

運動する角柱に作用する風力の動的効果

石 崎 潑 雄・許 昌 九

THE WIND PRESSURE DISTRIBUTION AND LIFT FORCE ON THE MOVING SQUARE CYLINDER

By *Hatsuo* ISHIZAKI and *Changgoo* HUH

Synopsis

By the wind tunnel tests, it was found that the wind pressure distributions and lift force on the moving square cylinder were much different from them on the stationary cylinder. The lift force would be influenced by the moving of the cylinder perpendicular to wind, and the lift force coefficient was proportional to the square of its amplitude.

1. ま え が き

軽量構造物や、高い構造物、および長大径間構造物には、比較的、剛性の低い骨組および部材をもつものがある。従って、これらの構造物は風力の作用によっても、ときには変形や振動の生じることがある。最近わが国においても、建築され始めた超高層建物は、従来の中高層建物等に較べて、その剛性が低い構造になっていることから、場合によっては空力的に不安定振動が起こるのではないかと懸念があり、また、大径間吊屋根構造でも、同様の危惧がもたれる。実際にこれらの構造物に不安定振動が生じるか生じないかは別として、風力あるいは、それ以外の何らかの作用による外力が作用して、構造物に変形、または振動の生じることがありうる。まえに筆者らの行なった実験において、一様流れ中にある角柱は運動しているときと、静止のときとで、一般流の速度が一定でも、その空気力にいちじるしい差異のあることがわかった。迎角 0° の場合、揚力方向成分の風圧係数は、共振運動時に静止時の3倍以上となる値を示したことから、角柱の運動変位量と風圧力の間には密接な相関々係のあることが推測されたので、角柱の運動挙動とその表面の風圧変化から、また、それらの流線観測結果から、角柱に作用する風力の挙動を探ろうとしたものである。

この問題については、既に C. Scruton,¹⁾ や G. V. Parkinson,²⁾ 大策³⁾ 等の研究があり、Scruton は角柱が風によって振動しているときの風速と振巾の関係を調べ、その系の減衰率、質量、固有振動数等を関連させて、実験的に空力的な不安定振動の領域を求めている。しかし角柱の表面に作用する風圧力、すなわち外力については触れてない。また Parkinson は運動する角柱の変位速度と一般流の速度をベクトルの加えて、相対的な見かけの風向を求め、運動する角柱の風圧分布を静止角柱の風圧分布値に置き換える準静的な仮定によって不安定性を理論的に説明しようと試みている。しかし、これも交番的に発生する渦による外力については触れていないため、構造物にとって非常に危険である共振時の風圧力については適用外として取り扱っているの、筆者らは風洞実験によって空力的に運動する角柱の運動挙動とその表面の風圧変動の挙動を調べ、あわせて煙風洞実験による流線観測結果等から、角柱の不安定問題に考察を加えた。

2. 実 験 方 法

実験は普通風洞による運動挙動、圧力変動実験と、煙風洞による流線観察実験を行なったので、そのそれぞれについて述べる。

1) 普通風洞実験

5cm×5cm 断面, 10cm×10cm 断面, 15cm×15cm 断面, 60cm 長さの亚克力板で作った三つの角柱を, 吹出口径 1m のゲッチンゲン型風洞中に振動しうるように設置し, 風を受けたときの角柱の運動変位と角柱まわりの圧力変動を測定した。このときの角柱の運動としては, 上下運動とねじり運動の両方が起こる場合と, 上下運動のみが生じる場合の2種類の支持方法を取りそれぞれの場合の測定を行なった。前者の上下とねじり運動を与える方法は角柱の中心に真鍮棒を通して, 両端を剛な柱に固定せしめる固定梁形式であり, もう一方の上下運動のみを与える方法は角柱の両端を片持梁の先端に固定し, ねじり運動を拘束させたものである。従って, 一方は迎角の変化を与えられ, 他方は迎角 $\theta=0^\circ$ の場合にみに限定される。後者の上下運動のみを許す系は比較的, 長い周期の固有振動周期を得ることと, それによる剛性低下からくるねじり運動をさけることを目的としたものである。Photo. (1) に風洞中に取付けられた角柱の状態を示す。角柱表面に作用した風圧変動はビニール管を通じて静電容量変化型変位計を用いたピトー型風圧計に導びき, オシログラフに記録した。このとき, 同時に変位計により運動変位も記録させた。この変位計も静電容量変化型のものを用いた。なお, 風圧計の応答特性は計器のペローズの固有振動数が 100cps 以上であるから, ビニール導管の長さ, 径の太さ等を考慮しても 30cps 前後の風圧変動には充分追随しうるものと考えられる。

