

後流中における高層建物の動的挙動 (その2)

谷 池 義 人

AERODYNAMIC BEHAVIOR OF RECTANGULAR BUILDINGS IN WAKES (PART 2)

By *Yoshihito TANIKE*

Synopsis

A series of wind tunnel experiments were continuously performed to investigate the interaction effects between neighboring tall buildings with different sizes in a high turbulent boundary layer over urban area comparing with the previous results in a low turbulent flow over open country terrain.

The along and cross wind responses of the downstream building under an interfering upstream building in a high turbulent flow were not found to be enlarged compared to those of the isolated building. This is because the vortices produced by an upstream building were not formed clearly and consequently the velocity fluctuation and the wake deformation, i. e., the switching in a wake region were decreased. The buffeting factor that is the response ratio of the down stream building to the isolated building and the influenced area formed by an upstream building were reduced with an increasing of turbulence intensity.

1. ま え が き

大都市の環境整備計画の一環として、郊外の開けた地域や埋立て地或いは都市内にある再開発地域等に高層ビル群を建設する傾向が強くなっている。高層建物が連立して建つと、建物間を流れる風が複雑に変形し、建物が単独で建っている場合に比べて風の作用が異なったものになる。とくに風上側に建つ建物により風下建物の受ける風力及びそれによる振動応答が、単独建物の場合に比べて著しく変化する場合がある。この種の研究は最近になって、Melbourne¹⁾、Saunders²⁾、Ruscheweyh³⁾、Sykes⁴⁾、Blessmann⁵⁾、Bailey⁶⁾及び著者^{7),8)}等により行われているが、研究の歴史が残いたために系統的に調べられておらず、また現象的に不明な点も多いために解析面の定式化も進んでいない。

前報⁷⁾では、埋立て地等に吹く乱れの小さい境界層風洞中での、異なった大きさをもつ連立建物の相互作用について調べ、風上建物により生じる渦の大きさと渦を取り囲む外側の流れの2棟間における変形が、風下建物の振動応答に大きく影響する機構等を明らかにした。

本報では、前報の結果⁷⁾に基づいて実験及び解析をさらに進め、都市内の一角に高層ビル群を建設したときの相互作用について調べ、接近流の性状の変化が2棟間の相互作用に及ぼす影響等について論じることとする。

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。前報⁷⁾では、海岸付近や埋立て地等の開けた地域に吹く自然風を

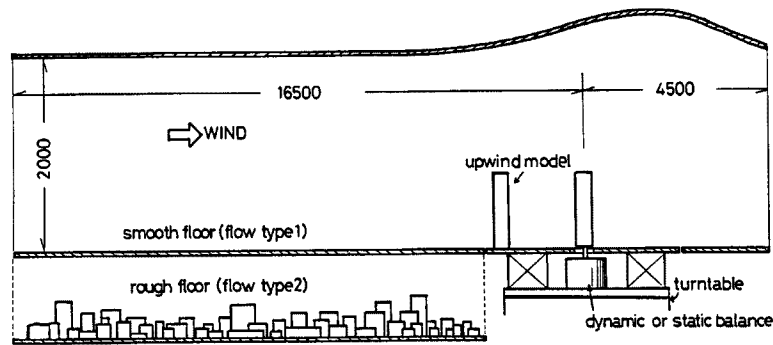


Fig. 1. Experimental set-up.

対象とし、なめらかな床面(図中の smooth floor)上に発達する境界層流(flow type 1)中で実験を行った。今回は、新たに都市を模した模型を風洞床面に敷きつめ、これを地表面粗度として乱れの大きい境界層を発達させ、都市に吹く自然風に近い風(flow type 2)を風洞内に再現させて実験を行った。なお、実験時には天井を調節し、測定部内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 α は巾法則の指数を示し、前報⁷⁾ の flow type 1 の結果も付記してある。実験風速 V は、建物模型頂部の位置で $V=1.6\sim 10$ m/s の範囲とした。使用した角柱模型、振動実験装置、並びに実験、解析方法は前報と同じであり、詳細は文献7を参照されたい。ここでは大きさ

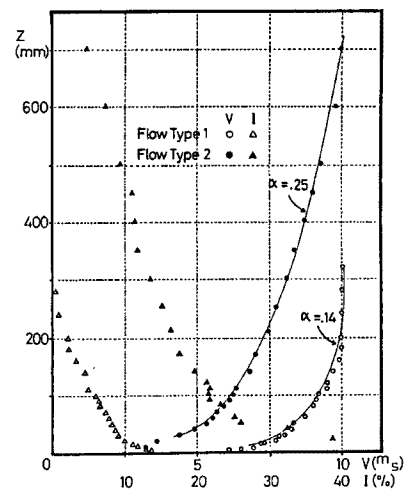


Fig. 2. Properties of approaching wind.

