上角柱のスケールが大きくなるにつれて増加する傾向にあり、Large の場合で角柱幅 B の30倍にも達する。

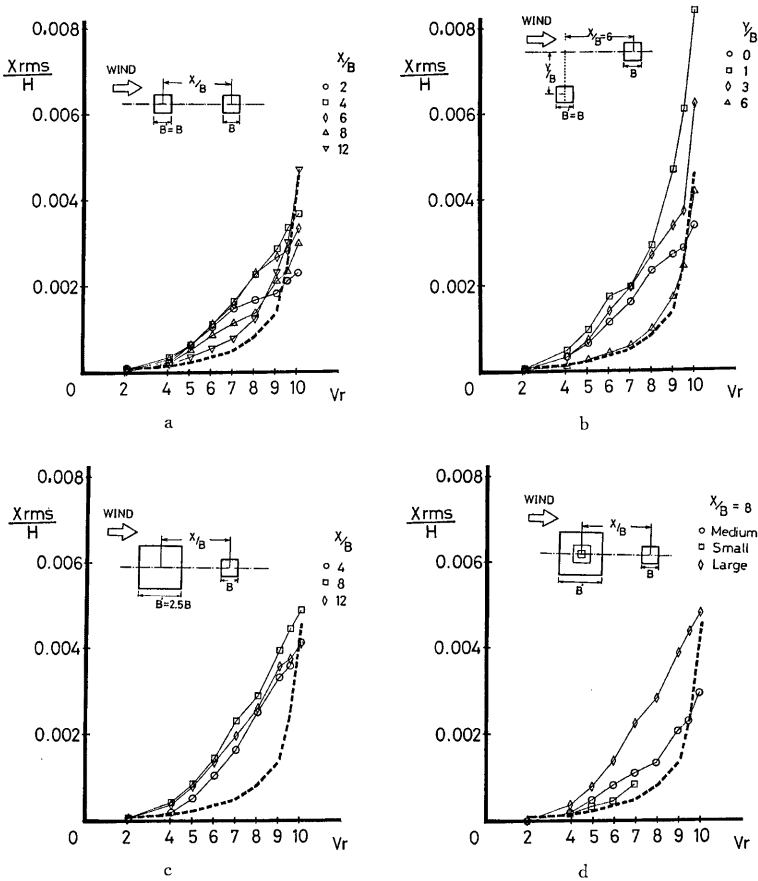


Fig. 5(a-d) Along wind responses of the downstream building with and without interference for various scales of upwind buildings.
 a: Medium model b: Medium model offset from centerline
 c: Larger model d: Various types of models

また、Fig. 5 d に示すように、風上の角柱が大きくなるにつれて風下角柱の振動は増加する。このことから風上の角柱により発生する渦の大きさ、すなわち接近流の乱れのスケールの増加につれて風向方向の振動は大きくなるものと思われる。

Fig. 6 を見ると、風向直角方向振動は V_r が 8~9 以下の範囲では風向方向振動と同じく風上角柱の存在によってその応答は増大する。但し、Large で $X/B=4$ あるいは Small で $X/B=1.5$ の場合のように隣接間

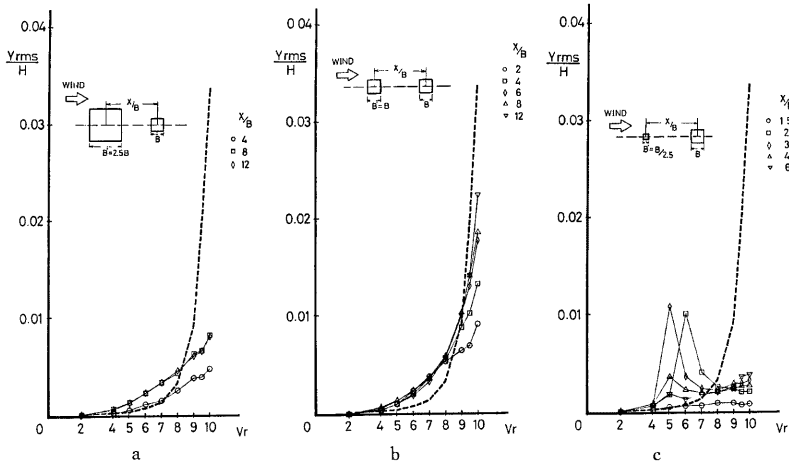


Fig. 6(a-c) Cross wind responses of the downstream building with and without interference for various scales of upwind buildings.
a: Larger model b: Medium model c: Smaller model

