

正四角柱の表面に作用する風圧変動について

石 崎 潑 雄・河 井 宏 允

WIND PRESSURE FLUCTUATIONS ON A CYLINDER OF SQUARE CROSS-SECTION IN A SMOOTH STREAM

By *Hatsuo* ISHIZAKI and *Hiromasa* KAWAI

Synopsis

The characteristics of fluctuating wind pressure on a cylinder of square cross-section in a smooth stream were investigated by means of wind tunnel experiments. It was found that the vortex shedding from the cylinder had a marked influence on both mean and r.m.s. coefficients of pressure on the lateral and leeward sides of the cylinder. The flow condition around the cylinder changed with angle of attack. As the separated flow reattaches to the corner of the cylinder at the angle of attack 12° , the vortex shedding is prevented and the pressure on lateral and leeward sides are considerably weakened.

1. ま え が き

近年、建築物はますます高層化しその構造設計にしろる風力の作用の重要さは飛躍的に増大している。しかも建築物の高層化に伴う振動特性の変化（即ち固有周期の増大と減衰性の低下の傾向）により、風力の静的な作用のみならず風力の動的な作用による建築物の挙動がきわめて重要な問題となってきた。

高層建築物の大部分は長方形断面を持つ四角柱型をしている。従来から、正四角柱をはじめとして四角柱の後流には円柱の場合と同じく周期的な交代渦が形成され、それにより四角柱には周期的な揚力が作用することが風洞実験等によって確かめられ、同時にそのような周期的な揚力による構造物の共振問題も研究されてきた。^{1), 2), 3), 4)} 特に B. J. Vickery は正四角柱に関して2次元状態のもとで層流、乱流のそれぞれの場合について風洞で詳しい測定を行い次のように報告している。層流、乱流の場合とも角柱には交代渦による強い周期的揚力変動が生じその大きさは迎角 0° の場合が最も大きく、変動揚力係数（ $\sqrt{\text{変動揚力の二乗平均値}} / \text{基準速度圧} \times \text{見付面積}$ ）は層流の場合1.3、乱流の場合0.7位となる。また周期的変動の無次元周波数（Strouhal 数）は約0.12である。¹⁾

実際の建築物の場合、強風の迎角は必ずしも壁面に直角であるとは限らず、設計にあたってはさまざまな迎角の場合について検討する必要がある。また強風時の風向は平均風向を中心にかなり大きく変動しているため、実際の建物に作用する風力の性質は風向変動の小さい風洞実験結果とかなり異ると予想される。そのような二つの理由から今回の実験は、過去の研究ではあまり行われなかった迎角の小さな変化に関して角柱全体にわたる風圧変動がどのように変るかを調べることを主たる目的とした。実験結果からこれまでの研究以上に、再附着点、base pressure、側面の風圧力等の相互の密接な関連が明らかになるとともに、その関連を角柱の後流中に形成される交代渦の位置と強弱によって統一的にとらえることができた。

2. 実験の概要

実験は京都大学防災研究所のゲッチンゲン型風洞で行った。風洞の吹出口は径が100cmの正八角形断面をしている。モデルは一辺が10cm、高さが50cmの正四角柱で厚さ3mmのアクリル板により作られている。ま

た模型の両端は流れを 2 次元状態にするため Fig. 2 に示したように 300cm にわたって端板ではさんだ。

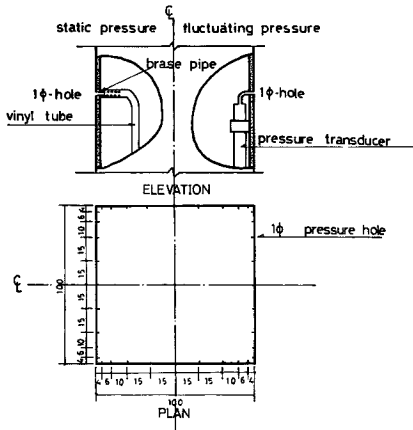


Fig. 1 The cylinder of square cross-section.

模型は風洞の吹出口から 70cm の後方の風洞の中央に設置し、風圧は模型の中央部周囲 36 点に関して測定した。風圧測定的位置及び実験時の状態を Fig. 1 及び Fig.-2 で示した。また風向の変化は模型自体を回転するという方法をとった。角柱周囲の風圧力は、平均風圧力と変動風圧力を別々に測定した。平均風圧力は、角柱周囲にあけた径 1mm の穴からビニールチューブでペローズ型差動変圧器式風圧計に導き測定した。変動風圧力はダイヤモンド型半導体式風圧計を角柱内部に組み込んで測定した。実験時の状態での後者の周波数特性は 0.2~500c/s にわたって一様でこの実験にとっては十分満足のゆくものである。また基準風速及び基準速度圧は風洞吹出口に取り付けたピトー管で測定し、角柱周囲の風速は定温度型熱線風速計により測定した。実験時の平均風速は 15m/s、乱れの強さは 0.4% であった。なお測定結果の blockage の影響による補正は行わなかった。

