

長方形断面をもつ高層建築物の非定常風圧力

丸山 勇祐・谷池 義人・西村 宏昭

UNSTEADY AERODYNAMIC PRESSURE ON RECTANGULAR HIGH-RISE BUILDING

By Yusuke MARUYAMA, Yoshihito TANIKE, and Hiroaki NISHIMURA

Synopsis

To consider aeroelastic instabilities of prismatic high-rise buildings in strong winds, i.e., vortex induced oscillation or galloping, unsteady aerodynamic forces must be investigated as the external forces acting on building. From this point of view, wind tunnel experiments were performed to obtain information of the fluctuating pressure on side face of buildings, which are subjected to the forced harmonic oscillation with a fundamental linear mode in a boundary layer. In the previous paper we presented about the case of the oscillating square prism. This paper presents the characteristics of fluctuating pressures of other two type rectangular prisms. One type prism has the depth-breadth ratio equal to 2 which is the model of flow reattachment. Other type prism has the depth-breadth ratio equal to 0.5 which is the model of perfect separation. And the comparison of 3type prism (square and 2type rectangular prism) is described.

1. はじめに

高層建築物のような3次元構造物では、流れの性状や応答が高さ方向に変化する。このことから空力不安定振動を引き起こす要因となる空気力も高さ方向に変化する。高層建築物の振動の抑制や耐風設計において、建物各部に作用する空気力の変化を明らかにすることは重要である。筆者等は、前報¹⁾で正方形断面をもつ角柱の側面に働く非定常空気力を強制振動実験から求めた。この結果から上層部と下層部に働く空気力に違いのあることがわかった。上層部ではカルマン渦の影響をあまり受けず準定常的な考えが適用できることを示し、下層部ではカルマン渦の発生周波数と角柱の振動数の一致する共振風速付近で急激に空力負減衰効果が働き始めることを示した。本報では、さらに種々の形状の高層建築物での現象を明らかにするため、流れが再付着する風方向に細長い長方形断面角柱(辺長比2)および流れが前縁で完全に剝離する風直角方向に細長い長方形断面角柱(辺長比0.5)について強制振動実験を行い、それらの角柱側面に作用する変動風圧を測定した。またこれら2種類の長方形断面角柱との比較から、正方形断面角柱で見られた複雑な現象を明らかにすることも目的である。

2. 実験方法

日本建築総合試験所の幅1.8m、高さ1.5mの測定断面をもつエッフェル型吹出式境界層風洞を用いて実験を行った。接近流は、平均風速の鉛直分布がべき指数 $\alpha = 0.14$ 、低層部における乱れの強さを10%と

した厚さ 15 cm の境界層流とした。風洞内で実験模型を風直角方向に強制振動させ、その側面に働く変動風圧を測定した。

強制振動装置 (Fig. 1) は、前報¹⁾で用いたものを使用した。この装置は、パルスモータによる回転運動をカムを介して風直角方向のロッキング振動に変換し、カムによって振動振幅を変えられるようにした。模型の振動形態は 1 次の直線モードになる。強制加振振幅は建物の層間変位角 γ_r で表わし、0.004, 0.008, 0.016 の 3 種類とした。また強制振動の振動数 $f_m = 8.1\text{Hz}$ とした。角柱の振動変位は振動装置下部に設置したレーザー変位計により測定した。模型は断面が幅 $B = 5\text{cm}$ 、奥行き $D = 10\text{cm}$ (辺長比 $D/B = 2$) の風直角方向に細長いものと、幅 $B = 10\text{cm}$ 、奥行き $D = 5\text{cm}$ (辺長比 $D/B = 0.5$) の風直角方向に細長いものの 2 種類の長方形角柱を用いた。また角柱の高さは $H = 35\text{cm}$ で、アスペクト比は $H/\sqrt{BD} = 5$ である。実験風速は、角柱頂部で無次元風速 $V_r (= V/f_m \sqrt{BD})$ が 3~14 の範囲とした。

変動風圧の測定は、角柱側面に設けた縦方向 8 点、横方向 6 点、合計 48 点の圧力測定孔から、長さ 60 cm のビニールチューブを介して圧力センサーにつないで行った。2 種類の角柱の断面を Fig. 2 に示す。また側面の圧力測定孔を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の側面は測定孔の位置を表わすために描いたものであり高さ H と奥行き D の比は正確ではない。使用した圧力計は差圧型のもので、10 mmq で 1V の出力をする。ビニールチューブ使用による誤差は以下のようにデジタル的に補正した。解析領域の 40 Hz 付近までゲイン要素に関してはフラットだったので補正を行わなかった。また位相差に関しては、40 Hz 付近まで直線的にずれると近似し、一定時間だけずらすことにより補正を行った。測定されたデータは直接 A/D 変換を行い、デジタルデータをコンピューターに送り解析を行った。Fig. 4 に計測および解析方法のブロック図を示す。