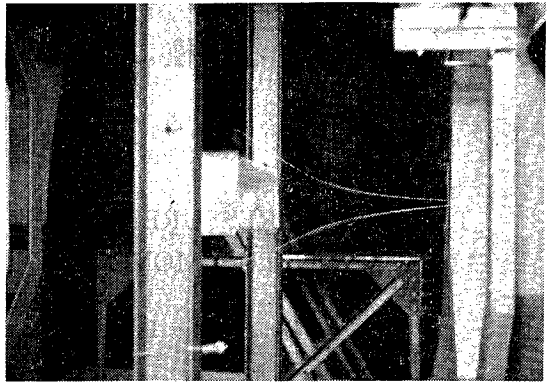


Photo. 1 View of the square cylinder fit up in wind tunnel.

迎角の変化による影響を調べる実験では, 迎角 θ を 0° から 45° まで 5° 刻みに変化させ, そのそれぞれ

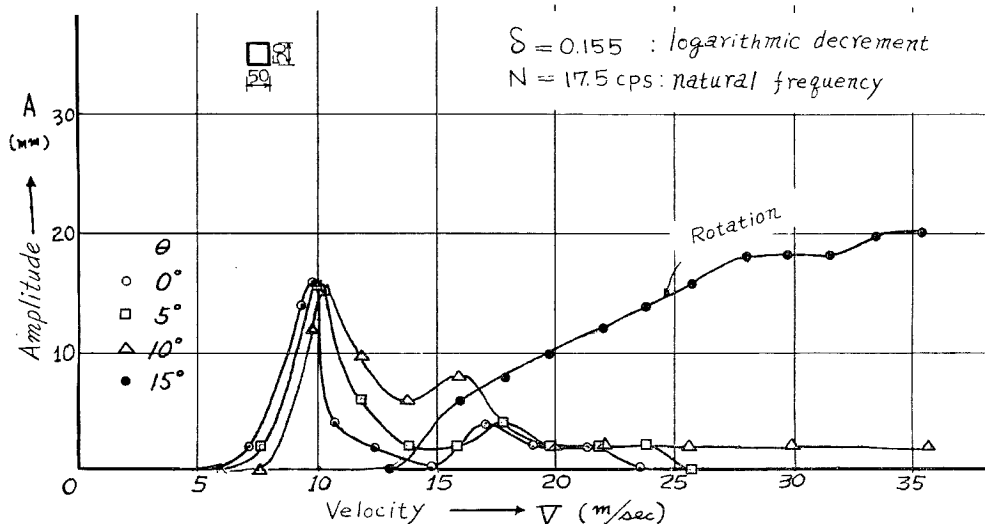


Fig. 1 The relations between the wind velocity and the amplitude moving square cylinders.

