

角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES OF TIME MEAN FLOWS AROUND
RECTANGULAR PRISMS

溝 田 武 人*・岡 島 厚**

By Taketo MIZOTA and Atsushi OKAJIMA

1. 結 言

近年、土木・建築構造物は時代のすう勢と設計・施工技術の向上とが相まって、ますます長大化、高層化の傾向をたどっている。したがって構造物やその部材の固有周期は長くなり、さらに柔構造化、軽量化という工学的、経済的要請もあって、耐風安定性の面からみれば危険側に近づきつつあると考えられる。そのため自然風の影響下に建設される構造物については、耐風安定性の検討が不可欠となっている。このような問題に関連して、風洞および水槽を用いて今日まで多くの実験的研究が行われてきた。しかし、一般に、剝離を伴う流れの理論的な取り扱いには非常に困難である。

さて、土木・建築構造物としてよく用いられる角柱に関しては、一様流中に静止させた場合に作用する抗力は、断面比が約 0.62 のとき鋭いピーク値をもつという特異な性質が知られている^{1),2)}。また種々の断面比を有する角柱の迎角の変化に伴う抗力、揚力およびモーメントの測定も行われている^{3)~5)}。振動する角柱では、断面比や迎角を変化させて自由振動法、強制振動法により振動応答振幅⁶⁾、表面圧力^{7)~9)}、非定常空気力¹⁰⁾および後流の応答特性¹¹⁾等が求められている。そして角柱においては断面比や迎角の違いによって流体力も大きく異なること、発振流速が共振流速およびその約 1/2 付近となるように種々の流速域に及ぶこと、振動中の流体力の非線形的性質などが明らかになった。

しかし角柱に作用する定常な流体力に限っても、角柱まわりの流れとの関連において研究を行った例は少なく、しかもそれらは主として可視化による流れ観察という定性的な方法によっている。すなわち、前述の角柱断面比の変化に基づく抗力の特異な性質については、煙風

洞¹⁾や水槽²⁾によって角柱背後への流れの回り込みの状態が観察されている。また、迎角 0° の断面比が約 2.8 以上の流れ方向に細長い角柱では、前縁で剝離したせん断層は上下面で再付着するが(再付着型角柱)、2.8 以下の角柱では再付着しない(完全剝離型角柱)。そこで、流れの可視化観察から、完全剝離型角柱に頭上げ正の迎角を与えると下面側の流れの曲率が上面側のそれに比べ大きくなるので、下面の圧力が低下し、結果として下方へ力が働くと説明されている¹²⁾。このような空力特性をもつ構造物は準定常的には不安定であり、ギャロッピング振動¹³⁾を発生する可能性がある。

これらの研究にもかかわらず物体と流体との相互作用についてはいまだ不明な点が多く、たとえば、断面比が異なる角柱背後の流れの違いや、完全剝離型角柱に迎角を与えた場合の剝離領域内部の流れの構造等についても余り明確ではない。

このような背景のもとに本報では、種々の断面比の角柱を供試模型として、これらを一様流中で静止させて、そのまわりの剝離した時間平均的な流れの様相を実験により定量的に求め、角柱に作用する定常流体力との関連において検討を加えたものである。

2. 風洞、供試模型および実験条件

実験は九州大学応用力学研究所のエッフェル型風洞を使用して行った。測定部は幅 0.7 m × 高さ 3.0 m × 長さ 2.0 m で、主流方向の乱れ度は一様流速 U_∞ に対して 0.18% である。主として用いた角柱寸法は、高さ (H) × 長さ (D) = 150 mm × 60 mm (断面比 $D/H=0.4$ 角柱)、150 mm × 150 mm (1.0 角柱)、150 mm × 300 mm (2.0 角柱) および 90 mm × 360 mm (4.0 角柱) である。また D/H を 0.1~1.5 の間で細かく変化させた場合は、 $H=150$ mm を一定として D を変えた。模型の角はいずれも鋭く仕上げてある。またスパン長はいずれ

* 正会員 工修 九州大学助手 応用力学研究所

** 正会員 工博 九州大学助教授 応用力学研究所

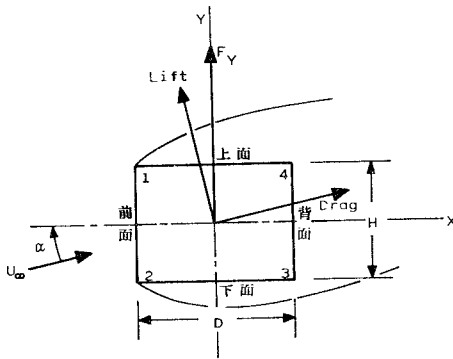


図-1 空気力の定義

も風洞幅と同一の 700 mm である。角柱の装着部の両側の風洞壁にはおのおの 30 mm ずつの凹地を設けている。そこで角柱端部に簡単な端板をつけた結果、スパン方向の背圧分布はほぼ一様となり、しかも他の実験値¹⁾とほぼ同一値となったので、流れの 2 次元性は十分よいものと考えられる。