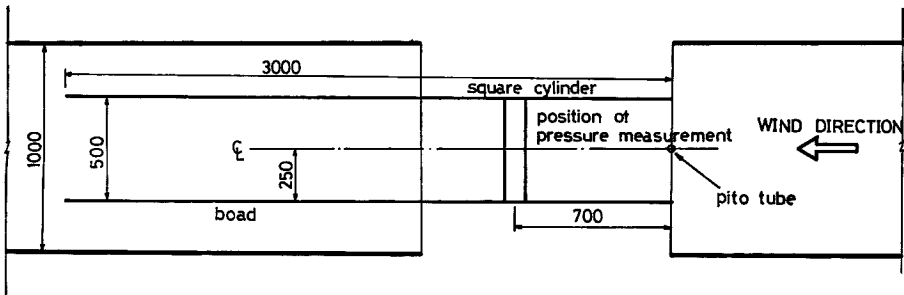


Fig. 2 Pressure taps arrangements and apparatus for pressure measurement.

3. 実験結果

3.1 風向による角柱周囲の風圧力の変化

円柱と違い角柱等の軸対称形でない形状のものは、迎角の変化とともにその周囲に作用する風圧力も変化することが予想される。Fig. 3 は 0° から 5° 間隔で 45° までのそれぞれの迎角について正四角柱の周囲の平均風圧係数、変動風圧係数の分布を示したものである。この図で実線は平均風圧係数 $C_{p.m.}$ を表わし、破線は変動風圧係数 $C_{p.r.m.s.}$ を表わす。ここで $C_{p.m.}$ 及び $C_{p.r.m.s.}$ を次のように定義する。

$$p(t) = \overline{p(t)} + p'(t), \quad \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt, \quad \overline{p'(t)^2} = \frac{1}{T} \int_0^T p'(t)^2 dt$$

$$C_{p.m.} = \frac{\overline{p(t)}}{\frac{1}{2} \rho V^2}, \quad C_{p.r.m.s.} = \frac{\sqrt{\overline{p'(t)^2}}}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

