

角柱振動時の風圧力特性について（その2）

石崎 潑雄・谷池 義人・近藤 宏二

ON THE AERODYNAMIC PRESSURE ACTING ON AN OSCILLATING RECTANGULAR PRISM (Part 2)

By *Hatsuo ISHIZAKI, Yoshihito TANIKE and Koji KONDO*

Synopsis

The characteristics of the mean wind pressures acting on side faces of the rectangular prism oscillating transversely in a uniform flow were examined in the previous paper. The purpose of this paper is to investigate the behavior of the fluctuating wind pressures acting on the oscillating rectangular prism with side ratio 2 under the same experimental conditions as the previous study. The following main results are obtained.

- 1) It is considered that the restricted oscillation observed near the lower reduced wind velocity less than one half of the resonant wind velocity is caused by the fluctuating wind pressures acting on the side surfaces near the windward edges of the prism.
- 2) The galloping oscillation for the higher reduced wind velocity is seemed to be caused by the fluctuating wind pressures acting on the side surfaces near the leeward edges at the middle height of the prism while the phase angles of the pressures relative to the displacement move forward as the reduced wind velocity becomes higher.

1. ま え が き

構造物が風により風向直角方向に振動する現象は古くから知られていたが、その振動がいかなる原因によって発生するのであろうかという発生機構が解明されてきたのは最近のことである。発生機構の解明の糸口となった一つの方法は、物体振動時に加わる動的な空気力、いわゆる非定常空気力を測定したことであった。この非定常空気力の測定に関する研究は、土木構造物の研究者を中心として数年来行われてきた¹⁻⁶⁾。筆者等も一昨年以来建築構造物を対象として、この種の研究を行ってきた⁷⁻⁹⁾。土木構造物を対象とした非定常空気力に関する実験では、2次元模型（特に角柱）を用いて、振動モードも heaving であったが、建築構造物を対象とした著者等の実験では、3次元角柱を用いて振動モードは rocking とした。

著者を含めたこれまでの研究で、2次元あるいは3次元角柱全体に加わる非定常空気力の特性がかなり明らかとなり、非定常空気力と振動変位との位相差が振動発生に何らかの影響を与えることがわかった⁵⁻⁹⁾。しかしながら、この非定常空気力の形成過程や伝播経路等に関してはまだわかっておらず、渦励振やギャロピング振動などの風向直角方向振動の発生機構をさらに詳しく調べるためには、角柱の振動時に側面各部に加わる風圧力（非定常な風圧力と呼ぶ）の特性を求めらる必要がある⁹⁻¹⁰⁾。

この観点に立ち、本研究では3次元角柱の側面の各位置に圧力の測定点を設け、個々の測定点の変動圧をスペクトル解析して非定常な風圧力の形成成分を、各測定点間の相互相関から非定常な風圧力の伝播経路を、あるいは各測定点に働く非定常な風圧力と振動変位との位相差から振動の発達や減衰との関係をそれぞれ求め、風向直角方向振動の発生機構の解明を試みた。（その1）において、この非定常な風圧力の時間平均的な特性を明らかにしたが、ここでは時間的に変動する特性について検討する。

2. 実 験

2.1 計測方法

使用した模型, 強制振動装置および実験条件等は(その1)とまったく同じである。非定常な風圧力のうちで時間的に変動する成分(変動圧)の測定には, 差圧式の拡散型半導体圧力変換器(T社製 DD102A-0.3F)を用いた。この圧力変換器の共振周波数は約 600 Hz であり, 従来のバルク型のものに比べやや小さいが, ゼロ点のドリフト量はかなり少なくなる。変動圧の測定には圧力計を模型内部の測定点に直接取り付けを行うのが理想的であるが, そうすると模型の振動に伴ない取り付け部分が緩んだり, 模型の重量増加による振動装置のモーターの負荷を生じるおそれがある。そのため平均圧の測定の場合と同様, 測定孔から長さ 90 cm のビニールチューブを介して圧力変換器に導いた。このときの共振周波数を測定すると約 180 Hz 程度となり, 本実験を行うには支障はないものと思われた。

この圧力変換器を5台用いて, Upper Line, Middle Line, 等の各列ごとの5点を同時に測定した。圧力測定は片側面の圧力と, 両側面に働く圧力差(以後差圧と呼ぶ)との2つがある。前者の場合は差圧式の圧力変換器の片方の管を測定孔につなぎ, もう一方の管をビニールチューブを介して風洞外に開放した状態にし, 後者の場合は圧力変換器の両方の管に側面の番号の同じ測定孔からのビニールチューブをそれぞれつないだ。圧力変換器からの出力は直流アンプで増巾し, 差動トランスからの振動変位を示す出力とともにデータレコーダーに記録した。

2.2 解析方法

Fig. 1 に計測および解析方法のブロック線図を示す。解析は非定常な風圧力の変動成分の大きさと変位との位相差, 変動圧のスペクトル解析および2測定点間の変動圧の相互相関係数等に分れている。変動圧の大きさと位相差はデータレコーダーからの出力を 10 Hz のローパスフィルターを通した後, 6ch のペンレコーダーに同時に書き添えて読み取った。スペクトルと相関係数は 100 Hz のローパスフィルターを通した後, シグナルプロセッサ(S社製, 7T07A)を用いて解析した。読み取り時間を 1/1000 秒とし, 8 秒間のデータを解析した。

