

高層建物の質量減衰パラメータによる 空力不安定性について

石崎 潑 雄・谷 池 義 人

EFFECTS ON MASS-DAMPING PARAMETER ON THE WIND RESPONSE OF A HIGH-RISE BUILDING

By *Hatsuo ISHIZAKI and Yoshihito TANIKE*

Synopsis

This paper describes a wind tunnel study to investigate the effects of wind directions and mass-damping parameters on the response of a square prism with the aspect ratio 4.5 to 1. The simultaneous measurements of along and cross wind responses are carried out by a dynamic model balance with two degrees of freedom. A series of tests are performed to assess the effects of changes in stiffness, mass, damping, and wind direction. These tests are conducted by placing the model in a turbulent shear layer which is generated in a wind tunnel with the working section 2.5 m wide, 2 m high and 21 m long. The maximum response of a square-section tall building with an usual mass-damping parameter is generally found to occur in the cross wind direction when the wind is blowing perpendicularly onto a face.

1. ま え が き

近年、建築構造や施工技術の進歩により建物がより高くより軽くなってきている。そのため、建物に作用する水平力として風力が地震力より大きくなる場合も生じており、風工学の重要性が認識されつつある。本報は、高層建物の風による振動に関する耐風設計資料を得る目的で実験を行い、その結果をまとめたものである。

風による建物の動的応答を調べるために行われた風洞実験は、これまでに数多くあるが、その多くは実験結果を実際の建物の耐風設計に適用する場合に必要な種々の相似条件を満足していない。本研究においては、まずこの相似条件について調べ、この条件を満足するために模型や振動実験装置に特別の工夫を施し、さらに風洞内に自然風にできるだけ近い流れを再現させた。このため、ここで得られた結果は今後の耐風設計に十分適用できるものと思われる。

2. 実 験

2.1 風洞気流

実験で使用した風洞は、京都大学防災研究所の境界層風洞である。この風洞は単回路吹出型で、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。この風洞の特徴及び性能に関しては著者等の論文¹⁾に述べてある。今回の実験では、測定部の風上側に毛足が 12 mm のナイロン製の人工芝を 18 m にわたって敷きつめ、これを地表面粗度として測定部内に乱流境界層を発達させた。この際、実際の大気現象に則して実験時の測定部内の静圧を一定に保つように、天井の高さを調節した。Fig. 1, Fig. 2 に測定部と人工芝の概略を示す。測定部内の座標軸は Fig. 1 に示すとおりである。

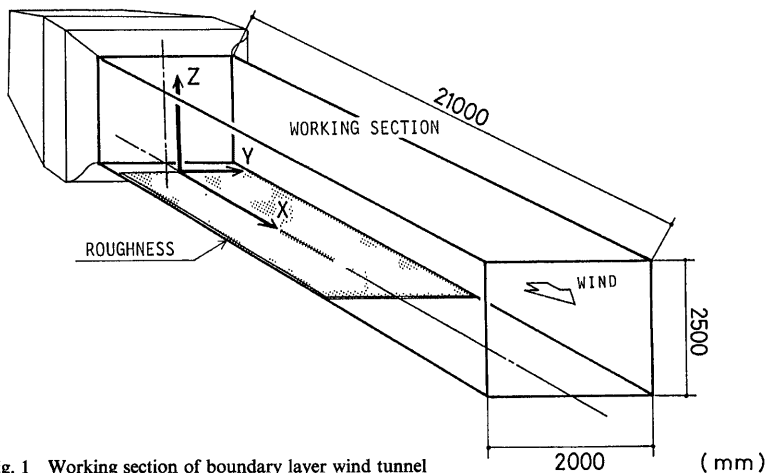


Fig. 1 Working section of boundary layer wind tunnel

模型設置位置付近 ($X=16.5\text{ m}$) での平均風速の鉛直分布、いわゆる風のプロフィールを Fig. 3 に示す。図の両軸は (1) 式に示す巾法則を適用するために対数表示してある。

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{1/n} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 z は地面からの高さ、 z_0 は基準高さ、 V は高さ z における平均風速、 V_0 は基準高さでの平均風速、 n は巾指数をそれぞれ示す。境界層外部の平均風速を $V_B=2\sim 25\text{ m/s}$ まで変化させても巾指数 n の値にはほとんど変化がなく、いずれも $n=3.1$ になった。