- t ; 時間
- ρ ; 空気密度
- $p(t)$; 角柱表面に作用する風圧力
- T ; 平均時間
- V ; 基準風速

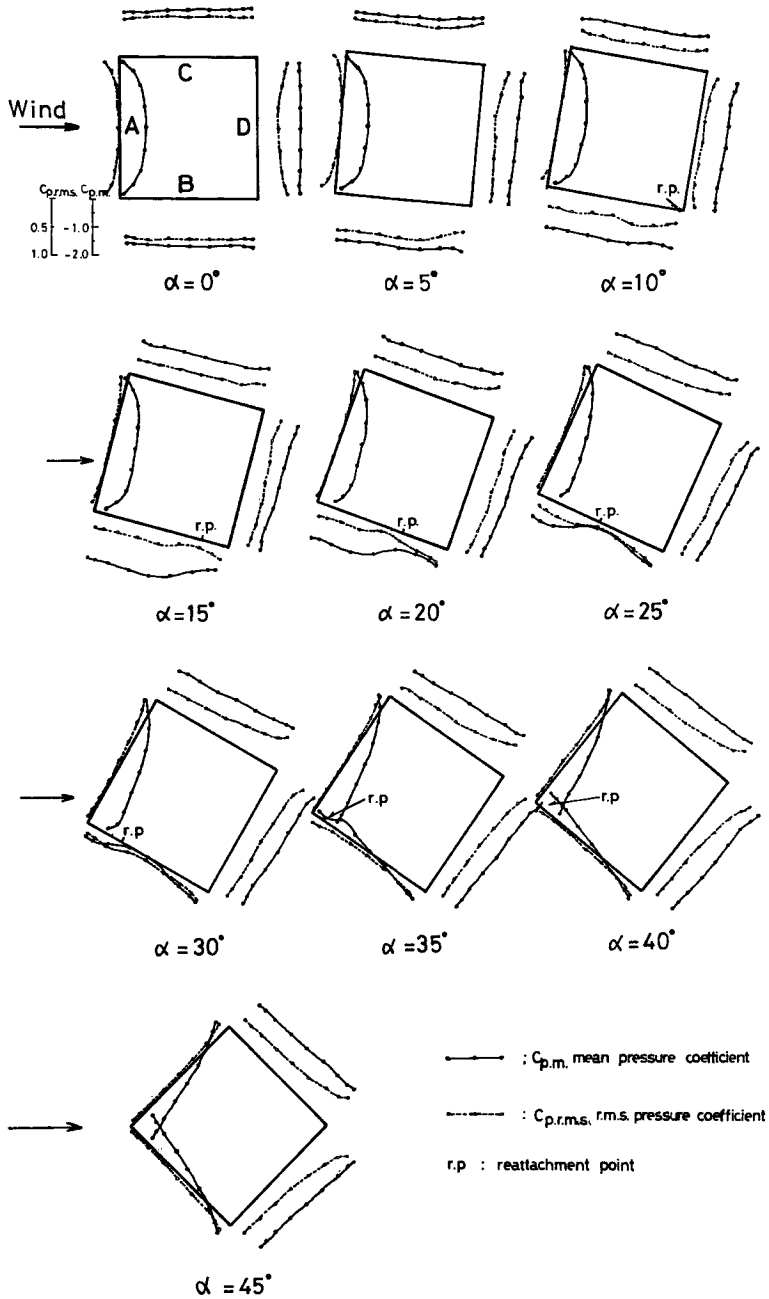


Fig. 3 Distributions of the mean and the r.m.s. coefficients of pressure on the walls.

迎角が 0° からしだいに増加するに従って角柱の各面の平均風圧係数, 変動風圧係数の分布は変化するが, 特に風上へ向かう側面 (Fig. 3 の B 面) の風圧係数の分布の変化が最も著しい。この面では, 迎角 0° のときにはほぼ面全体にわたって平均風圧係数, 変動風圧係数とも一様な分布形を示すが, 迎角 10° 付近から風下側の部分の風圧係数が減少しはじめる。更に迎角 20° 付近から平均風圧係数, 変動風圧係数とも凹形分布を示し, その最小値の位置は迎角の増大とともに風上側へ移動する。一方背面 D 及び側面 C の風圧係数の分布形は風向によってあまり大きく影響されず面全体にわたってほぼ一様となる。ただ変動風圧係数は迎角の増大とともに風下側の端で大きくなる傾向が顕著となる。また各面ともに平均風圧係数, 変動風圧係数の分布形はほぼ同じとなった。

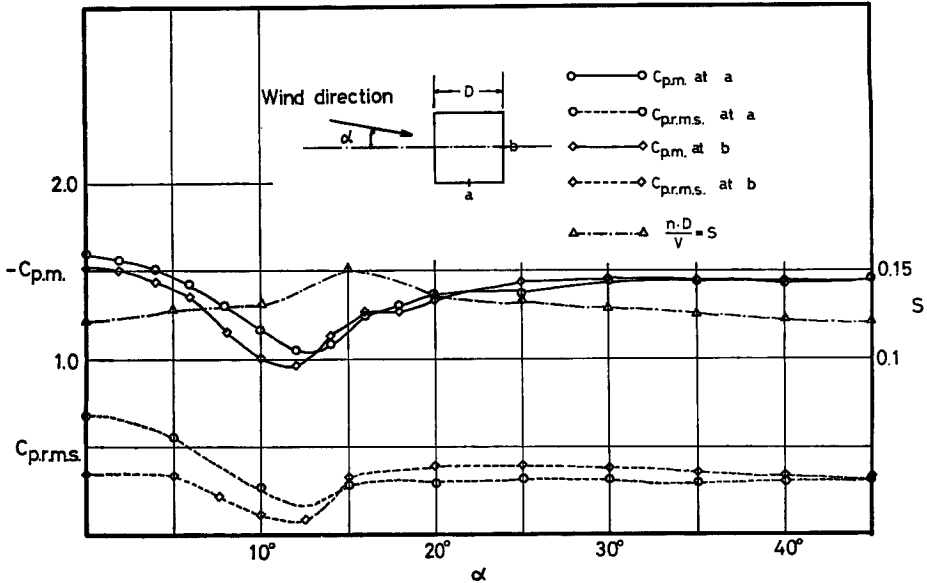


Fig. 4 Variation of the mean and the r.m.s. coefficients of pressure on the lateral and leeward sides with angle of attack.

