

角柱振動時の風圧力特性について（その1）

石崎 潑雄・谷池 義人・近藤 宏二

ON THE AERODYNAMIC PRESSURE ACTING ON AN OSCILLATING RECTANGULAR PRISM (Part 1)

By *Hatsuo ISHIZAKI, Yoshihito TANIKE and Koji KONDO*

Synopsis

The purpose of the paper is to investigate the characteristics of the mean wind pressures acting on side faces of a rectangular prism having side ratio 2 (with short edges to the wind direction) which is sinusoidally oscillated with rocking mode across wind direction. Wind tunnel experiments were performed over a wide range of reduced wind velocity from 4.5 to 40 by the forced oscillation technique. The following main results are obtained.

- 1) The large negative wind pressures on the side surfaces near the windward edges were observed near the lower reduced wind velocity less than the resonant wind velocity and the pressure recoveries are also found toward the side surfaces near the leeward edges.
- 2) The wind pressure distributions acting on the oscillating prism become similar to these of the wind pressures acting on the standing prism whether the oscillating amplitude being large or small at the higher reduced wind velocity beyond the resonant wind velocity.

1. ま え が き

建築・土木構造物のうちに代表的な形状をなす角柱の静止時に加わる風圧力の性状に関しては、これまで数多くの研究者により実験が行われてきた。時間平均的な風圧、いわゆる平均圧の分布に関する実験はほぼしつくされている。時間的に変動する風圧、いわゆる変動圧に関してもここ十年来、計測器械等の飛躍的な進歩により精密な測定が行われるようになり、動的な特性が明らかになってきた。

ところで、物体に風があたると振動を生じることがある。物体の動特性や風の性質によっては大振巾の振動に発達することもある。風による振動の発生原因を調べる一つの方法として、静止物体に作用する風圧から求めることがある。これは静止物体に作用する風圧から推定した力を外力項として物体の運動方程式に代入し、これを解くことにより変位を求め、実際の変位との比較を行いその妥当性を検討する方法である。この準定常的な方法により、風向方向に振動するバフエッティング振動、風向直角方向に振動するギャロッピング振動などの解析がなされている^{1,2)}。その結果、バフエッティング振動においては一応の成果が得られているが、ギャロッピング振動に関してはある限られた条件下でしか、この方法は適用されないようである^{1,3)}。これは振動時に物体に加わる風圧力（非定常な風圧力と呼ぶ）が、静止時のものと異なるためである。したがって、この振動の発生機構を解明するためには振動時の物体に加わる非定常な風圧力を求めることが必要であろう。

本論文では渦励振やギャロッピング振動のように風向直角方向に一定振巾で振動するものをとり上げ、振動時に角柱側面に作用する風圧力の特性を調べることにした。この種の研究は2次元角柱に関しては2-3例⁴⁻⁶⁾あるが、3次元角柱に関してはほとんど見あたらない。そのためここでは3次元角柱の振動時の風圧力特性について調べた。得られた結果は2次元角柱振動時のものや3次元角柱静止時のものとも比較を行い

その差異についても検討した。また、本論文は(その1)と(その2)に分けて、(その1)では非定常な風圧力のうちで時間平均的なもの(平均圧)について、(その2)では時間的に変動するもの(変動圧)について調べた。

2. 実 験

2.1 模 型

使用した角柱模型は断面の辺長比が1:2のものであり、寸法と形状を Fig. 1 に示す。材料はアクリル板を用いてあり、側面と上面は厚さ 3mm、下面は厚さ 5mm とした。圧力測定孔の内径は 1mm で片側面に17個づつとし、両側面に設けた。各測定孔の番号付けを Fig. 2 に示す。測定孔の位置は風向に沿った列とこれに直角で中央の高さ方向の列とがある。前者を地面板から遠い順に Upper Line, Middle Line, Lower Line と名付け、後者を Center Row と名付けた。また、前者の測定孔は風上から順に 1, 2, ..., 5 と番号を付け、後者のものは頂部から順に 1, 2, ..., 5 と番号を付けた。

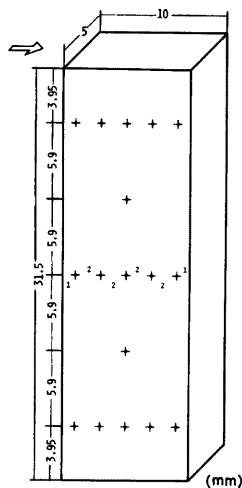


Fig. 1. Model.