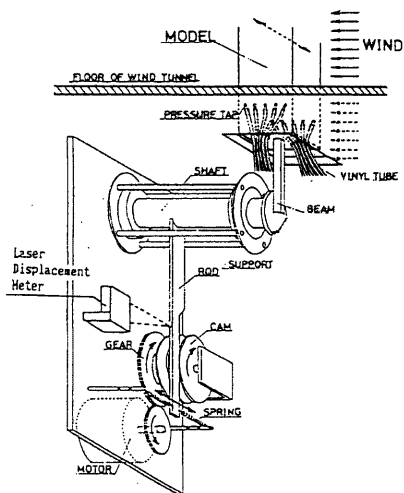


Fig. 1 Forced oscillation instrument

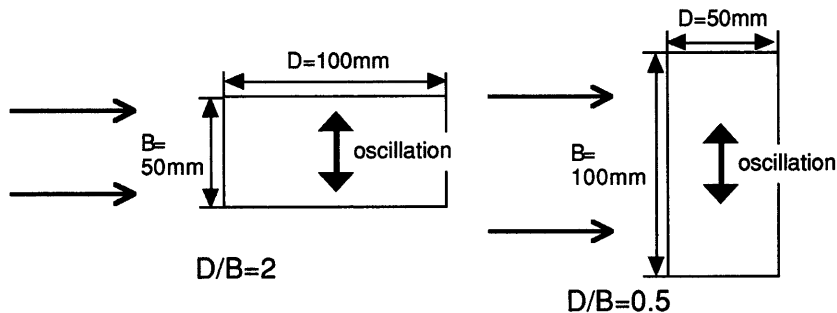


Fig. 2 Plan of two type prisms

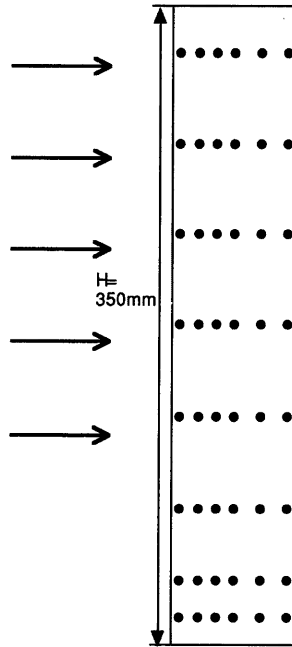


Fig. 3 side surface with pressure taps of prism

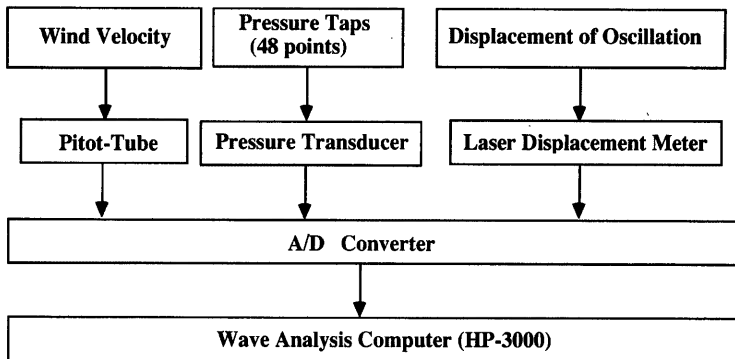


Fig. 4 Block diagram for measurement and analysis

3. 変動風圧のスペクトル解析

角柱側面に働く変動風圧の主成分を調べるため、スペクトル解析を行った。Fig. 5, Fig. 6 は代表的な点でのパワースペクトルを静止時と4種類の風速について示している。横軸は周波数 (Hz)、縦軸は各周波数のパワーを20 Hz までの全パワーで割ってパーセントで表示したものである。周波数領域での分解能は、サンプリング周波数を100 Hz、データ数を1024点としているので、0.0976 Hz である。また結果は16回のアンサンプル平均を行っている。図中の f_m , f_s とあるのは角柱の振動数 f_m と角柱後方に発生するカルマン渦の発生周波数 f_s を表わす。

Fig. 5 は、辺長比2の角柱についての結果である。スペクトル解析の結果、振動振幅による差はほとんど見られなかったため、ここでは $y_r = 0.008$ のものと角柱静止時のものについてのみ結果を示す。角柱静止時にはどの点においてもはっきりしたピークが見られない。これは流れの再付着により角柱後方にカルマン渦が明確に形成されないことによると思われる。高風速時に得られたスペクトルピークからストローハル数 $St (= f_s \cdot b/V)$, f_s はピークを示す周波数) を計算すると、 $St = 0.111$ になった。これより、カルマン渦の発生周波数と角柱の振動数が一致 ($f_s = f_m$) する共振風速は $V_{RES} (= 1/St) = 9.0$ となる。振動時には、角柱側面全面で角柱の振動数成分 (f_m 成分) が卓越し、ストローハル数成分 (f_s 成分) はほとんど見られない。中層部および下層部ではわずかに f_s 成分と思われるものが見られるが、値がばらついていて明確なピークは見られない。 f_s 成分が見られないのは、静止時と同じ流れの再付着により角柱後方にカルマン渦が明確に形成されないことによると思われる。共振風速付近ではピークを示すパワーはかなり大きくなっているが、これは f_m 成分と f_s 成分の一致する同期現象によると思われる。この現象も下層部のほうがより明確に見られる。共振風速を超えてからもしばらく同期現象は見られるが、 $V_r = 11.0$ 付近から f_s 成分のピークが弱まって、共振風速以下のときと同じ傾向になる。