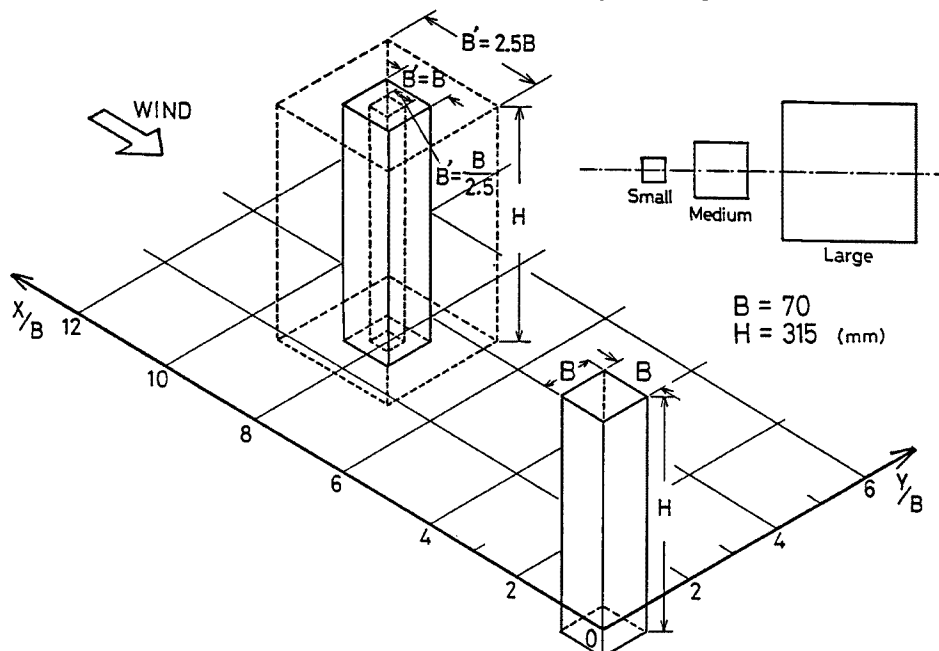


Fig. 3. Test arrangement of three types of interfering building models.

の異なる3種類の風上角柱（大きい順に Large, Medium, Small モデルと呼ぶ）と弾性支持した風下角柱（Medium モデルと同じ大きさ）の2棟間の配置を **Fig. 3** に示す。図に示すように風上、風下両角柱ともに同じ高さ（ H ）をもつ正方形断面角柱であるが、角柱の幅（ B or B' ）が異なる。なお、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 $\mu=1.25\%$ とし、いずれも風向方向（ X 方向）と風向直角方向（ Y 方向）の両方向に等しくした。

3. 実験結果と考察

3.1 応答曲線

乱れの大きい乱流境界層流中（flow type 2）で、風下角柱の振動変位が風上角柱の大きさとその位置によりどのように変化するかを、**Fig. 4, 6** に示す。図の縦軸は角柱頂部の水平変位の標準偏差（ X_{rms} , Y_{rms} ）

