

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*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLUCTUATING PRESSURE ON HARMONICALLY OSCILLATING RECTANGULAR CYLINDER

小松 定夫**・小林 紘士***

By Sadao KOMATSU and Hiroshi KOBAYASHI

1. 概 説

長大橋梁あるいは細長い橋梁部材などが風の作用により振動を発生しやすいことは周知のとおりである。これらの振動はその発生原因別に、(1)風の乱れによる強制振動、(2)構造物の周囲にできる渦の作用による渦励振および(3)気流の負減衰効果による自励振動などとして理解されている。これらの振動現象を解明するためには、構造物に作用する動的空気力の実体を把握することが重要である。

動的空気力は、構造物の断面形状、風の迎角や乱れの強さおよび構造物の振動状態などにより複雑に変わるもので理論的な取扱いは困難である。このように複雑な動的空気力の実体を究明するために、主として模型による風洞実験が実施されている。そして、模型を加振する強制振動法¹⁾を用い振動中の模型に作用する動的空気力をセンサーにより直接実測するか、あるいは自由振動法²⁾により模型の変位または加速度などを実測しかつ空気力特性を仮定して間接的に動的空気力を推定している。

これらの方法は、模型の各部分に作用する空気圧の合力としての空気力を把握するためのある種のアプローチである。しかし、動的空気力がどのような機構で発生するかというような分析的考察に必要な詳細な情報はこれらの方法からは得難い。そのため、最近では模型のまわりの非定常流れの観察^{3),4)}およびシミュレーションによる数値解析^{5),6)}、模型表面に作用する動的圧力の測定⁷⁾などが試みられている。しかし、これらの方法にも現在のところ限界があるように思われる。

著者らは、動的空気力の発生機構の解明に対して、動

的圧力の測定は有効な手段の1つであると考えている。それにもかかわらず、いままでに振動中の模型に作用する動的圧力を詳しく調べた例は非常に少ない。圧力測定例が少ないのは、振動中の模型に作用する圧力を測定するのに適した圧力計が得難かったことがおもな原因であると思われる。

著者らは、橋梁の2次元模型に作用する動的圧力を測定する目的で低風速でも十分大きな出力を有する圧力計を試作した。本論文においてはまずその圧力計とそれを用いる実験方法について述べる。そして、その圧力計により長方形断面を有する2次元角柱に作用する動的圧力を測定してその特性を調べ、風による不安定現象の発生要因について考察するとともに振動性状と動的圧力特性との関連性について究明する。

2. 圧力計の試作

橋梁の2次元模型による風洞実験では、風洞の規模、模型の大きさ等により差はあるが、通常0~10数m/sの風速範囲で実験が実施される。そして風による模型の振動はわずか1m/s前後の微風速で観測されることもある。このような低風速で精度よく圧力を測定するためには、かなり高感度の圧力計が要求される。測定器および検出器の感度を高くすれば、動特性が悪化し、雑音を拾いやすくなる。そのため、目的にかなう圧力計を得ることは相当困難なこととなる。

著者らは、半導体ひずみゲージを使用した圧力計を試作した。そして以下に述べるように、その試作圧力計の静的および動的特性を調べ有用性を確認した。市販の圧力計は一般に高価であり、しかも微圧測定に対して精度が悪いことが多いが、この試作圧力計は、1m/s程度の風速における動圧に対しても十分の感度を有しその優位性が認められたので、やや詳しく説明する。

* 内容の一部は土木学会年次学術講演会(第30回、昭和50年10月)において発表した。

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 立命館大学助教授 理工学部土木工学科

(1) 圧力計の構造と機能

試作圧力計の受感部は、波形成型加工した磷青銅ダイヤフラムと磷青銅の片持板とよくなる。それらを剛な円板に取付けた。ダイヤフラムの中心と片持板の先端とは細い銅線で連結してある。

円板の中心部に直径 4 mm の孔を設け、その孔を通して測定圧をダイヤフラムに作用させる。一方、ダイヤフラムと片持板全体を円筒形の容器で密閉し、その容器の側面に設けた直径 2 mm の孔から基準圧を作用させる。このようにすると片持板には測定圧と基準圧との差圧に比例したひずみが発生する。そのひずみを片持板の支点付近に張付けた半導体ひずみゲージで検出した。ひずみゲージの出力は IC 化演算増幅器で増幅した。このような圧力計を合計 30 個試作した。

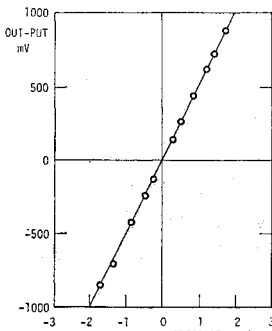
(2) 静的応答特性

読み取り精度 1/100 mm Aq の傾斜型マノメーターを用いて試作圧力計の静的応答特性を調べた。出力の直線性は、±10 mmAq (風速約 13 m/s の動圧に相当) の範囲で確かめられた。感度は約 500 mV/1 mmAq であった。図一1 に微小圧力に対する応答曲線の一例を示す。図より明らかなように、直線性はきわめて良好である。

(3) 動的応答特性

圧力計の共振振動数は約 60 Hz であった。しかし、これは測圧孔に導圧管を接続しない時の値である。風洞実験に使用する際には実験の都合上かなり長い導圧管を用いて測定することになる。この導圧管の存在は圧力計の動特性に大きな影響を与える。そこで風洞実験における使用状態を想定し、それに見合った導圧管を圧力計の測定孔に接続してその時の圧力計の動特性を調べた。