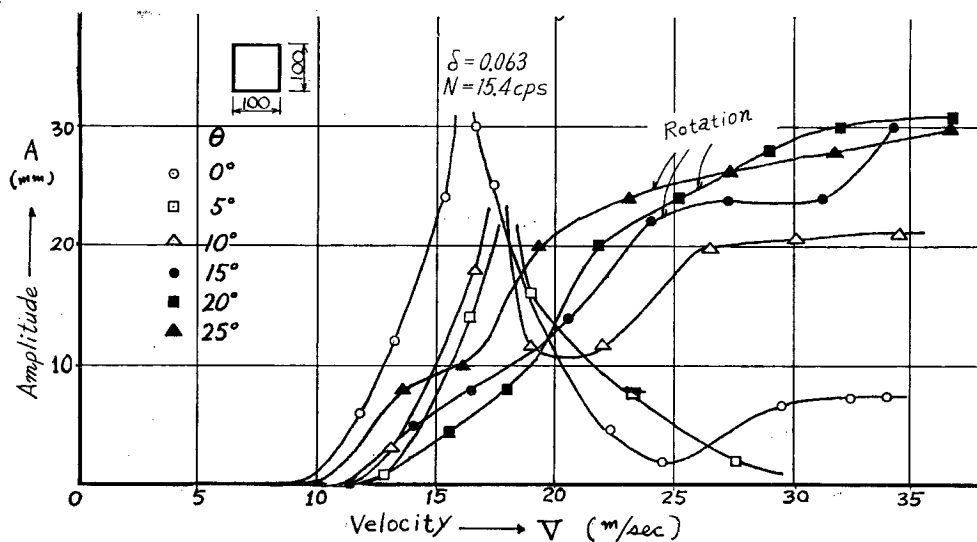


Fig. 2 The relations between the wind velocity and the amplitude of moving square cylinder.

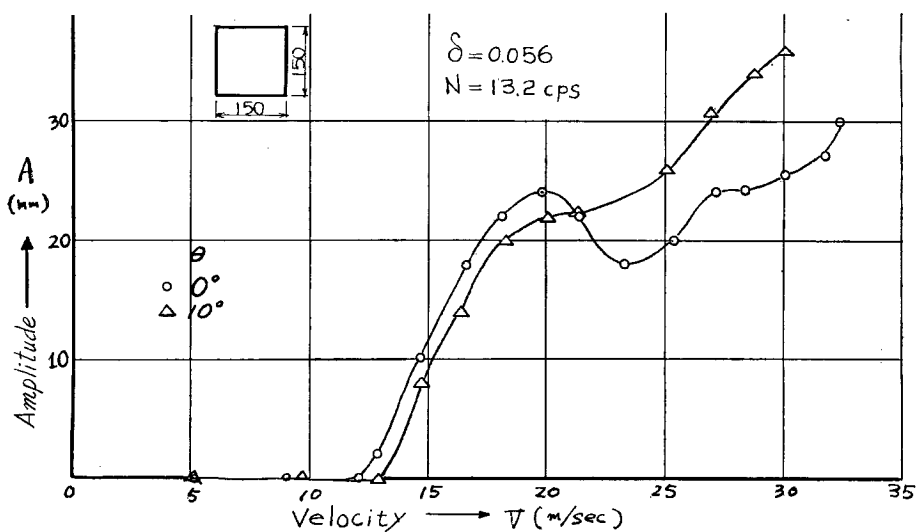


Fig. 3 The relations between the wind velocity and the amplitude of moving square cylinder.

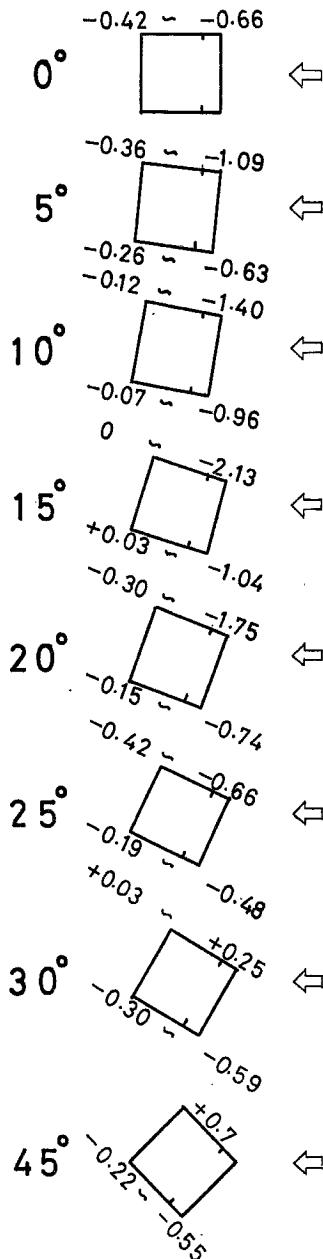


Fig. 4 Change of the wind pressure coefficient for change of angle of attack on stationary cylinder.