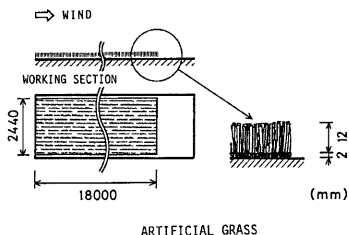


Fig. 2 Roughness of artificial grass

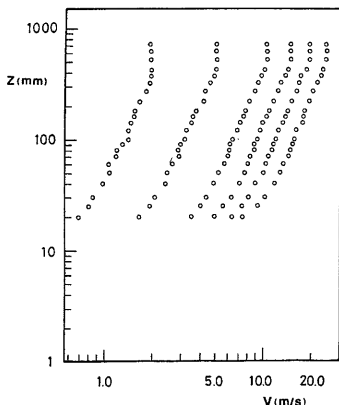


Fig. 3 Mean velocity profile of wind model

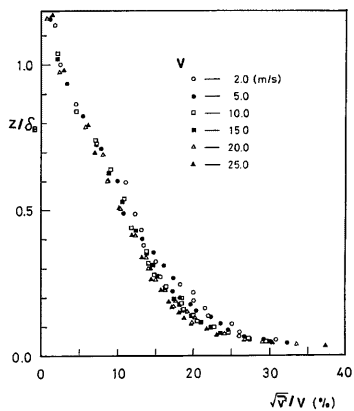


Fig. 4 Longitudinal intensity profile of wind model

また、同位置での風の乱れ強さの鉛直分布を Fig. 4 に示す。縦軸は各測定点の高さ z を境界層の厚さ δ_B で割った値、横軸には乱れ強さ $\sqrt{v^2}/V$ (%) をとる。この図から z/δ_B が 0.4 以下になると、平均風速の増加につれて乱れ強さが小さくなる傾向が見られる。なお、空間相関から求めた風向方向の乱れのスケール L_x は、 $z=10\sim 30\text{ cm}$ の高さで $L_x=20\sim 25\text{ cm}$ であった。モデルの幅 b に対する比で表わすと、 $L_x/b=4\sim 5$ となり、実際の建物に対する自然風のスケール比としては、ほぼ妥当なものであろう。

若者等の行った別の実験²⁾によると、測定部内の地表面粗度を人工芝から実物の 1/250 程度の都市模型に置き換えても、それによって作られる平均風速と乱れ強さの鉛直分布は、人工芝の場合とほとんど差がないことがわかった。このことは吹送距離を 16 m と長くして、境界層を十分に発達させた場合には、粗度の形状や大きさが異っても風速及び乱れの分布性状には大差がないことを意味する。また、Fig. 3, 4 と Counihan³⁾ の調べた自然風の性状とを比較すれば、人工芝と測定部の天井の上下移動によって作った風洞気流は、高層ビルの建ち並ぶ都市上空を吹く風を精度よく再現しているものと思われる。

2.2 模型と実験装置

実験で使用した模型は、建築物の一つの代表的な形状である正方形断面角柱とした。角柱の寸法は幅 $b \times b=5 \times 5\text{ cm}$ 、高さ $h=22.5\text{ cm}$ とし、高さを幅で割ったアスペクト比は $h/b=4.5$ とした。この値は正方形断面をもつ高層ビルの一一般的なアスペクト比である。角柱の側面をバルサ材、上下面をアクリルで作り、軽くて剛なものとした。

今回の実験では、角柱の風向方向振動と風向直角方向振動を同時に測定できるように角柱底面の真下に回

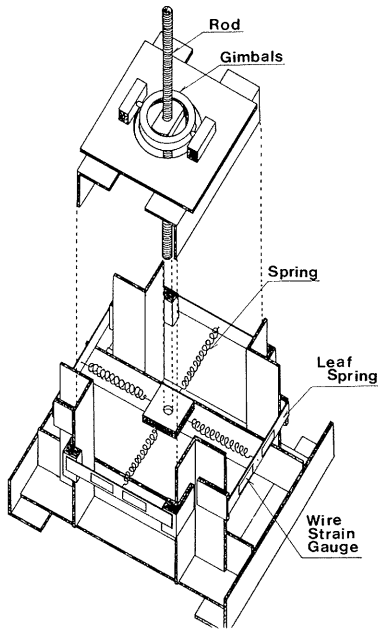


Fig. 5-a Dynamic model balance with two degrees of freedom

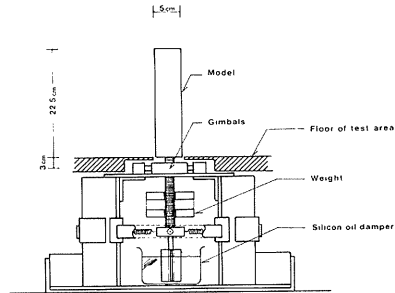


Fig. 5-b Details of dynamic model balance

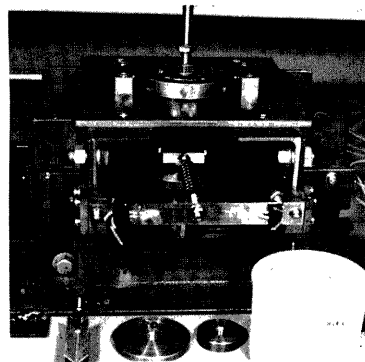


Photo 1 Dynamic model balance

転中心を設けて、2自由度のロッキング振動を可能にする装置を用いた。この装置の概略を Fig. 5(a, b) 及び Photo 1 に示す。真鍮製のロッドを鉛直方向に支持し、その支持点を中心としてロッドが2方向に剛体回転できるように、回転中心にジャイロ스코ープの原理を応用したリングを取り付けた。回転中心より下方のロッドには、水平2方向に互いに直交する4個のコイルバネを取り付け、それぞれの先端を板バネに接続してロッドを弾性支持した。板バネにはワイヤストレインゲージを貼り付け、これによって振動変位を検出した。ロッドの最下端には、矢羽の形をした小さなアルミ板を取り付け、これをシリコンオイル中に浸すことによって角柱の減衰を変化させた。また、ロッドには種々の錘が取り付けられるようにネジが切っており、これによって角柱の慣性モーメントを任意に変えることができる。なお、回転中心から角柱底面までの距離 r を $r=3\text{ cm}$ とした。