図-2 に試験装置の既略図を示す。容積 8



図一1 圧力計の静的応答特性

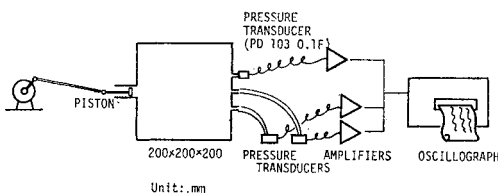


図-2 試作圧力計の動特性の試験装置

l_s の立方体の箱内部にピストンを用いて周波数 0~100 Hz, 振幅 0.4 mmAq の正弦的に変動する圧力を発生させた。ただし、周波数の高い所ではピストンをスピーカーに置き替えた。その変動圧力を長さ $l=50, 80, 150$ cm, 内径 4 mm の 3 種のビニール製導圧管を用いて圧力計に導いた。同時に共振振動数約 625 Hz の半導体圧力計 (豊田工機 PD 103-0.1F) を箱に直接取付けた。以上の圧力計の出力を電磁オシログラフで記録した。

半導体圧力計の出力は 0~100 Hz の範囲でほぼ正確であると考えられた。これを基準として試作圧力計の動特性を調べた。図-3 は試作圧力計に $l=80$ cm の導圧管を接続した時の出力の基準圧力計出力に対する比をプロットしたものである。周波数 5 Hz までは振幅の誤差はほとんど認められない。この時共振振動数は約 28 Hz と考えられる。なお $l=50$ cm, 150 cm の時の共振振動数はそれぞれ約 36, 18 Hz となった。図-4 は $l=80$ cm の場合の試作圧力計の位相特性をプロットしたものである。周波数 5 Hz までは位相遅れは非常に小さい。

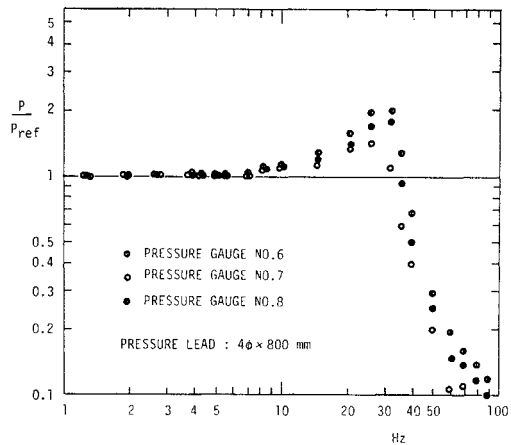


図-3 周波数応答特性

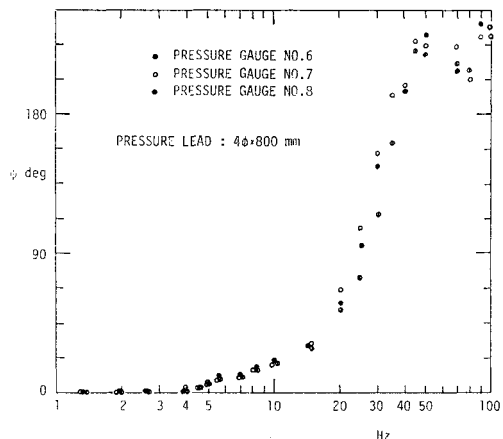


図-4 位相特性

(3) 温度特性

試作圧力計は出力の温度依存性が多少認められた。煩雑であるが、使用直前直後に感度の校正を行い、できるだけ頻繁に0点のチェックを行うことにより、この欠点を克服するようにした。

(4) 圧力孔について

模型表面に設ける圧力孔については、(1)孔の軸は表面に垂直である。(2)孔の周囲に製作上の凹凸がないこと、(3)孔径はできるだけ小さいことなどの注意が必要とされている⁸⁾。孔径があまり小さいと空気の粘性の影響で動的圧力測定に支障をきたす。立川⁹⁾は角柱表面の動的圧力測定に際し直径2, 3 および 12 mm の圧力孔を設けて実測を行い、いずれの場合も良好な結果を得ている。本実験では圧力孔の直径は 2 mm とした。

圧力孔を同一断面内に多数設けて実験を行うが、上流側の圧力孔が下流側の測定圧にほとんど影響を与えないことを別途確認した。

試作圧力計を用いて以上のような方法で圧力測定を行うことが適切であることは、後述の実験結果において、圧力測定結果から算定された角柱の定常振幅が実測振幅とよく一致したこと、および圧力測定結果を基に算定された角柱の空力減衰率 δ_a が広範囲の振幅にわたり実測空力減衰率と一致したことなどから首肯できる。

3. 振動中の長方形断面角柱に作用する動的圧力

一様流中にばね支持された長方形断面角柱はギャロッピングまたは限定振動*を起すことが知られている。ギャロッピングは空気力の負減衰作用によるものとされ、準静的な取扱いで非線形振動理論によるアプローチが試みられている^{10), 11)}。一方、限定振動は、静止角柱にみられる周期的な渦の発生現象と関連させて理解されている。角柱の固有振動数と渦の発生周波数が一致するような限界風速 V_{cr} の近辺で限定振動が発生する場合が多いからである。しかし、限定振動の発生風速域と V_{cr} とは必ずしも一定の関係にあるわけではなく、 V_{cr} が振動発生時の風速であったり、振動の消滅する時の風速に近い場合もある。また、 $1/2 \cdot V_{cr}$, $2 V_{cr}$ 近辺で限定振動が発生することもある^{12) ~ 15)}。これらは角柱の断面形状、迎角に左右される。このような限定振動の発生に関してはまだ十分な知見がなく、定性的な論議にとどまっている。

* 限定振動には規則的な振動とパフティングのような不規則な振動とがある。ここでは規則的な振動を取扱う。

ここでは普通橋梁などで問題となる気流直角方向の限定振動を対象とする。限定振動を発生しやすいような高さ D と幅 B の比が $D/B=1/3$ の長方形断面を有する角柱を用いる。長辺が気流と平行(迎角 $\alpha=0^\circ$)となるようにばね支持し上下1自由度で振動させる。そして角柱表面に作用する動的圧力を測定する。