角柱の側面に作用する風圧変動は, 正弦波に近い周期的な変動を示した。Fig. 4 は側面の風圧変動の無次元周波数 $S (=n \cdot D / V, n$: 側面の風圧変動の周波数, D : 角柱の一辺の長さ, V : 基準風速) と背面 D と側面 C の中央点の平均風圧係数, 変動風圧係数の風向による変化を示したものであるが, 各風圧係数の風向による変化の傾向は大体一致している。即ち, 各風圧係数とも迎角が 0° からしだいに増大するに従って減少し, 迎角 12° 付近で最小となりその後増大し迎角 20° 以上ではほぼ一定となる。この傾向は, 円柱の抗力係数が Reynolds 数の変化によって大きく変化することと類似している。また無次元周波数 S は, 迎角の増加とともに増大し, 迎角 15° 付近で最大となりその後減少する。

B. J. Vickery, P. W. Bearman 等は既に背面の平均風圧係数 (base pressure coefficient) と揚力変動との間に密接な関係が存在することを報告しているが, 今回の実験により, よりはっきりとその事実が裏付けされるとともに, 新たに背面及び側面では平均風圧力と風圧変動の間にも密接な関係があることがわかった。

3.2 背面の風圧変動のスペクトラム

迎角 0° から 20° のときに各面に作用する風圧変動の様子は, 側面の場合にはほぼ全体にわたって同一周期をもつ規則的な変動であった。また風上上面 A に作用する風圧力の場合も振巾は小さいけれども側面の風圧力と同一周期の規則的な変動であった。一方背面 D に作用する風圧力の様子は場所によってかなり異なり

複雑であった。そのためよりはっきりと背面に作用する風圧力の性質を解明するため、1/3オクターブ周波数解析機でパワースペクトル解析を行った。Fig. 5 は迎角 0° のときの背面の各点に作用する風圧変動のパワースペクトル密度である。隅に近い No. 3 点の風圧変動の場合、変動のエネルギーは側面の風圧変動と同じ周波数の $S=0.12$ 付近の周波数領域に集中する。一方中央の No. 1 点の風圧変動の場合、変動のエネルギーは No. 3 点の風圧変動の2倍の周波数である $S=0.24$ 付近の周波数領域に集中する。また No. 1 点と No. 3 点の中間の No. 2 点の風圧変動の場合、変動のエネルギーは $S=0.12$ 付近と $S=0.24$ 付近の2つの周波数領域に集中する。

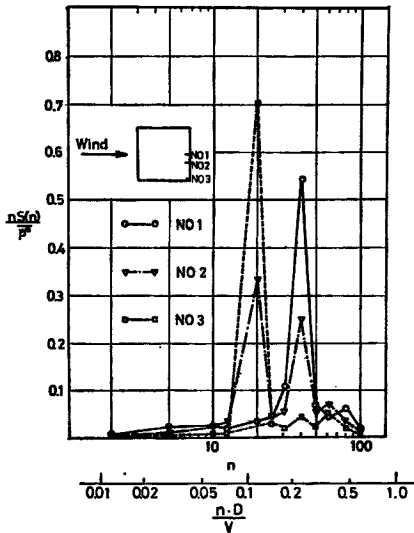


Fig. 5 Power spectra of fluctuating pressure of leeward surface.

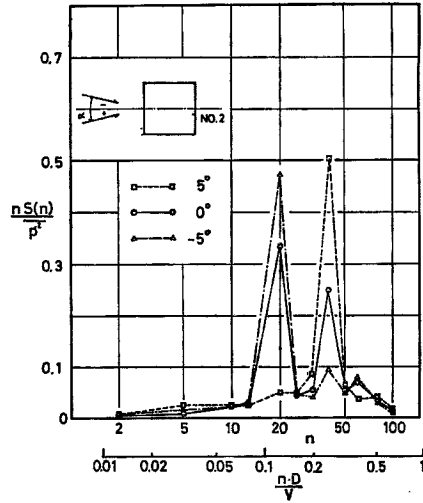


Fig. 6 Variation of power spectra with angle of attack.

また同じ点に作用する風圧変動の場合でも風向が変化するに従いその変動のエネルギーの集中する周波数は違ってくる。Fig. 6 は No. 2 点の風圧変動のパワースペクトル密度を迎角 -5° 、 0° 、 5° の各風向に関して示したものである。変動のエネルギーは、迎角 -5° の場合は $S=0.24$ 付近、迎角 0° の場合に $S=0.12$ 付近と $S=0.24$ 付近、迎角 5° の場合には $S=0.12$ 付近の周波数領域に集中する。この変化の様子はさきに Fig. 5 で示した迎角 0° における場所による風圧変動のパワースペクトル密度の変化の傾向とほぼ一致している。

3.3 その他の風圧力の性質

この項では、建築物の外壁（例えばガラス）の設計にとって重要な建築物に作用する局部風圧の特徴について述べる。既に Fig. 3 で示したように、今回の実験では側面の風上側の隅に大きな局部負圧を生じる現象は見当たらず平均風圧係数の最大値は -1.7 程度であった。しかしながら迎角 20° から 45° までの広い風向の範囲にわたって、側面 C と背面 D (Fig. 3) にパルス状のきわめて振巾の大きな風圧変動が観測された。Fig. 7 は迎角 30° の場合の側面 C の風圧変動の記録の一部を示したものであるが、その風圧変動は風下側へ向かうに従い正弦波に近い波形からパルス状の鋸波に変化する。そして風下側に最も近い点では、ときおり速度圧の5倍を越える強烈な負圧が観察された。このような鋸状の波形は、既に自然風中の実験において立川正夫によって報告されているが、今回のようにパルス状のきわめて大きな負圧が観測された例はほとんどなく、ガラス等の局部負圧による破壊に関して今回の実験結果は新たな重要な問題を提起している。⁵⁾