2.3 実験方法

振動実験に先立ち、角柱を自由振動させて固有振動数 f_m と減衰定数 μ を測定した。角柱の慣性モーメント I は、振動数 f_m とバネの回転剛性 K とから $2\pi f_m = \sqrt{K/I}$ の関係式によって計算した。振動数はコイルバネと板バネの厚さを変えることにより、減衰はシリコンオイルの量を増減することにより、さらに慣性モーメントはロッドを含めた振動系全体の重さを変化させることにより、それぞれ調節した。なお、これらの値は、互いに直交する2方向に因していずれもほぼ等しくした。

実験風速は $2\sim 12\text{ m/s}$ の範囲で約15風速とし、熱線風速計を用いて測定した。風速計の設置場所は、角柱の風上側で角柱と同じ高さとした。角柱に対する風向は、風が角柱の一面に直角にあたる場合 ($\alpha=0^\circ$) と、斜めからあたる場合 ($\alpha=22.5^\circ, 45^\circ$) の3種類とした。ゲージからの出力は直流増幅器によって増幅し、60 Hz のローパスフィルターを通過させた後、波形解析装置に入力した。A-D 変換の読み取り間隔は 2 ms とし、10秒間のデータを解析した。なお、Photo 2 に振動装置を風洞内に設置した様子を、Photo 3 に風下側の測定部から見た実験状況を示す。



Photo 2 Experimental set up in wind tunnel



Photo 3 Inside view of wind tunnel

3. 相似条件

風洞実験で得られた結果を実際の高層建物の耐風設計に適用する際に必要となる相似条件について調べてみる。この条件は、実際に建物周辺に吹く自然風と風洞気流とを相似にさせることと、流れが実物と模型にあたる時の影響を相似にさせることの2つである。前者の条件は、自然風のもつ風速のプロフィール、乱れ強さ、乱れのスケール及び流れ方向の静圧勾配等の性質を、風洞内に再現させることであるが、2.1節からこの条件はほぼ満たされている。

後者の条件は、Reynolds 数、Froude 数、建物の幾何学的形状、減衰率比、建物と空気の密度比、及び無次元風速（あるいは弾性のパラメーター）を実物と模型で一致させることである。このうち Reynolds 数と Froude 数は、流体の運動を記述する Navier-Stokes の方程式の各項の比率で表わされるが、この2つの条件は互いに相反する事象で、一般に建築構造物を対象とした風洞実験では得られない。しかし、ここで対象とする直方体の建物の場合、流れの剥離位置がほぼ一定となることから Reynolds 数の影響は小さくなり、さらに流体の密度が小さい、すなわち空気密度が小さいことから Froude 数の影響も無視できる。したがって、他の4つの条件を一致させればよい。このうち幾何学的な相似条件は、実物がある比率で縮小して作れば得られる。

建物の1次の振動モードを線型、すなわちロッキングと仮定すれば、残りの3つの条件は減衰定数 $\mu (=C/2\sqrt{K \cdot I})$ 、質量パラメーター $N (=I/\rho b^4 h)$ 、無次元風速 $V (=V/f_m b)$ で表わすことができる。ここで C は減衰係数、 K は回転剛性、 $I (= \int_0^h m(z)z^2 \cdot dz)$ は慣性モーメント、 $m(z)$ は高さ z での単位長さあたりの質量、 ρ は空気密度、 b, h は建物の幅と高さ、 f_m は建物の固有振動数とする。この3つの無次元量を実物と模型で一致させれば、実際の直方体建物の風による動的応答を風洞実験により把握することができる。

ところで、中村・澤田⁴⁾、大築・鷲津⁵⁾、及び著者⁶⁾等の行った実験によると、構造物に作用する空気力のうちで構造物の振動変位と同相の空気力成分は、通常、構造物の復元力に比べて一桁以上小さくなることから、構造物の振動数はほとんど変化しないことがわかった。Scruton⁷⁾によると、このような場合には相似のパラメーターとして μ と N をそれぞれ独立に選ぶ必要はなく、それらの積 $\mu \times N$ で代表することができる。この積を一般に質量減衰パラメーター、あるいは Scruton 数と呼ぶ。以上のことから、本実験では無次元風速と質量減衰パラメーターの値を種々に変化させて角柱の振動応答を求め、実際の直方体建物の空力不安定性状を調べることにした。

4. 実験結果

4.1 振動波形

角柱を中心とした座標系を Fig. 6 に示す。座標系の原点を回転中心にとり、 x, y 軸を角柱の一辺に平行で互いに直交する2方向に、 z 軸を高さ方向にとる。なお、地面板は $z=r$ の位置、すなわち角柱底面と同じ高さの位置にある。

角柱頂部の振動変位 X_a, Y_a を平均成分 \bar{x}, \bar{y} と変動成分 x, y にわけて次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} X_a &= \bar{x} + x \\ Y_a &= \bar{y} + y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

