

# 境界層流中にある長方形断面角柱の 空力不安定性について

石崎 潑雄・桂 順治・谷池 義人・大藤 信雄

## THE WIND RESPONSES OF PRISMS WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION IN BOUNDARY LAYERS

By *Hatsuo ISHIZAKI, Junji KATSURA,*  
*Yoshihito TANIKE and Nobuo OFUJI*

### Synopsis

This paper describes a wind tunnel study to investigate the effects of wind directions and mass-damping parameters on the response of prisms with rectangular cross-sections.

The simultaneous measurements of along and cross wind responses were carried out by a dynamic model balance with two degrees of freedom. A series of tests were performed to assess the effects of changes in stiffness, mass, damping and wind direction.

These tests were conducted by placing the models in two different types of boundary layers generated in a wind tunnel with working section 2.5 m wide, 2 m high and 21 m long.

The maximum response of tall building with an usual mass-damping parameter was generally found to occur in the cross wind direction when the wind is blowing perpendicularly onto a face.

## 1. 序 文

建築架構技術の発展や新材料の開発によって建物の軽量化や高層化が進むと、建物に作用する風力は相対的に増加する。また、部材の接合方法の進歩によって溶接が多く用いられるようになったため、構造物の減衰性は低下する傾向にある。従って高層建築物は風によって振動しやすくなっており、その性状を把握することがますます重要になってきている。

風による構造物の挙動は、接近流の乱れの強さ、構造物の断面形状、構造物の減衰、風向角によって複雑に変化するため、特に実際の建物がある乱流境界層においては未だ系統的な把握がなされていない。また、これまでの研究例は構造物の振動時に作用する付加的な空気力を考慮していないものが多い。

本研究では気流の乱れが異なる2種の乱流境界層中で高層建築物の代表的な形状である正方形と長方形の断面をもつ角柱を例により、その空力不安定を明らかにして今後の耐風設計の一資料とすることを目的とし自由振動実験を行ったものである。

## 2. 実 験

### 2.1 風洞及び風洞気流

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し型で、測定部の断面は、幅 2.5 m、高さ 2 m で長さは 21 m である。天井は21枚のパネルで構成されており、上下に動か

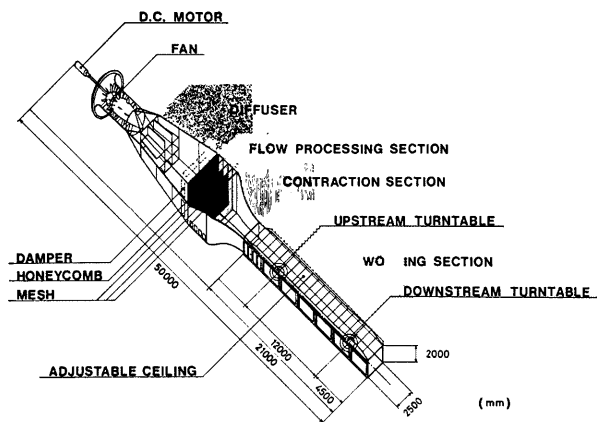


Fig. 1 Boundary layer wind tunnel

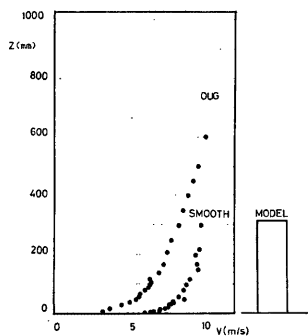


Fig. 2 Mean velocity profile of wind model

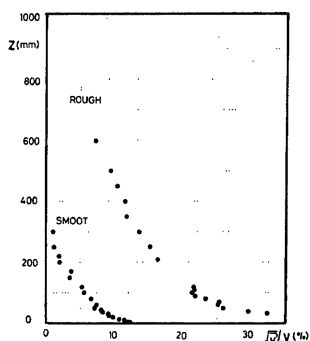


Fig. 3 Longitudinal intensity profile of wind model

して内部の静圧を一定にすることができる。風洞の全景及び各部の寸法を Fig. 1 に示す。

今回の実験は、風洞床面に何も敷かない場合（以下、SMOOTH な場合と呼ぶ）と、吹き出し口の downstream 5.6 m の位置から模型周辺まで 10.9 m にわたって、スケール 1/250 の都市模型を敷きつめた場合（以下、ROUGH な場合と呼ぶ）の 2 種類の乱流境界層内で行った。SMOOTH 及び ROUGH な場合の気流の模型設置位置（吹き出し口の downstream 16.5 m）での平均風速及び乱れの強さのプロファイルを Fig. 2, Fig. 3 に示す。縦軸に各測定点の高さ、横軸に平均風速  $V$  (m/s) と乱れの強さ  $\sqrt{u^2}/V$  (%) をそれぞれとっている。図は基準風速 10 m/s について測定したものであるが、石崎・桂・谷池・丸山<sup>1)</sup>の実験により、基準風速を変えても分布形状は変わらないことがわかっている。

## 2.2 模型及び振動装置

模型は高層建築物の代表的な形状である長方形断面角柱とした。断面の辺長比が 1 : 1, 1 : 2, 2 : 1 の

Table 1 Characteristics of models

| MODEL | b(cm) | d(cm) | h(cm) | b:d | b:h    | Weight(g) |
|-------|-------|-------|-------|-----|--------|-----------|
| 1     | 7     | 7     | 31.5  | 1:1 | 1:4.5  | 85        |
| 2     | 5     | 1.0   | 31.5  | 1:2 | 1:6.3  | 77        |
| 3     | 1.0   | 5     | 31.5  | 2:1 | 1:3.15 | 77        |

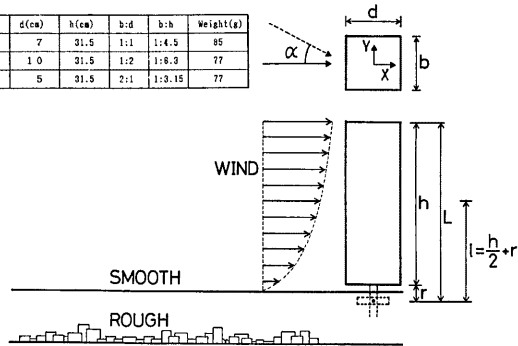


Fig. 4 Orientation of model

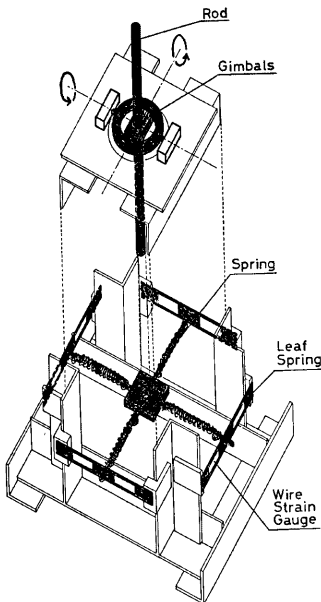


Fig. 5 Dynamic model balance with two degrees of freedom

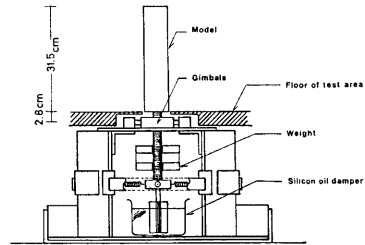


Fig. 6 Details of dynamic model balance

3種類で高さは一定のものである。模型の寸法をTable 1, 実験における座標系をFig. 4に示す。模型の材質は角柱の側面をバalsa材・上下面をアクリル材で作り、慣性力を小さくし十分な空気力が得られるようにした。模型底面の中央には直径8mmのネジ穴が切っており、真鍮製のロッドを介して振動装置に接続できる。