Fig. 6 は、辺長比2の角柱についての結果である。振動振幅による差はほとんど見られなかったため、ここでは $y_r = 0.008$ のものと角柱静止時のものについてのみ結果を示す。角柱静止時には、上層部でははっきりしたピークが見られず、中層部および下層部では明瞭なスペクトルピークが見られる。これは上層部に行くほど渦が分散しているためと思われる。スペクトルピークを示す周波数は、中層部、下層部とも同じであり、これからストローハル数 $St (= f_s \cdot b/V)$, f_s はピークを示す周波数) を計算すると、 $St = 0.083$ になった。これより、カルマン渦の発生周波数と角柱の振動数が一致 ($f_s = f_m$) する共振風速は $V_{RES} (= 1/St) = 12.0$ となる。

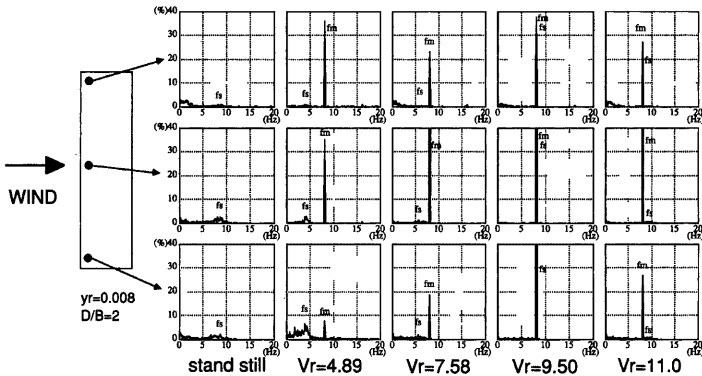
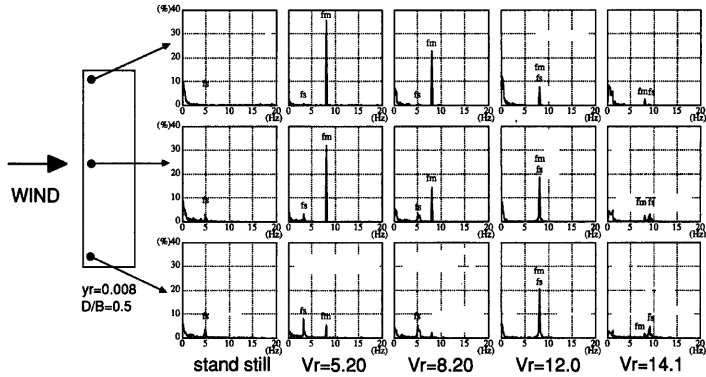


Fig. 5 Nondimensional power spectra of pressures on side surface ($D/B = 2$)

Fig. 6 Nondimensional power spectra of pressures on side surface ($D/B = 0.5$)

振動時には、上層部では常に f_m 成分が卓越し、 f_s 成分はほとんど見られない。また風速の増加とともに f_m 成分も弱まっている。中層部では f_m 成分、 f_s 成分の両方のピークが見られるが、低風速時には f_m 成分のほうが卓越している。共振風速付近では f_m 成分と f_s 成分の一致によりピークを示すパワーは大きくなる。共振風速を超えてもしばらくは f_s 成分が明確に見られないが、これは同期現象が続いているためだと思われる。共振風速を超えてからは f_s 成分が卓越し f_m 成分は小さくなる。下層部では中層部同様に両方のピークが見られるが、低風速では f_s 成分がかなり卓越している。風速の増加とともに f_m 成分のピークが大きくなり、共振風速付近ではピークを示すパワーはかなり大きくなる。共振風速を超えても中層部同様にしばらく同期現象が続く。共振風速を超えてからは f_m 成分は小さくなる。

4. 変動風圧のなす仕事量

4.1 仕事量の定義

角柱側面の各測定点で得られた変動風圧より振動に寄与する空気力（非定常空気力）を取り出すことを考える。ある点 (i 点) での 1 サイクル ($1/f_m$) ごとに変動風圧が角柱になす仕事量 W_i は、その点での変動風圧 $P_i(t)$ (ただし、平均成分を除く) と水平変位 y_i を用いて次式で表わされる。

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot dy_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

本報では角柱を強制的に調和振動させているので、水平変位 $y_i(t)$ は次式のような余弦波で表わされる。

$$y_i = y_{0i} \cos 2\pi f_m t \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると、