隔が狭いと、風上角柱の遮風効果が大きくなり単独柱の応答より小さくなる。単独柱の振動は、 V_r が 8 以上になると渦励振を生じるために急激に大きくなる。これに対し、風上に角柱が存在すると、その後流の変形と乱れのために風下角柱は周期的で強い渦の発生がおさえられて単独柱より応答が小さくなるのであろう。

風上側 $2B \sim 3B$ の位置に Small の角柱がある場合、 $V_r = 5 \sim 6$ でピーク応答を示す振動が見られる (Fig. 6c)。このときの応答値は単独柱の 20 倍にも達する。さらに風速が増加すると応答値は小さくなり、逆に単独柱の $1/10$ 程度になることから渦励振に似た共振現象が生じているようである。この興味ある現象は風上の角柱からの剝離流と風下角柱との相互干渉により生じるが、詳細については次節で述べる。

Fig. 7 を見ると、Medium の場合 (Large の場合も同様) には風上角柱を X/B 軸から少しずらせたときに応答がより大きくなる。この傾向は Bailey¹⁰⁾ の結果にも見られる。Small の場合には 2 つの角柱を風向に直列して置いたときにピーク応答が最も大きくなる。但し、ずらし距離が Small の場合 $Y/B \geq 3$ 、Medium の場合 $Y/B \geq 6$ 、Large の場合 $Y/B \geq 8$ になると風上角柱の干渉作用はなくなる。なお、角柱を風向に並列して置いたときには、単独柱の応答とはほぼ同程度になる (Fig. 7c)。

風上角柱のスケールが風下角柱の風向直角方向振動に及ぼす影響を Fig. 8 に示す。共振していると思われる $V_r \approx 5$ 付近の Small の応答を除くと、Medium の応答が最も大きくなる。風向方向の振動と異なり、風上角柱により生じるスケールの大きい渦は、風向直角方向振動を増大させる効果をもたないようである。また、渦励振を妨げる効果は、Medium の場合、すなわち風下角柱の剝離渦と同じ発生周期とスケールをもつ場合に最も小さくなる。Fig. 5d の風向方向振動と比較すると、 $V_r \geq 4$ の応答値は風向直角方向振動の方が大きく、いずれも 2 倍以上になる。

なお、Sykes⁸⁾ によると風が角柱の一面に斜めから吹く場合には、角柱間の相互作用は弱くなり、風下角柱の振動応答は風に直面する場合に比べて小さくなる。したがって、本報では耐風設計の立場から風が角柱の一面に直角にあたる場合を対象とした。

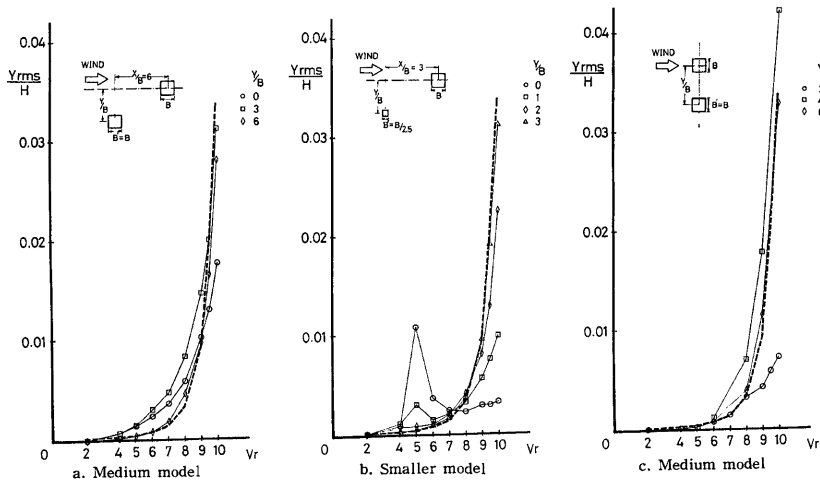


Fig. 7(a-c) Cross wind responses of the downstream building offset from the centerline of upwind building.