Fig. 5及びFig. 6に振動装置を示す。装置は、角柱の風向方向と風向直角方向の振動を同時に測定できるように、角柱底面の真下に回転中心を設けて、2自由度のロッキング振動を可能にしたものである。真鍮製のロッドを鉛直に支持し、その支持点を中心としてロッドが2方向に回転できるように、回転中心にジャイ

ロスコープの原理を応用したリングを取り付けた。ロッドの回転中心より下方の部分に水平方向に互いに直交する4個のコイルばねを取り付け、それぞれの先端を板ばねに接続してロッドを弾性支持した。板ばねに4枚のワイヤー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

根の形をしたアルミ板を取り付け、これをシリコンオイルに浸して、矢羽根の大きさとシリコンオイルの量を変えることによって角柱の減衰を変化させた。今回の実験では、矢羽根2種類と矢羽根を取り付けない場合の計3種類の減衰について行った。ロッドの回転中心とコイルばねによる支持点の間にはネジが切っており、この部分に種々のおもりを付けることによって振動部分の慣性モーメントを変えることができる。実験では198gのおもりを取り付けた。なお、3種類の角柱で慣性モーメントの値をほぼ同じにした。

### 2.3 実験方法

実験に先立ち、振動装置の諸元を測定した。

固有振動数  $f_m$ 、減衰定数  $\mu$  は、角柱を自由振動させてその波形をペンレコーダーに出力し、それを読み取って得た。回転剛性  $K$  は、角柱頂部に水平力を与え、そのときの回転角と回転中心でのモーメントとの関係により求めた。慣性モーメント  $I$  は  $2\pi f_m = \sqrt{K/I}$  の関係式により求めた。

実験風速は2~12 m/sの範囲で、風速は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風上面より見付幅の6倍の距離で、高さは約20 cmの位置である。

1) 角柱に風が直角にあたる場合は10~20風速。

2) 斜めからあたる場合は、迎角が0°~45°までの約6種類について3~4風速。

上記1), 2)について、SMOOTHな場合とROUGHな場合の2種類の乱流境界層内で、減衰を3段階に変化させて測定した。ゲージからの出力は差動トランスボックスを介して直流増幅器によって増幅し、テープレコーダーに記録した。また同時に熱線風速計からの出力を交流回路を通して変動成分のみをテープレコーダーに記録した。解析はテープに記録した波形を、風速変動についてはそのまま、振動波形については100 Hzのローパスフィルターを通してから波形解析装置に入力した。A-D変換のサンプリング時間は2 msで、サンプル数は平均、標準偏差及び確率密度関数については5000点、10秒間、振動変位の軌跡については500点、1秒間のデータを採取した。

### 2.4 相似条件

本実験は、乱流境界層中にある角柱の振動性状の把握を目的として行った。従って気流が実際に構造物と模型にあたる時の挙動を相似にさせることが要求される。以下にその相似条件について述べる。

実物の縮小模型を使用した場合の相似条件は、1) Reynolds 数、2) Froude 数、3) 減衰率比、4) 建物と空気の密度比、5) 無次元風速の5つのパラメーターを一致させることである。1)は気流の状態を支配するパラメーターであるが、一般に建築構造物を対象とした風洞実験では一致させることは困難である。しかしここで対象とする長方形断面角柱では、流れの剝離位置がほぼ一定となるため、Reynolds 数の影響は無視できる。2)は吊屋根のように構造物の復元力に重量が大きく作用する場合に必要なが、高層建築物のように復元力が主として弾性力から成る場合には Froude 数の影響は無視できる。

構造物の一次の振動モードをロッキングと仮定すると、3)は減衰定数  $\mu (=c/2\sqrt{K \cdot I})$ 、4)は質量パラメーター  $N (=I/\rho b^4 h)$ 、5)は無次元風速  $\bar{V} (V/f_m b)$  で表わされる。ここで  $c$  は減衰係数、 $\rho$  は空気密度である。ところで、中村・溝田<sup>2)</sup>、大築・鷺津<sup>3)</sup>、石崎・谷池<sup>4)</sup>等の実験によって、構造物の振動はほぼ固有振動数で起こることがわかっている。Scruton<sup>5)</sup>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  $\mu$  と  $N$  を独立に選ぶ必要はなく、それらの積  $\mu \times N$  で代表させることができる。この積は一般に質量減衰パラメーターあるいは Scruton 数と呼ばれている。ここでは石崎・谷池<sup>4)</sup>による式にもとづき、質量減衰パラメーター  $\delta$  を、

$$\delta = \frac{16 \pi^2 I \mu}{\rho b^2 d h l}$$

とした。ここで  $l$  ( $=h/2+r$ ) は、回転中心から角柱の半分の高さまでの距離を表わす。

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、その空力不安定性状を調べることにした。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 振動状態

Fig. 7 に SMOOTH な場合の, Fig. 8 に ROUGH な場合の角柱頂部の振動変位の軌跡を, 辺長比 1 : 1 の断面での 3 種類の無次元風速  $\bar{V}$  ( $=V/f_m b$ ) について示す。いずれも質量減衰パラメーター  $\delta=95$  で最も減衰が小さい場合である。図の両軸は角柱頂部の変位を回転半径  $L$  で割った層間変位角の値をとってある。

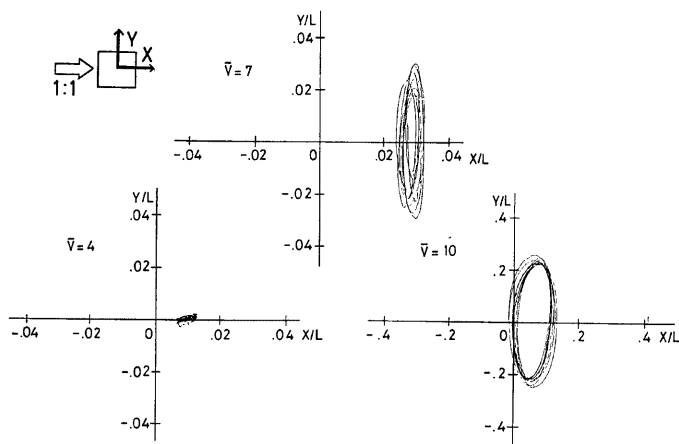


Fig. 7 Trace of path at top level of the model  $b:d=1:1$ ;  $\delta=95$ ; SMOOTH