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot dy_i = \int_0^{1/f_m} P_i(t) \cdot y_{0i}(t) dt = 2\pi f_m y_{0i} \int_0^{1/f_m} P_i(t) \sin(2\pi f_m t) dt \quad \dots\dots (3)$$

ここで f_m は角柱の振動数、 y_{0i} は i 点での振動振幅である。三角関数の直交性より、変動風圧 $P_i(t)$ の中で仕事量 W_i に寄与するのは、周波数 f_m の成分であることが上式よりわかる。変動風圧 $P_i(t)$ から f_m 成分のみを取り出したもの $P'_i(t)$ を次式の様におく。

$$P'_i(t) = P'_{0i} \cos(2\pi f_m t + \beta_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで P_{0i} は i 点に作用する変動風圧の fm 成分の振幅を示す。 β_i は変動風圧と変位との位相差を示し、 $\beta_i > 0$ のとき、変動風圧は変位に対して位相の進みをもつ。式(4)を式(3)に代入すると、

$$W_i = \int_0^{1/4m} P_i(t) \cdot dy_i = \pi y_{0i} P_{0i} \sin\beta_i \dots\dots\dots (5)$$

P_{0i} , y_{0i} は正であるから、 W_i の正負は $\sin\beta_i$ の符号によって決まる。 β_i が $2n\pi < \beta_i < (2n+1)\pi$ のとき (n は整数)、 $0 < \sin\beta_i < 1$ になり、 W_i は正になる。この場合 i 点に加わる変動風圧のなす仕事は、角柱にエネルギーを与え振動を増大させる。逆に β_i が $(2n-1)\pi < \beta_i < 2n\pi$ のとき (n は整数)、 $-1 < \sin\beta_i < 0$ になり、 W_i は負になる。この場合変動風圧のなす仕事は、角柱からエネルギーを奪うことになり振動を減少させる。また、側面全体の測定点に加わる変動風圧が、1 サイクルあたりに角柱に対してなす仕事量の総和 W_T は次式となる。

$$W_T = \sum_{i=1}^{48} a_i W_i \dots\dots\dots (6)$$

ここで a_i は、 i 点の風圧が分担する面積を示す。 W_T が正になるとき、角柱側面は空気からエネルギーを与えられることになり、振動を促進する力、つまり負減衰力を受ける。この空気力が風直角方向の空力不安定振動の原因となる。

4.2 風方向に細長い角柱 (辺長比2)

Fig. 7 は辺長比2の角柱側面に働く変動風圧と振動変位の位相差の風速による変化を代表的な点において表わしたものである。ここで位相差 β_i は変位の周期を基準に $-180^\circ < \beta_i \leq 180^\circ$ の範囲で表わしている。 β_i が 180° より大きくなるときは、 $\sin\beta_i < 0$ になるので $(\beta_i - 360^\circ)$ で示し、逆に β_i が -180° 以下になるときは、 $\sin\beta_i \geq 0$ になるので $(360^\circ + \beta_i)$ で示した。横軸は無次元風速 V_r で表わしている。図中の矢印は共振風速を示す。また位相差 β_i は変位 $y_i(t)$ と変動風圧 $P_i(t)$ の相互相関係数が最大となる τ から求めたもの

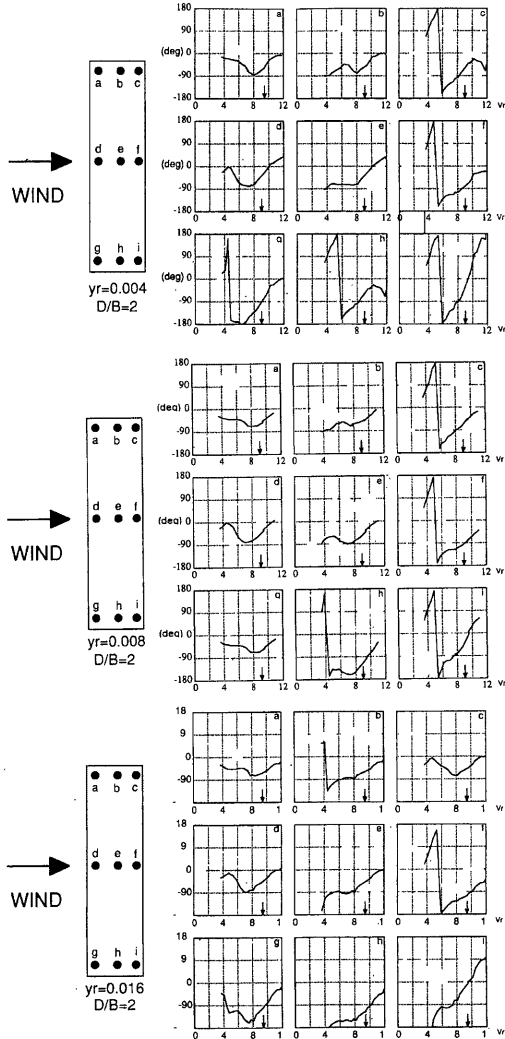


Fig. 7 Phase angle between fluctuating pressure and the displacement of the prism ($D/B = 2$)