3. 実験結果

3.1 パワースペクトル

角柱側面に加わる非定常な風圧力の主な成分を調べるためにスペクトル解析を行った。片側面の圧力と両側面の差圧の両方について解析した結果, ほとんど差はなかったのでここでは差圧による結果のみを示す。Fig. 2 (a, b, c, d) に得られた結果を示す。各図のスペクトルは 60 Hz までのパワーを用いて無次元化して表わしており, 縦軸はパーセント, 横軸は周波数を示す。周波数の分解能は 9.76/10 Hz である。Fig. 2-a は角柱静止時の, Fig. 2-b, c, d は角柱振動時の各測定点のスペクトルを示す。図中の()内の数字は測定点の位置(その1参照)を, 連続した3つの数字は無次元振巾 \bar{u} 強制振動数 f_m 無次元風速 \bar{V} をそれぞれ表わす。また, m, s とあるのはそれぞれ振動数成分 (f_m 成分), ストローハル成分 (f_s 成分)を示す。

Fig. 2-a を見ると, (1), (3)の測定点では, はっきりとしたスペクトルピークを示すが, 後縁付近の(5)

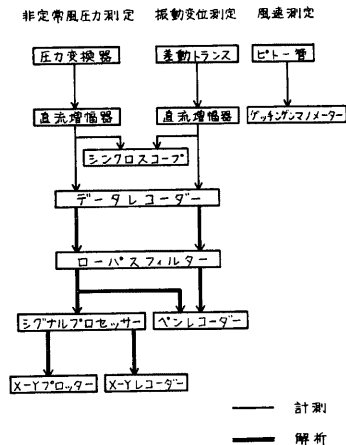


Fig. 1. Block diagram of measurement and analysis.

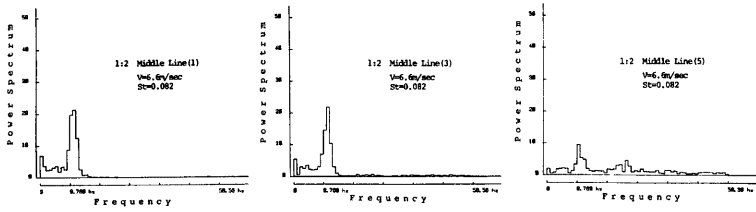


Fig. 2-a. Power spectra on side surfaces for prism standing.

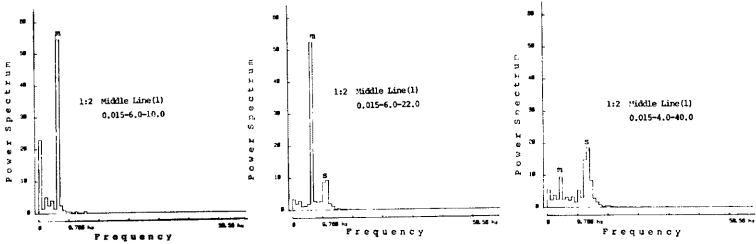


Fig. 2-b. Variation of power spectra increasing of reduced wind velocities.

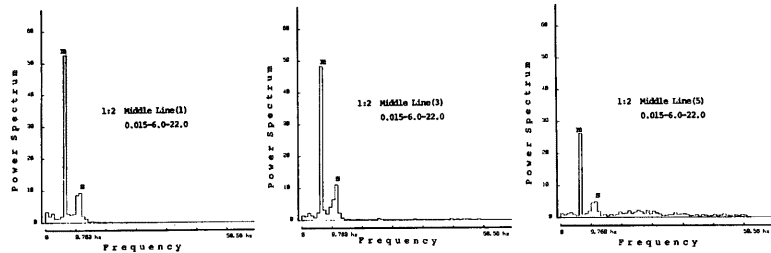


Fig. 2-c. Power spectra on side surfaces for prism oscillating.

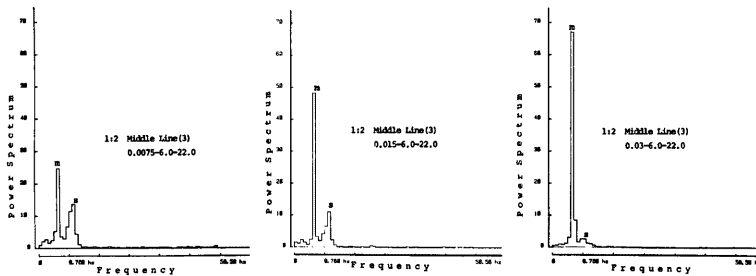


Fig. 2-d. Variation of power spectra increasing of reduced amplitudes.

では高周波成分があらわれピークを示すパワーも小さくなる。スペクトルピークを示す周波数は3つとも同じであり、ストローハル数 S_t を計算すると、 $S_t=0.082$ となった。従って共振風速 V_{res} は $V_{res}=(1/S_t)=12.2$ となる。上層、下層の列のスペクトル解析からも同じ結果を得た。

Fig. 2-b は振動振巾を一定にして風速を増加させたときのスペクトルの変化を示す。 $\bar{V}=10$ のときのスペクトルピークは1つで f_m 成分である。よってこの \bar{V} は同期領域内にあることを示す⁹⁾。(その1)で述べたように、このとき発生する渦は、 f_m 成分の渦と f_s 成分の渦とが一体となったものである。 $\bar{V}=22$ になると、 f_m 成分と f_s 成分の2つのピークが現われ、同期領域を外れたことを示す。風速が高くなり $\bar{V}=40$ になると、 f_m 成分のパワーより f_s 成分のパワーの方が卓越してくる。 \bar{V} が40を越えてさらに風速が高くなると、 f_s 成分が支配的となり f_m 成分はほとんど見られなくなるものと思われる。このとき側面に加わる非定常な風圧力の特性は、角柱静止時の風圧力の特性にほぼ等しくなると思われる。著者等が以前行った非定常空気力のスペクトル解析においても同様の傾向が見られた^{7,8)}。

Fig. 2-c は測定点の位置が風下側に向うにつれて、スペクトルがどう変化するかを示した図である。**Fig. 2-a** の静止時のものと同様、風下側に向うにつれ高周波成分が多くなる。