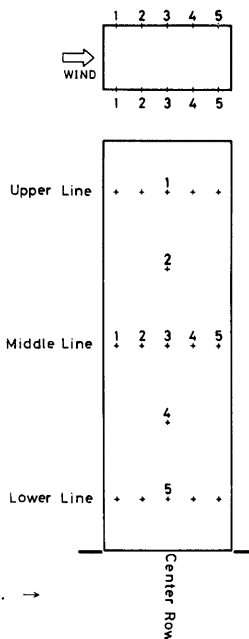


Fig. 2. Naming of pressure holes. →

2.2 実験装置

非定常な風圧力を測定する方法として、自由振動法⁷⁾と強制振動法⁸⁾の2つがあるが、ここでは後者の方法を用いた。この方法についての詳細は著者等の文献を参照されたい⁹⁾。使用した強制振動装置は以前著者等が非定常空気を検出したときに用いた装置を改造したものである。Fig. 3 にその概要を示す。以前のものとほとんど変わっていないが、風洞外のダミーモデルが不用となったのと、支持棒にゲージを貼る必要がなくなったのが異なる⁹⁾。ダミーモデルの代りに錘を取り付け、模型のロッキング振動を円滑にした。模型

の強制振動数 f_m は後で述べる無次元風速によって多少異なり 4~8 Hz の範囲とした。模型の振動振巾は模型頂部の水平振巾 y_0 を回転中心から模型頂部までの長さ L で割って無次元化して表わし、 $\bar{y}(=y_0/L)=0.03, 0.015, 0.0075$ の3種類とした。この無次元振巾 $\bar{y}$ は以前の非定常空気力検出時のものに比べ約5%程度小さくなっている^{9,10)}。これは以前の $\bar{y}$ は支持棒に貼ったゲージ位置を近似的にロッキング振動の回転中心と仮定して求めたために両者の差が生じたものである。

2.3 実験方法

風洞内に模型を取り付けた状態の実験概要を Fig. 4 に示す。使用した風洞はゲッチングン型の開放風洞で、吹き出し口の断面は直径 1 m の円に外接する正八角形をしている。実験時の風は風速勾配のほとんどない一様流（乱れの強さは 0.5%）とした。実験風速 V は約 1.8~8.0 m/sec の範囲とした。 V を振動数 f_m と風に直面する模型の巾 b で割って無次元風速 $\bar{V}(=V/f_m \cdot b)$ を求め、 $\bar{V}$ を 4.5~40 の範囲とした。非定常な風圧力のうちで時間平均的な成分（平均圧）は、測定孔から内径 2 mm、長さ 90 cm

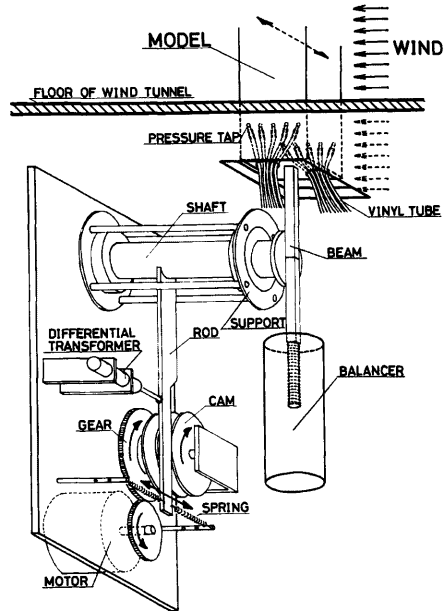


Fig. 3. Forced oscillation instrument.