である。

振動振幅の違いによる位相差 β_1 の変化はあまり見られなかったが、角柱側面の測定場所によって異なった傾向が見られた。上層部（図中の点 a, b, c）および風上側（図中の点 a, d, g）では同じような傾向が見られる。共振風速 9.0 の約半分の無次元風速 4~5 付近で極大値をもち、風速の増加とともに位相差 β_1 が小さくなり無次元風速 7~8 付近で負の値のピークとなっている。それ以上の風速になると風速の増加とともに位相差 β_1 の値も大きくなるが $\beta_1 > 0$ となる部分はほとんど見られない。また共振風速付近では明確な変化は見られなかった。風下側の下層部（図中の点 f, h, i）では風速の増加とともに位相差 β_1 も単調に増加している。無次元風速 7~8 付近でやや傾きが緩くなる部分も見られるが、ほぼ直線的に変化している。位相差 β_1 の値は増加しているが i 点以外では $\beta_1 > 0$ となる部分は見られなかった。また共振風速付近については、同様に明確な変化は見られなかった。角柱中央の e 点の位相差 β_1 は 2 つの傾向を併せもったような変化を示している。

位相差 β_1 の風速による変化は、上層部風下から下層部風上に向かって引ける対角線を境に異なった傾向が見られた。これは上層部と下層部で流れの速度が異なるために起こると思われる。流れの速い上層部ほど再付着点が風下側に寄っていると思われる。

Fig. 8 は辺長比 2 の角柱側面に働く変動風圧と振動変位の位相差 β_1 の分布を代表的な風速において表わしたものである。振動振幅による差はあまりなかったが、振幅の小さなものほど高風速域において位相差 $\beta_1 > 0$ となる領域が広がっていた。

風速の低いときは、流れが伝わるのに時間がかかるため風上と風下で位相に大きな差ができた。風速の増加とともに上層部の風上側から位相差 β_1 が大きくなり、上層部の風上側を中心に放射状に変化する分布となった。共振風速を超えるあたりから上層部と下層部の差はほとんどなくなり風上から風下にかけて位相差 β_1 が小さくなる傾向にある。これは側面全面で再付着が起こらなくなったからだと思う。このとき下層部の風下側で極端に β_1 が小さくなっているがこの部分だけ再付着が起こっているものと思われる。

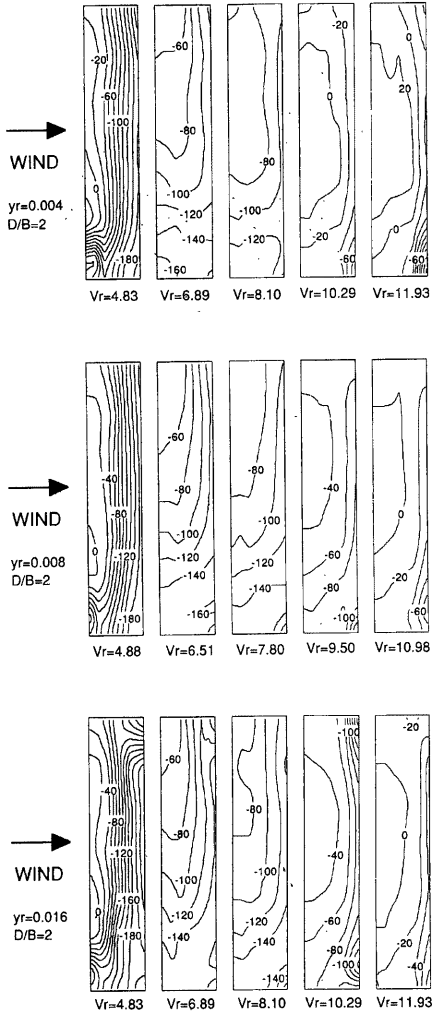


Fig. 8 Contours of phase angle with various reduced wind velocities ($D/B = 2$)

4.3 風直角方向に細長い角柱 (辺長比0.5)

Fig. 9 は辺長比0.5の角柱側面に働く変動風圧と振動変位の位相差の風速による変化を代表的な点において表わしたものである。図の表示は Fig. 6 と同様である。ただし $yr = 0.016$ の場合のみ共振風速まで測定しているが、 $yr = 0.004, 0.008$ に関しては無次元風速12付近までしか測定していない。振動振幅の違いによる位相差 β_i の変化は、共振風速以下ではあまり見られなかったので $yr = 0.016$ の傾向について述べる。