Fig. 2-d は風速を一定にして、振巾を増加させたときのスペクトルの変化を示す。 \bar{V} を一定にして \bar{y} を増加させると、 f_m 成分のパワーが大きくなる。とくに $\nu=0.03$ のときは f_s 成分はわずかしか見られず、 f_m 成分が支配的となる。これは(その1)でも述べたように \bar{y} の増加に伴ない、 f_m 成分の渦の形成が促進されるためであろう。さらに \bar{y} が大きくなると f_m 成分のピークのみになり、同期現象を示すと思われる。著者等の以前の結果においても \bar{y} の増加につれ、同期領域も拡がるということが確認されている^{7,8)}。

3.2 側面の相関係数

2つの測定点の圧力変動 $P_i(t)$ と $P_j(t)$ の相互相関係数 $R_{ij,\tau}$ は次式で定義される。

$$R_{ij,\tau} = \overline{P_i(t)P_j(t+\tau)} / \sqrt{\overline{P_i(t)^2}} \sqrt{\overline{P_j(t)^2}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで t は時間、 τ は隔り時間、 $\overline{\quad}$ は時間平均を示す。(1)式で $\tau=0$ とおいたときの相関係数を R_{ij} で表す。**Fig. 3** に側面の流れに沿った方向の相関係数を示す。但し解析は片側面のときのものである。こ

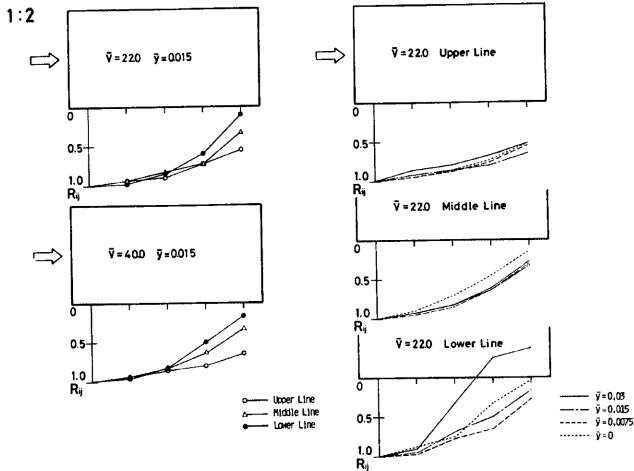


Fig. 3. Cross correlations on side surface.

ここで R_{ij} は側面でも最も風上側の測定点 (1) を基準とし、そこを 1 としたときの相関係数である。

左側の図に \bar{V} の違いによる R_{ij} の変化を角柱の高さ方向の各層に分けて示す。ここで $-\circ-$, $-\triangle-$, $-\bullet-$ はそれぞれ上層, 中層, 下層部の R_{ij} を表わす。 \bar{V} が 22 から 40 へと増加しても R_{ij} の形状にほとんど差はない。これは両者の圧力の伝播機構にほとんど差がないことを示す。風下側に向うにつれ相関は小さくなる。これは圧力の伝播速度が有限であるため、(1) の測定点から遠ざかるほど時間差が大きくなることと、風下側に向うにつれ剝離流に高周波成分の乱れが生じることの 2 つの原因が考えられる。(3) の測定点までは上, 中, 下層ともほとんど差はないが、(4), (5) の測定点では下層に向うにつれ相関が悪くなる。これは地板の影響により、下層部ほどより早く剝離流が乱されるためであろう。

右側の図に振動振巾の違いによる R_{ij} の変化を各層ごとに示す。図中の $-$, $---$, $----$ はそれぞれ無次元振巾 \bar{r} が 0.03, 0.015, 0.0075 のときの R_{ij} を示し、 $-----$ は角柱静止時の R_{ij} を示す。上層あるいは中層の相関は静止時を含め \bar{r} の大小にかかわらずほぼ一定となる。このことは上層あるいは中層で発生する渦の種類や強さは振巾の大きさによって異なっても、渦の流下速度等の機構はあまり変わらないと思われる¹⁹⁾。左図においても見られたように風下側の測定点 (4), (5) では下層部ほど相関が悪くなる。この測定点付近では \bar{r} の大きさによって R_{ij} の値もばらつきとくに $\bar{r}=0.03$ のとき R_{ij} は負となる。この負の相関の生じる原因については明らかでない。 \bar{r} が大きいと渦の形成が促進され、風速が高くなっても側面風下側で剝離流の断続的な再付着が生じることと何らかの関連があるのかもしれない。

3.3 高さ方向の相関係数

Fig. 4 は側面中央の高さ方向 (Center Row) の相関係数が、 \bar{r} の大小及び \bar{V} の高低によりどのように変化するかを示したものである。但し解析は片側面のときのものである。ここで R_{ij} は地板に最も近い測定点 (5) を基準として、そこを 1 としたときの相関係数である。図中の \blacktriangle 印は 2 次元角柱静止時の軸方向の相関を示す¹⁹⁾。このときの基準点は 2 つの端板ではさまれた 2 次元角柱の対称面上で、側面の中心にとっている。

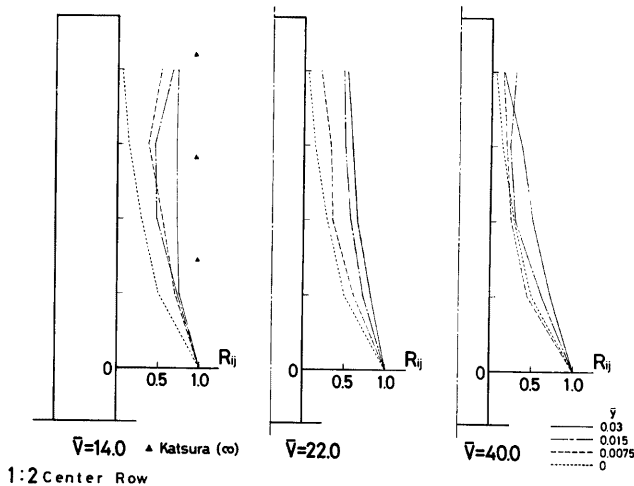


Fig. 4. Cross correlations on center row (side surface along height).