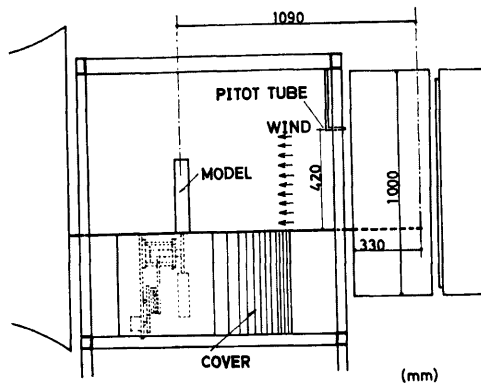


Fig. 4. Model set-up in test section of wind tunnel.

3. 実験結果

3.1 側面の風圧分布

風圧係数 C_p を次式で定義した。

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{q} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで P は角柱のある一点に加わる風圧力。 P_∞, q は角柱の影響を受けない無限遠点の空気静圧および速度圧であるが、ここでは風洞内に設置した Pitot 管の静圧と速度圧で代表させた。

角柱側面の平均圧分布を Fig. 5 (a~c) に示す。無次元振幅 $\bar{y}$ の大きい順に a, b, c とした。図中の○は角柱の上層部 (Upper Line) の、△は中層部 (Middle Line) の、●は下層部 (Lower Line) の C_p をそれぞれ示す。図中に Two-Dim. とあるのは2次元の実験結果である^{5,6)}。但し、 $\bar{V}$ は本実験と同じ定義であるが、無次元振幅は本実験と異なる。2次元の場合の無次元振幅は実振幅 a を風に直面する巾 d (本論文では b とした) で割って定義し、 a/d で表わしている。したがって、3次元の実験結果と直接比較できないが、ここでは3次元の中層の高さでの振動振幅を角柱の風に直面する巾で割ったものと、2次元の a/d とが比較的一致する場合についてのみ両者を比較した^{5,6)}。

角柱のストローハル数 $S_t (= f_s \cdot b / V, f_s$ は角柱静止時に卓越して発生する渦の周波数) は、(その2) で示すように角柱を静止させた状態で側面各部に加わる変動圧をスペクトル解析して求めた。その結果、 $S_t = 0.082$ となり、共振風速 V_{res} は $V_{res} (= 1/S_t) = 12.2$ となった。 $\bar{y} = 0.03$ のときの Fig. 5-a を見ると、 V_{res} よりかなり低い $\bar{V} = 4.5$ のとき、上、中、下層のいずれの場合も側面風上側で大きな負圧を生じ、風下に向うにつれ圧力が回復している。この傾向は2次元の場合にも見られる^{4,6)}。これは角柱の前縁で剥離した流れが風上側の側面付近で渦を形成し、風下側の側面ではこの剥離流が再付着するからであろう。このとき形成される渦は角柱静止時に発生するストローハル成分の渦 (f_s 成分の渦) ではなく、角柱の振動によって生じる渦 (f_m 成分の渦) であろう。このことは(その2) で側面の変動圧をスペクトル解析した結果、 f_m 成分が支配的であったことから確認される。この辺長比 1:2 をもつ角柱は $\bar{V} = 4.5$ 付近でピーク応答を示す限定振動を生じると言われているが、この再付着現象が振動発生に何らかの影響を及ぼしているのかもしれない¹¹⁾。