また、3章で述べた角柱の質量減衰パラメーター δ をここでは次式で定義する。

$$\delta = \frac{16\pi^2 I \mu}{\rho b^3 h l} \dots \dots \dots (3)$$

ここで $l (= \frac{h}{2} + r)$ は回転中心から角柱の高さの半分までの距離を示す。

本実験では、角柱の質量、減衰、剛性をそれぞれ変化させて、次表に示す角柱の振動数 f_m 、減衰定数 μ 、及び質量減衰パラメーター δ の値を4種類得た。これらの値は、 x, y の両方向で等しくした。

Fig. 7(a, b, c) に、迎角 α が変化したときの角柱頂部の振動変位の軌跡を δ の最も小さい Case I を例に

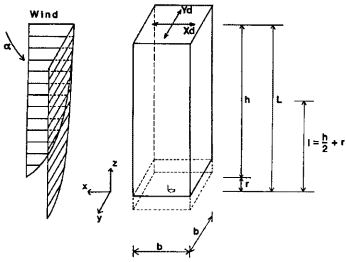


Fig. 6 Orientation of model

Table 1 Lists of frequency f_m , damping ratio μ and mass-damping parameter δ of the model

Case \ Item	f_m (Hz)	$\mu (\times 10^{-2})$	δ
I	22	0.78	120
II	17	0.56	150
III	17	1.1	290
IV	16	2.4	670

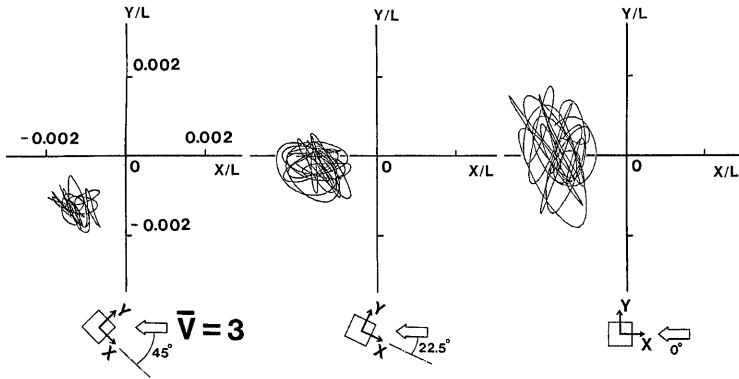


Fig. 7-a Trace of path at top level of the model with various angles of attack ($\bar{V}=3$)

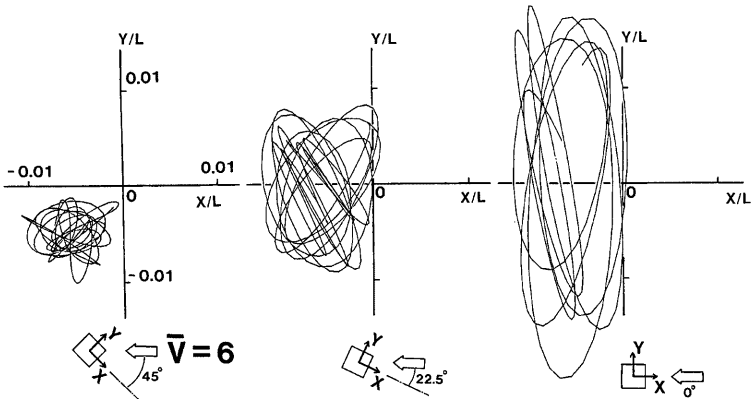
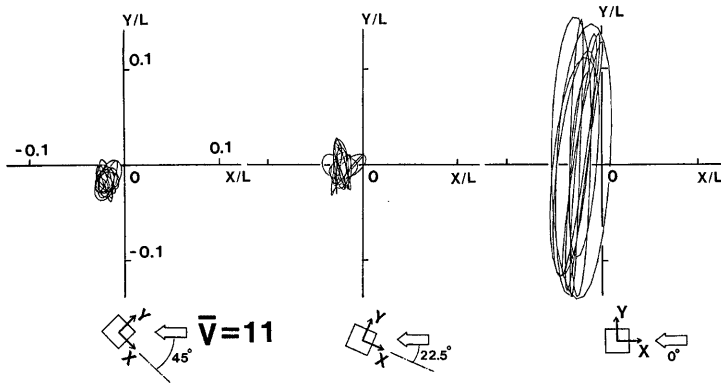


Fig. 7-b Trace of path at top level of the model with various angles of attack ($\bar{V}=6$)

Fig. 7-c Trace of path at top level of the model with various angles of attack ($\bar{V}=11$)

として示す。無次元風速 \bar{V} ($=V/f_m b$) の低い順に a, b, c とした。両座標軸とも角柱頂部の変位 X_s, Y_s を回転半径 L で割って無次元化してある。但し、座標の目盛りは \bar{V} の増加につれて大きくなる。

無次元風速が $\bar{V}=3$ と低いときには、迎角 α の大きさにかかわらず振動は不規則になる。また、振動の軌跡の包絡線は平均変位 (\bar{x}, \bar{y}) を中心とした円に近くなる。円の大きさ、すなわち振動変位の極値は α の増加につれて小さくなる。これに対し、平均変位の絶対値 $\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ は、 α の増加につれてわずかではあるが大きくなる。これは正方形断面角柱に加わる風力が、迎角 α の増加、すなわち見付け面積の増加につれて大きくなることに対応する。