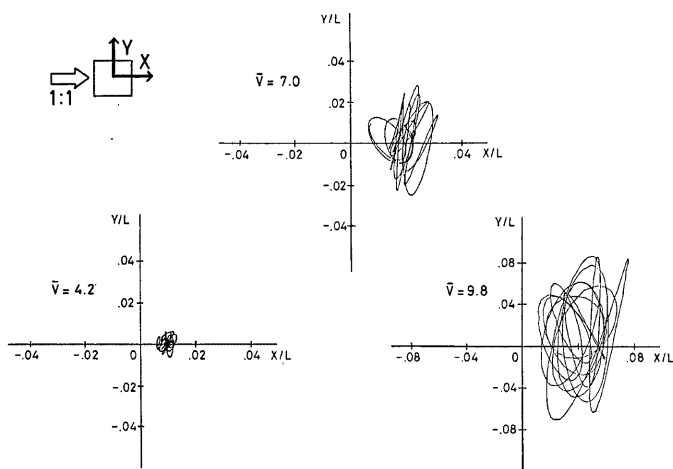


Fig. 8 Trace of path at top level of the model  $b:d=1:1$ ;  $\delta=95$ ; ROUGH

SMOOTH な場合、 $\bar{V}=4$  では不規則な振動で、振幅は X 方向の方が大きくなっている。これは風向方向の変動風速によるものと思われる。 $\bar{V}=7$  では振動はかなり定常的になり、またこの時点で、平均変位を考慮した変位は X, Y 両方向ではほぼ同じになっている。 $\bar{V}=10$  になると、さらに定常性が増し SINE 波に近くなっている。この断面では、石崎・谷池<sup>9)</sup>の求めた一様流中での Strouhal 数は、0.115であり、渦の発生周波数と角柱の固有振動数が一致するいわゆる共振風速は  $\bar{V}_{res}=8.7$  である。 $\bar{V}=7, 10$  ではこの同期現象が起きているものと見られる。ROUGH な場合、 $\bar{V}=4.2$  では振動は不規則であるが、SMOOTH な場合と違い X, Y 方向の振幅はほぼ同じになっている。 $\bar{V}=7, 9.8$  では振幅は Y 方向が卓越しているが、乱れの影響が大きいので SMOOTH な場合の同風速の波形よりは不規則である。またこの時、X 方向の振幅が大きい時は Y 方向の振幅が小さく、Y 方向が大きい時は X 方向が小さくなっている。これより両方向の間でエネルギーの交換が起きていることがわかる。平均変位を考慮した変位は、 $\bar{V}=9.8$  においても X, Y 方向ではほぼ同じであり、SMOOTH な場合と比べて X 方向に対する Y 方向の変化の比は小さい。これは風の乱れによる強制的な変動力が大きくなり、自動的な振動が生じにくくなっているためと思われる。

他の断面においても、 $\bar{V}$  の値は異なっているが低風速域では不規則な振動で高風速域になるにつれて定常的になるという傾向を示している。

### 3.2 風速変動と振動変位の確率密度関数の比較

Fig. 9, 10, 11, は ROUGH な場合、辺長比 2 : 1 の断面での  $\delta=65$  のときの各風速において同時に記録した風速変動及び振動変位の確率密度関数である。横軸は振動変位の標準偏差で無次元化した値、縦軸は確率密度である。上段は風速変動で、中段は X 方向、下段は Y 方向のものである。

風速変動の確率密度関数は、正規分布に従うといわれており、本実験でもその分布は各風速ともほぼ正規分布になっている。X, Y 方向の振動変位の分布についても平均変位を軸とした左右対称形である。 $\bar{V}=2.8$

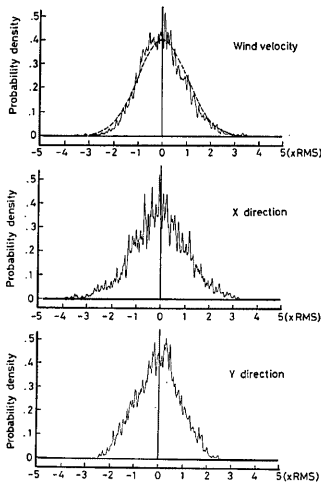


Fig. 9 Probability density functions of wind fluctuation and model displacement  
b:d=2:1;  $\delta=65$ ; ROUGH;  $\bar{V}=2.8$

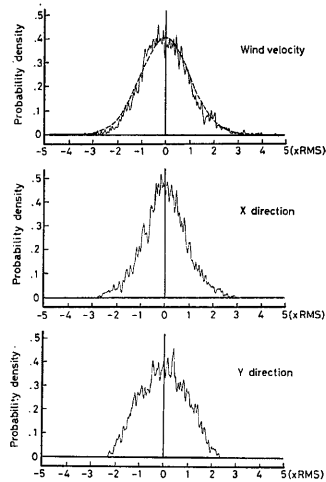


Fig. 10 Probability density functions of wind fluctuation and model displacement  
b:d=2:1;  $\delta=65$ ; ROUGH;  $\bar{V}=4.9$

では  $X$  方向の分布は正規分布に近く接近流の乱れによる振動成分が卓越していることがわかる。同じ風速での  $Y$  方向では、分布域は  $X$  方向より狭くなっており、振動変位に含まれる SINE 波の成分が卓越してきている。 $\bar{V}=4.9$  では分布域はさらに狭くなり、振動は定常的な傾向が強まっている。 $\bar{V}=7.0$  では、 $Y$  方向の分布形は典型的な SINE 波の形状を示している。

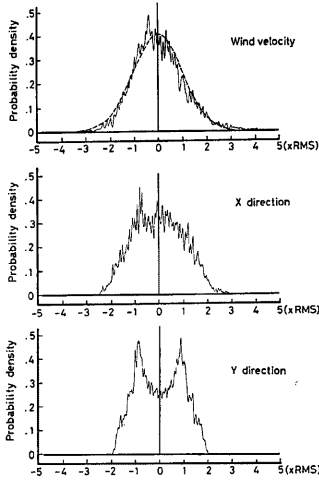


Fig. 11 Probability density functions of wind fluctuation and model displacement  
 $b:d=2:1$ ;  $\delta=65$ ; ROUGH;  $\bar{V}=7.0$

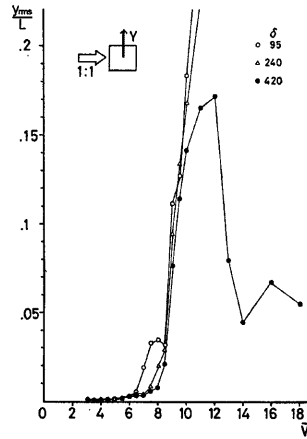


Fig. 12 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
 $Y$  dir.;  $b:d=1:1$ ; SMOOTH

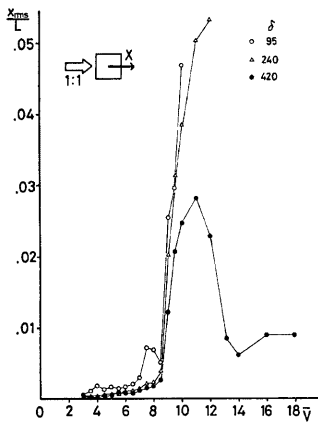


Fig. 13 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
 $X$  dir.;  $b:d=1:1$ ; SMOOTH

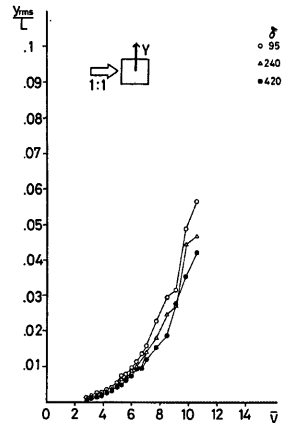


Fig. 14 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
 $Y$  dir.;  $b:d=1:1$ ; ROUGH

他の断面における振動変位の確率密度分布も、X、Y 両方向ともに低風速時には正規分布に近い。高風速になると、2:1の断面におけるほど顕著な SINE 波の分布形状はみられないが、やはり分布域が狭くなり平均値付近でのピークの値は小さくなっている。

### 3.3 応答曲線

迎角  $\alpha=0^\circ$  の場合の、質量減衰パラメーターが変化したときの風速と変位の関係を示す応答曲線について述べる。

#### (1) 1:1の断面

SMOOTH な場合の Y 方向、X 方向の振動変位を Fig. 12, Fig. 13 に、ROUGH な場合の Y 方向、X 方向の振動変位を Fig. 14, Fig. 15 に示す。縦軸は角柱頂部の振動変位の標準偏差を回転半径  $L$  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。横軸は無次元風速  $\bar{V}$  である。曲線は各グラフに3種類の質量減衰パラメーターについて描いてある。