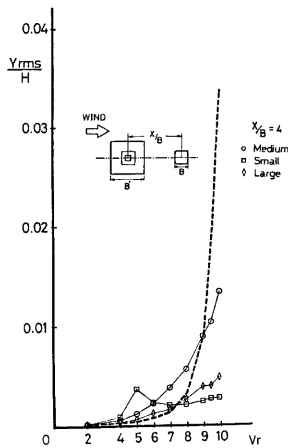


Fig. 8 Crosswind response of the downstream building with and without interference for various scales of upwind buildings.

3.2 結果の解析

前節で得た結果を基に、風上角柱の存在により風下角柱の振動応答が単独柱の応答に比べてどれほど増加するかを調べた。Melbourne⁶⁾の提案に基づき、単独柱に対する応答倍率(Buffeting Factor と呼び $B.F.$ で表わす)を次式で表わす。

$$B.F. = \frac{\text{風上角柱があるときの風下角柱の応答}}{\text{単独柱の応答}} \quad (2)$$

この $B.F.$ は $V_r=4\sim 8$ の風速域で 1 より大きくなり、 V_r が 8 を越えると逆に 1 以下となる。ここでは、 $B.F.$ が最も大きくなる $V_r=5$ のときの $B.F.$ の値を $(X/B, Y/B)$ 上にプロットした。Fig. 9, 10 の等高線の数字は、その位置に風上角柱があるときの $B.F.$ を示す。図中の $S(f)$ は単独柱 (Isolated) 及び風下角柱の振動変位の生のスペクトルを示し、FFT 法で 5 回平均して求めたものである。ここで f_u, f_s はそれぞれ風上、風下角柱のストローハル数から求めた渦発生数を示す。また、このスペクトルに対応する振動変位のリサージュを Fig. 10 の右側に付ける。リサージュは両軸とも角柱頂部の水平変位を高さ H で割って無次元化してある。Fig. 11 は、Fig. 9, 10 の $B.F.$ を基に、 $B.F.\geq 3$ の等高線が風上角柱のスケールによりどのように変化するかを示したものである。

Fig. 12 は、風向方向の平均変位に対応する平均抗力の $B.F.$ を示し、空気力測定用の天秤を用いて求めたものである。なお、このときの単独柱の抗力係数 C_D は $C_D=0.94$ である。この図を見ると、平均抗力は風上角柱の遮風作用のために単独柱より小さくなる。この遮風効果は風上角柱が大きくなるにつれて増大する。とくに Medium, Large の場合、風下角柱の抗力が 0 になる位置が存在する。両角柱がさらに接近すると、負の抗力すなわち風上方向への空気力が作用する。これは風下角柱が風上角柱の後流に入り、風上角柱背後の負圧により風上方向へ引き寄せられるためであろう。このことは Fig. 10 のリサージュ (Large の場合) で平均変位が負となることから確かめられる。このように風下角柱に作用する平均抗力は単独柱に比べて小さくなるが、その振動変位は Fig. 9, 10 に示したように逆に増大する。これは、風下角柱は平均的な力は小さくとも周期的な外乱を受けるためと考えられる。

Fig. 9, 10 の Medium の振動変位の $B.F.$ を Bailey¹⁰⁾ の実験値と比較すると、等高線の分布形状は良く似ているが、値そのものは本実験値が 2 倍程度大きくなる。これは、角柱のアスペクト比や振動モード等の幾何学的形状、減衰定数、質量パラメータ等の力学的特性及び接近流の気流性状が両実験で異なるためと思われる (但し、Bailey の実験では詳細は不明)。とくに接近流の乱れが大きく影響し、著者等の実験 (未発表) あるいは Blessmann⁹⁾ の研究においても乱れの増加につれて $B.F.$ が小さくなる傾向が見られた。