2次元角柱静止時の相関は3次元角柱静止時のものに比べかなり大きい。これは3次元の場合の側面まわりの流れは、高さによって異なった境界と接するため高さ方向で一様とならないが、2次元の場合は軸方向で同じ境界をもつため、側面まわりの流れがほぼ一様となり軸方向の相関もよくなるのであろう。振動が生じると高さ方向の相関もよくなる。これは振動にともなって発生する渦が角柱静止時に発生する渦に比べて、高さ方向にわたりより一様に出るからであろう。

$\bar{V}=14$ のとき、同期領域内にあると思われる $\bar{r}=0.03$ のときの相関は上層部まで大きい。このとき発生する渦は f_m 成分のみであるため、相関がよくなるのであろう。 $\bar{V}=22$ のときは \bar{r} の大小にかかわらずいづれも同期領域外となるが、このときの相関は \bar{r} の増加につれてよくなる。3-1節のスペクトル解析の結果から明らかのように、 \bar{r} の増加につれ f_m 成分の渦発生が卓越してくる。 f_m 成分の渦は f_s 成分の渦に比べ、高さ方向により一様な出方をするために相関がよくなるのであろう。 $\bar{V}=40$ のときの相関は \bar{r} の小さいときは f_s 成分の渦発生が卓越するため、静止時のものに近づく。 \bar{r} が大きくなると、 f_s 成分と同程度に f_m 成分の渦も発生するので多少相関はよくなる。

3.4 非定常な風圧力の波形

Fig. 5 (a, b) に角柱振動時に側面各部に働く変動圧の記録例を示す。波形はすべて10 Hzのローパスフィルターを通して、ノイズを取り除いた後のものである。左側の数字は中層部の測定点の位置を示し、 y は差動トランスによって測定した振動変位を示す。但し圧力変換器の出力は5台とも若干異なるため、1～5の圧力変動を示すグラフから圧力の大きさを直接比較することはできない。このときの圧力測定は両側面の差圧で行った。ここでいう差圧とは(その1)の Fig. 2 で上側面に加わる圧力から下側面に加わる圧力を差し引いたものであり、この値が正のときは上側面から下側面に向う風圧力が作用する。また、振動変位は差圧の場合と同じく、下側に向う方向を正にとる。図中の一点鎖線と破線との差が、変位と圧力の位相差を示す。破線が一点鎖線より右側にあるときは圧力は変位に対し位相の遅れをもち、逆に左側にあるときは圧力は変位に対し位相の進みをもつ。

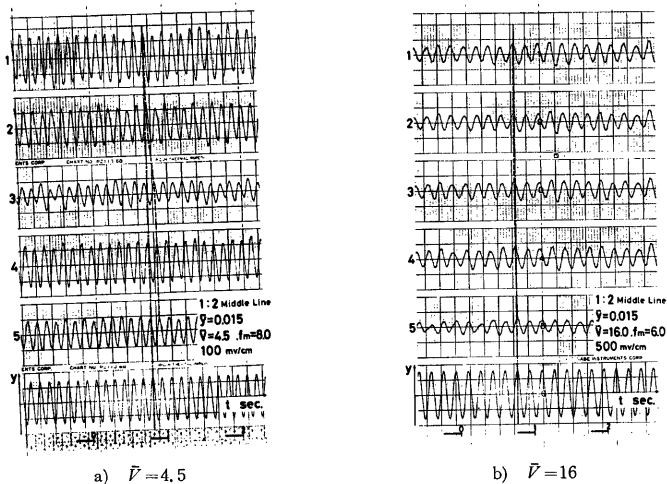


Fig. 5. Records of pressures acting on side surface and displacement of prism.

$\bar{V}=4.5$ のときの Fig. 5-a を見ると、圧力の変動はほぼ正弦的であり、風下側に向うにつれ位相の遅れも大きくなる。圧力の振動数はどの測定点のものも同じで、変位の振動数にはほぼ等しい。このことは 3-1 節で述べたようにこれらの圧力変動のスペクトル解析からも確認される。Fig. 5-b に示す $\bar{V}=16$ のときの波形は、 $\bar{V}=4.5$ のときのもの比べ出力を 1/5 に落してある。圧力の変動は後縁付近の (5) の測定点を除きほぼ正弦的であり、位相はわずかではあるが進む傾向が見られる。(1)~(4)の測定点は同期領域内にあるため振動数にほとんど変化は見られないが、(5)の測定点では同期領域を外れて f_s 成分の変動が加わるため波形に多少の乱れを生じ、振動数も変位と同じ $f_m=6$ のものとストローハル成分の $f_s=7.9$ のものとがあらわれる。そのため変動圧の振巾を読み取る際には、 f_m と同じ振動数をもつ波形のものを数波読み取りそれらを平均した。

波形の読み取りはここで示した $\bar{V}=4.5, 16$ 以外にも $\bar{V}=6.3, 10, 18, 22$ のときのものがある。角柱の振動数は $\bar{V}=4.5, 6.3$ のときは $f_m=8$ 、これ以外のときは $f_m=6$ とした。使用した 6 つのローパスフィルターはすべて同じ特性（減衰傾度は 24 dB/OCT）をもったものであり、10 Hz のローパスフィルター通過後の振動特性は、振動数が 6, 8 のときそれぞれ 0, -0.5 dB となる。つまり $f_m=6$ のときの振巾はフィルター通過後も影響を受けず、 $f_m=8$ のときの振巾はフィルター通過後約 4 割程度小さくなる。このため $\bar{V}=4.5, 6.3$ のときの変動圧の振巾は、この影響を考慮して求めた。