SMOOTH な場合、 $\delta=420$  では共振風速 ( $\bar{V}_{res}=8.7$ ; 石崎・谷池<sup>6)</sup>による) 付近から発達した渦励振が  $\bar{V}=14$  になるといったんおさまっており、さらに風速が高くなるとギャロッピングが生じると思われる。その他の  $\delta$  では振幅が大きくなりすぎてデータ取得不可能となったが、 $\delta=420$  でみられるような渦励振とギャロッピングの分離はみられずに、振幅が単調に増加すると思われる。

ROUGH な場合は SMOOTH な場合ほど曲線の傾きの増加は顕著ではない。これは乱れの影響で Strouhal 成分の渦が生じにくくなったためであり、Y 方向における共振風速付近からの振幅の発達は角柱の振動に伴う付加的な空気力、すなわち固有振動数成分の渦によるものと考えられる。従って共振風速以上の風速域において、角柱静止時に作用する空気力をもとに応答解析を行うことは困難になる。

#### (2) 1:2の断面

SMOOTH な場合の Y 方向、X 方向の振動変位を Fig. 16, Fig. 17 に、ROUGH な場合の Y 方向、X 方向の振動変位を Fig. 18, Fig. 19 に示す。

SMOOTH な場合、質量減衰パラメーターが  $\delta=130, 330$  の時に、 $\bar{V}=5.5$  付近の低風速域で限定振動がみられた。これは一様流中においてもみられる。その後共振風速 ( $\bar{V}_{res}=11.5$ ; 石崎・谷池<sup>6)</sup>による) 付近までは、振幅の増加は小さい。共振風速を過ぎるあたりからギャロッピングが起これと思われ、振幅は急激に

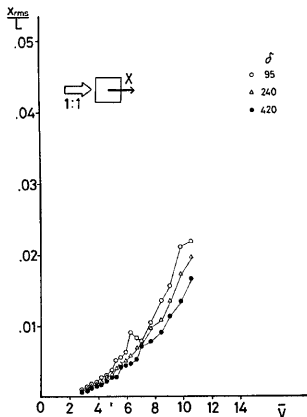


Fig. 15 RMS responses for different values of mass-damping parameters X dir.; b:d=1:1; ROUGH

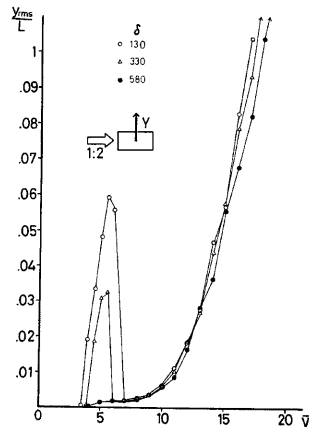


Fig. 16 RMS responses for different values of mass-damping parameters Y dir.; b:d=1:2; SMOOTH

増加している。

ROUGH な場合、 $\delta=130$  のときに  $\bar{V}=5.5$  において、Y 方向の応答がピークを示している。この振動は SMOOTH な場合の限定振動に比べてかなりランダムで振動も小さい。これは、気流が前縁で剝離した後の渦の形成が乱れによって妨げられ、渦によって振動機構にもたらされる空気が弱まるためであった。しかしながら、減衰が小さい場合には乱れの大きい境界層流中においても低風速域で、ピークを示す応答がみられることは興味深い。

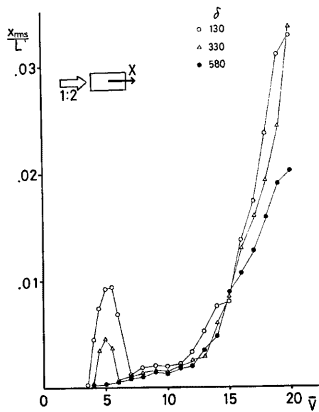


Fig. 17 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
X dir.; b:d=1:2;SMOOTH

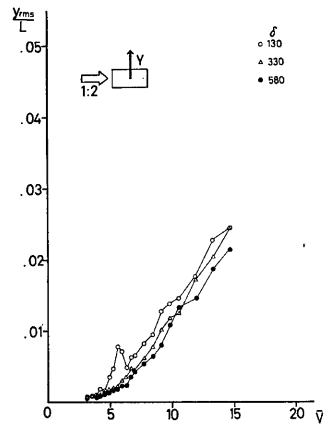


Fig. 18 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
Y dir.; b:d=1:2;ROUGH

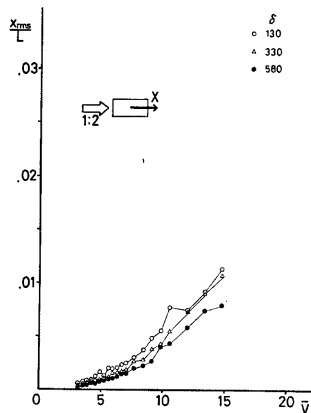


Fig. 19 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
X dir.; b:d=1:2;ROUGH

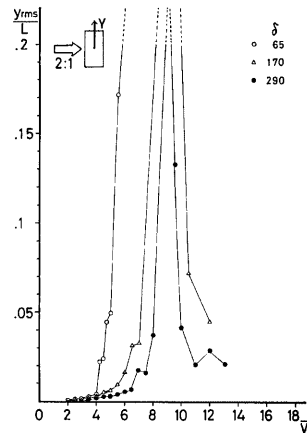


Fig. 20 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
Y dir.; b:d=2:1;SMOOTH

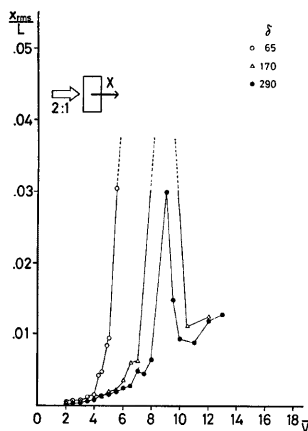


Fig. 21 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
X dir.; b:d=2:1;SMOOTH

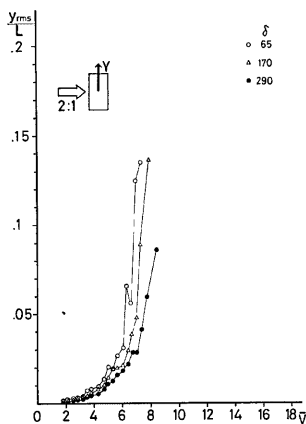


Fig. 22 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
Y dir.; b:d=2:1;ROUGH

### (3) 2 : 1 の断面

SMOOTH な場合の Y 方向, X 方向の振動変位を Fig. 20, Fig. 21 に, ROUGH な場合の Y 方向, X 方向の振動変位をそれぞれ Fig. 22, Fig. 23 に示す。

SMOOTH な場合,  $V=4$  までは振幅は小さく質量減衰パラメーターの違いによる応答の差もあまりみられない。 $\delta=65$  では  $V=4$  を過ぎたあたりから振幅が急激に大きくなる。この断面では石崎・谷池<sup>9)</sup>の求めた一樣流中における Strouhal 数は 0.12 で共振風速は  $V_{res}=8.3$  である。この現象は低風速域から生じる渦励振がそのまま発散したものである。 $\delta=170, 290$  では  $\delta=65$  においてと同様な低風速域からの振幅の急激な発達はみられず, 共振風速を中心とした非常に鋭いピークをもつ大振幅の渦励振が生じている。