風上角柱の大きさによる風下角柱の $B.F.$ の変化を調べると、Small の場合には $B.F.\geq 10$ の領域が局所的に存在するが、 $B.F.\geq 3$ の領域は Fig. 11 に示すように風向及び風向直角方向ともに最も小さくなる。風上

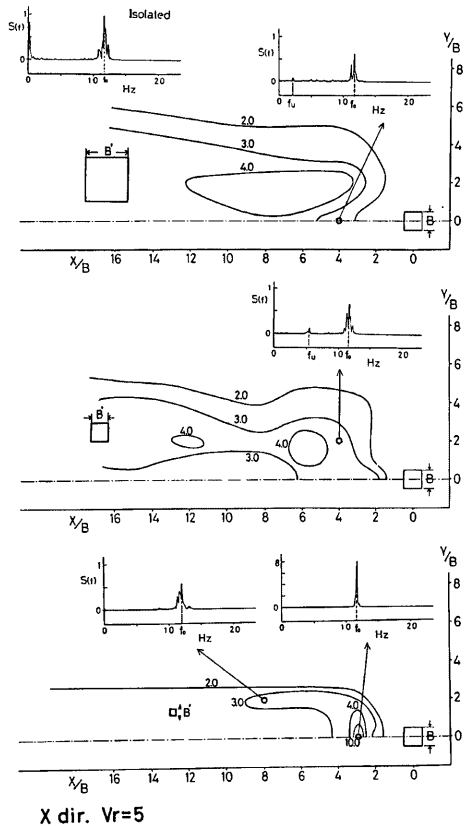


Fig. 9 Buffeting factor contours for along wind responses of the downstream building and spectra of their responses.

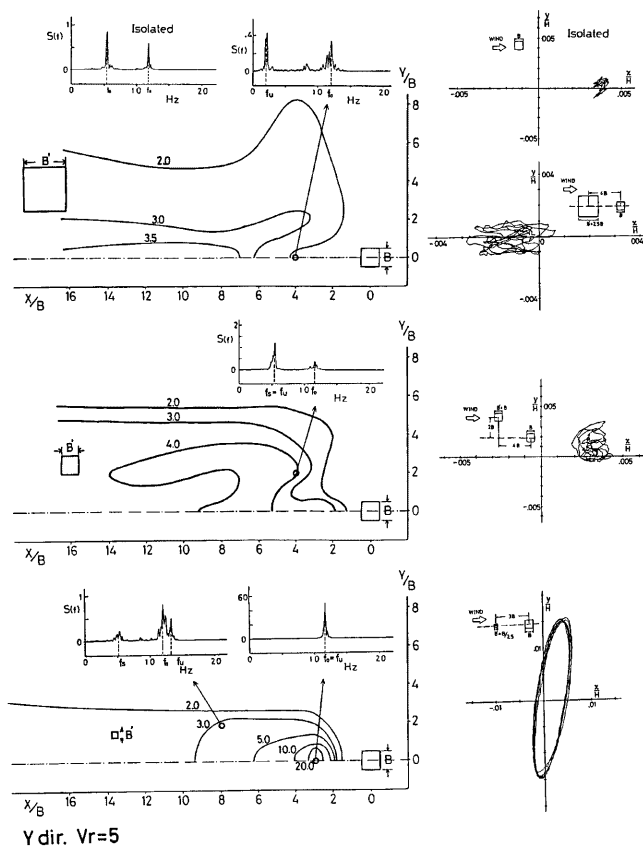


Fig. 10 Buffeting factor contours for cross wind responses of the downstream building, and spectra and traces of their responses.