(1) 実験方法

使用した角柱は高さ $D=75$ mm, 幅 $B=225$ mm, 長さ $L=678$ mm の長方形断面角柱である。スパン中央部の断面に直径 2 mm の圧力孔を計 26 個配列した(図-5)。この圧力孔に作用する圧力を測定するには、圧力計を角柱の内部に組込むことが理想的である。しかし、そのために角柱全体の重量が増加し、また、圧力計も角柱とともに振動するのでその影響が圧力計の出力に現われる虞れがあるので不都合である。それで、各測点の圧力を直径 4 mm のビニール管で風路外部にまで導き、風や振動の影響を受けないところに固定された圧力計に接続した。角柱の端部と圧力計の間に介在する導圧管は角柱の振動とともに自由に抵抗なく変形しなければならないので生ゴム管を用いた。この生ゴム管が角柱の構造減衰率および圧力測定値に与える影響はわずかであることを別途確認している。導圧管の総延長は約 70 cm であっ

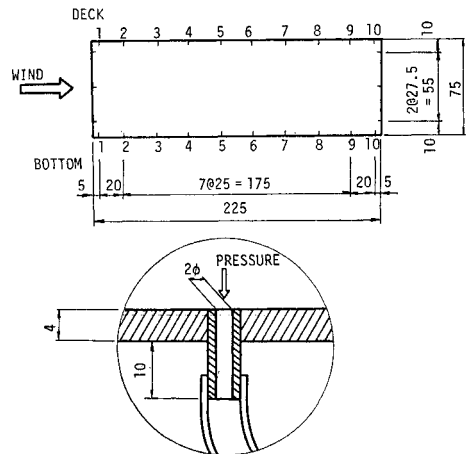


図-5 角柱の断面形状と圧力孔

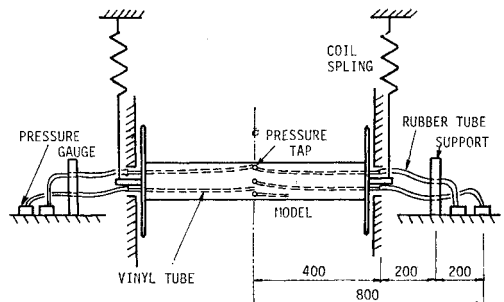


図-6 圧力測定実験の方法

た。圧力計の基準圧は実験室内圧とした。図-6 に測定方法の概略を示す。

4本のばねで長辺が気流と平行（迎角 $\alpha=0^\circ$ ）となるよう吊下げ、上下1自由度の振動をさせた。角柱の単位長さ当り重量は $w=3.063 \text{ kg/m}$ 、固有振動数は $N=3.20 \text{ Hz}$ 、構造減衰率は $\delta_s=0.02$ であった。一様気流中で角柱に十分大きな初期振幅を与えた後の減衰振動過程あるいは調和振動過程で圧力を測定した。限定振動の発生する風速においては、その他に角柱をいったん固定しておき解放した後の振動発達過程についても圧力測定を行った。

(2) 圧力測定結果

角柱の振幅-風速曲線を図-7 に示す。ここに、 η_0 は限定振動の定常振幅 y_0 を角柱の高さ D で除し無次元化した振幅である。また、 V_r は風速 V を角柱の固有振動数 N および D で除した無次元風速である。振動の発生している風速 ($V_r=7.1$) およびそれより低風速 ($V_r=4.4$) における角柱の上側面の各測点についての変動圧力の記録例を図-8 に示す。左側の数字は測点番号

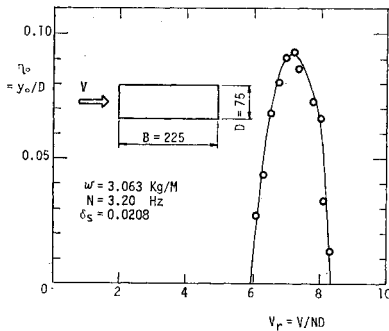


図-7 角柱の応答振幅・風速曲線

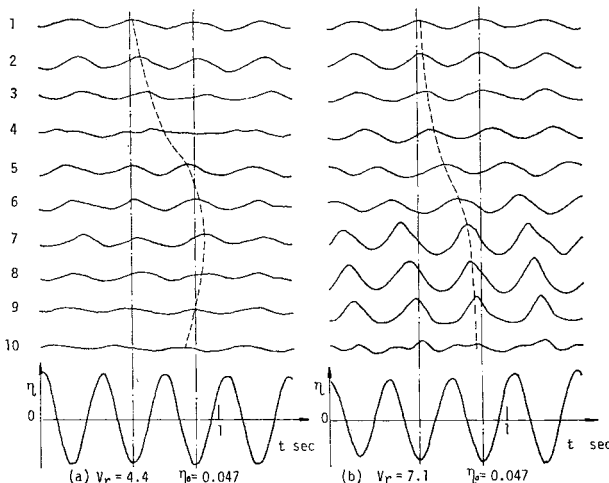


図-8 動的圧力の記録例 (任意スケール)

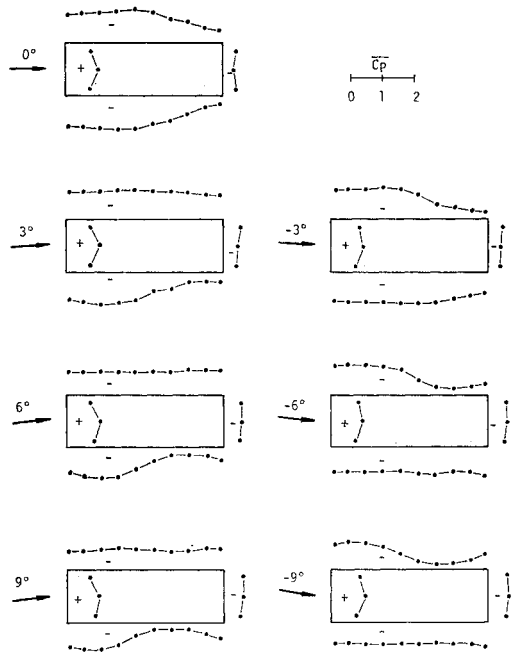


図-9 静止角柱の時間平均圧力分布

を示す。一点鎖線は角柱が最下端に位置する時刻、破線は圧力が最大となる時刻を結んだものである。圧力の変動はほぼ正弦的である。また、圧力の位相は、下流側の測点にいくにつれて遅れてくる傾向が認められる。以下すべての圧力変動の波形データについてスペクトル解析を行ったが、微小振幅の場合を除き正方形断面¹⁶⁾の時とは違って圧力のストローハル成分はほとんど認められなかった。