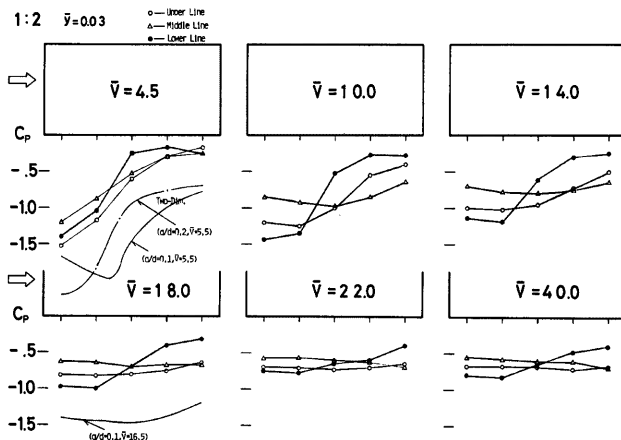
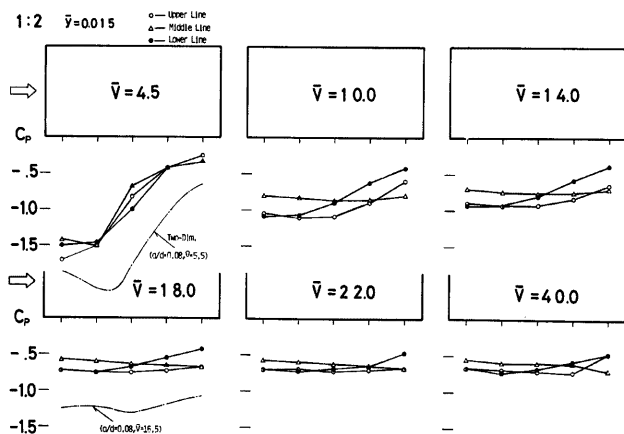
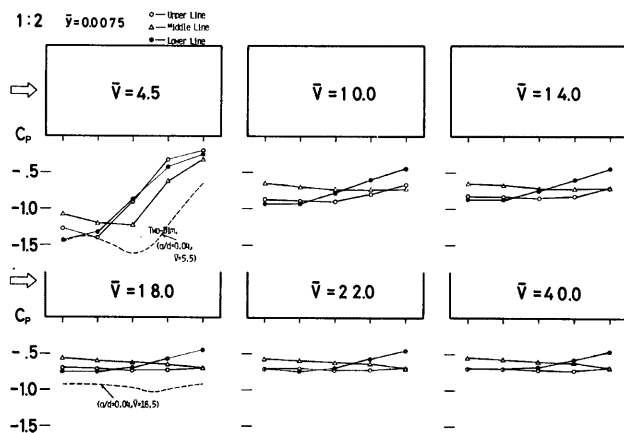


Fig. 5-a. Pressure distributions on side surface with reduced amplitude of $\bar{y} = 0.03$.

Fig. 5-b. Pressure distributions on side surface with reduced amplitude of $\bar{y}=0.015$.Fig. 5-c. Pressure distributions on side surface with reduced amplitude of $\bar{y} = 0.0075$.

$\bar{V}=10, 14$ のとき、上層と下層の側面の圧力分布は再付着の現象を示すが、再付着点は $\bar{V}=4.5$ のとき比べ風下側へ移行する。これは風速が高くなったため、渦の形成位置が風下側へ押し込まれるからであろう。また、中層の側面の圧力は風下付近でわずかに圧力を回復しているにすぎない。上層、下層と中層の性状の違いは、剝離流が接する境界条件の違いであろう。上層付近では角柱頂部からの剝離流による渦と前縁剝離の渦とが一体となり渦の形成を促進さすと思われる。下層付近では風速勾配のほとんどない一様流といっても地面板の影響でわずかながらも乱流境界層が存在している。このため下層の測定点は多少乱れの影響を受け渦の形成が促進されるのかもしれない。これらの原因で、下層では $\bar{V}$ が14前後になっても再付着の現象を呈するのであろう。ところが中層付近ではこのような境界条件がないため、渦の形成が遅れるのである。

$\bar{P}$ がさらに高くなり $\bar{P}=22, 40$ になると上, 中, 下層とも負の風圧係数 ($-C_p$) は小さくなり, 上, 中層の $-C_p$ は側面にわたりほぼ一定となる。後で示すようにこのときの $-C_p$ は角柱静止時のものに近づく。これは風速がさらに高くなったため, 渦の形成位置が角柱の背面付近にまで押し遣られ, 側面の $-C_p$ が小さくなるのであろう。また, 側面の変動圧をスペクトル解析すると, $\bar{P}=22$ のときはわずかではあるが f_s 成分があらわれ, $\bar{P}=40$ のときは f_s 成分が f_m 成分と同程度のパワーを示す。同期領域を外れた風速域では f_m 成分の渦と f_s 成分の渦とが互いに干渉し合うために, 角柱側面に働く負圧は2つの渦の足し合わさった強さとはならずそれよりかなり弱いものとなり, 角柱静止時に発生する f_s 成分の渦によるものとは同等の強さになるのであろう。