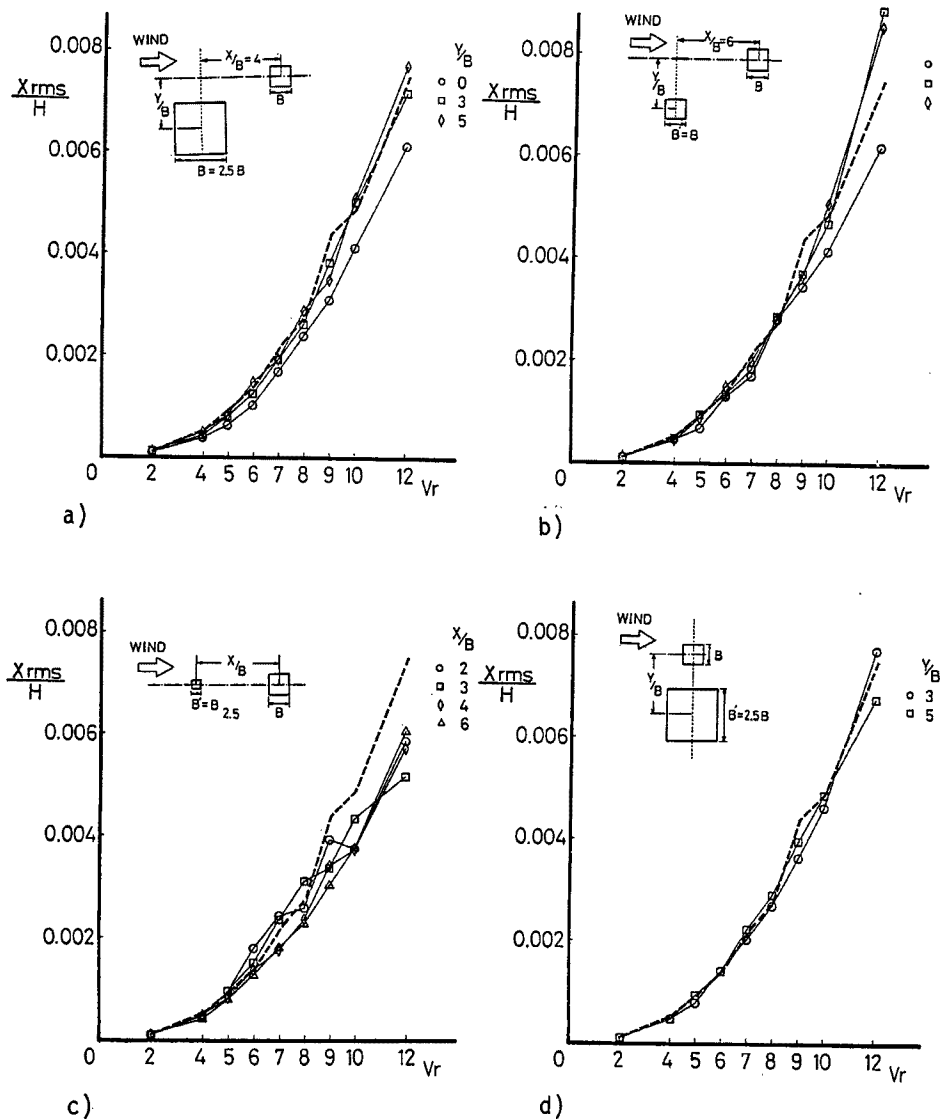


Fig. 4(a-d). Along wind responses of the downstream building with and without interference for various scales of upwind buildings.
a. Larger model, b. Medium model, c. Smaller model,
d. Larger model arranging in a row.

を高さ H で割って無次元化した値、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。なお、**Fig. 5** に無次元風速 V_r が $V_r=5$ のときの単独角柱及び風下角柱の振動変位のリサージュを示す。両軸は、ともに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. 4 を見ると、風下角柱の風向方向の振動応答は、前報⁷⁾ の乱れの小さい境界層流中 (flow type 1) での応答と異なり、風上角柱の存在によって大きく変化しないことがわかる。**Fig. 4 b** に示したように、風上角柱の剝離流線上に風下角柱が存在しても、単独角柱に対する応答の増加はほとんど見られない。乱れの小さい流れの下では、風上角柱により生じる剝離渦が乱れを作り、その乱れを含んだ流れが風下角柱に変動抗力として作用するために、風下角柱の風向方向の応答が単独角柱の応答に比べて大きくなる。また、風上角柱が大きくなるにつれて、発生する渦のスケールも大きくなり、風下角柱により大きな変動抗力が作用して応答が増大する。

これに対し、都市に吹く風の場合には、**Fig. 2** に示したように接近流の乱れがもともと大きく、またこの流れの下では、角柱により生じる剝離渦自体も明確な形では形成されにくくなるために、風上角柱の存在によって接近流の乱れがさらに増加することも期待できない。また、風上角柱の剝離流線上の速度増加も、乱流の拡散作用のために弱められ、風下角柱にほとんど影響を及ぼさない。これらの現象のために、乱れの大きい流れの下では、風上角柱の存在によって風下角柱の風向方向の応答が、ほとんど増大しないのであろう。

Figs. 4a~c を比較すると、風上角柱が大きくなるにつれて、風下角柱の風向方向応答はわずかではあるが減少し、Large モデルの場合には単独角柱の応答よりも小さくなる。この傾向は、乱れの小さい flow type 1 での振動応答結果と逆であるが、平均応答の結果とは同じである。前報⁷⁾ でも述べたように、単独角柱に対する風下角柱の平均応答の減少は、風上角柱の遮風作用で風向方向の平均風速が弱められるために生じる。この遮風効果は、風上角柱の大きさに伴い増大する。乱れの大きい流れの下では、風上角柱からの剝離渦による乱れの増加効果はほとんど期待できず、さらに風上の角柱が大きくなるとこの遮風作用が働くために、風下角柱の振動応答が単独角柱よりも小さくなるであろう。この現象は **Fig. 5** に示した振動変位のリサージュにも見られる。風下角柱の風向方向の平均及び振動変位は、いずれも風上角柱が大きくなるにつれて減少し、Large モデルの場合には単独角柱の応答よりも小さくなる。

なお、**Fig. 4 d** に示したように、2つの角柱を風向に並列して配置したときには、風向方向のみならず

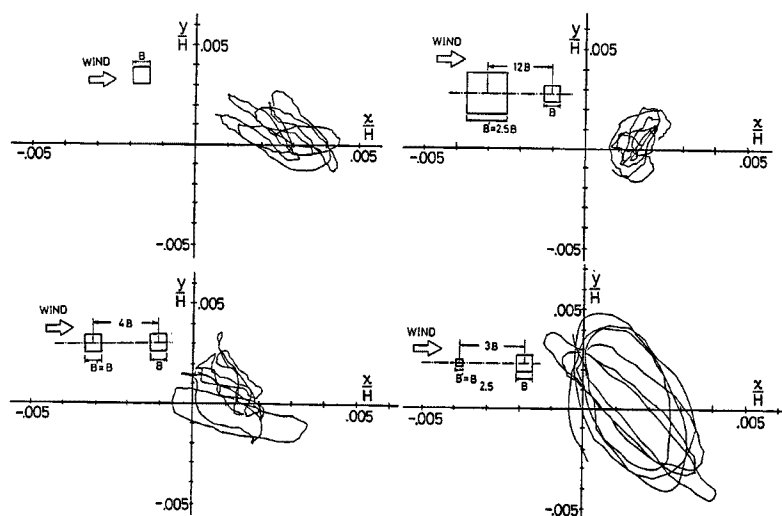


Fig. 5. Traces of the responses of the downstream building (at $V_r=5$).