図-9 は静止角柱の周りの時間平均圧力係数 \bar{C}_p の分布である。ここに、 \bar{C}_p は圧力係数 $C_p = P/1/2 \rho V^2$ (P は測定圧力、 ρ は空気密度) の時間的平均値である。 $\alpha=0^\circ$ の場合、後流側の隅角部付近で \bar{C}_p が大きく ($|\bar{C}_p|$ が小さく) なっている。その付近で前線からはく離れた流れが再付着しているものと推察される。迎角の増大とともに下面の再付着点は上流側に移動し、上面では再付着点がなくなり、ほぼ一律な圧力分布となっている。

このような静止角柱の圧力分布に対し、振動角柱の \bar{C}_p の分布は図-10 のようになる。 $\eta_0=0.03$ の場合 \bar{C}_p の分布形状は静止角柱の $\alpha=0^\circ$ の時のそれに似ている。 η_0 が大きくなると再付着点が上流側に移動したような分布形状となる。

1 サイクル中の圧力係数 C_p の分布の時間的推移の様子を図-11 に示す。各分布図の左側に、その時刻における角柱の相対迎角 $\alpha_{rel} = \tan^{-1}(\dot{y}/V)$ (\dot{y} は角柱の振動速度) を記入した。これを図-9 に示した \bar{C}_p の分布と対比させてみる

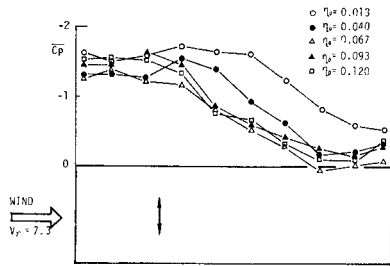


図-10 振動中の角柱の時間的平均圧力分布

と、 $\alpha_{rel.} = 3^\circ$ および $\alpha_{rel.} = -3^\circ$ の時の分布形状がそれぞれ静止角柱の逆符号の迎角 $\alpha = -3^\circ$ および $\alpha = 3^\circ$ の時の分布形状に類似している。角柱のまわりの流れが模型の運動にただちに追従できないでいわゆる流れの遅れが生じているものと推察される。このことからこの風速域における振動を準静的に取扱うことが不適当であることが確認される。

次に、振動発生風速域近傍において変動圧力係数の振幅 C_{p0} が変位振幅 η_0 に対して変化する様子を調べてみた。図-12 (a)~(f) にその結果を示す。(a), (b), (e), (f) は振動の減衰過程において C_{p0} を求め、 η_0 を横軸としてプロットしたものである*。(c), (d) は同様にして振動の発達過程における C_{p0} を求めたものである。