ROUGH な場合は  $\delta=65$  でも低風速域での渦励振はみられず, 振動はどの  $\delta$  の値においても共振風速に近づくにつれ, 単調に増加している。石崎・谷池<sup>9)</sup>等の研究によると, 風向直角方向に拡がった角柱の渦励振の性状は, 乱れの強さに影響されず一樣流のときとほとんど変わらない。したがってこの場合も共振風速を過ぎると, 振幅は減少するものと思われる。

### 3.4 迎角による応答の変化

#### (1) 1 : 1 の断面

Fig. 24, Fig. 25 に SMOOTH な場合の Y 方向と X 方向の, Fig. 26, Fig. 27 に ROUGH な場合の Y

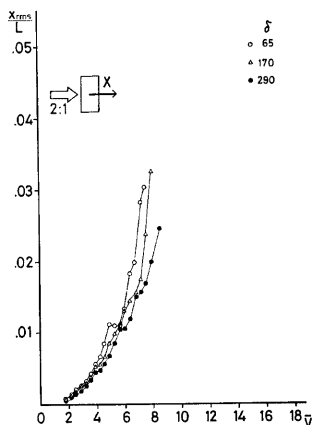


Fig. 23 RMS responses for different values of mass-damping parameters  
X dir.; b:d=2:1;ROUGH

方向と X 方向の迎角による応答の変化を示す。縦軸には角柱頂部の変位の標準偏差を回転半径  $L$  で割った層間変位角に相当する値、横軸には迎角  $\alpha$  をとってある。各グラフは 3 種類の無次元風速  $\bar{V}$  について描いてあり、各図ごとに質量減衰パラメーターの値によって 3 つのグラフを掲載した。左側が  $\delta$  の最も小さい場

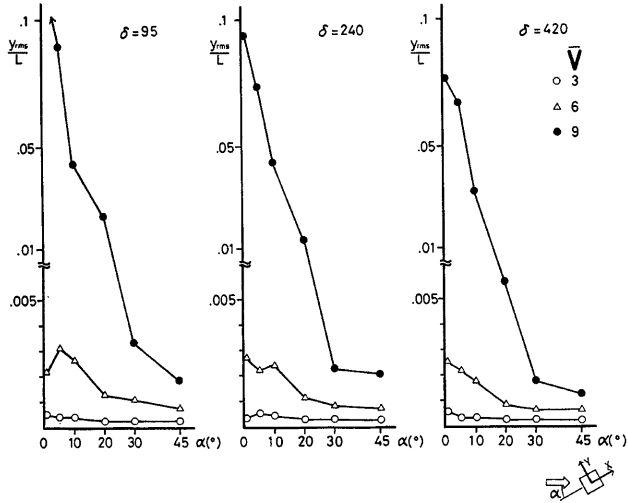


Fig. 24 RMS responses for various angles of attack Y dir.; b:d=1:1;SMOOTH

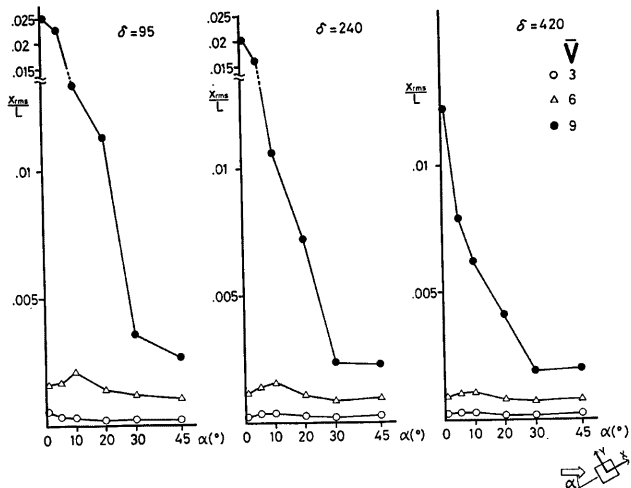


Fig. 25 RMS responses for various angles of attack X dir.; b:d=1:1;SMOOTH

合, 右側が  $\delta$  の最も大きい場合である。

SMOOTH な場合,  $\bar{V}=3$  では  $\alpha$  の違いによる応答の変化はほとんどみられず, 振動は接近流の乱れによるものと考えられる。 $\bar{V}=6$  では Y 方向で角度が大きくなるにつれて応答が減少する傾向がみられ,  $\bar{V}=9$

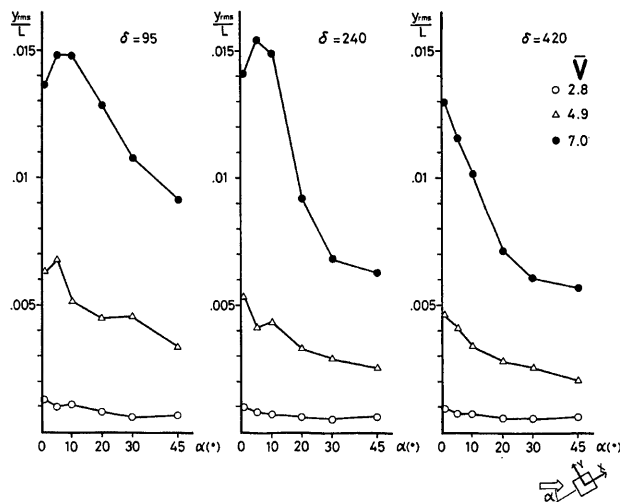


Fig. 26 RMS responses for various angles of attack Y dir.; b:d=1:1;ROUGH

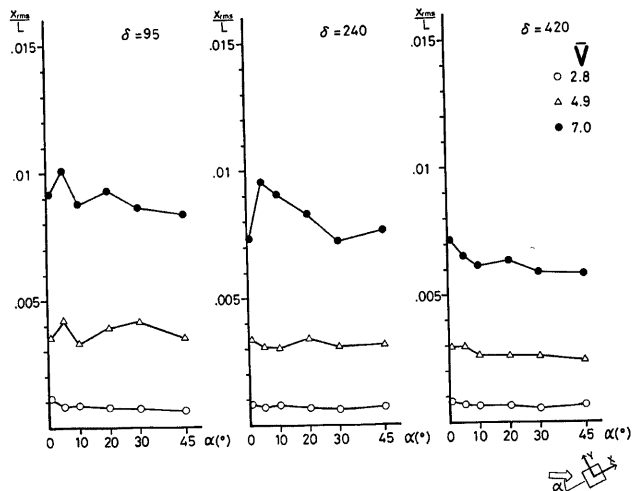


Fig. 27 RMS responses for various angles of attack X dir.; b:d= 1:1;ROUGH

になると、両方向においてその傾向がより顕著になる。

ROUGH な場合、X 方向では  $\alpha$  の違いによる変化はほとんどみられない。Y 方向では  $\alpha$  が大きくなるにつれて応答が減少するが、SMOOTH な場合と比較すると、 $\alpha=0^\circ$  のときの値はかなり小さくなる。これは