3.5 非定常な風圧力のなす仕事と位相差

前節で示した波形記録から $\bar{V}=4.5, 6.3, 10, 16, 18, 22$ のときの非定常な風圧力の振巾と変位との位相差を読み取った⁹⁾。 $\bar{V}=16, 18, 22$ の風圧変動の波形には Fig. 5-b に示したように測定点によっては f_m 成分のほかに f_s 成分があらわれてくるが、振動数 f_m をもつ定振巾の振動に寄与するのは f_m 成分の変動圧である。そのため f_m 成分の振巾を読み取り、これを非定常な風圧力の振巾とした。ここで取り上げた 6 つの無次元風速は前の非定常空気力の実験で、 C_l （非定常空気力のうちで振動速度と同相成分のもので、 $C_l > 0$ のとき振動の発生が考えられる）が負から正へ移行していく風速域のものである⁹⁾。ただ前の実験では $\bar{V}=4.5$ のときのものは実験上の困難さにより調べていない。自由振動実験によると、この風速域でピーク応答を示す限定振動が見られるので、このときの非定常な風圧力のなす仕事を調べることは興味深い。

角柱の各測定点での水平変位を y_i とすると、 y_i は (2) 式で表わされる。

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

3-4 節に示した風圧変動の波形を近似的に定振巾の調和振動と仮定すると、各測定点に作用する非定常な風圧力 P_i は (3) 式で表わされる。

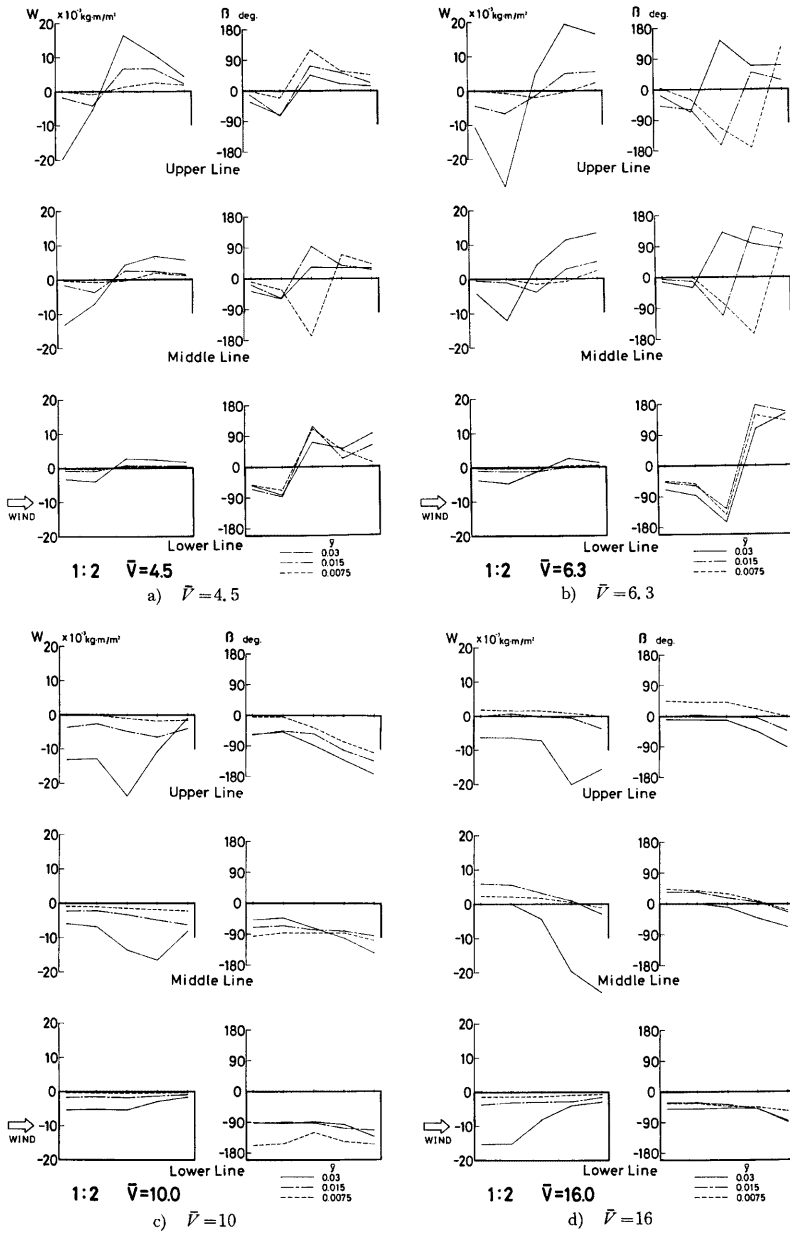
$$P_i = P_{0i} \cos(2\pi f_m t + \beta_i) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで i は測定点の位置で例えば Upper Line (3) とか Lower Line (5) で表わされる。 y_{0i} は i 点の水平振巾を示し、各層ごとの測定点 (1), (2), ……(5) では等しくなる。 P_{0i}, β_i はそれぞれ i 点に作用する非定常な風圧力の振巾と変位との位相差を示す。

各測定点に作用する非定常な風圧力が 1 サイクルあたりに角柱に対してなす単位面積あたりの仕事 W_i は (4) 式で表わされる⁹⁾。

$$W_i = \int_0^{1/f_m} P_i dy_i = \int_0^{1/f_m} P_i \dot{y}_i dt = \pi P_{0i} y_{0i} \sin \beta_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