Kareem et al⁶⁾, Melbourne⁹⁾ 等によると、 \bar{V} の低いときには x, y の両方向の振動は互いに独立な現象となる。これは2方向の振動変位 x, y を確率変数とした結合確率密度関数を求め、その形状を調べることにより判別できる。ここではこの解析を行っていないが、 $\bar{V}=3$ のときの振動の軌跡が Melbourne⁹⁾ 等の求めた軌跡と定性的によく似ていることから、このときの振動は x, y 方向に互いに独立であると思われる。2方向の振動が独立である場合には、これまでよく用いられてきた1方向の振動を拘束した状態、すなわち1自由度の振動実験によって振動現象を把握することができる。

無次元風速が $\bar{V}=6$ になると、 $\alpha=0^\circ$ における風向直角方向 (y 方向) への振動が他の場合に比べて大きくなる。このときの x, y 平面内の振動の軌跡は楕円に近くなり、自励的な振動の発生がうかがわれる。また、このときの風向直角方向の振動変位は、平均変位を含めた風向方向の振動変位に比べて1.5倍以上にもなる。この正方形断面角柱のストローハル数 S_i は、一様流中では $S_i=0.115$ であり、これから共振風速 \bar{V}_{res} を計算すると $\bar{V}_{res}=8.7$ になる⁶⁾。 $\bar{V}=6$ の風速域は、一様流中においては渦励振の開始領域に相当しており、この振動が乱流境界層中においても生じることを示す。

さらに $\bar{V}=11$ になると、 $\alpha=0^\circ$ のときの風向直角方向への振動が一層大きくなり、その振幅もほぼ一定になる。このときの振動は、渦励振からの発振がそのままギャロッピングへ移行したものと考えられる。この場合には、 x, y 両方向の振動は互いに独立ではなく、両方向でエネルギーの交換が行われるものと思われる。また、他の迎角の場合には、これまでと同様、その軌跡は円に近くかつ振動波形は不規則であり、強制振動的な性状を示す。

なお、 δ を変化させても Fig. 7(a~c) とよく似た現象が見られたことから、正方形断面角柱に風が直角にあたる場合には、乱流境界層中においても渦励振やギャロッピングの自励的な振動が生じ、風向直角方向の振動変位が飛躍的に大きくなることがわかった。角柱に対し風が斜めからあたる場合には、無次元風速 \bar{V} の

大きさにかかわらず、いずれも強制振動的な性状を示し、その振動の変動成分は x, y 両方向でほぼ等しくなった。このことは次節に示す応答曲線からも明らかになる。

4.2 応答曲線

質量減衰パラメーター δ が変化したときの風速と変位の関係を示す応答曲線を Fig. 8(a~e) に示す。a, b, c 図は y 方向の、d, e, c 図は x 方向 (但し、c 図は x, y に共通) の応答曲線を示し、迎角 α をこの順に小さくとした。図中の数字は質量減衰パラメーターの値であり、横軸は無次元風速 \bar{V} を、縦軸は角柱頂部の振動変位の標準偏差 $\sqrt{\bar{x}^2}(=x_{rms}), \sqrt{\bar{y}^2}(=y_{rms})$ を回転半径 L で割って無次元化した値、すなわち層間変位角に相当する値を示す。なお、a 図の縦軸の目盛りは他の図の 5 倍にとっている。

$\alpha=45^\circ$ の場合には、振動変位の平均及び変動成分が x, y 両方向でほぼ等しくなるために、ここでは両者の平均をとり一つのグラフで代表させた。 $\alpha=22.5^\circ$ の場合には、 y 方向の振動変位の標準偏差 y_{rms} が、わず

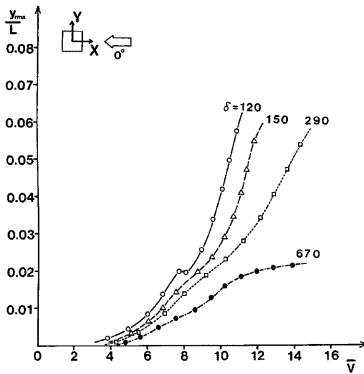


Fig. 8-a RMS responses in y direction of the model for different values of mass-damping parameters ($\alpha=0^\circ$)

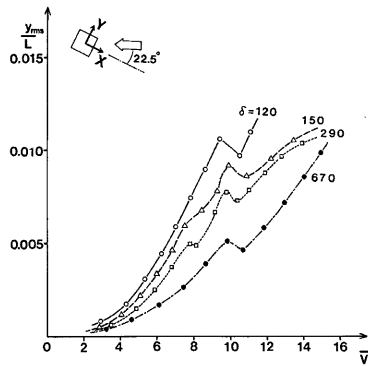


Fig. 8-b RMS responses in y direction of the model for different values of mass-damping parameters ($\alpha=22.5^\circ$)

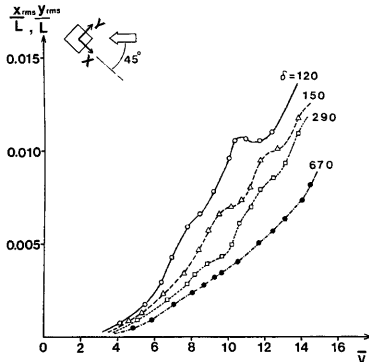


Fig. 8-c RMS responses in y (or x) direction of the model for different values of mass-damping parameters ($\alpha=45^\circ$)