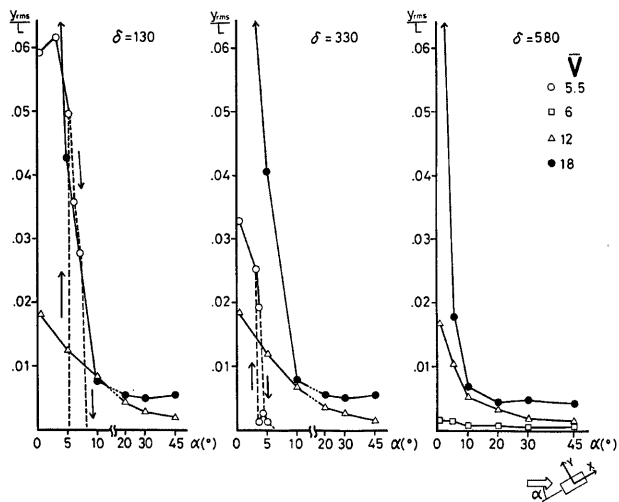


Fig. 28 RMS responses for various angles of attack Y dir.;  $b:d=1:2$ ; SMOOTH

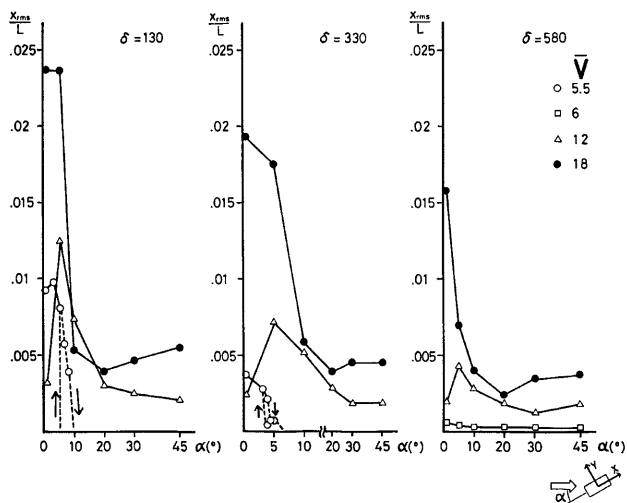


Fig. 29 RMS responses for various angles of attack X dir.;  $b:d=1:2$ ; SMOOTH

3.3(1) で述べたように Strouhal 成分の渦が生じにくくなるためである。 $\alpha=45^\circ$  のときの値は SMOOTH な場合に比べて大きくなっているが、角度が大きくなってくると接近流の乱れによる変動力が支配的になるため、乱れが大きくなると応答も増加すると考えられる。

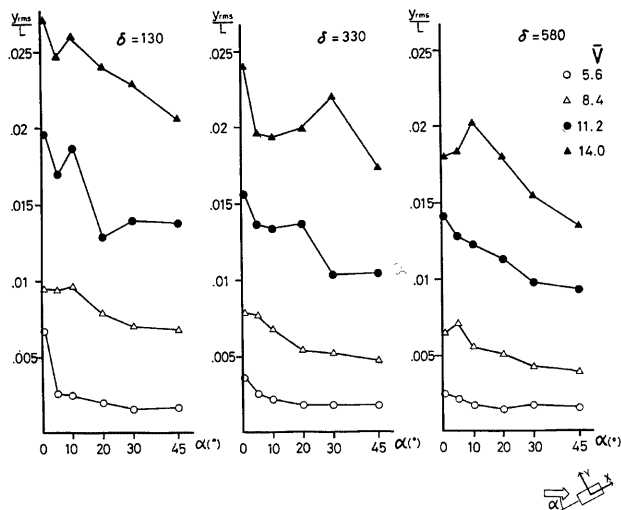


Fig. 30 RMS responses for various angles of attack Y dir.; b:d=1:2;ROUGH

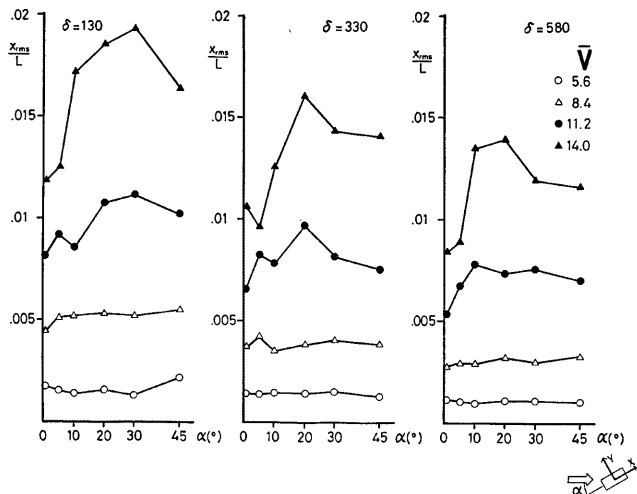


Fig. 31 RMS responses for various angles of attack X dir.; b:d=1:2;ROUGH

また、 $\delta$  の違いによる応答性状の差異はみられず、全体的にみて最大の応答が生じるのは角柱が風に直面する場合である。

(2) 1 : 2 の断面

Fig. 28, Fig. 29 に SMOOTH な場合の Y 方向と X 方向の, Fig. 30, Fig. 31 に ROUGH な場合の

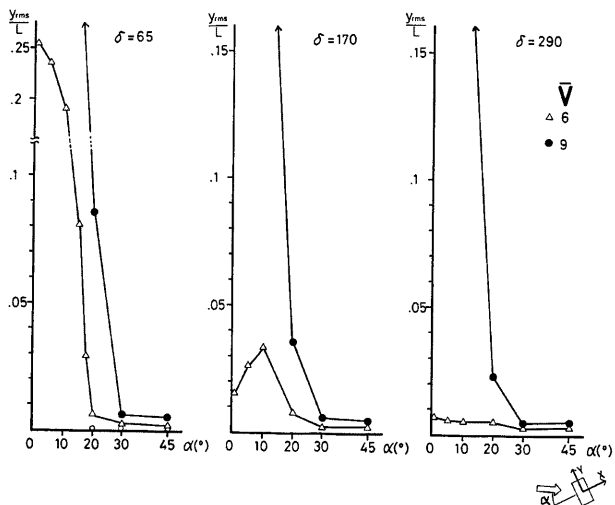


Fig. 32 RMS responses for various angles of attack Y dir.; b:d=2:1;SMOOTH

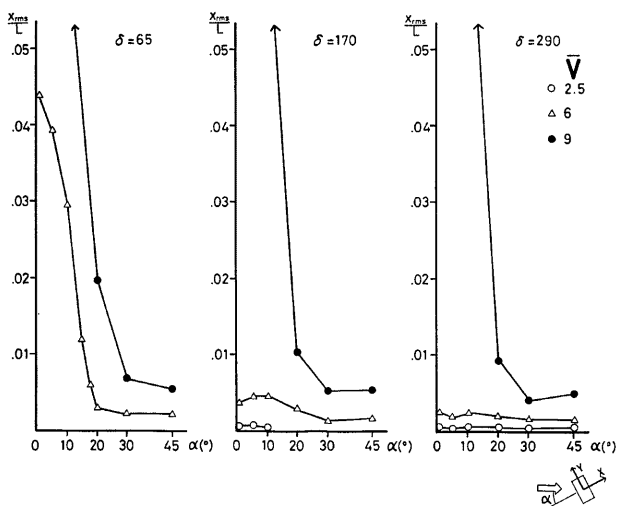


Fig. 33 RMS responses for various angles of attack X dir.; b:d=2:1;SMOOTH

Y 方向と X 方向の迎角による応答の変化を示す。

SMOOTH な場合, 3.3(2) で述べた限定振動が生じるとき, すなわち  $\delta=130, 330$  の  $\bar{V}=5.5$  において, 2つの角度  $\alpha_1, \alpha_2$ , ( $\alpha_1 < \alpha_2$ ) の間でループを描く現象がみられた。 $\alpha=0^\circ$  から  $\alpha_1, \alpha_2$  と角度が増加するときは振幅は単調減少し,  $\alpha_2$  以上の  $\alpha$  から角度が減少するときは  $\alpha_2$  を過ぎても振幅は大きくならず,