$\bar{P}$ が小さくなり $\bar{P}=0.015$ のときの **Fig. 5-b** を見ると, $\bar{P}$ の増加に伴う側面の圧力分布の変化の様子は, $\bar{P}=0.03$ のときのものとさほど変わらない。しかし, 側面の負圧がほぼ一定となる風速域は $\bar{P}=18$ 付近となり, $\bar{P}=0.03$ のときに比べ低くなる。これは振巾が小さくなると同期領域の範囲が狭くなり, 高風速域まで及ばないことを示す。この傾向は著者等が以前求めた非定常空気力の自乗平均値においても見られる⁹⁾。

$\bar{P}$ がさらに小さくなり $\bar{P}=0.0075$ になると (**Fig. 5-c**), $\bar{P}=4.5$ のときの圧力の回復点, つまり再付着点は $\bar{P}=0.03, 0.015$ のときに比べ風下側に後退している。これは振巾が小さくなると渦の形成が遅れ, 形成位置がより風下側に後退するためであろう。同様の傾向が2次元の場合にも見られる。 $\bar{P}=4.5$ のときの中層部の圧力の分布性状は上, 下層のものと若干異なり, 2次元の分布性状によく似ている。これはこのときの中層部の側面まわりの流れの状態が2次元のものに似ているためであろう。

Fig. 5 a, b, c の3つの図を参照して, $\bar{P}=16.5$ のときの2次元結果と $\bar{P}=18$ のときの3次元結果を調べてみる。2次元の場合は a/d の減少につれ $-C_p$ も小さくなる傾向にあるが, **Fig. 7** に示す静止時のものに比べると $-C_p$ は大きくなる。これは振巾が小さくなると f_m 成分の渦も小さくなるが, 依然同期領域内にあり f_s 成分の渦と一体となるため, 静止時のものよりは側面に働く負圧が大きくなるのであろう。3次元の場合は $\bar{P}$ が0.015から0.0075へと小さくなくても $-C_p$ の変化はほとんどなくなり, ほぼ静止時のものに近づく。これは $\bar{P}$ が0.015以下になると, 同期領域を外れるため渦度の大きな渦は形成されなくなるからであろう。

以上をまとめると, 角柱振動時に側面に作用する風圧力いわゆる非定常な風圧力は, 主に2つの成分の渦からなる。 f_m 成分と f_s 成分の渦である。 $\bar{P}$ が V_{res} より低いときは f_m 成分の渦が卓越して発生し, $\bar{P}$ が V_{res} より高くなると f_m 成分と f_s 成分の2つの渦があらわれる。 $\bar{P}$ が低いと f_m 成分の渦が風上側面付近に形成されるため, 風上側の負圧が大きくなる。逆に $\bar{P}$ が高くなると同期領域を外れるため, f_m 成分と f_s 成分の渦とが互いに干渉あって渦度を弱めあう。また, それらの渦の形成位置が角柱の後流付近に後退するため, 側面にわたり $-C_p$ はほぼ一定となりその値も小さくなる。 V_{res} 付近では f_m 成分の渦と f_s 成分の渦とが一体となるため, 渦度の大きな渦が形成される。渦の形成位置は高さによって異なり, 上, 下層部では角柱の側面付近, 中層部では背面付近に後退する。このため上, 下層部の側面に働く負圧は中層部のものより大きくなる。