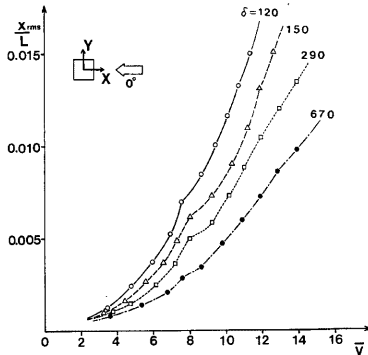


Fig. 8-d RMS responses in x direction of the model for different values of mass-damping parameters ($\alpha=0^\circ$)

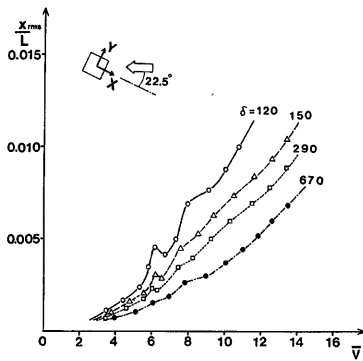


Fig. 8-e RMS responses in x direction of the model for different values of mass-damping parameters ($\alpha=22.5^\circ$)

得られている。

一様流中において角柱が風に直面する場合 ($\alpha=0^\circ$)、質量減衰パラメーター δ が大きくなると、共振風速 \bar{V}_{res} 付近でピーク応答を示す振動を生じることがある。乱流境界層中においては、 δ の大ききにかかわらずこのような現象は見られず、いずれも \bar{V} の増加につれて振動は単調に大きくなる。

また、 \bar{V} が 8 前後になると、y 方向すなわち風向直角方向への振動はほぼ定常になり、乱流境界層中においても渦励振が生じることを示す。さらに \bar{V} が大きくなると、渦励振からギャロッピングへ移行するが、一様流中において見られたように渦励振とギャロッピングとが分離してあられわずに、この移行は連続的に生じる。なお、Fig. 8-a を見ると、 δ の最も大きい $\delta=670$ の場合には、 \bar{V} の増加に伴い y_{rms} の増大する割合が他の δ に比べて小さくなる。さらに δ を大きくすると、渦励振やギャロッピング等の自発的な振動が生じにくくなり、風向方向の振動と同様、風の乱れによる強制的な振動が卓越してくることも考えられる。

一様流中比べて乱流境界層中においては、角柱静止時に発生する周期的な Strouhal 数成分の渦が生じにくくなるために、 \bar{V}_{res} 付近で生じる渦励振は主として角柱の振動に伴う付加的な空気力、すなわち振動数成分の渦によって引きおこされるのであろう。このため、渦励振は自発振動的な傾向が強くなる。このことから、 \bar{V} が 8 以上の高風速域においては、角柱静止時に作用する空気力をもとにして、風向直角方向の振動現象を解析することは一般に困難になる。但し、 δ が非常に大きくなる場合には、 \bar{V} が高くなっても強制的な振動が卓越してくると思われるので、この手法が適用できるものと思われる。

4.3 振動の発生領域

Fig. 8(a-e) をもとにして、振動の発生領域が質量減衰パラメーター δ によってどのように変化するかを調べた。ここでは、変動成分の大きくなる y 方向の振動を対象とし、 y_{rms}/L が 0.008 以上になる場合を振動の発生領域と定義した。その結果を Fig. 9 に示す。斜線で囲んだ範囲が $y_{rms}/L \geq 0.008$ になる振動の生じる領域である。横軸には無次元風速 \bar{V} 、縦軸には質量減衰パラメーター δ をとる。図中の破線は、同じ角柱を用いて著者¹²⁾ が以前求めた一様流中での $\bar{V}-\delta$ の関係である。

振動の発生領域は、迎角 α 及び質量減衰パラメーター δ の増加につれてより高風速側に移行する。 $\alpha=22.5^\circ, 45^\circ$ の場合には、 δ の増加につれて振動の発生領域が著しく高風速側へ移行する。

これに対し、 $\alpha=0^\circ$ の場合には、 δ が 600 以下のときに振動の発生領域は一様流の場合よりもさらに低風速側へ前進し、空力的により不安定となる。 δ が 600 以下の領域は、 \bar{V} で 8 以下の風速域に対応し、この領域においては主として風の乱れによる強制的な振動が生じる。 \bar{V} が 8 以上になると、前節でも述べたよう

かではあるが x 方向の x_{rms} より大きくなる。しかし、前節の Fig. 7 に示したように平均変位を考慮すれば、x 方向の振動変位 X_d が y 方向の Y_d を上まわる。これに対し、 $\alpha=0^\circ$ の場合には、 \bar{V} が 4 以下の低風速域において両者の標準偏差 x_{rms}, y_{rms} は同程度になるが、 \bar{V} が 5 以上になると y_{rms} は x_{rms} の 2~4 倍にも達し、さらに平均変位を考慮しても Y_d は X_d の 1.5~3 倍になる。また、迎角 α に関する x 方向あるいは y 方向の標準偏差を比較すると、いずれも $\alpha=0^\circ$ のときの x_{rms}, y_{rms} が最も大きくなる。これらの結果から、無次元風速 \bar{V} の低い領域で耐風設計を行う場合には主として $\alpha=0^\circ$ の x 方向の振動を考慮し、 \bar{V} の高い領域においては同じく $\alpha=0^\circ$ の y 方向の振動を考慮すればよい。Reinhold・Sparks¹¹⁾ の行った実験においても同様の結果が