風向直角方向の振動応答にもほとんど変化は見られなくなる。

Fig. 6 を見ると、風下角柱の風向直角方向の振動応答は、風向方向の応答と同じく、風上角柱が大きくなるにつれて減少し、Large モデルの場合には単独角柱の応答より小さくなるのがわかる。前報⁷⁾で示したように、風下角柱の風向直角方向応答の増大は、主として風上角柱からの剝離渦を取り囲む外側の流れが風下角柱によって交互に曲げられ (switching と呼ぶ)、これが風下角柱に変動揚力として作用することによって起る。接近流の乱れが増すと、一般に角柱からの剝離流がより早く乱流化し、渦化が促進されるとともに、剝離剪断層自体も厚くなる。この厚くなった剪断層の一部が、角柱の側面後縁付近に再付着することによって

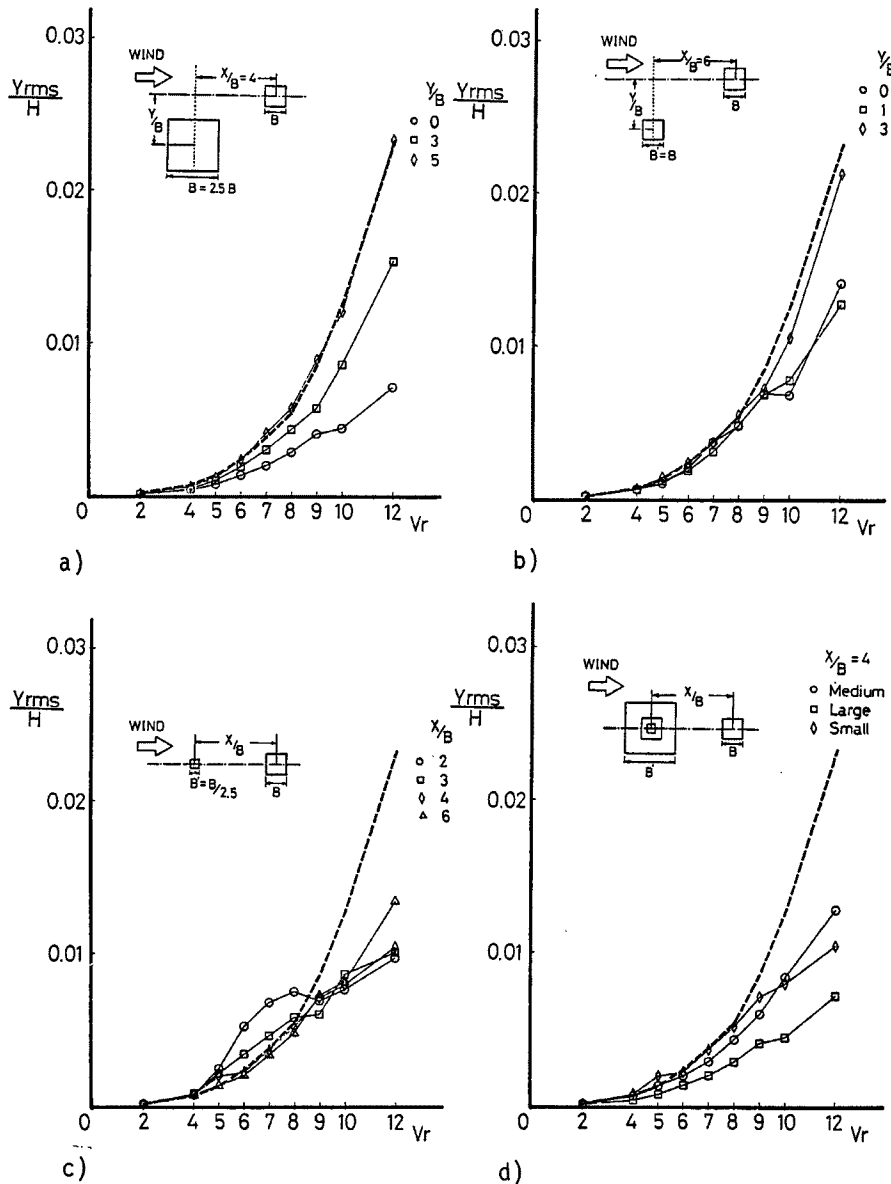


Fig. 6(a-d). Cross wind responses of the downstream building with and without interference for various scales of upwind buildings.
a. Larger model, b. Medium model, c. Smaller model, d. Various types of models.