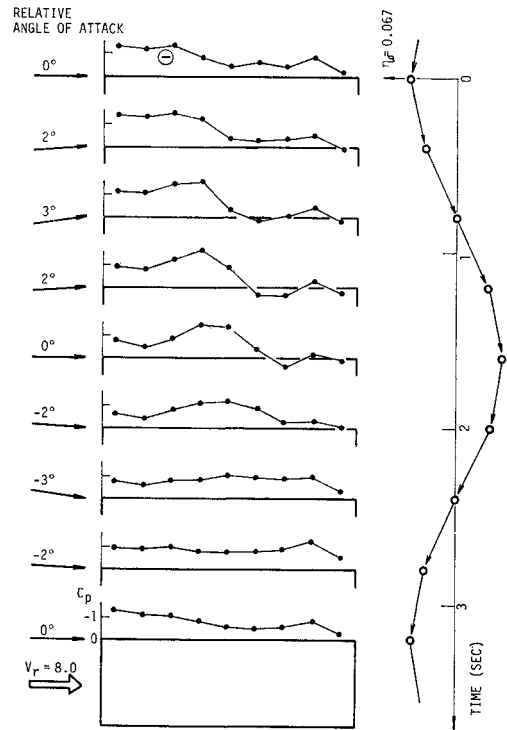


図-11 1 サイクルにおける圧力分布の時間的推移

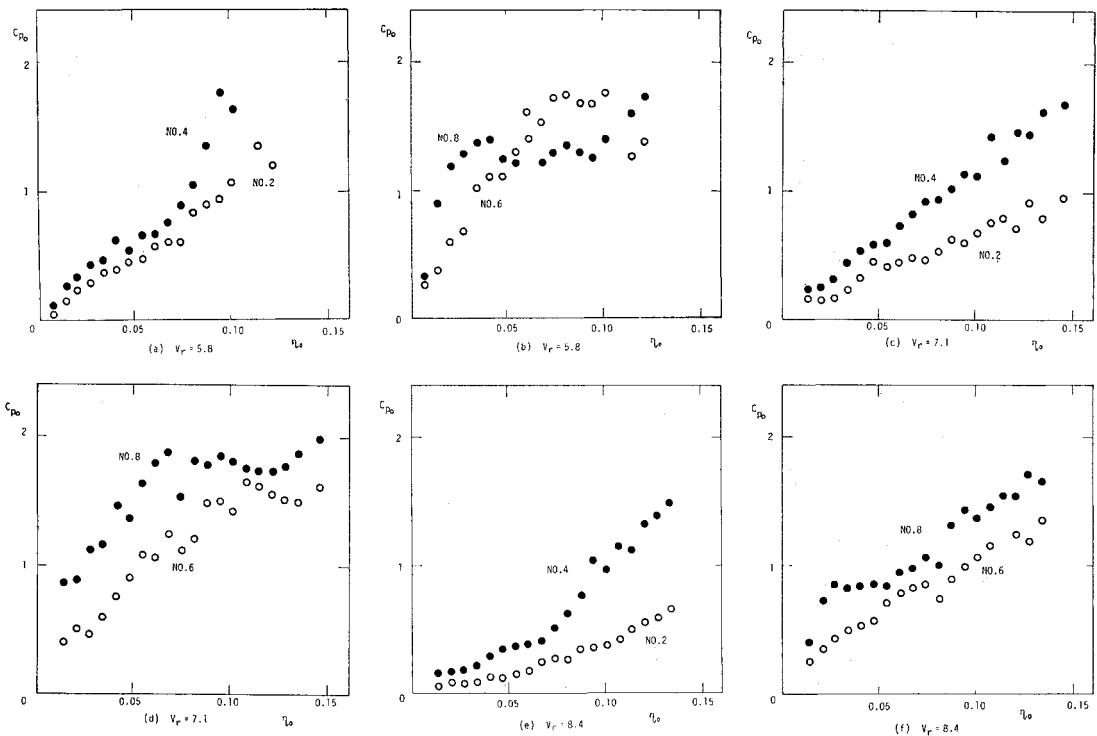


図-12 圧力の振幅 C_{p0} の変位振幅 η_0 による変化

* 角柱の迎角 $\alpha = 0^\circ$ であるので上面と下面の同一番号の測点の圧力は同じ性状を示した。そこで両者の実測値の平均を求めてプロットした。以下の解析でも同様に処理する。

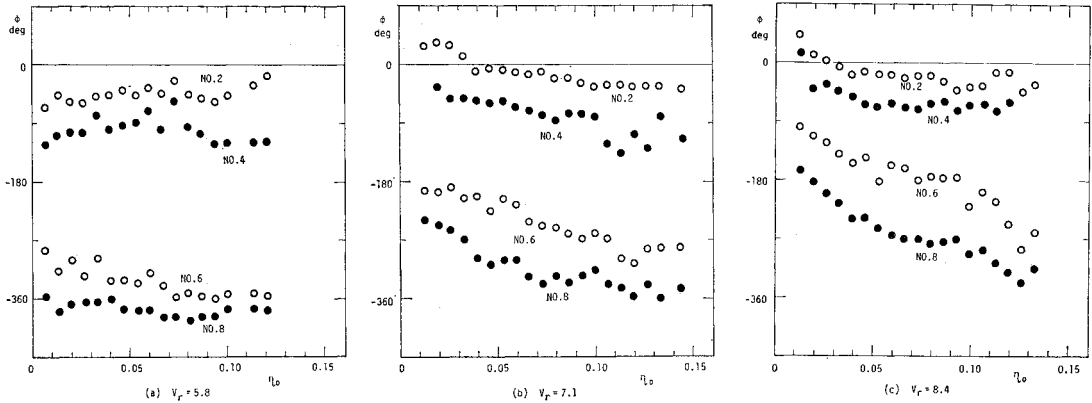


図-13 圧力の位相差 ϕ の変位振幅 η_0 による変化

いずれの場合も上流側の測点（測点 No. 2, No. 4）の C_{p0} は実験振幅範囲内（図-7 に示した最大応答変位振幅の 1.5 倍程度）では η_0 に直線比例して増大している。一方、後流側の測点（測点 No. 6, No. 8）の C_{p0} の η_0 に対する比は η_0 が大きくなるにつれて小さくなってきている。これと同風速において圧力の変位に対する位相差 ϕ を計算した。上面および下面の測点の圧力の最小値となる時刻とそれぞれ角柱が最上位または最下位となる時刻との差をオッシロ記録から読み取り、角度に換算した。圧力の位相が進んでいる場合を正とした。図-13 (a)~(c) にその結果を示す。(a) の測点 No. 2, No. 4 を除けば位相の遅れ量は η_0 の増大とともに増大している。上述の圧力の振幅の非線形性ととも、この位相差が振幅によって変化する特性が空気力に非線形性をもたらす要因となっていると考えられる。

4. 振動の発生と圧力特性

各測点の圧力変動はほぼ正弦的で、角柱の振動と同周期であった。また、角柱の振動の発達、減衰の様子は、本論文の実験範囲内では穏やかなものであった。このような場合、振動の 1 周期のみに着目すると角柱の振動および圧力の変動を近似的に一定振幅の調和振動として扱うことが許されよう。

圧力が角柱に対してなす仕事を考えてみる。角柱の変位を下向きを正として $y = y_0 \cos \omega t$ 上面のある測点の圧力を $P = P_0 \cos(\omega t + \phi)$ とする。ここに、 ω は角柱の円振動数である。その点の圧力が 1 サイクル中に角柱に対してなす単位面積当りの仕事 W は、

$$W = \int_0^{2\pi/\omega} P y dt = \pi P_0 y_0 \sin \phi \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) から、圧力の位相差 ϕ が $2n\pi < \phi < (2n+1)\pi$ (n は整数) となればその圧力は角柱に対し正の仕事をする

ことになり、角柱の振幅を増大させる働きを有する。

図-14 は $\eta_0 = 0.047$ において角柱の上下側面の圧力の仕事 W を計算した結果を示す。風速の低い ($V_r = 4.4$) 場合 $W > 0$ となる領域が 2 か所出現している。

図-8 (a) からわかるとおり上流側の測点の位相差は小さく、それより下流側の測点に移るに従って次第に位相が遅れ、測点 No. 6~8 においては $\phi < -2\pi$ となる。さらに下流側の測点 No. 9, No. 10 においては再び $-2\pi < \phi < -\pi$ となったため下流側隅角部においても $W > 0$ なる領域が生じた。風速が次第に高くなると $W > 0$ の領域は 1 つとなりしかも後流側へ移動している。各測点の圧力変動は、前縁からはく離れた流れが平均流とともに後流へ移動する過程で生ずるものと考えられるが、平均流速が速くなると、それに伴いはく離流の流下する速度が速くなり正の仕事をする測点 ($-\pi > \phi$