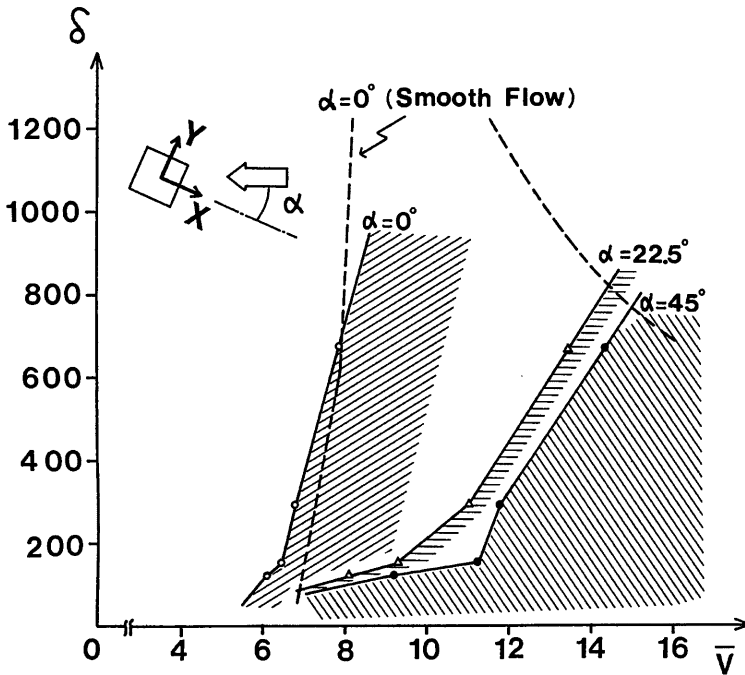


Fig. 9 Regions of aerodynamic instability varied with mass-damping parameters

に角柱の振動に伴う付加的な空気力による自励的な振動が卓越するが、 δ の増加に伴う振動の発生領域を比較することにより、この振動は一樣流中と比べると乱流境界層中では生じにくくなる。これは付加的な空気力を形成する振動数成分の渦が、一樣流中に比べ乱流境界層中では高さ方向に一樣になりにくいためであろう。

4.4 耐風設計例

今回の実験で得られた結果を実際の高層建物の耐風設計に応用してみる。ここでは次表に示す高層オフィスの空力不安定性について検討する。

耐風設計の手順は次のとおりである。

- 1) 設計建物の慣性モーメント I を求める。
 - 2) 設計建物の質量減衰パラメーター δ を求める。
 - 3) \bar{V} (無次元風速) - δ の関係及び $\bar{V} - y_{rms}/L$ (無次元振動変位) の関係から、振動の発生風速 \bar{V} とその大きさを求める。
 - 4) 実際の風速に換算する。
 - 5) 設計建物の安全性を検討する。
- 上の1)~5)の順にそれぞれの値を求める。
- 1) 建物の重量が高さ方向に一樣に分布している

Table 2 Example of high-rise steel building

Structure	Steel
Width	40 m × 40 m
Height	160 m
Weight	45000 tw
Fundamental Frequency	0.2 Hz
Damping Ratio	0.01

と仮定し、単位長さあたりの質量 m を求めると、

$$m = \frac{45000}{160} = 281 \text{ (t/m)}$$

になる。慣性モーメントは

$$I = \int_0^h m z^2 \cdot dz = 281 \times \frac{160^3}{3} = 3.84 \times 10^8 \text{ (t} \cdot \text{m}^2) = 3.84 \times 10^{11} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$$

- 2) 質量減衰パラメーター δ は (3) 式で定義しているが、ここでは実際の建物に対応させて (3) 式で $I = \frac{h}{2}$ とおく。したがって

$$\delta = \frac{16 \times \pi^2 \times 3.84 \times 10^{11} \times 0.01}{1.23 \times 40^3 \times 160 \times 160/2} = 600$$

となる。但し、空気密度を $\rho = 1.23 \text{ (kg/m}^3)$ にした。

- 3) 実物 (アスペクト比 4) と模型 (アスペクト比 4.5) でアスペクト比がわずかに異なるが、著者の以前求めた一樣流中での実験結果¹²⁾ から推定すると、この程度のアスペクト比の違いは振動性状にほとんど影響を及ぼさないものと思われる。Fig. 9 を見ると、 $\delta = 600$ のときの振動の発振風速は $\alpha = 0^\circ$ のときが最も低く、無次元風速で $\bar{V} = 7.7$ となる。このときの振動は渦励振であり、振動変位の最大値すなわち振幅は $\sqrt{2} \times y_{r.m.s.} / L = \sqrt{2} \times 0.008 = 0.11$ となる。また、Fig. 8-a から $\delta = 600$ の応答曲線を、 $\delta = 670$ の場合で代表させてもさほど大差はないものと思われる。したがって、この振動は \bar{V} の増加につれて徐々に大きくなる。