角柱のスケールが大きくなるにつれて前節で示したように風向方向振動は増大し、さらにその振動に及ぼす影響範囲も広がる。これに対し、風向直角方向振動に及ぼす影響範囲は、Small, Large, Medium の順に広がり、同じスケールの角柱間で最も大きくなることがわかった。なお、 $B/F \geq 2$ となる範囲は、風向、風向直角方向ともに Medium, Large の場合で $X/B=30$, Small の場合でも $X/B=20$ にまで広がる。

単独柱の振動変位のスペクトルを見ると、風向直角方向には角柱静止時の渦発生数（ストローハル数から求まる渦発生数）である f_s 成分が存在し、振幅が不規則で小さいと角柱は固有振動数 f_0 のみで振動していないことがわかる。また、風向方向には f_s 成分はなく、わずかなではあるが $2f_s$ 成分が存在し、渦放出に伴う強制的な力が作用している。風上に角柱があると、 f_s 成分に代り風上角柱静止時の渦発生数である f_u 成分があらわれ、風上角柱の剝離渦が風下角柱の振動を引き起こす要因になる。

とくに、 $(X/B, Y/B) = (3, 0)$ の位置に Small の角柱があると、スペクトルピークは唯一でその値も非常

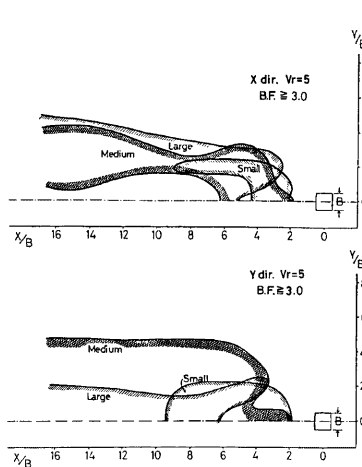


Fig. 11 Buffeting factor contours for various scales of upwind buildings.

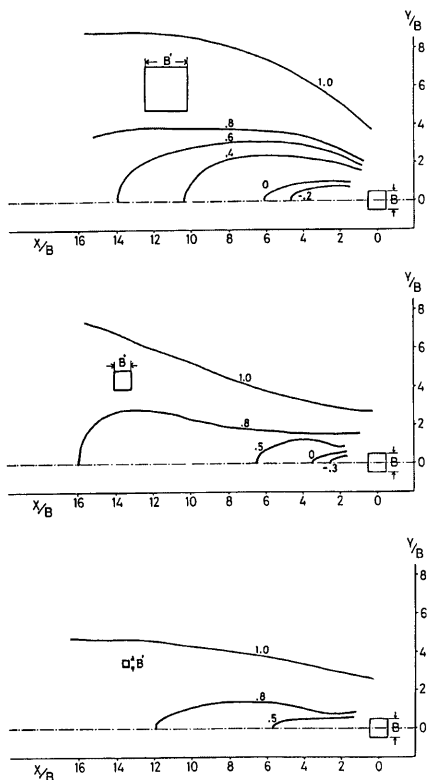


Fig. 12 Buffeting factor contours for mean drag forces of the downstream building.

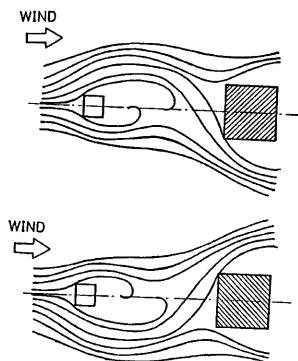


Fig. 13 Flow visualization around building models.

に大きくなる。このときの振動のリサージュを見ると、振幅は一定となり共振を生じていることがわかる。**Fig. 13** に2次元の煙風洞（オンディナオイルを気化させた煙）を用いて角柱周りの流れを可視化した流線を示す。この図を見ると、風上角柱からの渦放出に伴う剝離流が風下角柱によって交互に曲げられ、Switching を起こしている。この Switching は、 $V_r \approx 5$ のときに風下角柱の振動と共鳴し、その周波数が風下角柱の固有振動数 f_0 に取りこまれて（lock-in）、両者は一致する。このために風下角柱は渦励振の発生風速以下で共振を生じ振動が大きくなるのである。