より運動量を失い、角柱背後に形成される渦自体が弱くなる。また、再付着を生じない場合でも形成される渦自体は、明確な形を保っておらず、その形成位置もより角柱背面に近づく。

これらの現象で、風上角柱からの剝離渦を伴う流れの変形が小さくなり、風下角柱に大きな変動揚力が作用しなくなる。さらに風上角柱が大きくなると、遮風効果が生じ、風向方向の平均風速成分のみならず、風向直角方向の変動風速成分をも減少させるために、風下角柱の風向直角方向応答が単独角柱に比べて小さくなるのであろう。これらの現象は、**Fig. 5** に示したリサージュからも推測することができる。

なお、Small の角柱が風上側 $X/B=2\sim3$ の位置にあるとき、風下角柱の風向直角方向応答は、 $V_r=5\sim8$ の風速域で単独角柱の応答を1.5~2倍程度上まわる。乱れの小さい流れの下では、前報⁷⁾ に示したように $V_r=5\sim6$ の風速域で、風上角柱からの渦放出に伴う後流の変形 (switching) の周期と風下角柱の固有周期とが一致し、共振現象が生じる。このため、風下角柱の風向直角方向への応答は、単独角柱の20倍にも達していた。

接近流の乱れが増加すると、一般に明確な剝離渦が形成されにくくなり、switching 現象が生じにくくなる。しかしながら、接近流に強い乱れが含まれていても、その乱れのスケールが風上角柱のスケール（ここでは幅）に比べて十分に大きい或いは十分に小さい場合には、明確な剝離渦が形成され、その形成位置がより背面に近づく。本実験での接近流の乱れのスケール L_x は、風下角柱幅 B の2.5~3倍程度である。Small の角柱幅 B' に比べると $L_x/B'=6\sim8$ となり、スケール比が十分に大きいとは言いが、他のモデルに比べると多少なりとも switching 現象が生じ易くなる。この影響で、Small モデルの風向直角方向応答が、単独角柱及び他のモデルの応答に比べて大きくなるのであろう。**Fig. 5** に示すリサージュを見ても、Small モデルの応答は共振現象に近い振動波形を示していることがわかる。

なお、前報⁷⁾ の結果では Small の角柱が風上側 $X/B=3$ の位置にあるときに、今回の結果では $X/B=2$ の位置にあるときに、風向直角方向の応答が最大となる。このことは、接近流の乱れが増すと渦の形成位置が風上角柱の背面により近づくために、2棟間のより短い間隔で switching 現象が効果的に生じることを示している。

3.2 応答倍率

前節で得た結果を基に、単独角柱に対する風下角柱の振動応答の増加率を調べた。この増加率は一般に Buffeting Factor と呼ばれ、次式で表わされる。

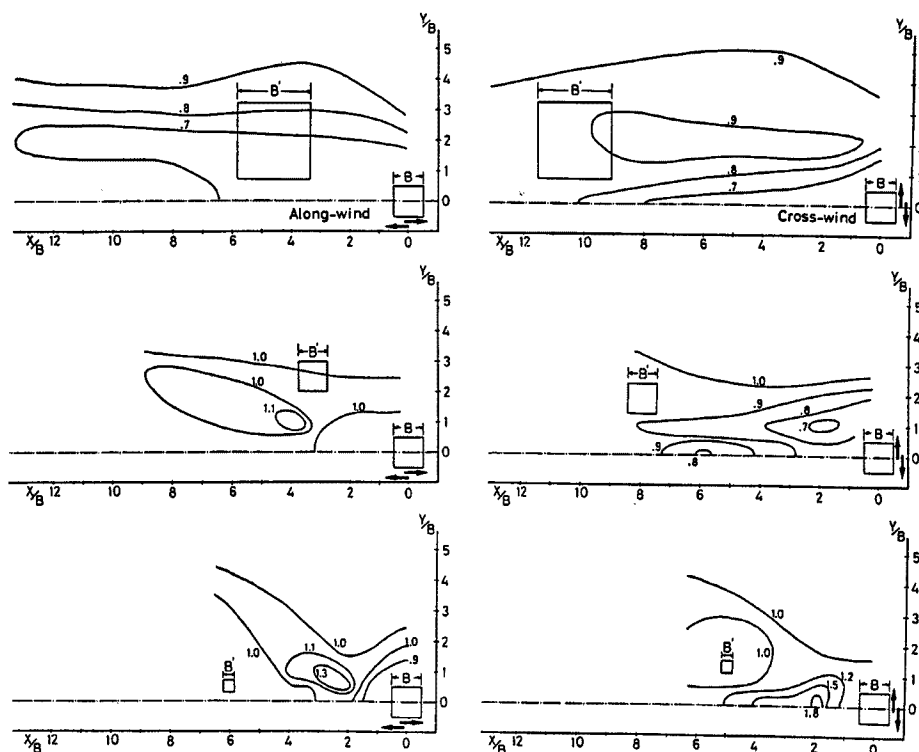
$$B.F. = \frac{\text{風上に角柱があるときの風下角柱の応答}}{\text{単独角柱の応答}}$$

この $B.F.$ は無次元風速 V_r によって異なるが、ここでは前報⁷⁾ の結果に対応させて、 $V_r=5$ のときの値を無次元化した2棟間の距離 (X/B , Y/B) 上にプロットし、**Fig. 7** に示す。図の等高線の数字は、その位置に風上角柱があるときの $B.F.$ を示す。

$B.F.$ が1より大きくなる領域は、風向方向及び風向直角方向の両方向ともに Small モデルの一部の領域に限られており、他のモデルでは全領域にわたり1にほぼ等しいか、或いはそれ以下になる。前報の結果では、 $B.F. \geq 2$ の領域がいずれのモデルの場合にも風上方向に $X/B \geq 20$ にまで広がっており、接近流の乱れの増加は $B.F.$ の値のみならずその相互作用の影響範囲をも減少させることがわかる。