下層部の風下側 (図中の点 h, i) を除いて角柱全面ではほぼ同様な傾向が見られる。共振風速以下では、風速の増加とともに位相差 β_i も直線的に増加している。また位相差 β_i の値は無次元風速4~5付近で正となっている。無次元風速10付近から β_i の増加は緩やかになるが、共振風速付近で急激に大きくなり $\beta_i = 90^\circ$ ぐらになる。高風速の現象は下層部の風下側にも見られる。下層部の風下側の現象は明確ではないが i 点などは他の点ともよく似ている。

Fig. 10 は辺長比0.5の角柱側面に働く変動風圧と振動変位の位相差 β_i の分布を代表的な風速において表わしたものである。振動振幅による差はあまりなかったので $yr = 0.016$ の傾向について述べる。

風速の低いときは、風上側で $\beta_i > 0$ となり風下側で $\beta_i < 0$ となっている。風速の増加とともに $\beta_i > 0$ の領域が風下側に広がっていき無次元風速7付近で側面全体が $\beta_i > 0$ となっている。風上側のほうが位相差 β_i の値は大きくなっていて、上層部と下層部では大きな違いは見られない。共振風速付近では $\beta_i = 90^\circ$ の領域が側面全体に広がっている。共振風速を超えてからは下層部の β_i が大きくなり、上にくいほど小さくなっている。

4.4 変動風圧のなす仕事量の総和

Fig. 11 は各点の仕事量の総和 W_T を式(6)より求めた結果を示している。(a)は前報で求めた正方形断面角柱 (辺長比1) の結果である。(b)は風方向に細長い長方形断面角柱 (辺長比2),

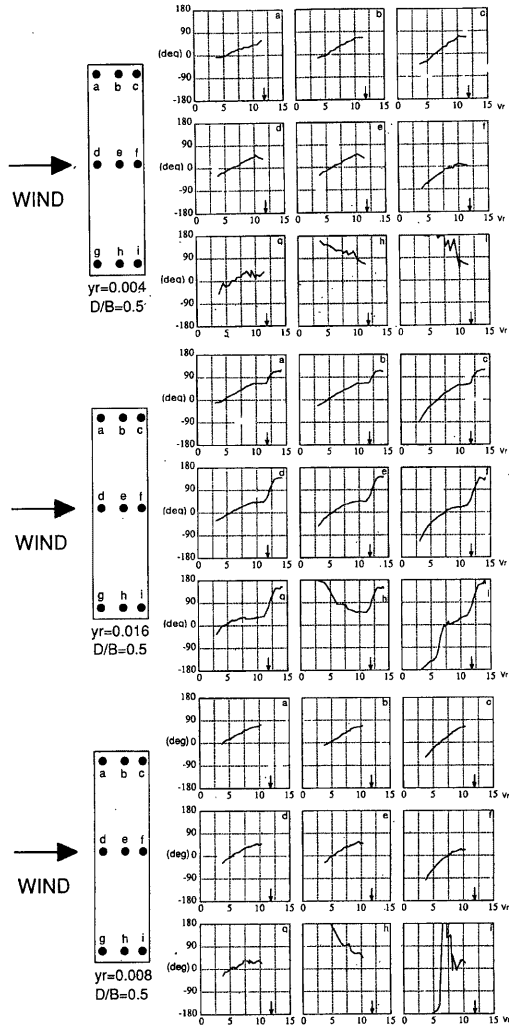


Fig. 9 Phase angle between fluctuating pressure and the displacement of the prism ($D/B = 0.5$)

(c)は風直角方向に細長い長方形断面角柱(辺長比0.5)の結果である。横軸は無次元風速を表わし、矢印は共振風速を表わしている。縦軸は仕事量 W_T を代表長さ B 、角柱断面積 B^2 、速度圧 q_H で無次元化した量である。Fig. 12は谷池・西村²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾が強制振動振動実験から求めた非正常空気力である。谷池・西村は角柱の振動軸に働くモーメント量から非正常空気力を測定している。これと比較して、今回の結果はよく似たものになっている。

まず、前報で述べた正方形断面角柱の結果について簡単にまとめておく。共振風速よりも低い風速では変動風圧のなす仕事の総和は負であり、共振風速付近で急激に仕事量は正になっていた。角柱の上層部では風速とともに変動風圧と振動変位の位相差 β_1 は直線的に増加し、共振風速よりも低い風速で正になっていた。下層部では位相差 β_1 は風速とともに増加したが、共振風速付近で急激に負から正へと変化した。このことから共振風速付近では、上層部と下層部で異なる仕事を受けていることがわかった。

風方向に細長い長方形断面角柱(辺長比2)では、すべての風速の時に仕事量 $W_T < 0$ となっていた。無次元風速7~8付近で負のピークとなっていて、共振風速付近から増加し始めるが $W_T > 0$ となる領域はほとんど見られなかった。これは流れが再付着するため角柱側面に負圧があまり働かないので、空気力は振動を抑える方向に働いていると思われる。