れの場合について、風速 0 から 40m/sec までの風を吹かせて、そのときの運動変位と風圧変動を測定した。迎角を変化させない $\theta=0^\circ$ の片持梁支持のものについても同じく風速 0 から 40m/sec までの風を吹かせて、運動変位と風圧変動を測定した。前者の系の固有振動数は $f=10\text{cps}$ から $f=24\text{cps}$ の範囲で種々変化させているが、後者の片持梁支持の系は固有振動数 $f=5.5\text{cps}$, $f=7.2\text{cps}$, $f=9.5\text{cps}$ の 3 種類について行なった。角柱まわりの風圧力測定点は Fig. 5 に示してある。

ii) 煙風洞による流線の観察

煙風洞による実験は、10cm×10cm 断面角柱周りの流れの様子を 2 次元的に観察し、一部を写真撮影した。Photo. 3 から Photo. 12 に示したように静止角柱の迎角を変化させたときの流線の変化を観測した。次に運動角柱まわりの流線を観察するため、つまみバネに角柱を吊り下げ、自由振動を与えて運動させたときの観測も行なった。このときのバネの固有振動数は 2.5cps で風速は 1.5m/sec から 3.0m/sec まで変化させた。

3. 測定結果

ii) 普通風洞実験による測定結果

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 に大, 中, 小各角柱の迎角を変化させたときの風速と変位の関係を示し, Fig. 4 には迎角の変化に対する風圧係数の変化を示した。Fig. 5 に共振運動時と静止時の風圧係数値を示し, 運動時と静止時の風圧分布の相異と比較した。Fig. 6 は共振運動時の風圧変動と運動変位とそのときの同じ風速で運動を拘束したときの風圧力を比較して示した。Photo. 2 は, 臨界風速時, 運動変位が序々に大きくなりながら, 定常運動に近づく過度現象時の運動変位と風圧変動記録である。

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 から迎角 $\theta=0^\circ$ から $\theta=10^\circ$ の範囲では運動は上下運動であり, 変位, 風速の曲線にひとつのピークがみられる。 $\theta=15^\circ$ から $\theta=25^\circ$ の範囲では, ねじり運動を起こし, 回転角も風速の増加とともに大きくなっている。 $\theta=30^\circ$ 以上になると上下運動も回転運動もなく, ほとんど静止の状態となる。Fig. 4 に示した迎角の変化に対する風圧係数の変化は θ が 0° から 10° 付近までは対応する 2 面の揚力方向の風圧係数値にあまり差がなく, 従って交番力の大きさがほぼ等しく上下運動が起こりやすい傾向を示しているようである。しかし, $\theta=15^\circ$ 以上になると, 対応する二面の風圧係数値の差が大きくなり, 従って, ねじり運動が起こりやすくなることを示している。Fig. 5 の運動時と静止時の風圧分布図では, 運動時の風圧値が静止時の 3 倍におよんでおり, その差のいちじるしいことが示されている。Fig. 6 の運動時と固定時の風圧記録からも, そのことがよくわかる。

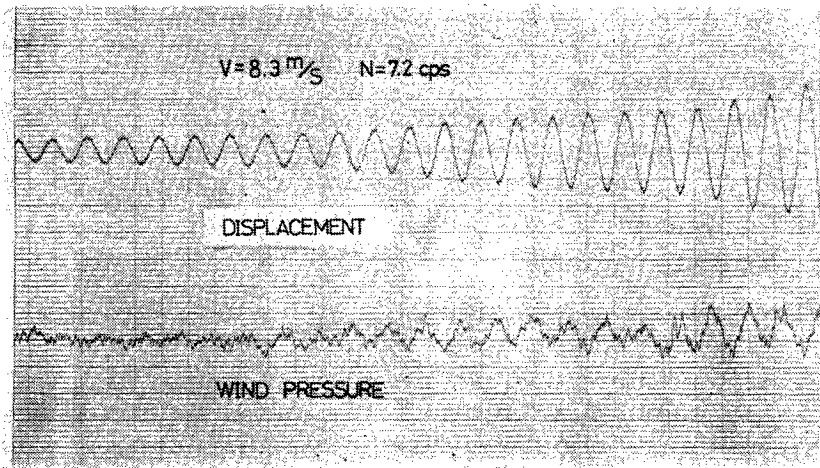


Photo. 2 The record of wind pressure fluctuation and displacement for moving square cylinder.