この Switching 現象は、Medium, Large の場合においても生じ、その周波数が風下角柱振動時の f_u 成分を作り出すのである。したがって、Small の場合のように風下角柱に比べ風上角柱の断面が小さくなると、

Switching の周波数 f_u が相対的に大きくなり、より低風速で風下角柱の固有振動数 f_0 と一致し共振が生じる。なお、この Switching は風下角柱のストローハル数成分の渦発生を妨げる働きをするために、 $V_r \approx 9$ 付近で渦励振の発振が抑えられ振動は単独柱に比べて小さくなる。

4. む す び

連立する高層建物の動的挙動を調べる目的で風洞実験を行い、次の結果を得た。

- 1) 風上角柱の遮風効果のために、風下角柱の受ける平均抗力は単独柱に比べて減少するが、振動は風上角柱により生じる乱れと後流の周期的な変動のために逆に増大する。
- 2) 風下角柱の風向方向振動は、風上角柱のスケール（ここでは角柱幅）の増大、すなわち剝離渦による乱れのスケールの増加に伴い大きくなる。
- 3) 風向直角方向の振動は、一般に同じスケールの角柱間で大きくなる。但し、風上に幅の短い細長い角柱があるときには、風下角柱は渦励振の発振風速より低い風速域で共振を生じて風向直角方向に大きく振動し、場合によっては単独柱の20倍にも達する。
- 4) 風上に角柱があると、風下角柱の渦励振は妨げられる。
- 5) 風上角柱の風下角柱振動に及ぼす影響範囲は、風下角柱幅の20～30倍にも達する。
- 6) 風下角柱の風向方向振動は、風上角柱のつくる剝離流の風速増加と乱れが、風向直角方向振動は角柱間の相互作用による後流の周期的な変形（Switching）が主要因と考えられる。

本実験を行うにあたり京都大学名誉教授石崎澄雄先生には適切な御助言を頂きました。また、防災研究所野澤淳技官には実験装置を製作して頂き、同じく杉政和光技官には風洞実験を手伝って頂いた。これらの御厚意に対し心から感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Cooper, K.R. and R.L. Wardlaw: Aeroelastic Instabilities in Wakes, Proc. 3rd. Int. Cont. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1971, pp. 647-655.
- 2) Ruscheweyh, H.P.: Aeroelastic Interference Effects between Slender Structures, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 14, 1983, pp. 129-140.
- 3) 白石成人・松本 勝・白土博通: 2本直列柱の空力応答特性とその発生機構に関する基礎的研究, 風工学シンポジウム, 1984, pp. 277-284.
- 4) Melbourne, W.H. and D.B. Sharp: Effects of Upwind Buildings on the Response of Tall Buildings, Proc. Regional Conf. Tall Buildings, 1976, pp. 174-191.
- 5) Reinhold, T.A., H.W. Tieleman and F. J. Maher: Interaction of Square Prisms in Two Flow Fields, Jour. Industrial Aerodynamics, Vol. 2, 1977, pp. 223-241.
- 6) Saunders, J.W. and W.H. Melbourne: Buffeting Effects of Upstream Buildings, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, 1979, pp. 593-606.
- 7) Ruscheweyh, H.P.: Dynamic Response of High Rise Buildings under Wind Action with Interference Effects from Surrounding Buildings of Similar Size, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, 1979, pp. 725-734.
- 8) Sykes, D.M.: Interference Effects on the Response of a Tall Building Model, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 11, 1983, pp. 365-380.
- 9) Blessmann, J. and J.D. Riera: Wind Excitation of Neighbouring Tall Buildings, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 18, 1985, pp. 91-103 & 105-110.

- 10) Bailey, P.A. and K.C.S. Kwok: Interference Excitation of Twin Tall Buildings, Jour. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 21, 1985, pp. 323-338.
- 11) Vickery, B.J.: Load Fluctuations in Turbulent Flow, Proc. ASCE, Vol. 94, EM 1, 1968, pp. 31-46.
- 12) 石崎潑雄・谷池義人：高層建物の質量減衰パラメーターによる空力不安定性について，京大防災研年報，第27号 B-1，1984，pp. 227-238.