Large モデルの場合には、前節で述べた遮風効果のために、両方向の $B.F.$ が1より小さくなる。この遮風作用の影響範囲は $X/B \geq 10$ にまで広がる。前報⁷⁾ の平均抗力（風向方向の平均変位に対応する）の $B.F.$ の拡がりと比較すると、等高線の分布形状はよく似ており、風下角柱の振動応答に関する $B.F.$ の減少は、風上角柱の遮風作用によってもたらされていることがわかる。

Small モデルの場合、 $B.F.$ が1を越える領域が局所的に存在し、風向方向応答では風上角柱の剝離流線上に、風向直角方向応答では中心線上 (X/B 軸上) に、風下角柱が存在するときに $B.F.$ が最も大きくなる。これは前節でも述べたように、Small モデルの場合には接近流の角柱幅に対する乱れのスケール比 L_x/B



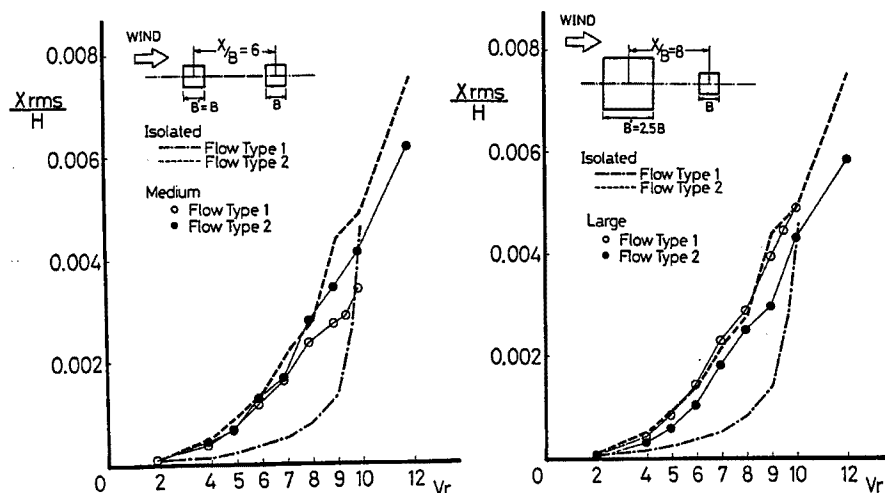


Fig. 8. Comparison of the along wind responses of the downstream and the isolated building in two types of approaching flows.

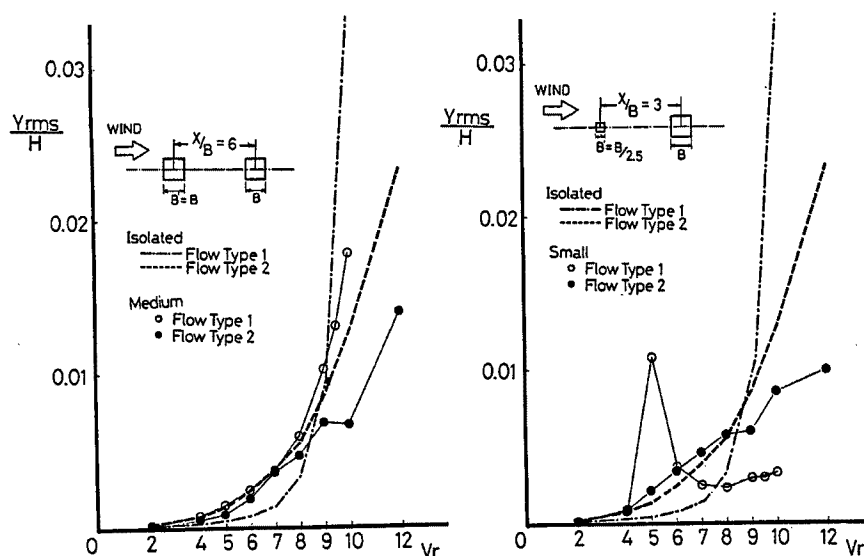


Fig. 9. Comparison of the cross wind responses of the downstream and the isolated building in two types of approaching flows.

ときとはほぼ同等の効果を及ぼすものと考えられる。

Laneville⁹⁾によると、乱れの小さい一様流中において、角柱の淀み点を通る風上側の流線上に障害となる小さい物体（ここでは円柱）が存在すると、それによって乱された流れが風下の角柱に及ぼす抗力は、乱れの大きい乱流中において単独角柱の受ける抗力にほぼ等しくなる。彼の示唆するところ、接近流の乱れを形成するスケールの小さい渦の物体近傍における変形が、その物体まわりの流れの状態に影響を及ぼし、とくに物体の淀み流線上にある渦が最も大きく変形を受けるために、この流線上の渦すなわち乱れが物体まわりの流れを大きく左右する。

本実験では、Fig. 5に見られるように風上に角柱が存在する場合には、その遮風効果により風下角柱の平均変位（平均抗力に対応）は乱れの大きい流れの下での単独角柱の平均変位に比べて小さくなるが、風向