P_{0i}, y_{0i} は正であるから W_i の正負は $\sin \beta_i$ の符号によってきまる。 β_i が $2n\pi < \beta_i < (2n+1)\pi$ のとき $0 < \sin \beta_i < 1$ となり、 W_i は正になる。但し n は整数とする。 W_i が正になるとき、 i 点に加わる非定常な風圧力は角柱の振動を増大さす働きをする。また、角柱の側面全体に加わる非定常な風圧力の 1 サイクルあたりになす仕事は $W_T = \sum_{U, M, L} W_i$ (U, M, L は上, 中, 下層の測定点の合計を意味する) で表わされ、この値が正になるとき振動の発生が考えられる。つまり前に求めた C_l と表現は異なるが同じ特性を有するのである。



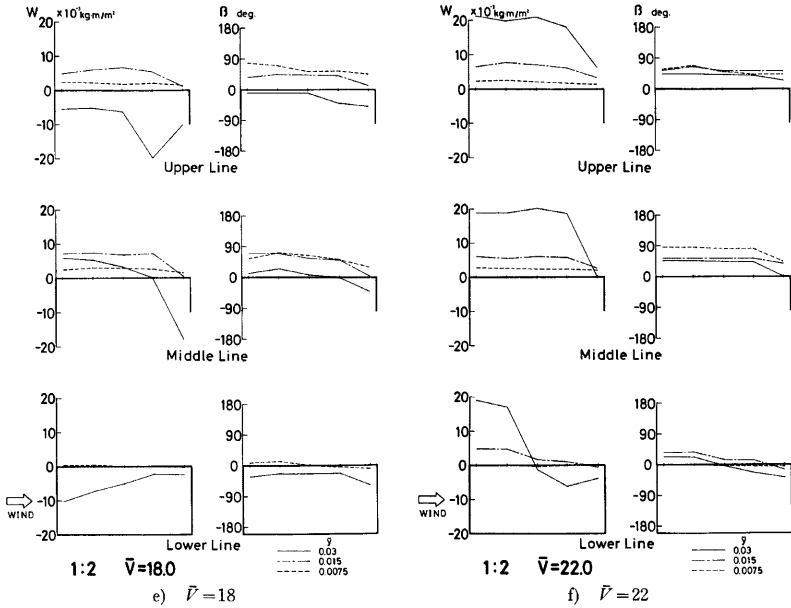


Fig. 6. Works done by pressures and phase angles relative to displacement increasing of reduced wind velocities.

Fig. 6 (a~f) に無次元振巾 \bar{v} の大小による W_i と β_i の変化を各層ごとに示す。ここで位相差 β_i は $-180^\circ < \beta_i \leq 180^\circ$ の範囲で表わした。 β_i が 180 度より大きくなる場合は $\sin \beta_i < 0$ となるので $(180^\circ - \beta_i)$ の値で示し、逆に β_i が -180 度以下になる場合は $\sin \beta_i \geq 0$ となるので $(-180^\circ - \beta_i)$ の値で示した。 $\bar{v} = 4.5$ のときの仕事 W_i をみると、各層とも風上側で負、風下側で正となっている (**Fig. 6-a**)。側面の圧力変動は前縁で剝離した流れが細かい渦を形成し、この渦が剝離流によって風下へ流下する過程で生じるのであろう⁹⁾。剝離流の流下速度は風速に比例すると考えられ、 $\bar{v} = 4.5$ のように風速が低くなると剝離流の流下速度は遅くなり、それに伴って圧力の伝播速度も遅くなる。そのため変位に比べて位相の遅れを生じ、風上側の測定点では仕事 W_i が負となる。逆に風下側の測定点では位相の遅れがさらに大きくなり 180 度以上 ($\beta_i < -180^\circ$) になるため W_i は正となる。辺長比 $1 : 3$ の二次元角柱を用いた実験においても同様の傾向が伺える⁹⁾。また、(その1) で示したように風上側の側面付近では渦度が大きく周期的な渦が形成され、風上側の時間平均的な負圧も大きくなるが、この負圧は振動の発生には何も寄与しないことがわかる。 W_i の絶対値は上層部ほど大きくなる。これは上層部ほど水平振巾が大きくなることから考えると当然のことと思われる。 W_T は \bar{v} の大小にかかわらずいずれも正となることから振動の発生が考えられるが、 \bar{v} の増加にともなって大きくならず $\bar{v} = 0.0075, 0.015, 0.03$ のとき、それぞれ $W_T = 6.9, 11.9, 3.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{m}^2$ となる。したがってこのとき発生する振動は大振巾のものとはならず、ピーク応答を示す限定振動となるだろう。このことは著者等が行った自由振動実験においても確認される^{8,15)}。また、この振動の発生に主に寄与するのは、上層風下側に加わる非定常な風圧力である。

$\bar{v} = 6.3$ のときの W_i の性状は $\bar{v} = 4.5$ のときとよく似ているが、 W_T は $\bar{v} = 0.03$ の場合を除きいずれも負となる (**Fig. 6-b**)。これは風速が若干高くなったために、風下側で位相の遅れが回復するからであろう。

また、 $\bar{v}=0.03$ のときの W_T は正となる。これは主として中層風下側の W_i によるものである。 \bar{v} が小さいとき W_T は負となり、 \bar{v} が大きくなると W_T は正となる。このことは角柱に大きな初期変位を与えて振巾を大きくすると、振動が発生しうることを意味するが、実際の構造物ではこのような現象は起こり得ず自励振動発生のおそれはほとんどない。また、 $\bar{V}=4.5, 6.3$ の低風速域での位相の遅れは \bar{v} の増加につれて大きくなる。これは \bar{v} の増加につれて渦の形成が促進され、剝離流の再付着点がより風上側に移行することと何らかの関連があるのかもしれない。

$\bar{V}=10$ になると、風下側で位相の遅れがさらに回復し、 $-180^\circ < \beta_i < 0$ の範囲になる (Fig. 6-c)。そのため W_i は各層とも負となり、振動は発生しないものと思われる。また、 β_i を側面全体にわたって平均すると、 \bar{v} の大小にかかわらずほぼ一定となり -90 度前後の値となる。同様の傾向が前に求めた非定常空気力と変位との位相差 β_0 にも見られ、両者の値もほぼ一致する⁹⁾。