- 4) $\bar{V} = V / f_n b$ の関係式から $\bar{V} = 7.7$ のときの実際の風速 V は、

$$V = 7.7 \times 0.2 \times 40 = 62 \text{ (m/s)}$$

になる。この値は建物頂部 (ここでは地上 160 m) での風速であるので、(1) 式を用いて地上 10 m での基準風速 V_{10} に換算すると

$$V_{10} = 62 \times \left(\frac{160}{10} \right)^{-\frac{1}{3.1}} = 26 \text{ (m/s)}$$

になる。

- 5) 地上 10 m の地点で風速 26 m/s 程度の風は、通常の台風時には吹くと予想される。また、このときの建物の振動変位は層間変位角で 1/100 程度になり、主体構造が塑性域に達する場合もある。

したがって、Table 2 に示した建物は耐風設計上危険となる。このことから、この設計建物は渦励振を防止するために、剛性と重量を増して固有振動数 f_n と質量減衰パラメーター δ を大きくする配慮が必要である。

5. む す び

高層建物の一つの代表的な形状である正方形断面角柱の、乱流境界層中での空力不安定性状を調べる目的で風洞実験を行った。主な結果は次のとおりである。

- 1) 十分な吹送距離をもつ人工芝を地表面粗度とし、さらに測定部内の静圧を一定に保った風洞気流は、都市上空を吹く風を精度よく再現していることがわかった。
- 2) 風が角柱に直角にあたる場合に振動が最も大きくなる。このうち、無次元風速 \bar{V} が 4 以下のときには風向方向 (x 方向) の振動が、 \bar{V} が 4 以上になると風向直角方向 (y 方向) の振動が卓越してくる。
- 3) 無次元風速が $\bar{V} \leq 4$ と低いとき、角柱断面に直交する x, y 方向の振動は互いに独立な現象になる。
- 4) 風が角柱に直角にあたる場合には、乱流境界層中においても渦励振やギャロッピングの自動的な振動が生じ、風向直角方向の振動変位が飛躍的に大きくなることがわかった。したがって、 \bar{V} が 8 以上の高風速域においては、角柱静止時に作用する変動空力をもとにして、風向直角方向への振動現象を解析することは一般に困難になる。
- 5) 風が角柱に斜めからあたる場合には、無次元風速 \bar{V} の大きさにかかわらず、いずれも強制振動的な性

状を示し、その振動の変動成分は x, y 両方向でほぼ等しくなる。

- 6) 振動の発生領域は、迎角 α 及び質量減衰パラメーター δ の増加につれて、より高風速側に移行することがわかった。
- 7) $\alpha=0^\circ$ の場合には、質量減衰パラメーター δ が600以下のときに、振動の発生領域は一様流中の場合よりもさらに低風速側に移行し、空力的により不安定となることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、京都大学防災研究所桂順治助教授と林泰一助手には乱流境界層の機構について有益な助言を頂いた。同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。また、大石幸嗣君をはじめ石崎研究室の学生諸君には、実験、解析、図の作成に多くの協力を得た。これらの御厚意に対し心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石崎澄雄・桂 順治・谷池義人：新設の風工学研究用境界層風洞について，京大防災研年報，第26号 B-1, 1983, pp. 313-322.
- 2) 石崎澄雄・桂 順治・谷池義人・丸山 敬：風洞床面の粗度の変化による気流の性状について，京大防災研年報，第27号 B-1, 1984 (投稿中).
- 3) Counihan, J.: Adiabatic Atmospheric Boundary Layers — A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972—, Atmospheric Environment, Vol. 9, 1975, pp. 871-905.
- 4) Nakamura, Y. and T. Mizota: Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Proc. ASCE, Vol. 101, EM6, 1975, pp. 855-871.
- 5) Otsuki, Y., K. Washizu, H. Tomizawa and A. Ohya: A Note on the Aeroelastic Instability of a Prismatic Bar with Square Section, Jour. Sound and Vibration, Vol. 34, 1974, pp. 233-248.
- 6) 石崎澄雄・谷池義人：風向直角方向に振動する角柱の空力不安定性について，日本建築学会論文報告集，第306号，1981，pp. 11-20.
- 7) Scruton, C.: On the Wind-excited Oscillations of Stacks, Towers and Masts, Proc. Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1963, pp. 797-836.
- 8) Kareem, A., J. E. Cermak and J. A. Peterka: Crosswind Response of High-rise Buildings, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, 1979, pp. 659-672.
- 9) Melbourne, W. H.: Probability Distributions of Response of BHP House to Wind Action and Model Comparisons, Jour. Industrial Aerodynamics, Vol. 1, 1975, pp. 167-175.
- 10) Melbourne, W. H.: Wind Loading and Wind Effects, Tall Building Criteria and Loading, Vol. CL, 1980, pp. 145-248.
- 11) Reinhold, T. A. and P. R. Sparks: The Influence of Wind Direction on the Response of a Square-section Tall Building, Proc. 5th Int. Conf. on Wind Engineering, 1979, pp. 685-698.
- 12) 谷池義人：高層建築物の空力不安定性に関する研究，京都大学学位請求論文，1984，pp. 64-121.