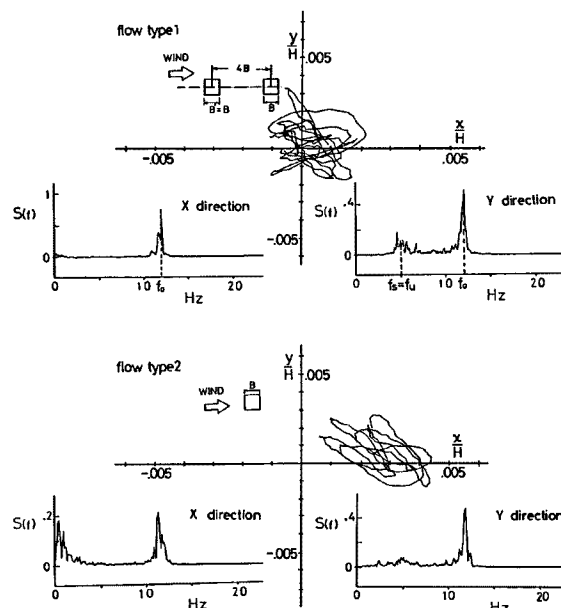


Fig. 10. Traces and spectra of the responses in two types of approaching flows.

方向及び風向直角方向の振動応答に関しては両者ともほぼ等しくなる。また、前報⁷⁾の結果から、風下角柱の中心線上 (X/B 軸上) から離れた位置に風上角柱が存在する場合にも、風下角柱に同じ作用を及ぼす。

これらの結果から、乱れの小さい流れの下で風上に角柱が存在することにより、風下角柱の振動が増加する現象は、風上角柱の剥離流によって形成されるスケールの大きい渦とそれを取り囲む後流の変形が風下角柱に作用する変動抗、揚力を増大させる場合と、このスケールの大きい渦の一部が風下に向うにつれて淀み流線上におけるスケールの小さい渦となり、これが風下角柱の近傍で変形し角柱まわりの流れの状態を変化させる場合とにより生じると考えられる。このうち2棟間の距離が短いときには主として前者の現象が卓越し、2棟間距離の相対的な増加につれて後者の現象が卓越してくるものと思われる。後者の現象が卓越する場合には、風下角柱の応答は乱れの大きい流れの下での単独角柱の応答にほぼ等しくなるものと思われる。

Fig. 9 の Small モデルの場合には、前者の現象が卓越し、さらに共振現象が生じるために、乱れの小さい風下角柱の応答と乱れの大きい単独角柱の応答とに差が生じるのであろう。

なお、 $V_r \geq 9$ になると、乱れの小さい flow type 1 での単独角柱の振動応答は、渦励振を生じるために急激に大きくなる。これに対し、風上に角柱があるとき、或いは接近流の乱れが大きい場合には、角柱の背後に明確で強い渦が形成されにくくなるために、渦励振の生じる共振風速付近における振動応答は、乱れの小さい単独角柱の応答に比べて小さくなる。

3.4 乱れ強さと応答倍率

接近流の乱れ強さが、風下角柱の応答倍率 ($B.F.$) に及ぼす影響を **Fig. 11** に示す。この図は $V_r=5$ のときの風向方向及び風向直角方向の $B.F.$ を示し、縦軸に対数表示した $B.F.$ の値を、横軸に角柱の2/3の高さにおける乱れ強さ I (%) をとる。また、図は全て Medium モデルの例であり、本実験結果 (図中の●印) の他に、Saunders (Δ), Bailey (∇), Blessman ($\square$), Melbourne ($\circ$) の結果を付記してある。なお、図中の (X/B , Y/B) は風上角柱の位置を示し、実線は目測で求めた回帰直線である。

風向方向及び風向直角方向の応答倍率 $B.F.$ は、ともに接近流の乱れの増加につれて指数関数的に減少し、 $I=17\sim 18$ % になると、ほぼ1に近づく。この傾向は風上角柱の配置によっても変わらない。つまり、接近流