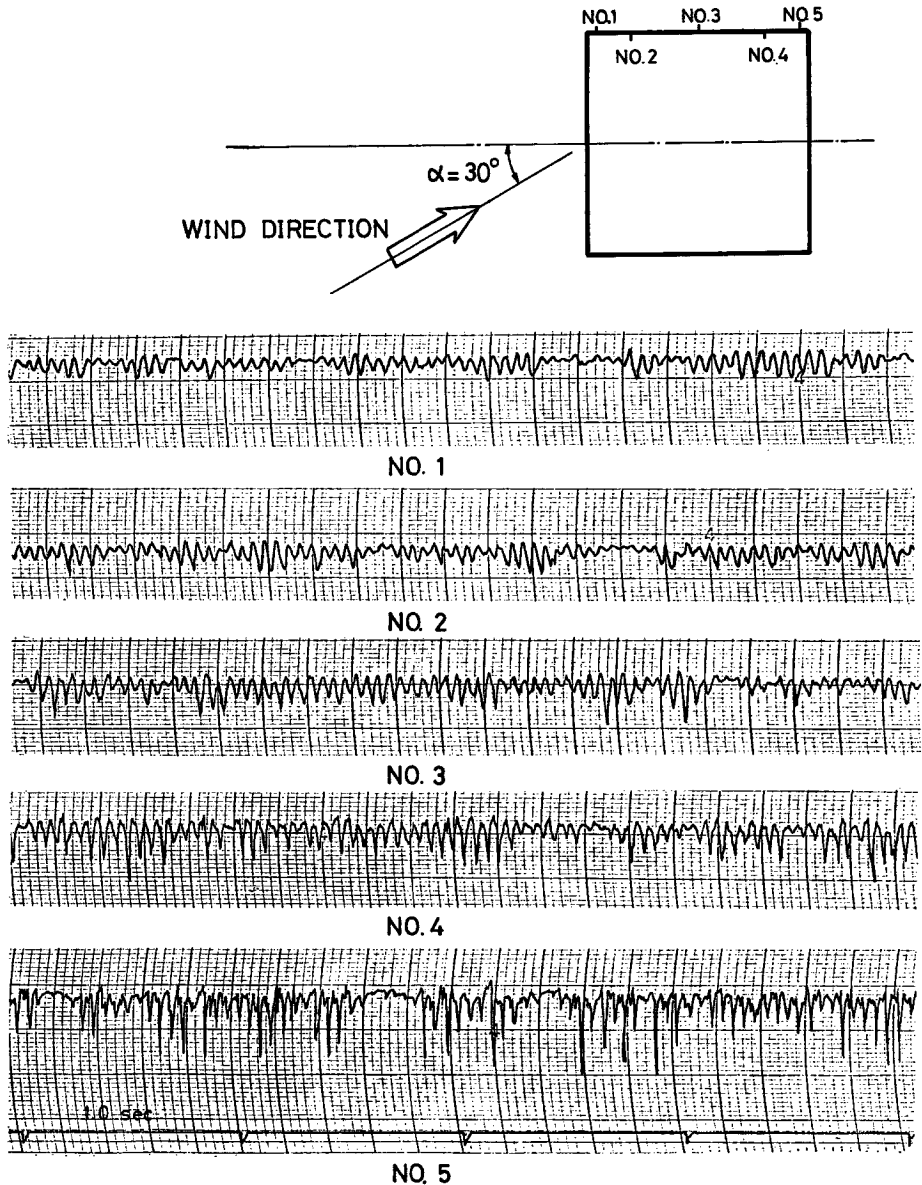


Fig. 7 Variation of pressure fluctuations on the lateral surface ($\alpha = 30^\circ$).