$\bar{V}=16$ のときの W_T は $\bar{v}=0.03, 0.015$ の場合は負となり、 \bar{v} の最も小さい $\bar{v}=0.0075$ の場合のみわずかに正となる。このことは角柱の減衰が大きい場合には振動は発生せず、また減衰が小さくなる場合でも微小振巾の振動しか発生しないことを意味する。振動の発生には $\bar{V}=4.5$ のときと異なり、風上側の測定点の仕事が寄与する。これは風速が高くなったため、圧力の伝播速度がはやくなり風上側の測定点では、変位に比べて位相の進みを生じるからであろう。 $\bar{v}=0.015$ のときの側面全体の W_T は負となるが、中層部の W_i に着目すると正となり振動を助長させる力が作用する。この力が上層部ではなく中層部に作用することは興味深い。

$\bar{V}=18$ のときの W_T は $\bar{v}=0.03$ の場合を除きいずれも正となる。このとき発生する振動は \bar{v} が 0.03 以上の大振巾のものには発達しないが、 $\bar{v}=0.0075$ のときの W_T より $\bar{v}=0.015$ のときの方が大きくなることか

ら、 $\bar{v}=0.015$ 前後のものになることが予想される。この振動の発生には上、中層の W_i が寄与するが、とくに中層の寄与が大きい。また、 $\bar{v}=0.03$ のときの中層風上側の W_i は正となっており、 $\bar{V}=16$ のときと同様、部分的に振動を助長する力が作用する。 $\bar{V}=16, 18$ のときの位相差は $\bar{V}=4.5, 6.3$ の低風速域のときと同様、 \bar{v} の増加につれて遅れる傾向にある^{10,11)}。

$\bar{V}=22$ のときの W_T は \bar{v} の大小にかかわらずいずれも正となり、 \bar{v} の増加につれて飛躍的に大きくなる。このとき発生する振動は \bar{v} が 0.03 以上の大振巾のものになると予想される。振巾が大きくなるにつれ、下層部に加わる非定常な風圧力も振動の発生に寄与するようになる。 $\bar{V}=16$ のときは中層部の W_i が、 $\bar{V}=18$ のときは上層部も加わり上、中層部の W_i が、 $\bar{V}=22$ のときはさらに下層部も加わり上、中、下層部の W_i が振動の発生に寄与するため、 \bar{V} の増加にともない振巾が大きくなり、いわゆるギャロッピング振動の性状を呈する^{14,15)}。 \bar{V} が高くなると風上側から風下側への圧力の伝播速度もはやくなるため、風上側と風下側の β_i の差は小さくなる。また、 \bar{V} が高くなるにつれて、 \bar{v} の小さい順、あるいは中、上、下層部の順に、位相の進みを生じるがこの原因に

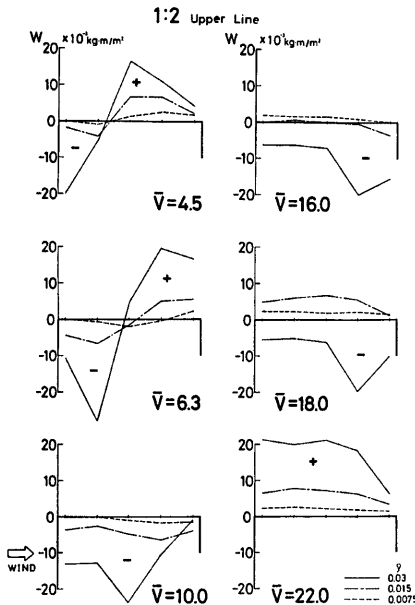


Fig. 7. Variation of works on upper line with reduced wind velocities.

については明らかでない。

Fig. 7 に \bar{V} の増加による W_i の変化を上層部を例にとりて表わす。 $\bar{V}=4.5$ のとき、風上側と風下側にそれぞれ W_i の負の領域と正の領域とが存在しているが、正の領域が負の領域を上回るため振動の発生が考えられる。 $\bar{V}=6.3$ になると、正の領域が後縁付近に後退し、 \bar{V} の小さい順に負の領域が広がる。そのため振動は生じにくくなる。 $\bar{V}=10$ になると、正の領域がさらに後退するため、すべて負の領域となり振動は生じないものと思われる。以上が V_{res} 以下の低風速域での振動の発達と減衰に寄与する W_i の変化である。

風速が高くなり $\bar{V}=16$ になると、振巾のもっとも小さい $\bar{V}=0.0075$ のときのみ側面にほぼ一様に正の領域がわずかではあるが存在し、微小振巾の振動発生が考えられる。 $\bar{V}=18$ になると $\bar{V}=0.03$ のときを除き、いずれの場合もほぼ側面一様に正の領域が広がり、 $\bar{V}=16$ のときに比べ振動がより発達するものと思われる。 $\bar{V}=22$ になると、 \bar{V} の増加に伴ない正の領域がさらに広がり、大振巾の振動に発達していくものと思われる。以上が V_{res} 以上の高風速域での振動、いわゆるギャロッピング振動の発達に寄与する W_i の変化である。

4. ま と め

辺長比 1 : 2 の 3 次元角柱が風により風向直角方向に振動するとき、側面各部に加わる非定常な風圧力の変動成分を取り出し、その特性を無次元風速で 4.5 から 40 の範囲にわたって調べた。得られた結果を下記に示す。