3.2 高さ方向の風圧分布

Fig. 6 に角柱側面の中央の測定点 (3) の高さ方向 (Center Row) の平均圧分布を示す。 $\bar{P}$ の大きさによる圧力分布の違いを実線, 一点鎖線及び破線で示す。 $\bar{P}=0$ の点線は角柱静止時のものを示す。また, ∇ 印は2次元角柱静止時の側面中央点の平均圧を示す¹²⁾。

$\bar{P}=4.5$ のとき, $\bar{P}=0.03$ の $-C_p$ は $\bar{P}=0$ のものより小さくなっている。これは **Fig. 5** でも示したように, $\bar{P}$ が大きいと中央の測定点 (3) 付近では剝離流の再付着の影響で圧力が上昇するためであろう。 $\bar{P}$ が0.03から0.015, 0.0075へと小さくなるにつれて $-C_p$ が大きくなっている。これは渦の形成位置が $\bar{P}$ の減少につれ風上から風下へと後退し, $\bar{P}$ の最も小さい $\bar{P}=0.0075$ のとき, ほぼ (3) の位置にくるために $-C_p$ が最も大きくなるのであろう。

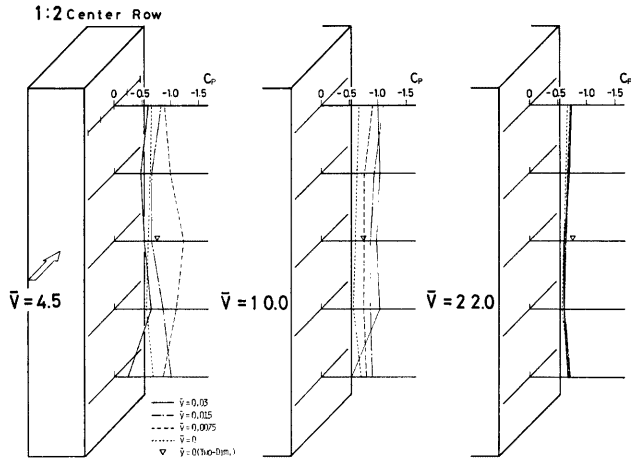


Fig. 6. Pressure distributions on center row (side surface along height).

$\bar{V}=10$ のとき、上層と下層部の場合を除き、 $\bar{V}$ の増加につれて $-C_p$ も大きくなる。 $\bar{V}=0.03$ のとき上層の $-C_p$ は $\bar{V}=0.015$ のものより小さくなり、下層では $\bar{V}=0$ のものより小さくなる。これは $\bar{V}$ が 4.5 から 10 へと高くなっても、上層と下層部では前節で述べた境界条件のため、再付着の現象が生じるのであろう。また、中層付近では $\bar{V}$ の増加につれて渦度の大きな渦が生じていると思われる。（その 2）で変動圧をスペクトル解析した結果、 $\bar{V}$ の大小にかかわらず $\bar{V}=10$ のときは同期領域内にあることから、この渦の成分は f_m 成分と f_s 成分とが一体となったものであろう。

$\bar{V}=22$ となり同期領域を外れると、 $\bar{V}$ の大小にかかわらず $-C_p$ はほぼ一定となり角柱静止時のものに近づく。圧力分布は高さ方向ではほぼ一様となるが、上層と下層部の $-C_p$ は中層付近のものに比べやや大きくなる。これは風速が高くなり再付着現象を生じない状態でも、前節で述べた境界条件の影響で上、下層の渦の形成が中層に比べて促進されて、やや渦度の大きな渦を生じるためであろう。

2 次元角柱側面の $-C_p$ は静止時、振動時（Fig. 5 参照）をとわず、3 次元のものに比べて大きくなっている。2 次元の場合は角柱側面まわりの流れの状態が軸方向（3 次元では高さ方向）ではほぼ一様となる。そのため前縁剝離により生じる渦の中心を結んだ線が軸方向とほぼ平行になり、渦どおしの結びつきが強くなる。3 次元の場合は上、中、下層で境界条件が異なるため、角柱側面まわりの流れの状態が高さ方向で一様とならない。このため渦の発生も高さ方向で一様とならずに、渦どおしの結びつきも弱くなる。したがって 2 次元の $-C_p$ は 3 次元のものより大きくなるのであろう。また、 $\bar{V}=10$ の振動時には 3 次元の $-C_p$ は 2 次元の静止時の $-C_p$ を上回る。これは 3 次元の振動時に発生する渦は f_s 成分のほかに f_m 成分も加わり一体となったものであるために、2 次元の静止時に発生する渦より強くなるのであろう。