風直角方向に細長い長方形断面角柱(辺長比0.5)では、無次元風速5付近で仕事量 $W_T > 0$ となり増大していく。共振風速付近でやや仕事量が大きくなるが、共振風速を超えると減少し始める。辺長比0.5の場合は流れが角柱前縁で完全に剝離し再付着をしないため、準定常的な考えで説明ができると思われる。ここで準定常的な考えとは、角柱の振動速度

により風が角柱に迎角をもって吹き、剝離せん断層の影響で起こる角柱側面での圧力分布が非対称になるために空気力が角柱に作用することを表わす。また共振風速付近では仕事量が大きくなるが、これは過励振が起こるためだと思われる。

正方形断面角柱と長方形断面角柱の結果を比較して見る。正方形断面角柱の上層部で見られた現象は、辺長比0.5の場合とよく似ている。これは正方形断面角柱でも上層部では流速が速いため流れが完全に剝離し

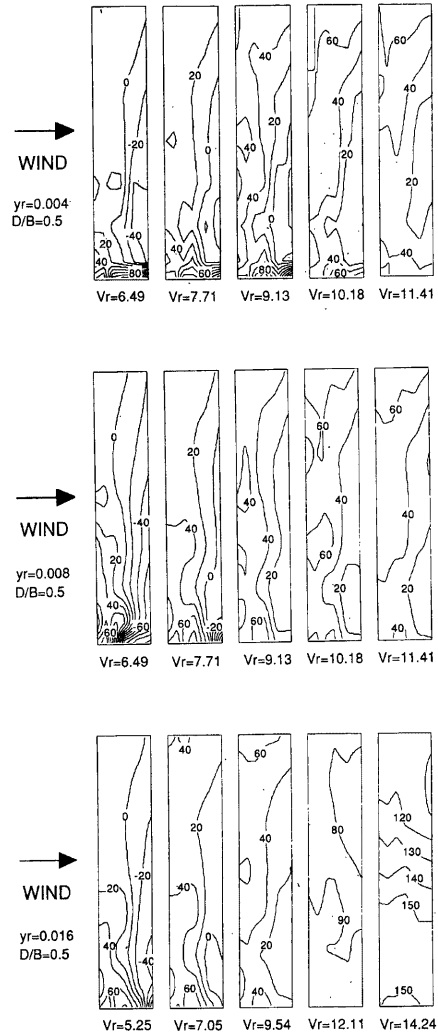


Fig. 10 Contours of phase angle with various reduced wind velocities ($D/B = 0.5$)

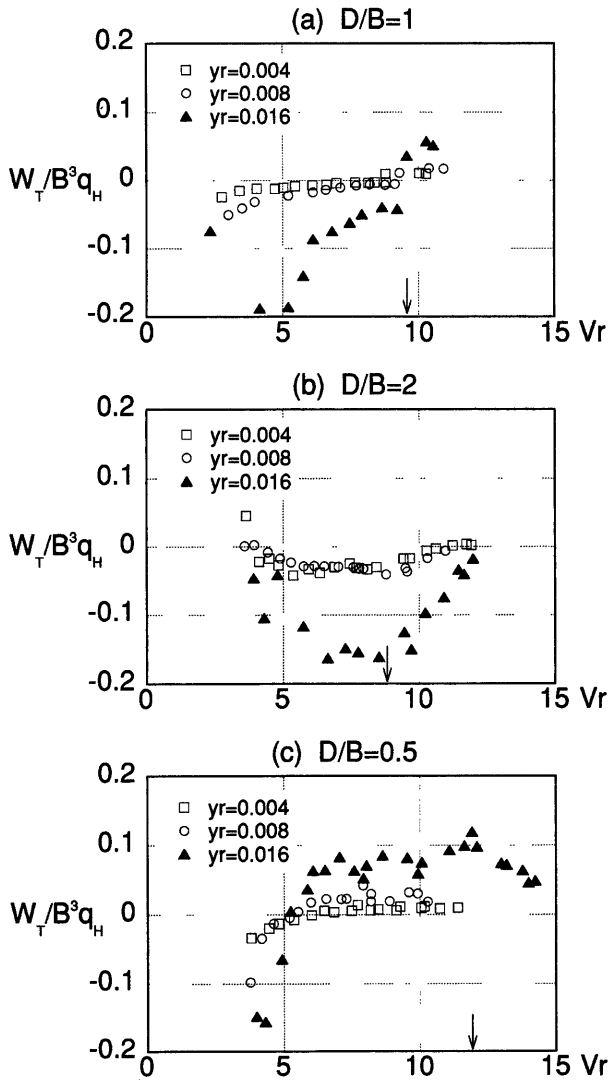


Fig. 11 Total work done by pressures on side surface of prisms (a) $D/B=1$ (b) $D/B=2$ (c) $D/B=0.5$

ていることによるとと思われる。また共振風速より低い風速での傾向は、辺長比2の場合と似ている。これは下層部では風速が低く、カルマン渦の周期と異なる周期で角柱を振動させるために、流れが乱されたり流れの再付着が起こったりするためではないかと思われる。共振風速と同時に急激に仕事量が正に変わるのは、