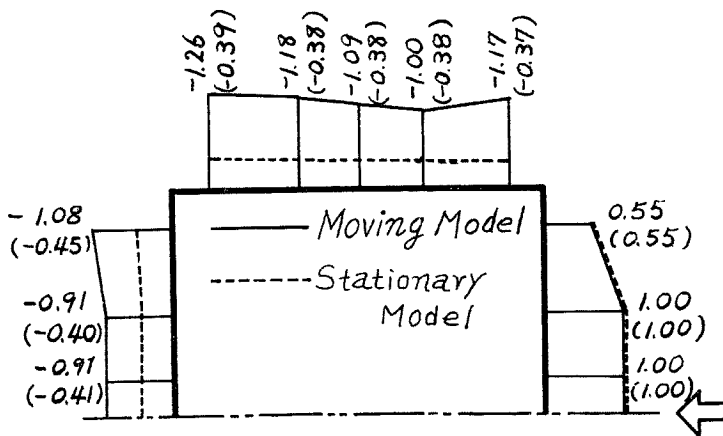


Fig. 5 The wind pressure coefficient for stationary and moving square cylinder.

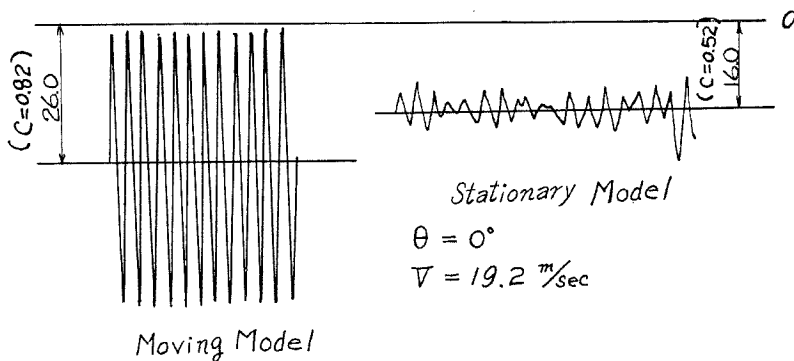


Fig. 6 The record of stationary and moving square cylinder.

Photo. 2 の記録から、運動変位が変化することによって、同一風速であっても、その風圧値の異なることがわかる。すなわち変位が大きくなるにつれて、風圧値も大きくなっている。

ii) 煙風洞実験による流線観測結果

Photo. 3 から Photo. 12 までに静止角柱の迎角を変化させたときの流線写真を示す。Photo. 13~Photo. 15 には迎角 $\theta=15^\circ$ の角柱を上下に運動させたときの模様を示した。それらの結果、当然のことながら、渦動領域部分の運動の激しいところに、負圧の大きい圧力変動がみられる。また、運動角柱まわりの渦動領域は静止角柱に較べて、非常に大きくその運動も激しい。

4. 測定結果についての考察

Fig. 6 の記録からわかるように、角柱が周期的に動いているときと、静止、すなわち固定されているときとは、そのまわりの圧力分布の様子がいちじるしく異なることがわかる。これが定量的にどの程度、運動変位量と風圧値の間に相関があるのかは明らかでない。そこで筆者は Photo. 2 の記録から、風圧値が、運動変位量 (a) の二乗に比例していることを見出した。すなわち、これは変位速度の二乗にも比例していることを示す。Fig. 7 に変位 (a) の 2 乗に対する風圧力の関係を示した。これは非常にきれいな直線関係を示している。これは流線観察によっても示されたことであるが、物体が運動することにより、そのまわりの流れの様相が急激に変化することから、運動変位と角柱表面の圧力との関係は非常に重要と考えられる。また筆者らの実験結果では迎角 $\theta=0^\circ$ のとき、その風速と変位の関係を示す曲線において、ピークがみられ、ある臨界風速時に渦による交番力が規則的であることを示している。これは G. V. Parkinson に