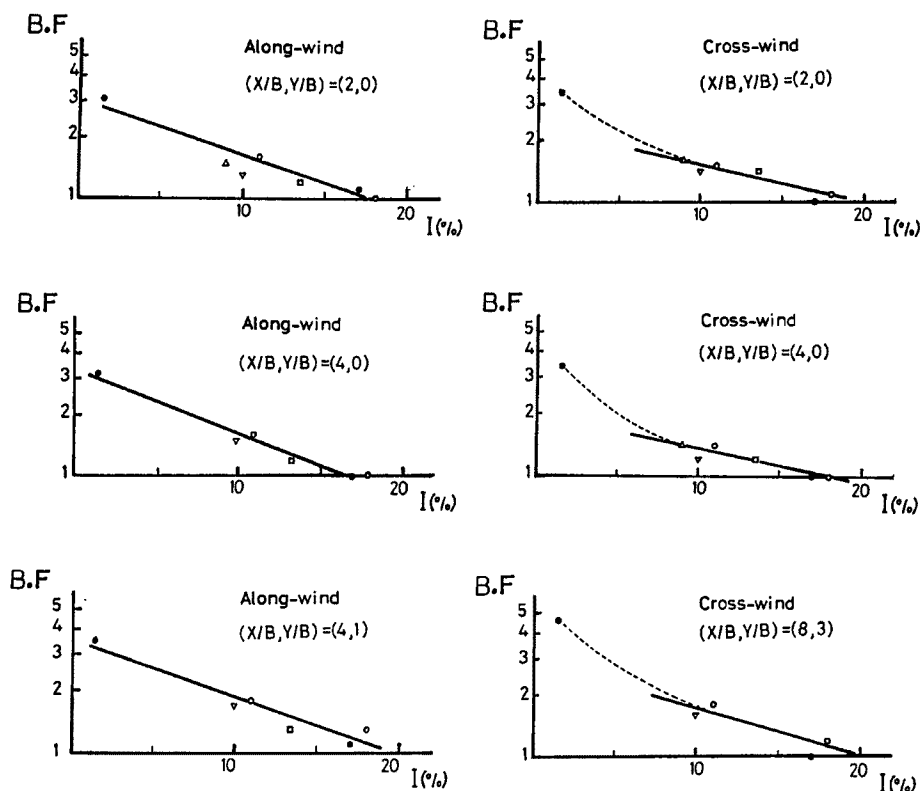


Fig. 11. Buffeting factor, $B.F.$ varied with the turbulence intensity, I (in case of Medium size model at $V_r=5$).

の乱れが増加し、 $I \geq 18\%$ になると、風下角柱の振動応答は風上角柱の影響を受けなくなり、単独角柱の応答にほぼ等しくなる。

逆に、接近流の乱れが小さくなり、 $I \leq 5\%$ になると、相互作用による2棟間の流れが風下角柱に大きく影響し、 $B.F.$ が2を越える。とくに、風向直角方向の $B.F.$ は、図中に破線で示したように急激に大きくなり、直線からずれてくる。乱れの小さい境界層流中における単独角柱の風向直角方向振動は、一様流中に近い性状を示し、 $V_r=5$ の風速域では渦放出に伴う共振現象、すなわち渦励振を起こさず、さらに接近流の乱れによる変動揚力もほとんど作用しないために、その応答値は極端に小さくなる。この結果、風上角柱の影響下での風下角柱の応答値と比較すると、その差が一層大きくなり $B.F.$ が急激に増大するのであろう。

4. む す び

2棟連立する高層建物の乱れの大きい境界層流中における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) 乱れの大きい境界層流中での風下角柱の風向方向及び風向直角方向の振動応答は、前報の乱れの小さい流れの下での応答と異なり、一般に風上角柱の存在によって大きく増加しないことがわかった。逆に、風上角柱が大きくなると、その遮風作用のために後流域の平均及び変動風速が小さくなり、風下角柱の応答は単独角柱に比べて減少する。

2) 接近流の乱れが大きくなると、風上角柱からの剝離渦が明確な形で形成されなくなるために、風速と乱れの増加が期待できず、さらに2棟間の後流の変形 (switching) も生じにくくなるために、風下角柱の振動応答は、単独角柱に比べて増大しなくなるものと考えられる。

3) なお、風上角柱が小さい場合（Small モデルの場合）は、接近流の角柱幅に対する乱れのスケール比が他のモデルに比べて大きくなるために、乱れが増しても風上角柱により明確な渦が形成され易くなり、この影響で風下角柱の振動応答は単独角柱よりも若干大きくなる。

4) 一般に、接近流の乱れの増加につれて、単独角柱に対する風下角柱の応答倍率 $B.F.$ は、両方向ともに減少し、さらに風上角柱の風下角柱に及ぼす相互作用の影響範囲も小さくなる。

5) Medium モデルの応答倍率は、2棟間の配置にかかわらず、両方向ともに接近流の乱れの増加につれて指数関数的に減少し、乱れ強さが17~18%になるとほぼ1に近づくことがわかった。したがって、乱れ強さが18%以上になると、風下角柱の振動応答は、風上角柱の影響を受けなくなり単独角柱の応答に等しくなる。

6) 乱れの小さい流れの下で、風上角柱の影響下における風下角柱の振動応答は、乱れの大きい境界層流中での単独角柱の応答にほぼ等しくなる。これは、風上角柱によって生じる渦とそれをとり囲む後流の変形が、接近流の変動風速成分を増大させる働きをし、もともと大きい乱れをもつ流れと同等の効果を風下角柱に及ぼすためと考えられる。

本研究を進めるにあたり京都大学名誉教授石崎澄雄先生並びに同教授桂順治先生には適切な御助言を頂きました。また、防災研究所羽野淳介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。さらに稲岡秀樹君（現在神戸製鋼 K. K.）には実験及び解析に多大の協力を得た。これらの御厚意に対し心から感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Saunders, J. W. and W. H. Melbourne: Buffeting Effects of Upstream Buildings, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, 1979, pp. 593-606.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 谷池義人・稲岡秀樹・桂 順治：後流中における高層建物の動的挙動，京大防災研年報，第29号 B-1，1986，pp. 159-169.
- 8) 谷池義人・稲岡秀樹：連立する高層建物の境界層流中での相互作用，第9回風工学シンポジウム，1986，pp. 139-144.
- 9) Laneville, A., I. S. Gartshore and G. V. Parkinson: An Explanation of Some Effects of Turbulence on Bluff Bodies, Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1975, pp. 333-341.