3.3 側面中層部の風圧分布

Fig. 7 に角柱側面の側面中層部の測定点（Middle Line）の平均圧分布を示す。図中の●、▲印は角柱を静止させた状態で風向角 α を反時計回りに、それぞれ 10 度、8 度与えたときの圧力分布を示す。また、 $\bar{V}=4.5$ 、22 のときの -×- 印は 2 次元角柱を静止させた状態で風向角をそれぞれ 10 度、0 度としたときの側面の圧力分布を示す¹²⁾。

$\bar{V}=4.5$ のとき、3-1 節で述べたように $\bar{V}$ の減少につれて、再付着点が風下側に移行する様子が伺える。 $\bar{V}=$

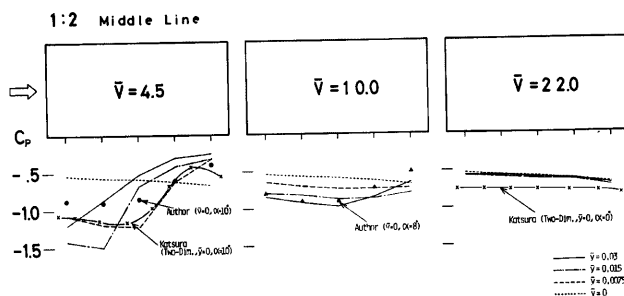


Fig. 7. Pressure distributions on middle line (side surface at middle height).

0.0075 のときの側面の圧力分布と $\bar{V}=0$ で $\alpha=10^\circ$ のときの圧力分布とは $-C_p$ の値そのものは若干異なるが、分布性状はよく似ており、いずれも再付着の現象を呈する。また、2次元との比較では $-C_p$ の値もほぼ一致しており、発生する渦（3次元のものは f_m 成分で2次元のものは f_s 成分）の種類は異なっても、その強さは同程度であろうと思われる。このことから角柱振動時の片側の側面まわりの時間平均的な流れの性状は、角柱静止時で風向角を与えたときの流れの性状によく似たものとなる。また、 $\bar{V}$ が 0.015, 0.03 とさらに大きくなったときの圧力分布は、風向角を10度以上与えたときの静止時の圧力分布にほぼ等しくなるであろうと予想される。

$\bar{V}=10$ になると、 $\bar{V}=0.03$ のときを除き後縁付近で圧力の上昇はほとんど見られない。 $\bar{V}=0.03$ のときは(4)、(5)の測定点付近で徐々に圧力が回復しているが、再付着現象特有の急激な圧力上昇は見られない。これは前縁からの剥離流が側面につねに再付着するのではなく、剥離流の一部が断続的に再付着するからであろう。このときの分布性状は $\bar{V}=0$, $\alpha=8^\circ$ のものとよく似ている。 $\bar{V}$ が高くなると、振巾が大きくなっても側面付近では渦は断続的にしか生じない。つまり側面付近のある定まった位置で渦の形成が周期的に行われないのである。このため静止時の分布形状との比較では、 $\bar{V}=4.5$ のときより風向角が小さくなるのである。

$\bar{V}=22$ になると、 $\bar{V}$ の大小にかかわらず側面の圧力分布は性状、値とも静止時のものに近づく。また、この風速は同期領域を外れており、渦の形成位置も角柱の背面付近に後退する。この影響で後縁付近(5)の $-C_p$ が若干上がりぎみとなるのであろう。このように角柱振動時の側面の平均圧分布は、 $\bar{V}$ が V_{res} 以下の低いときは $\bar{V}$ の増加につれて風向角を大きく与え、 $\bar{V}$ が V_{res} 付近の同期領域内のときは $\bar{V}$ が 0.03 と最も大きい場合のみ風向角を8度与え、 $\bar{V}$ が同期領域を外れて高くなるときは風向角を与えない場合の静止時の圧力分布にそれぞれ近づく。