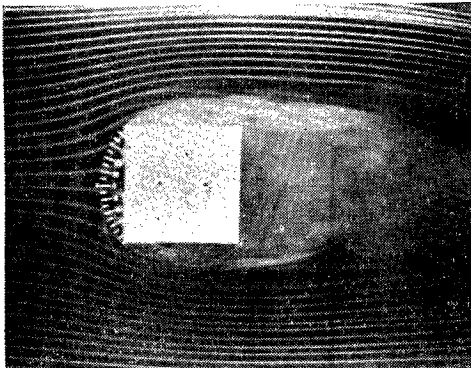


Photo. 3 The stream line around the square cylinder for angle of attack 0° .

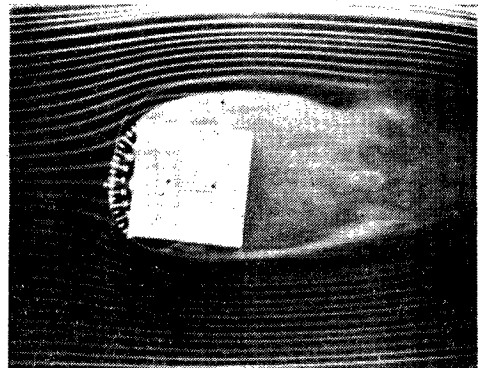


Photo. 4 The stream line around the square cylinder for angle of attack 5° .

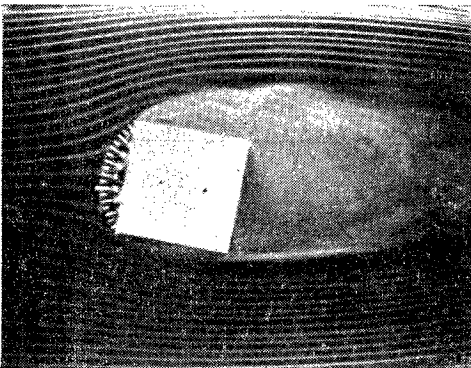


Photo. 5 The stream line around the square cylinder for angle of attack 10° .

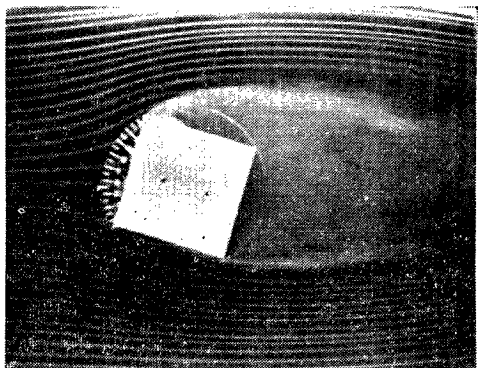


Photo. 6 The stream line around the square cylinder for angle of attack 15° .

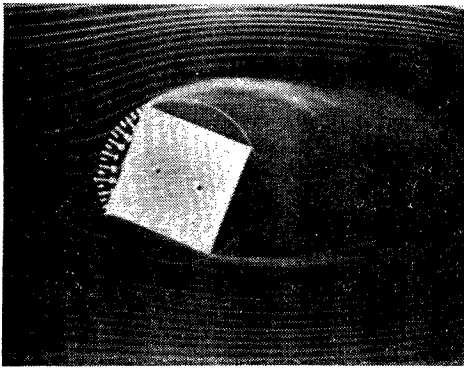


Photo. 7 The stream line around the square cylinder for angle of attack 20° .