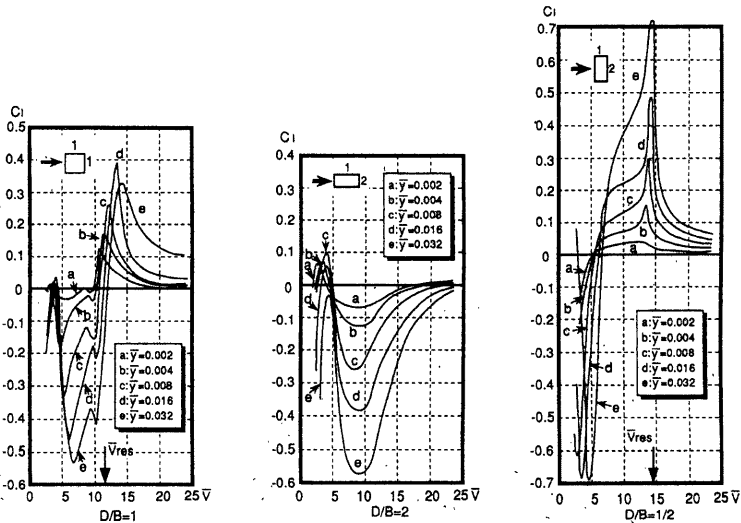


Fig. 12 Unsteady aerodynamic force coefficient (measured by Taniike and Nishimura)

角柱の振動とカルマン渦の発生が同期するためであると思われる。同期現象が起ると角柱の振動に合わせてカルマン渦が発生するので流れが完全に剝離するようになると思われる。

7. むすび

風方向に長い長方形断面角柱（辺長比2）と風直角方向に長い長方形断面角柱（辺長比0.5）の側面に作用する変動風圧力を角柱の振動時に多点にわたって測定し、その特性を調べた。得られた結果を下記に示す。

- 1) 辺長比0.5の角柱ではカルマン渦の発生周期の圧力変動が見られたが、辺長比2の角柱では再付着のため明確には見られなかった。
- 2) 辺長比0.5や辺長比2の角柱では圧力変動の特性は、上層部と下層部では大きな違いは見られなかったが、風下と風上で違いが見られた。
- 3) 辺長比2の角柱では変動風圧がなす仕事は常に振動を抑えるように働いていた。
- 4) 辺長比0.5の角柱では共振風速よりもかなり低い風速で変動風圧がなす仕事が正となり、空力不安定振動が起りやすくなっていた。
- 5) 正方形断面角柱で見られた上層部の現象は辺長比0.5の傾向とよく一致していた。また下層部の共振風速以前の傾向は辺長比2の傾向と似ていた。

参考文献

- 1) 谷池義人・西村宏昭・丸山勇祐：正方形断面をもつ高層建築物の空力不安定性，京大防災年報，第38号B-1，1995，pp.65-77
- 2) 谷池義人・西村宏昭：境界層流中における高層建築物の空力不安定振動，京大防災年報，第36号B-1，

- 1993, pp.69-78
- 3) 西村宏昭・谷池義人：境界層流中における高層建物の空力不安定振動—正方形断面をもつ高層建物の場合—, 日本建築学会論文報告集, 第 456 号, 1994, pp.31-37
 - 4) 西村宏昭・谷池義人：種々の長方形断面をもつ高層建築物の空力不安定振動, 第 13 回風工学シンポジウム, 1994, pp.341-346
 - 5) 西村宏昭・谷池義人：境界層流中における高層建物の空力不安定振動(続)—種々の長方形断面をもつ高層建物の場合—, 日本建築学会論文報告集, 第 482 号, 1996, pp.27-32
 - 6) Novak, M. : Galloping Oscillations of Prismatic Structures, Proc. ASCE, Vol. 98, EM1, Feb., 1972, pp.27-46.
 - 7) Bishop, R. E. D. and A. Y. Hassen : The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 277, 1964, pp.51-75
 - 8) Nakamura Y. and T. Mizota : Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Proc. ASCE, Vol. 101, EM6, Dec., 1975, pp.855-871
 - 9) 伊藤学・宮田利雄・藤沢伸光：振動する正方形断面に作用する空気力の特性, 土木学会第 30 回年次学術講演会概要集, I-208, 1975-10
 - 10) 谷池義人：高層建築物の空力不安定性に関する研究, 京都大学博士論文, 1983
 - 11) 石崎澁雄・谷池義人・近藤宏二：角柱振動時に側面に加わる動的な風圧力特性について (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1982, pp.1221-1222
 - 12) 石崎澁雄・谷池義人：角柱振動時に側面に加わる動的な風圧力特性について (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983, pp.2405-2406
 - 13) 石崎澁雄・谷池義人：角柱側面に加わる非定常な風圧力, 第 7 回風工学シンポジウム, 1982, pp.83-90