4. 実験結果の考察

4.1 風向による角柱周囲の風圧力の変化の原因

3.1項では風向によって角柱周囲の風圧係数の変化の様子を説明し、側面 B (Fig. 3) における風圧係数の分布が他の 3 面と比較して特に著じるしく変化することを明らかにした。角柱表面に作用する風圧力はその周囲の流体場によって左右されることから、側面 B の表面に作用する風圧力が風向によって著じるしく変化したという事実は、当然側面 B の近傍の流体場が風向の変化により大きく変化していることを表わし

ている。側面 B の近傍の流体場の変化の原因の一つとして、側面 B の風上側の端で剥離した流れの側面 B への再付着現象がある。Fig. 9 は迎角が 20° のときの側面 B の各点における風圧変動記録の一部である。この記録では、真中付近の No. 6 点に作用する風圧変動のみ高周波成分の多い不規則な変動を示しているが

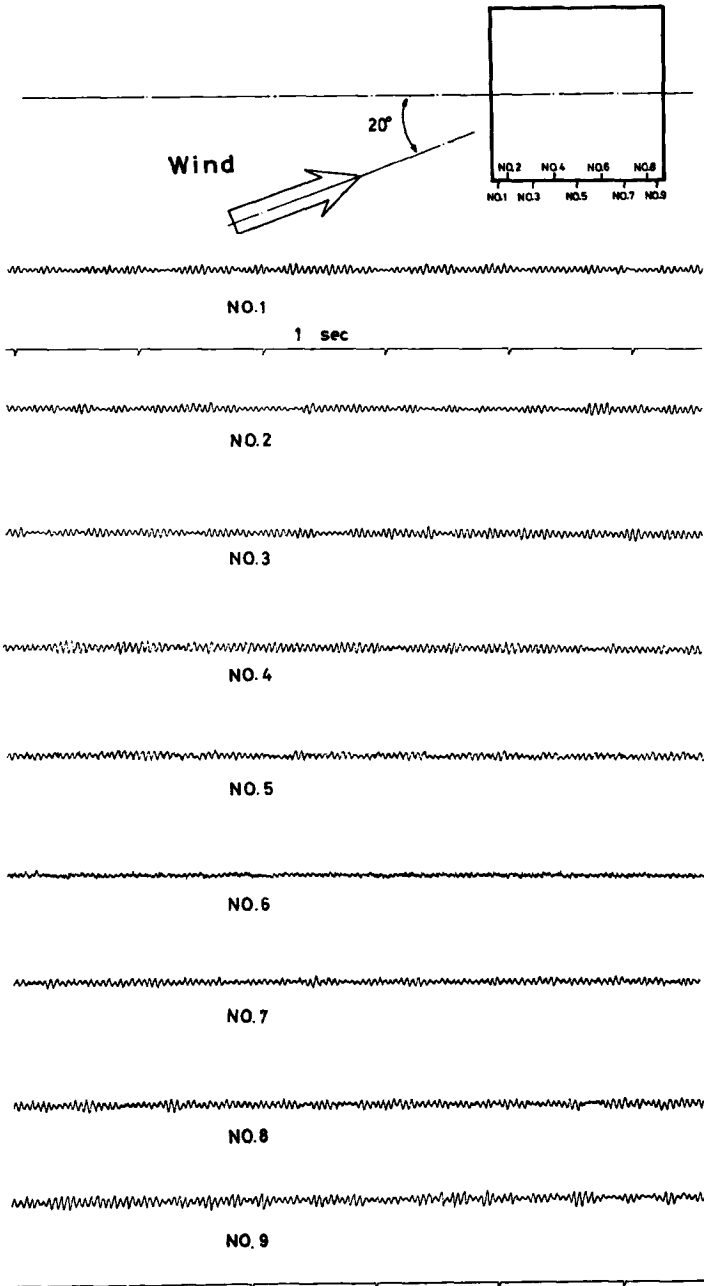


Fig. 8 Variation of pressure fluctuations on the lateral surface ($\alpha=20^\circ$).

その他の点では正弦波に近い規則的な変動を示している。これは No. 6 点付近で流れが変化しているためと考えられ、この場合 No. 6 点付近が風上側の端で剥離した流れの再付着点に相当するのではないかと推察される。一応上記のような推察のもとに再付着点を風圧変動記録から読みとり、それを風圧係数の分布図である Fig. 3 に示した。図中 r. p. が再付着点を表わす。3.1 項で述べた側面 B における風圧係数の分布の変化は再付着点が生じるとともに始まり、迎角 25° 付近では再付着点付近で風圧係数が最小となっていることがわかる。このように側面 B の風圧係数の分布と再付着点の位置との間には密接な関係が存在している。