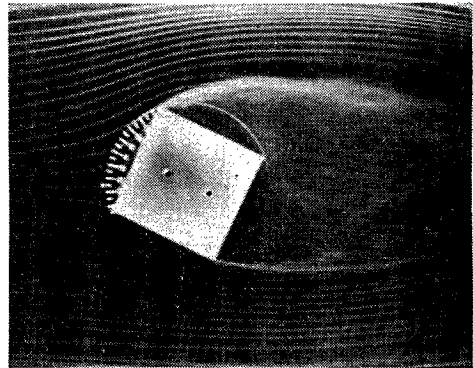


Photo. 8 The stream line around the square cylinder for angle of attack 25° .

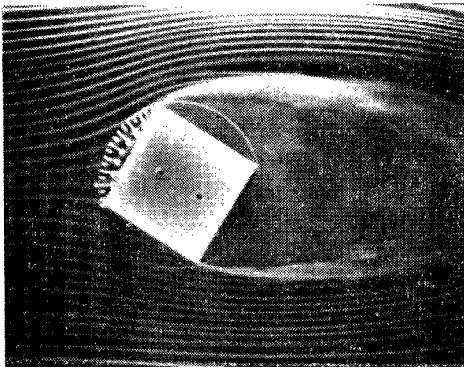


Photo. 9 The stream line around the square cylinder for angle of attack 30° .

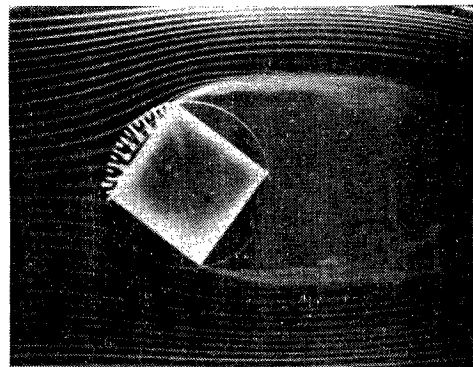


Photo. 10 The stream line around the square cylinder for angle of attack 35° .

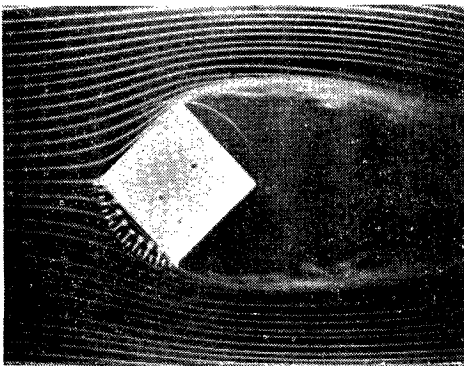


Photo. 11 The stream line around the square cylinder for angle of attack 40° .

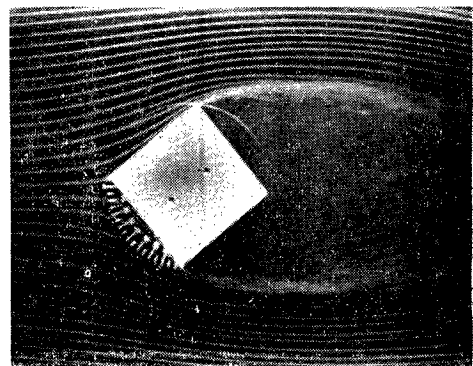


Photo. 12 The stream line around the square cylinder for angle of attack 45° .

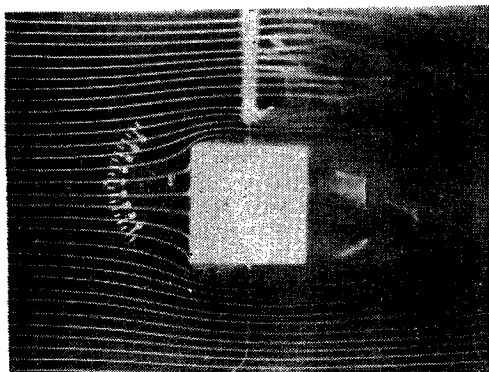


Photo. 13 The stream line around the stationary square cylinder.