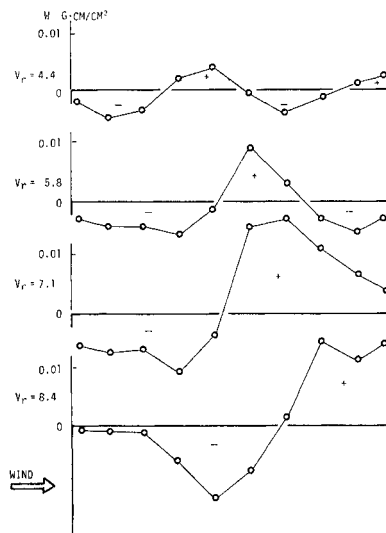
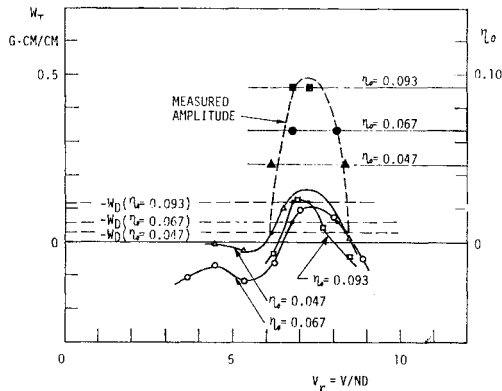


図-14 圧力のなす仕事の分布の風速による変化 ($\eta_0 = 0.047$)



図一15 スパン方向単位長さ当りに圧力のなす全仕事 W_T と角柱の応答曲線の推定

$> -2\pi$) の位置も後方に移動する。

そこで各測点の圧力のなす仕事を断面のまわりに積分するとその断面における角柱軸方向単位長さ当りに圧力のなす仕事 W_T が求められる。図一15 に無次元振幅 $\eta_0 = 0.047, 0.067, 0.093$ の時の仕事 W_T を示す。この仕事 W_T と構造減衰力のなす仕事 $W_D = -\pi c y_0^2 \omega / L$ (c : 減衰定数, L : 角柱の長さ) の和が正となる時角柱の振幅は増大する。また, $W_T + W_D = 0$ の時定常状態となる。本実験において $c = 0.312 \text{ gr} \cdot \text{sec/cm}$, $\omega = 21.05 \text{ rad/s}$, $L = 78 \text{ cm}$ であるので, それぞれの振幅に対する W_D は $W_D = -0.031$ ($\eta_0 = 0.047$), -0.063 ($\eta_0 = 0.067$), -0.123 ($\eta_0 = 0.093$) $\text{gr} \cdot \text{cm/cm}$ となる。 $-W_D$ の値を 図一15 に破線で記入した。これらの破線とそれぞれ同じ振幅の W_T 曲線との交点はその振幅の振動の現われる風速を表わす。このようにして推定した振動発生風速に対して無次元振幅 η_0 をプロットすれば 図中の \blacktriangle ($\eta_0 = 0.047$), \bullet ($\eta_0 = 0.067$) および \blacksquare ($\eta_0 = 0.093$) で示した点が得られる。それらは, 破線で示した実測応答曲線とよく一致している。以上のようなことから, 振動中の角柱のまわりの流れおよびそのもつ圧力効果は次のような性質を有すると考えられる。

(1) 気流中で角柱が振動することにより角柱の相対迎角 $\alpha_{rel} = \tan^{-1}(y/V)$ が変化する。その変化に応じて前縁からはく離する気流の状態が変動する。それが前縁付近の上下面に対し圧力変動となって現われてくる。そのようにしてゆがめられたはく離流は, 次の時刻には角柱の上下面に沿って後流側へ移動していく。振動により角柱の相対迎角が変わってもそのはく離流のもつ性状はすぐには失われず, このため側面における圧力分布のパターンが後流側へ移動していく。この様子は 図一11 に示した圧力分布の時間的変化状態から推論される。

(2) 前縁からはく離した気流による圧力効果の後流への移動は上下側面の各測点における圧力変動の変位に

対する位相差となって現われてくる。

(3) 圧力の位相差が $2n\pi < \phi < (2n+1)\pi$ となる測点では圧力は角柱に対し正の仕事をする。 図一14 に仕事分布図を示したが, 正の仕事をする測点の占める割合が最大となるのは $V_r = 7.1$ の場合であった。その風速近傍で限定振動が発生した。それより低い風速でははく離流が側面に沿って流下する速度が遅くなり, 各測点の圧力の位相は全体として遅れが大となってくる。そして $W > 0$ となる部分が上流側へ移動すると同時にその領域も小さくなる。したがって $W_T + W_D < 0$ となり振動が発生しなくなる。また, 高風速の場合は逆に はく離流の流下速度が速いため, 圧力の位相の遅れ量は小さくなり $W > 0$ の部分は角柱の後流域にまで早くでてしまうこととなり, したがって, $W_T + W_D < 0$ となり, 変動圧力は角柱に対する励振力とはなり得なくなる。したがって, このような風速域では角柱は空力弾性学的に安定となる。

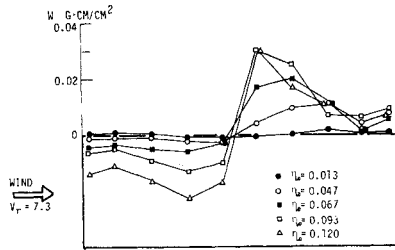
以上を総括して鉛直振動の発生機構に関して次のような考察ができる。角柱の前縁からはく離する流れのパターンは角柱の振動に伴い周期的に変動する。そのはく離流のパターンは平均流により下流側へ移動させられる。そのため, 角柱の側面の各測点においては位相が下流側の測点にいくほど遅れてくる変動圧力が生ずる。はく離流の流下速度と角柱の幅および振動数がある一定の値となる時, 角柱の振動を助長するような変位相差を有する領域が卓越するようになり振動が発生する。