また 3.1 項では側面 C と背面 D の中央点に作用する風圧力の風圧係数は迎角の増大とともに減少し迎角 12° 付近で最小となること、またこのような風向による背面 D と側面 C の風圧係数の変化の様子と円柱の抗力係数の Reynolds 数による変化の様子とが類似していることを指摘した。谷一郎は、円柱の抗力係数は境界層が表面から剥離してできる渦に関係し、その大小はほとんどその剥離の位置で決定されると報告している。⁶⁾ また A. Roshko は円柱の後流中に薄板をおくことにより base pressure が著じるしく低下する事実を円柱の後流中における交代渦の形成が薄板によってさまたげられ不規則となることと関連づけた。⁷⁾ 今回の実験の場合、側面 C と背面 D の風圧係数が風向によって同じ変化を示したことは、平均風圧と風圧変動が同じ要因によって支配されることを示している。また風圧係数が最小となった迎角 12° 付近は丁度側面 B の風上側の端で剥離した流れが風下側の端に再付着しはじめる迎角に相当し、この迎角付近では後流中の渦形成がかなり妨げられ弱く不安定になるものと推察され先の要因が後流中に形成される交代渦の強さ及び安定度ではないかと思われる。これはまた迎角 12° 以上になると再び背面 D と側面 C の風圧係数が増大する事実を次のように説明する。即ち、迎角が 12° からさらに増大するにつれて側面 B における再付着点がより風上側に移動する。そのことにより、側面 B の風下側の端で流れが再び剥離して角柱の後流には再び強い安定した渦が形成される。

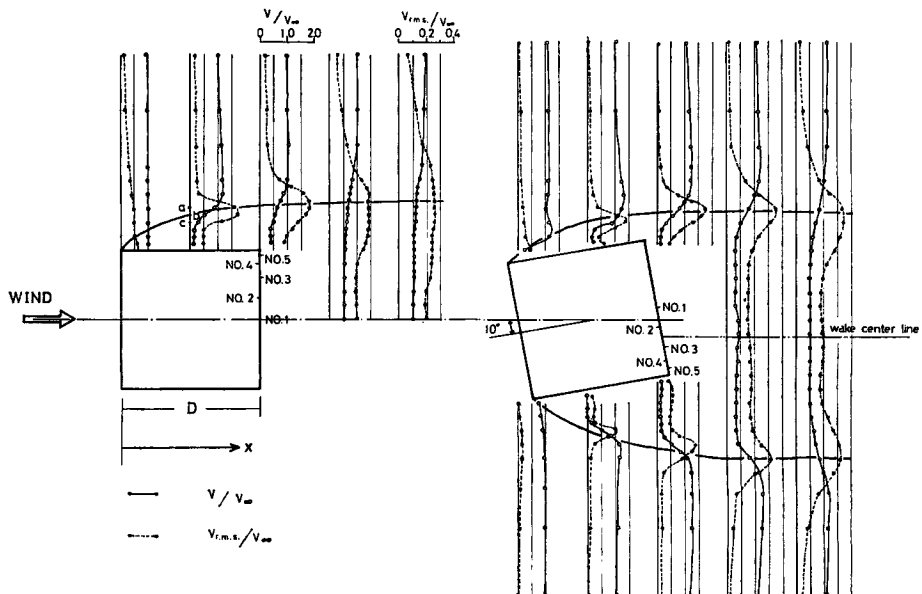


Fig. 9 Distributions of wind velocity around the cylinder ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$).

4.2 角柱周囲の風速分布と風圧力

この項では base pressure 急変の原因を探るために求めた迎角 0° と迎角 10° の場合の角柱周囲の平均風速

と風速変動の分布 (Fig. 9) を説明する。迎角 0° の場合風速変動の分布は風上側では極値をもつ山形分布を示すが風下側へゆくにしたがって山形はなめらかとなり、 $x/D=2.0$ (x : 角柱の風上側の端からの距離, D : 角柱の一辺の長さ) となるとほとんど一様分布を示す。一方迎角 10° の場合は風速変動の山形分布がかなり風下側まで続き $x/D=2.0$ でも山形分布を示す。また $x/D=0.5$ における風速変動は迎角 0° の場合の方が迎角 10° の場合よりかなり大きい。この位置での風速変動は角柱から渦が離れてゆくことにより、角柱の両端から発生する不連続面が不安定となることに起因していると考えられる。従って $x/D=0.5$ における風速変動の大小はそのまま後流中に形成される渦の強弱を表わしているとみてよい。4.1 項で後流中に形成される渦と base pressure との関連を述べたが、この風速分布の結果もそれを裏付けている。また $x/D=0.5$ の a, b, c (Fig. 9) における風速変動は Fig. 10 で示したように不連続面の外側では風速の弱い方へ鋭く上がった波形となり、不連続面の内側では風速の強い方へ鋭く上がった波形となり、不連続面が一定の周期で揺れているのがわかる。