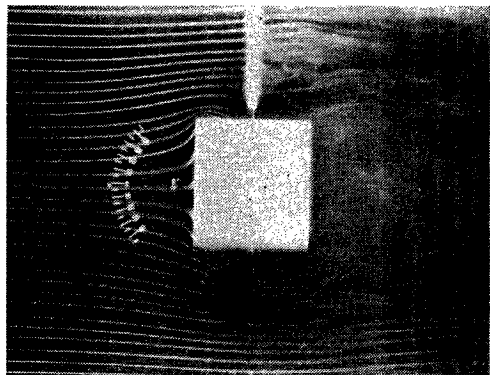


Photo. 14 The stream line around the moving square cylinder.

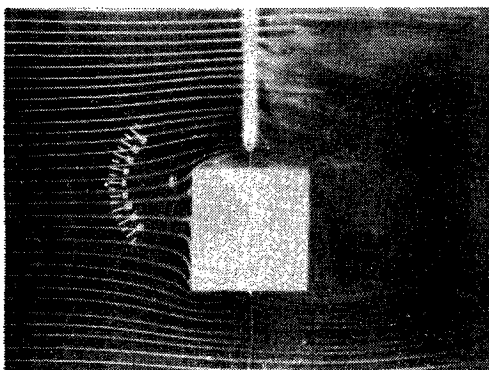


Photo. 15 The stream line around the moving square cylinder.

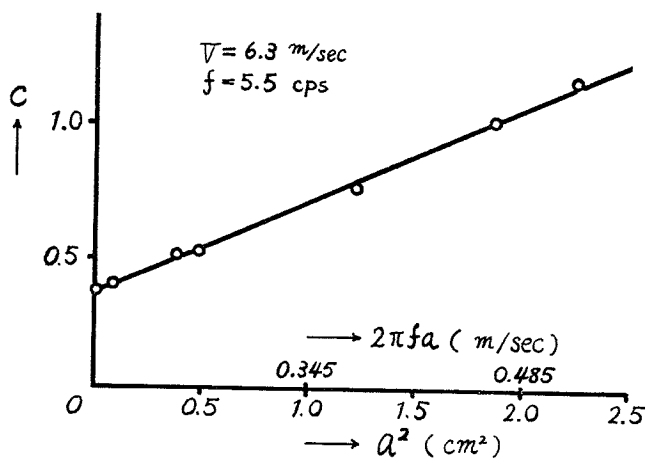


Fig. 7 The square of amplitude and wind pressure coefficient.

による準静定の考え方による取扱いではみられない結果である。従って Parkinson の方法では渦がまったく交差的に発生し、共振する範囲には適用できない。

このように角柱が周期的な運動をしているとき、そのまわりの圧力値は、その変位の大きさに関係しているようである。そこで筆者らは Fig. 7 の変位の 2 乗に対する風圧力の関係から、揚力方向成分の風力係数 C_L を求める計算式を求めてみた。このときの風圧分布は Fig. 6 に示したような、ほぼ一様であるものとして次式を示すことができる。すなわち、

$$C_L = C_{L0} + k \left(\frac{v}{V} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

となる。

なお、このとき、 v は角柱の変位速度

V は一般流の速度

を示す。また、式中、右辺の第 1 項の C_{L0} は静止角柱の揚力係数で第 2 項の係数 k は、本実験例で 75 となる。

5. む す び

以上の実験結果から、運動をしない角柱と固定されている角柱のまわりに作用する風圧力との間には、いちじるしく相異のあることがわかる。従って実際の構造物にもこれらの現象があると考えられるから、比較的、剛性の低い超高層建物、大径間吊屋根等には、十分、変位量と風圧力の関係に留意し、空力的不安定現象の生じないような配慮をすべきであろう。またこの種の問題は空力的不安定問題として、興味のある課題であり今後とも研究を進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) C. Scruton: Wind-excited oscillations of structures, Proc., of The Institution of Civil Engineer. 1964.
- 2) G.V. Parkinson: On the aeroelastic instability of bluff cylinders Trans. of ASME. June 1961 pp.252.
- 3) Y. OTSUKI: Tall buildings and aeroelastic problems, Trans. of AIJ, No.141, Nov.1967.