5. 圧力の非線形性と定常振幅について

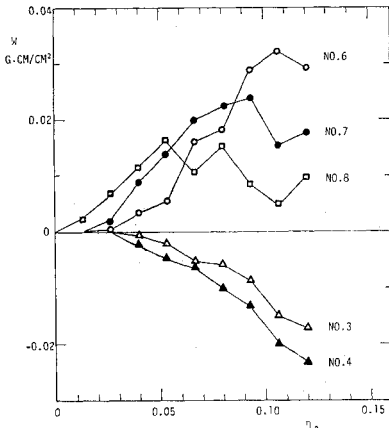
振動発生風速域における各測点の圧力のなす仕事 W は, 図一14 に示したように側面の中央部を境として上流側測点で負, 下流側測点で正となる。圧力の振幅 C_{p0} の変位振幅 η_0 に対する変化のパターンも同様に上流側と下流側の測点に大別される。すなわち, 上流側測点の C_{p0} は η_0 に対して直線的に増大する (図一12 (c))。下流側測点の C_{p0} は η_0 の大なるところではもはや増大は認められなくなり (図一12 (d)) 非線形性が認められる。

このような傾向は圧力のなす仕事 W にもみられる。 図一16 にそれぞれの振幅における W の分布を示す。さらに, 図一17 には上流側の測点 No. 3, No. 4 および下流側の測点 No. 6, No. 7, No. 8 について W の η_0 に対する変化の様子を示す。上流側測点の $|W|$ は η_0 に対して直線的に増大し, 一方, 下流側測点の W は η_0 の増大に伴いいったん増大するが, やがて一定値となるかまたは減少する傾向がみられる。

上記の資料を用いて, 軸方向単位長さ当りの全仕事 W_T を計算した。その結果を 図一18 に示す。構造減衰



図一16 限定振動の発生風速における圧力のなす仕事の分布の変位振幅による変化 ($V_R=7.3$)



図一17 圧力のなす仕事の変位振幅による変化 ($V_R=7.3$)

力が軸方向単位長さ当り1サイクル中になす仕事 W_D を逆符号としたものも同図に曲線で示した。振動の発達過程(この場合 図一

18 において $\eta_0 < 0.093$) にお

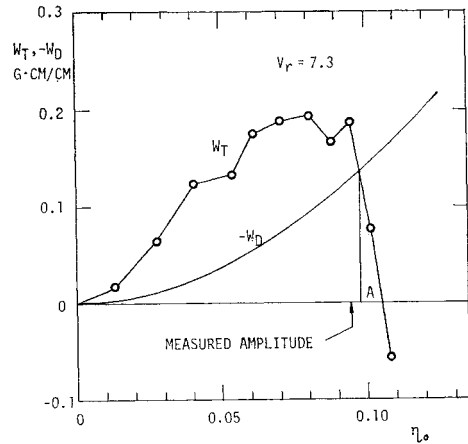
いては圧力が正の仕事をする部分が卓越しているため、 $W_T + W_D > 0$ となり、振幅は次第に増大する。振幅が $\eta_0 > 0.093$ となると W_T は急に減少し、ついには $W_T + W_D < 0$ となる。そのような領域では振動は減衰していく。 $W_T + W_D = 0$ となるような点 A においては、圧力のなす仕事と減衰力のなす仕事がつり合うため、振動は定常的となる。A 点の振幅はほぼ $\eta_0 = 0.1$ である。実測定常振幅 $\eta_0 = 0.093$ とよく合致している。

限定振動の振幅は、主として上下側面の中央部より下流側の測点に作用する圧力の非線形性(たとえば 図一12 (d) の○、●など)により定まるものと理解される。

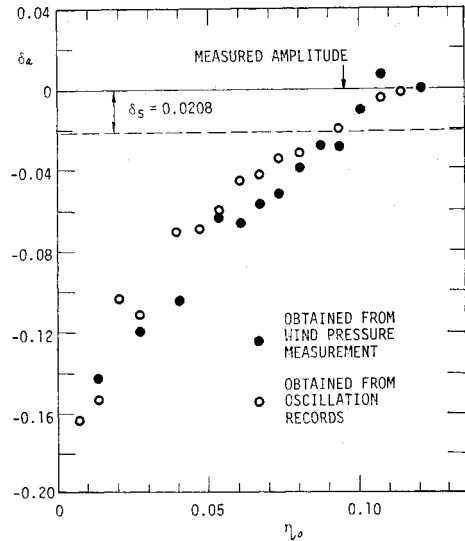
図一19 に空力減衰率・振幅曲線 ($\delta_a - \eta_0$ 曲線) を示す。●印は圧力測定結果をもとに $\delta_a = -W_T / (m y_0^2 \omega^2)$ として算定、○印は変位振幅の実測値より算定した値である。ここに、 m は模型の単位長さ当り質量である。両者はよく一致していることが認められる。 $\eta_0 = 0.093$ 付近(破線との交点)で $\delta_a + \delta_s = 0$ となっている。

6. 結 論

空力弾性学分野で圧力計を用いた研究例が少ないのは、安価で高感度かつ周波数特性のよい圧力計が得難いことが一因であると思われる。著者らは橋梁および橋梁



図一18 スパン方向単位長さ当りに圧力のなす全仕事 W_T と構造減衰力のなす仕事 W_D ($V_R=7.3$)



図一19 圧力測定結果から求めた空力減衰率(●印)と変位記録から直接求めた空力減衰率(○印)の比較 ($V_R=7.3$)

部材の動的風洞実験に使用できる高感度圧力計を試作しその性能を調べ十分実用的価値があることを確認した。

そこでその圧力計を用いて一様流中で気流直角方向に振動中の2次元長方形断面角柱に作用する動的圧力を測定し種々考察した。実験に使用した高さと幅の比が1/3の断面の角柱は、長辺が気流に平行に置かれた場合、無次元風速 $V_r = 6 \sim 8$ において気流直角方向の限定振動を発生することが知られているが、この振動発生風速付近の圧力特性を調べた。そして、上下側面の各測点に作用する圧力特性について次のようなことが明らかとなった。