また Fig. 9 の太実線は x/D の各位置における風速変動が最大となる点を結んだ線である。この線を一応不連続面とみなすと、迎角 10° の場合、両不連続面の中心線は背面の No. 2 点と No. 3 点の間を通る。3.2 項において背面の各点における風速変動のスペクトルの相違と No. 2 点に作用する風圧変動の迎角によるスペクトルの相違を説明したが、不連続面の中心線を基準にして Fig. 5 及び Fig. 6 を比較すると、中心線からの距離によって風圧変動のスペクトルの形が決定されているのがわかる。即ち、中心線が通る点の風圧変動のエネルギーは、 $S=0.24$ 付近の周波数領域に集中し、中心線から離れるに従い $S=0.24$ 付近の周波数領域に集中し、中心線から離れるに従い $S=0.24$ 付近の周波数領域に集中する変動のエネルギーは減り、 $S=0.12$ 付近の周波数領域に集中する変動のエネルギーは増大する。この事実は、背面の風圧力が角柱の後流に形成される交代渦の強さとその位置により決定されるという見方を裏付けるものである。

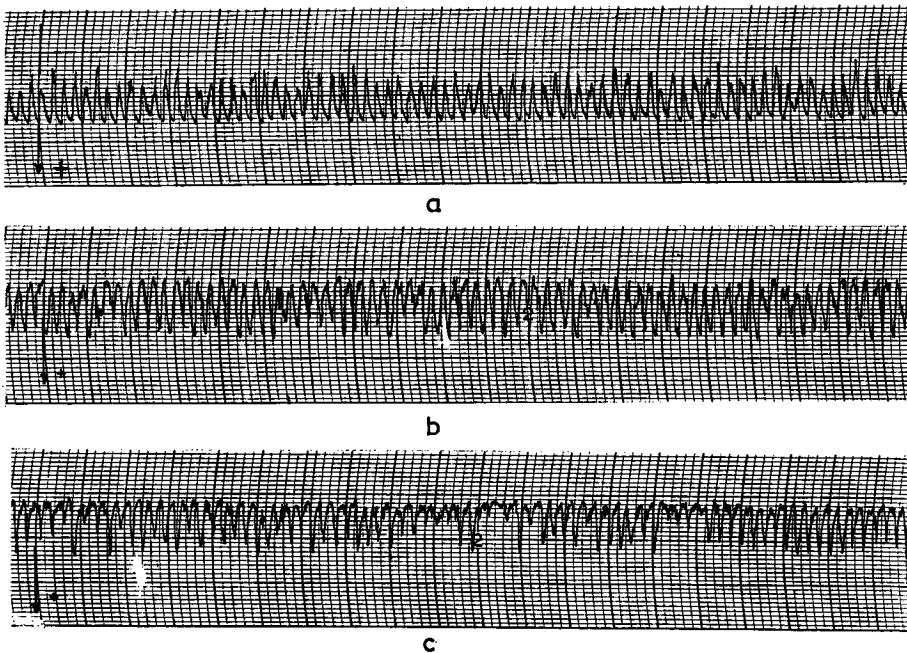


Fig. 10 Variation of velocity fluctuations.

5. 結 論

3,4章で述べた実験結果ならびに考察から得られた結論をまとめると次のようになる。

1. 角柱周囲に作用する風圧力の迎角による変化は、側面 B(Fig. 3) で最も著しい。これは側面の風上側で剥離した流れがこの側面に再付着することが原因で、迎角 20° 以上では再付着点付近で平均風圧係数も変動風圧係数も最小となる。
2. 背面 D 及び側面 C(Fig. 3) の中央点の風圧係数の風向による変化は、平均風圧係数、変動風圧係数とも同じ傾向を示し迎角 12° 付近で最小となった。
3. 迎角 20° から 45° 迄の各風向で、側面 C と背面 D の風下側の端に作用する風圧変動は、ときとして速度圧の 5 倍にも達する大きなパルス状の風圧変動を示した。
4. 背面 D の各点に作用する風圧変動のスペクトルはその位置と迎角の相違により異った形状を示した。

参 考 文 献

- 1) Vickery, B. J.: Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 25, 1966, pp. 481-494.
- 2) Vickery, B. J.: Load fluctuations in turbulent flow, *Journal of Mechanical division A.S.C.E.*, Vol. 94, 1968, pp. 31-46.
- 3) Wootton, L. R., and C. Scruton: Aerodynamic stability, The modern design of wind sensitive structures, *Summary of Proceedings of CIRIA Seminar*, 1970, pp. 65-81.
- 4) Parkinson, G. V.: Wind-induced instability of structures, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 1971, pp. 395-413.
- 5) 立川正夫: 自然風中において構造物に作用する風圧力に関する実験的研究その 3, *日本建築学会論文報告集*, 第 155 号, 昭和 44. 1, pp. 33-38.
- 6) 谷 一郎: 流れ学, 岩波全書, 1967, pp. 85-90.
- 7) Roshko, A.: On the wake and drag of bluff bodies, *Journal of the Aeronautical Science*, 1955, pp. 124-132.