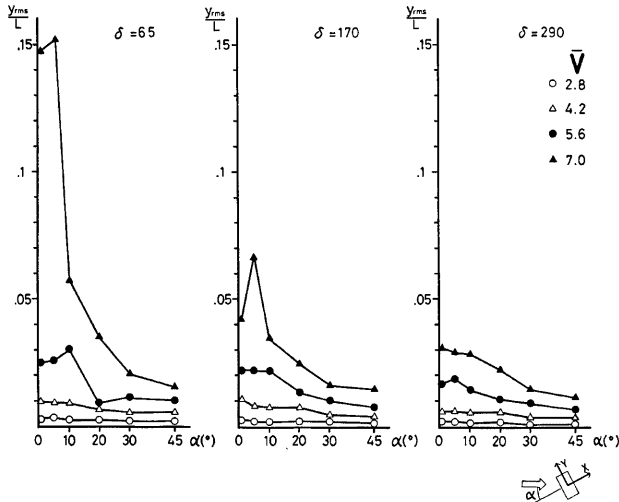


Fig. 34 RMS responses for various angles of attack Y dir.; b:d=2:1;ROUGH

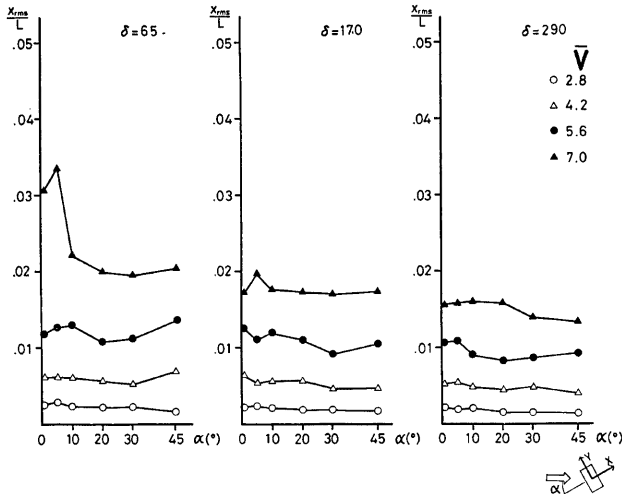


Fig. 35 RMS responses for various angles of attack X dir.; b:d=2:1;ROUGH

$\alpha = \alpha_1$  になってもとの振幅に戻った。これは角柱に作用する外力が迎角に対して非線形になるために起こるものと考えられる。 $\bar{V} = 12$  では X 方向の応答は  $\alpha = 5^\circ$  でピークを示しているが、これは角柱側面的一方で上流側に気流の再付着による定在渦が生じ、それが X 方向の振動に影響をおよぼすのであろう。

ROUGH な場合、X 方向の応答は角度が増えても減少せず、 $\bar{V} = 5.6, 8.4$  ではほぼ一定である。 $\bar{V} = 11.2, 14.0$  では  $\alpha = 20^\circ$  から  $30^\circ$  でピークを示し、 $\alpha = 45^\circ$  では  $\alpha = 0^\circ$  のときよりも応答は増加している。ピークを示す原因は現在のところよくわからない。応答が増加しているのは角度が大きくなるにつれて風の受圧面積が大きくなるためであろう。

(3) 2 : 1 の断面

Fig. 32, Fig. 33 に SMOOTH な場合の Y 方向と X 方向の、Fig. 34, Fig. 35 に ROUGH な場合の Y 方向と X 方向の迎角による応答の変化を示す。

SMOOTH な場合、 $\bar{V} = 9$  では Y 方向と X 方向の応答の変化はほぼ同じ傾向を示している。この風速は一樣流中での共振風速 ( $\bar{V}_{res} = 8.3$ ) に近いので、渦の発生による Y 方向の振動が卓越し、両方向のエネルギー交換によって、X 方向の振動も発達するものと思われる。したがって  $\alpha$  が大きくなってくると、規則的な渦が生じにくくなり、振幅は急激に減少する。

ROUGH な場合、 $\delta = 65$  で共振風速に近い  $\bar{V} = 7.0$  において  $\alpha$  が小さいときに渦励振がみられ、 $\alpha$  の増加につれて応答の急激な減少がみられる。 $\bar{V} = 7.0$  の  $\delta$  が大きい場合およびその他の風速での応答については接近流の乱れによる変動力が支配的になるため、 $\alpha$  の増加によって Y 方向の振動はわずかに減少しているが X 方向ではほとんど変わらない。

### 3.5 振動の発生領域

これまでの結果より、最大の振動振幅が発生するのは、3 種類の各断面とも  $\alpha = 0^\circ$  の場合の Y 方向、すなわち柱が風に直面している場合の風向直角方向であった。

上の場合について振動の発生領域が質量減衰パラメーターによってどのように変化するかを調べた。

(1) 1 : 1 の断面

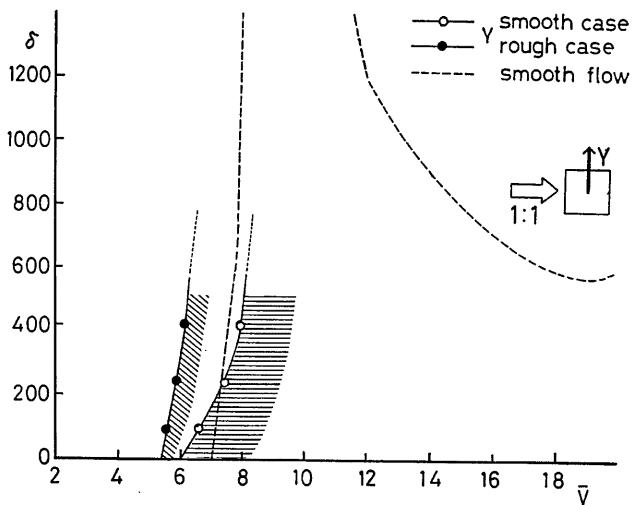


Fig. 36 Regions of aerodynamic instability varied with mass-damping parameters b:d=1:1

振動の発生領域は、Y方向の変動成分による層間変位角 ( $\gamma_{rms}/L$ ) が0.008以上になる場合と定義した。その結果を **Fig. 36** に示す。縦軸には質量減衰パラメーター  $\delta$ 、横軸には無次元風速  $\bar{V}$  をとる。図中の破線は、本実験と同じ角柱を用いて求めた石崎・谷池<sup>9)</sup>の一樣流中での結果である。

SMOOTH な場合、ROUGH な場合とも、領域は  $\delta$  の増加につれて高風速側に移行している。振動の発

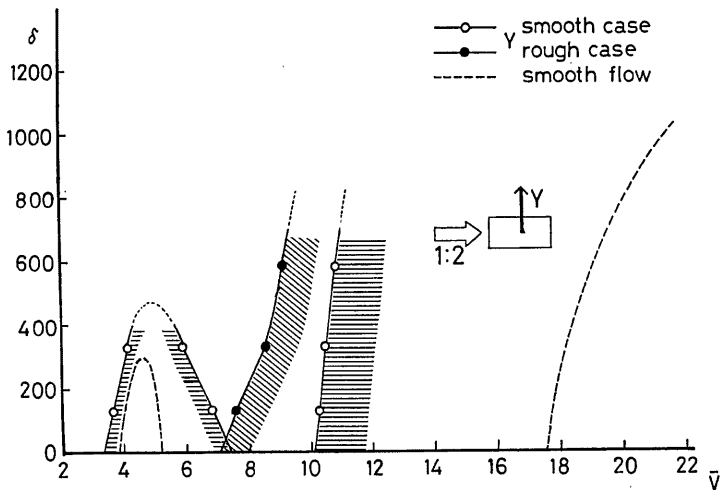


Fig. 37 Regions of aerodynamic instability varied with mass-damping parameters  $b:d=1:2$