4. ま と め

1:2の辺長比をもつ3次元角柱が風向直角方向にロッキング振動するときに、側面各部に加わる非定常な風圧力のうち時間平均的な風圧力を、無次元風速 $\bar{V}$ で4.5から40の範囲にわたって調べた。得られた結果は次のとおりである。

1) $\bar{V}=4.5$ の低風速域では振動振巾の大小にかかわらず、風上側の側面で大きな負圧を生じ、風下に向うにつれて圧力が回復する。これは角柱の振動にともなって発生する渦が、風上側の側面付近のある定まった位置に存在するためであろう。

2) $\bar{V}=4.5$ のとき、角柱振動時の側面の圧力分布は、角柱を静止させて風向角を与えたときの圧力分布にほぼ等しくなる。また、振動振巾の増加に伴ない風向角を大きくすれば、両者の圧力分布はほぼ等しくな

と思われる。

3) $\bar{P}$ が4.5から10, 14と増加するにつれて、圧力の回復点（再付着点）が風下側へ移行する。これは風速が高くなると、渦の形成位置が風下側へ押し遣られるためであろう。

4) 角柱側面上層と下層部の圧力の分布性状はよく似ており中層部のものと異なる。上層と下層部は渦の形成を促進するような境界条件をもつため、側面に働く負圧も中層部のものに比べて大きくなる。

5) $\bar{P}=10, 14$ の共振風速付近では、振動に伴って発生する渦 (f_m 成分の渦) と角柱静止時に発生する渦 (f_s 成分の渦) とが一体となり渦度の大きな渦を形成するため、側面の負の風圧係数 $-C_p$ も角柱静止時のものに比べて大きくなる。

6) 共振風速付近（同期領域内）では振動振幅の増加につれ、渦の形成が促進されるため側面の負圧も大きくなる。

7) $\bar{P}$ が共振風速を越えて高くなり $\bar{P}=22$ になると、振動振幅の大小にかかわらず側面の $-C_p$ は静止時のものに近づく。これは同期領域を外れた風速域では f_m 成分の渦と f_s 成分の渦とが互いに干渉し合って渦度を弱めあい、角柱静止時に発生する f_s 成分の渦と同等の強さになるためであろう。

8) 2次元角柱側面の負圧は静止時、振動時をとわず、3次元のものより大きくなる。これは2次元角柱の側面まわりの流れの状態が軸方向にはば一様となるため、剥離流により形成される渦の軸方向の結びつきが3次元の場合に比べより強くなるからであろう。

参 考 文 献

- 1) Davenport, A. G.: Gust Loading Factors, Proc. ASCE, Vol. 93, ST3, 1967, pp. 11-35.
- 2) Novak, M.: Aeroelastic Galloping of Prismatic Bodies, Proc. ASCE, Vol. 96, EM1, 1969, pp. 115-142.
- 3) 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.
- 4) 小松定夫・小林紘士：調和振動中の長方形断面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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 小西一郎・白石成人・松本 勝・小前 繁：変動風による橋梁断面の動的応答特性について，構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム，1972, pp. 167-174.
- 8) Bishop, R. E. D. and A. Y. Hassan: The Lift and Drag Forces on a Circular Cylinder Oscillating in a Flowing Fluid, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 277, 1974, pp. 51-75.
- 9) 石崎澄雄・谷池義人・中山久司：角柱の振動時における3次元の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.
- 10) 石崎澄雄・谷池義人・中山久司：角柱に加わる3次元の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.
- 11) 溝田武人・岡島 厚：一様流中で振動する角柱まわりの流れ，第6回風工学シンポジウム，1980, pp. 123-130.
- 12) 桂 順治：直方形建築物に加わる風圧力に関する基礎的研究，京都大学博士学位論文，1976.