(1) 振動中の角柱の上下側面の時間的平均圧力分布形状は静止角柱のそれに比べ、再付着点が上流側に移動したような分布形状となった。

(2) 振動中の角柱に作用する動的圧力の瞬間値は、

その時の角柱の相対迎角とほぼ逆符号の迎角の静止模型の平均圧力と似た分布形状となった。

(3) また、特徴のある圧力分布形状が、時間の経過とともにその形状を保持しながら下流方向へ移動する様子が認められた。

(4) 変動圧力の振幅は角柱の変位振幅とともに増大するが、その増大の様子は上下側面の中央部を境として2種類に大別された。すなわち、中央部より上流側測点では圧力の振幅は変位の振幅にほぼ比例して増加し、下流側測点では、変位振幅が大きくなるにつれて圧力の振幅はある一定値に収束する。

(5) 圧力の変位に対する位相差に関しては下流側の測点にいくに従い、また、変位振幅の増大に従って遅れ量が増大していく傾向がみられた。

(6) 振動発生風速において、圧力のなす仕事は、上下側面の中央部より上流側で負、下流側で正となっていた。仕事が正となる領域は風速の増大とともに下流側へ移動した。

(7) 圧力のなす仕事から限定振動の定常振幅、発生している風速域を算定することができた。それらの値は実測結果とよく合致した。

以上の成果を総合して考察した結果、限定振動の発生機構は次のようなものと推定できた。角柱の振動に対応して周期的に変動する前縁からはく離流が、平均流により角柱の上下側面に沿って下流へ流されていく過程で、側面の各位置にそれぞれ異なった位相の変動圧力を生じさせる。角柱の振動数は一定であり、はく離流の流下速度はほぼ平均風速に比例するので、ある特定の風速 ($V_r \approx 7$) の時、側面に作用する圧力は上流側で負、下流側で正の仕事をするような位相となる。そしてある振動時の変位振幅が定常振動時の変位振幅 (たとえば、図-18 の $\eta_0 \approx 0.1$ に相当する振幅) より小さい時、断面全体にわたる全仕事と構造減衰力のなす負の仕事との代数和が正となり、振動が発達する。風速がこれより低い場合、はく離流の流下速度が遅くなるため、正の仕事をする領域は側面の中央部付近に存在し負の仕事をする領域に比べ狭くなる。逆に高風速域では、はく離流の流下速度が速くなるため、正の仕事をする領域は下流側に移動し、この場合もその領域は狭くなる。したがって、両仕事の代数和は負となり、これらの風速域では振動は発生しない。限定振動の振幅がある一定値に抑えられる現象は、主として、側面中央部より後流側の正の仕事をする領域の圧力の変位振幅に対する非線形性に起因するものであることがわかった。

振動の発生機構の解釈に際して、ここでは角柱表面の圧力変動に着目した。引き続き種々の辺長比をもつ長方形断面について調べ、限定振動ならびにギャロッピング

の発生機構について報告する予定である。

謝辞：この研究は、立命館大学大学院生であった三代 豊君の協力を得て進められた。風洞実験、資料整理には同大学4回生諸氏の協力を得た。あわせて深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 釜口展弘・坂田 弘：吊橋の耐風安定性に関する基礎研究，日本航空宇宙学会誌，Vol. 13, No. 133, 1965.
- 2) Sabzevari, A. and Scanlan, R.H.: Aerodynamic Instability of Suspension Bridges, Jour. of Engrg. Mechanics Div., ASCE, Vol. 94, No. EM 2, 1968.
- 3) 小西一郎・白石成人・大門考一・井上浩男：箱型構造断面に対する Flow Visualization と風洞実験，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム，pp. 215~222, 1974年12月.
- 4) 溝田武人：角柱のまわりの流れ，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム，pp. 125~132, 1976年12月.
- 5) Usuki, S.: The Application of a Variational Finite Element Method to Problems in Fluid Dynamics, International Jour. for Numerical Meths. in Engrg., Vol. 11, pp. 563~577, 1977.
- 6) 岡島 厚・高田浩之・浅沼 強：振動する物体まわりの非定常流れ，日本機械学会論文集，37巻304号，pp. 2300~2318.
- 7) Bublitz, P.: Unsteady Pressure and Forces Acting on an Oscillating Circular Cylinder in Transverse Flow, Flow Induced Structural Vibrations, IUTAM-IAHR Symposium, Karlsruhe, pp. 443~453, August, 1972.
- 8) ポフ：機械工学における空気力学実験法，村田 暹・小川徹・三宅 裕共訳，朝倉書店，pp. 132, 昭和44年2月.
- 9) 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，日本建築学会論文報告集，第150号，昭和43年8月.
- 10) Parkinson, G.V. and Brooks, N.P.H.: On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders, Transactions of the ASME, Jour. of Applied Mechanics, Vol. 28, pp. 252~258, 1961.
- 11) Novak, M.: Aeroelastic Galloping of Prismatic Bodies, Jour. of the Engrg. Mechanics Div. Proc. of the ASCE, Vol. 95, No. EM 1, pp. 115~142, Feb., 1969.
- 12) 白石成人・松本 勝・高口秀和・斎藤 恒範・武内隆文：箱型構造断面の渦励振動現象に関する実験的研究，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム，pp. 155~162, 1976年12月.
- 13) Novak, M.: Galloping and Vortex Induced Oscillations of Structures, The Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, pp. 799~809, 1971.
- 14) Otsuki, Y., Washizu, K., Tomizawa, H., Ohya, A. and Fuji, K.: Experiments on the Aeroelastic Instability of Prismatic Bars with Rectangular Sections, *ibid.*, pp. 891~898.
- 15) 中村泰治・溝田武人：ある箱型構造物の空力弾性的特性について，構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム，pp. 151~158, 1972年12月.
- 16) 大築志夫・鷲津久一郎・富沢治利・大屋昭男：箱形建物模型の風洞実験—強制振動法による空気力の測定—，同上，pp. 175~182. (1977.8.25・受付)