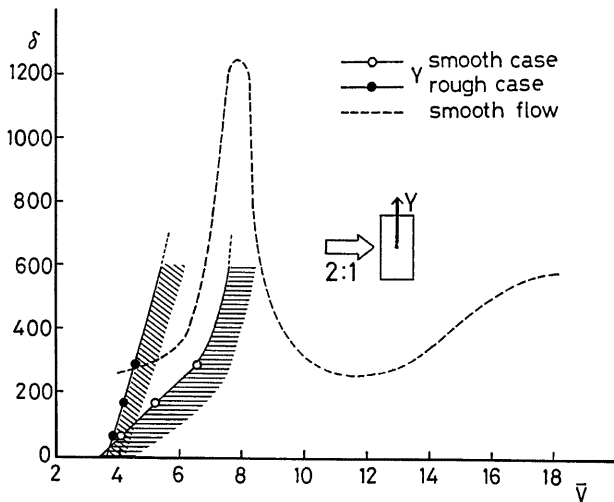


Fig. 38 Regions of aerodynamic instability varied with mass-damping parameters  $b:d=2:1$

生ずる風速は、 $\delta \leq 200$  では  $\text{ROUGH} < \text{SMOOTH} < \text{一樣流}$  の順で高くなるが、この領域は  $\bar{V}=7$  よりも低いところであり、主として風の乱れによる強制的な振動が生じている。 $\bar{V}=7$  を過ぎると一樣流と  $\text{SMOOTH}$  の順が逆転しているが、これは共振風速  $\bar{V}_{res}=8.7$  に近くなるにつれて自励的な振動が卓越してくるためである。ここではデータはないが、 $\delta$  がさらに大きくなり  $\bar{V}$  が共振風速により近くなると、 $\text{ROUGH}$  と一樣流、 $\text{ROUGH}$  と  $\text{SMOOTH}$  の順が逆転することが推定できる。

(2) 1 : 2 の断面

**Fig. 37** に振動の発生領域を示す。

$\text{SMOOTH}$  な場合、 $\delta=400$  以下では限定振動が起こるために、一樣流と同様に領域が2つに分かれている。乱れが大きくなると領域は1つになる。限定振動の起こらない  $\delta=400$  以上の領域では、振動の発生する風速は  $\text{ROUGH} < \text{SMOOTH}$  の順でいずれも一樣流に比べてかなり低風速側に前進している。したがって、 $\delta$  が大きく限定振動を考慮に入れない場合は乱れが大きくなるにつれて振動は発生しやすくなるといえる。しかしながら、限定振動の発生する風速は乱れが大きい場合よりも低いので、領域が2つに分かれるときの接近流の乱れの強さの臨界値を知ることが重要である。今回の実験では求められなかった。

(3) 2 : 1 の断面

**Fig. 38** に振動の発生領域を示す。

$\text{SMOOTH}$  な場合、 $\delta=400$  以下では、一樣流中に比べて領域は高風速側に移行しているが、境界線の形状はよく似たものになっている。したがってこの場合の振動については渦による変動力が支配的になっていると考えられる。

接近流の乱れが比較的小さく振動が渦によって生じる場合は、乱れの増加に伴って渦の発生が徐々に不規則になり、そのため領域は高風速側に移行する。さらに乱れが大きくなると、渦が生じにくくなり逆に乱れによる変動力が支配的になり、今度は乱れの増加につれて領域は低風速側に前進する。この場合も1 : 2 の断面と同じく支配的な変動力が入れかわる接近流の乱れの強さの臨界値が重要な意味をもつ。

#### 4. 結 論

本研究では境界層流中にある長方形断面角柱の空力不安定性を把握する目的で2自由度の自由振動実験を行った。以下にその結果をまとめる。

- 1) 振動状態は接近流の乱れの強さによってかなり影響を受ける。乱れが大きくなると、振動波形は不規則になり、渦振動やギャロッピングのような自励的な振動は生じにくい。
- 2) 風速変動の確率密度関数は正規分布になる。接近流の乱れが大きいときの、風向方向および風向直角方向の振動変位の確率密度関数は、低風速域では接近流の乱れによる変動力が支配的になるので、風速変動の確率密度関数の分布形状に近くなる。また、風速が高くなるにつれて、両方向とも振動変位に含まれる定常波 (SINE 波) の成分が卓越してくるために、振動変位の確率密度関数は分布域が狭くなり、分布形状もピークの値が小さくなって横軸方向に広がる。
- 3) 乱れが大きいとき、辺長比1 : 1および1 : 2の断面における共振風速付近での振幅の増加は、角柱の振動に伴う付加的な空気力、すなわち固有振動数成分の渦によるものと考えられる。従ってこのときは、角柱静止時に測定した風圧力をもとに応答を推定することは困難である。
- 4) 辺長比1 : 2の断面で、接近流の乱れが小さく質量減衰パラメーター  $\delta$  が小さい場合には、乱流境界層中でも一樣流中と同様に低風速域での限定振動がみられた。
- 5) 風向直角方向の応答が渦励振や限定振動によってピークを示すときは、風向方向の応答も同様にピークを示している。このときは、Davenport, Vickery 等によるパフェッティングの理論はあてはまらない。
- 6) 迎角を変化させたときの応答は、風向直角方向では一般に角度  $\alpha$  の増加にともなって減少する。特に  $\alpha=0^\circ$  のときに限定振動、渦励振、ギャロッピング等が生じている場合は急激な応答の減少がみられ

る。

7) 辺長比1:2の断面において気流の乱れが小さいとき、 $V=12$ ,  $\alpha=5^\circ$ で風向方向の応答がピークを示す現象がみられた。これは角柱の上流側の側面に生じる定在渦の影響によるものであろう。

8) 辺長比1:1の断面をもつ角柱の振動の発生領域は、質量減衰パラメーター $\delta$ が200以下では接近流の乱れの大きい方が低風速側にあるが、 $\delta$ が大きくなり風速が共振風速に近づくにつれて、乱れのより小さい場合から順に領域が低風速側に移ると思われる。

9) 辺長比1:2の断面をもつ角柱の振動の発生領域は、接近流の乱れが小さい場合には限定振動が発生するために、低風速側に独立した領域ができる。風向方向に長い断面の構造物を設計する際には質量減衰パラメーターを大きくして限定振動が起こらないようにする必要がある。低風速域での独立した領域を除くと振動の発生領域は接近流の乱れが大きくなるにつれて低風速側に前進する。

10) 辺長比2:1の断面をもつ角柱の振動の発生領域は、渦の発生による変動力が支配的なうちは接近流の乱れの増加にともなって、高風速側に移行するが、乱れによる変動力が支配的になると逆に低風速側に前進する。またこの断面では他の断面に比べて渦励振が起こりやすく、振動の発生領域はより低風速側にあるので、設計の際に注意する必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) 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，pp. 249-260.
- 2) Nakamura, Y. and T. Mizota: Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Proc. ASCE, Vol. 101, EM6, 1975, pp. 855-871.
- 3) Otuki, Y., K. Washizu, H. Tomizawa and A. Ohya: A Note on the Aeroelastic Instability of a Prismatic Bar with Square Section, Journal of Sound and Vibration, Vol. 34, 1974, pp. 233-248.
- 4) 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.
- 5) Scruton, C.: On the Wind-excited Oscillation of Stacks, Towers and Masts, Proc. Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1963, pp. 797-836.
- 6) 谷池義人：高層建築物の空力不安定性に関する研究，京都大学学位論文，1984.
- 7) 岡内 功・伊藤 学・宮田利雄：耐風構造，丸善，1977.