1) スペクトル解析の結果、側面各部に加わる非定常な風圧力の主な成分は、振動数成分 (f_m 成分) の渦とストローハル成分 (f_s 成分) の渦の 2 つであった。無次元振巾 \bar{V} を一定にして、無次元風速 \bar{V} を変化させた場合、 \bar{V} が共振風速 V_{res} 付近あるいはそれ以下の低い風速域では、 f_m 成分の渦発生が支配的となり、 \bar{V} が V_{res} より高くなり同期領域を外れると f_m 成分と f_s 成分の両方の渦発生が見られ、さらに \bar{V} が高くなると f_s 成分の渦発生が卓越するものと思われる。

2) 側面の流れに沿った方向の相互相関を調べた結果、側面風下側に向うにつれ相関は小さくなる。これは側面に沿った圧力の伝播速度が有限であることと、前縁からの剝離流が風下側に向うにつれ高周波成分の乱れを生じることの 2 つの影響であろう。

3) この側面方向の相関は静止時を含め、 \bar{V} の大小にかかわらずほぼ一定となる。これは発生する渦の強さや種類は \bar{V} の大きさによって異なっても、渦の流下速度等の機構はほとんど変わらないことを意味する。

4) 側面中央の高さ方向の相互相関を調べた結果、振動時の相関は静止時のものに比べて大きくなる。これは振動に伴って発生する f_m 成分の渦が静止時に発生する f_s 成分の渦に比べて、高さ方向にわたりより一様な出方をするからであろう。また、振巾の増加につれて相関もよくなるが、これは f_m 成分の渦発生が卓越してくるからであろう。

5) 2 次元角柱静止時の高さ方向（軸方向）の相関は、3 次元角柱静止時のものに比べかなり大きい。3 次元角柱の側面まわりの流れは高さによって異なった境界と接するが 2 次元の角柱場合は軸方向でほぼ同じ境界をもつため、側面まわりの流れもほぼ一様となり、軸方向の相関もよくなるのであろう。

6) 同期領域内の風速域では側面各部の圧力変動はほぼ正弦的であり、変位との位相 β_i は遅れる傾向となる。同期領域を外れ風速が高くなると、 f_s 成分の変動が加わるため波形に多少の乱れを生じ、 β_i も進む傾向となる。

7) 側面に加わる非定常な風圧力が変位に対し位相の進み ($0 < \beta_i < 180^\circ$) をもつとき、この風圧力は角柱に対し正の仕事なし振動を助長させる働きをする。

8) $\bar{V}=4.5$ のように風速が低くなると、側面風下側では位相の遅れが大きくなり 180° 以上となるため、見かけ上の位相の進みとなる。そのため側面の風上側と風下側に仕事 W_i の負の領域と正の領域とがあらわれ、正の領域が負の領域を上回るために振動が発生する。また、振巾の増加につれて W_i の正の領域は大きくなりなない。したがってこのとき発生する振動はピーク応答を示す限定振動になるだろう。

9) \bar{V} が同期領域を外れて高くなると、振巾の小さい順に側面風上側から位相の進みが生じ始める。 $\bar{V} = 16$ のときは側面中層部の仕事 W_i が、 $\bar{V} = 18$ のときは上層部も加わり、中層部の W_i が、 $\bar{V} = 22$ のときはさらに下層部も加わり側面全体の W_T が振動の発生に寄与するため、 \bar{V} の増加に伴ない振巾も大きくなるいわゆるギャロッピング振動の性状を呈するものと思われる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、剽難渦の概念について助言を得た京都大学防災研究所桂順治助教授、実験装置を製作した羽野淳介技官並びに風洞実験と図の作成に協力を得た杉政和光技官に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 釜口展宏・田中博喜・高原 茂・松井友二：振動円柱の非定常空気力に関する研究，構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム，1970，pp. 153-159.
- 2) 伊藤 学・宮田利雄・森光康夫：正方形柱に作用する変動抗・揚力，構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム，1972，pp. 159-165.
- 3) 森光康夫・伊藤 学・宮田利雄：空気力の非線形性を考慮した構造物の空力弾性振動，土木学会論文報告集，第219号，1973，pp. 27-36.
- 4) 成田信之・横山功一・伊藤杜一：斜長橋桁断面の空力特性（その1），構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム，1974，pp. 223-230.
- 5) Nakamura, Y. and T. Mizota: Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Proc. ASCE, Vol. 101, EM 6, 1975, pp. 855-871.
- 6) 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.
- 7) 石崎澄雄・谷池義人・中山久司：角柱の振動時における3次元空気力特性について，京都大学防災研究所年報，第23号B-1，1980，pp. 229-240.
- 8) 石崎澄雄・谷池義人・中山久司：角柱に加わる3次元非定常空気力について，第6回風工学シンポジウム，1980，pp. 333-340.
- 9) 小松定夫・小林紘士：調和振動中の長方形断面角柱に作用する動的圧力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第278号，1978，pp. 15-23.
- 10) 宮崎正男・宮田利雄・伊藤 学：乱流中の角柱周りの定常・非定常圧力分布特性，第6回風工学シンポジウム，1980，pp. 177-184.
- 11) 山田 均・宮田利雄・伊藤 学：たわみ振動する角柱の周辺圧力分布に関する一考察，第6回風工学シンポジウム，1980，pp. 185-192.
- 12) 白石成人・松本 勝：充実構造断面の渦励振特性に関する基礎的考察，第6回風工学シンポジウム，1980，pp. 317-324.
- 13) 石崎澄雄・桂 順治・河井宏允：2次元角柱変動圧軸方向相関の測定と渦の径路の測定，構造物の耐風性に関する第5回シンポジウム，1978，pp. 183-190.
- 14) Parkinson, G. V. and J. D. Smith: The Square Prism as an Aeroelastic Nonlinear Oscillator, Quart. Jour. Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 17, Part 2, 1964, pp. 225-239.
- 15) 石崎澄雄・谷池義人・近藤宏二：風による角柱の振動不安定性に対する稜の寸法比の影響について，京都大学防災研究所年報，第23号B-1，1980，pp. 241-255.