本実験では、主流と反対方向に平均的に流れている領域、いわゆる逆流域を含む流れを測定するので、流速の測定にはタンデム型熱線流速計プローブを使用する。このプローブの出力直線性、方向特性、電気的および流体力学的応答特性ならびに測定方法の詳細はすでに報告した¹⁴⁾のでここでは省略する。この熱線プローブは、トラバース装置を使って一様流（水平）方向 2.5 m、鉛直方向 1.5 m の範囲で移動可能で、その最小駆動ピッチは 0.1 mm である。風速 U_∞ は $U_\infty = 6.90 \text{ m/s}$ とし、流れのレイノルズ数 (R_e 数) は $R_e = U_\infty H / \nu = 7.14 \times 10^4$ (0.4, 1.0, 2.0 角柱), 4.28×10^4 (4.0 角柱) である。ただし、 ν は空気動粘性係数である。この程度の R_e 数領域では、剥離点が固定している角柱において、流れに及ぼす R_e 数の影響は少ない¹⁵⁾とされているが、予備実験の結果、 $R_e = 2.31 \times 10^4 \sim 1.21 \times 10^5$ の範囲で背圧係数や後流の流速分布に大きな変化は認められなかった。測定結果の整理において距離は H 、流速は U_∞ で整理し、角柱表面の圧力 p は圧力係数 $C_p = (p - p_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ で表わす。角柱の背面中央の圧力係数を背圧係数 C_{pb} と記す。ここで、 p_∞ は一様流の静圧、 ρ は空気密度である。ストローハル数は $S_t = fH / U_\infty$ とし、 f はカルマン渦による流れの基本振動数である。

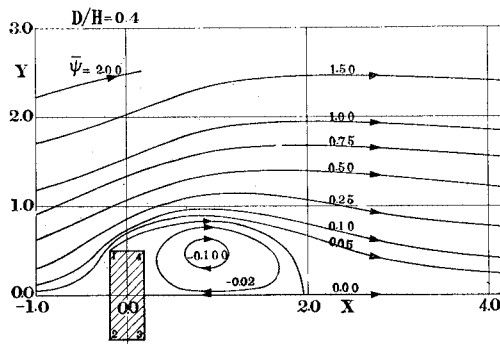


図-2(a) $D/H=0.4$ 角柱まわりの流線 ($\alpha=0^\circ$)

図-1 に示すように迎角 α° (または α ラジアン) は角柱の頭上げ角を正とし、便宜上 4 か所の角をおのおの角 1, 2, 3, 4 と称する。また、角柱に加わる単位スパン長当たりの定常流体力のうち、流れ方向の力を抗力 Drag, それと直交方向の力を揚力 Lift とする。Drag および Lift はそれぞれ $C_D, C_L = \text{Drag}, \text{Lift} / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 H$ として抗力係数、揚力係数と称する。図のように F_Y を角柱に固定した座標系 (X, Y) での Y 方向の単位スパン長さ当たりの空気力とすれば、 $F_Y = \text{Drag} \cdot \sin \alpha + \text{Lift} \cdot \cos \alpha$ となり、 $C_{FY} = F_Y / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot H'$ と無次元表示する。なおここで H' は $D \geq H$ のとき $H' = D, D < H$ のとき $H' = H$ を用いる。 u, v は X, Y 方向の時間平均流速を表わしタンデム型プローブではこの成分を検出することができる。時間平均流速 \bar{u}, \bar{v} を測定するには、角柱後流のカルマン渦による非定常流速の成分を除くために、その振動数の約 $1/10 \sim 1/20$ のローパス・フィルター (0.3 Hz) を使用する。計測時間は、1 か所につき平均 20 秒程度である。したがって、 \bar{u}, \bar{v} はカルマン渦の 70~120 周期間の時間平均流速である。 \bar{W} は $\bar{W} = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}$ とする。計測点は、 X 方向に約 20 か所、そのおのおの $X = \text{一定}$ の位置で Y 方向には約 10~20 か所である。角柱近傍で流速が急激に変化するところは適宜細かい間隔で測定する。 (X, Y) 点における流線の値 $\bar{\psi}(X, Y)$ は、 $\bar{\psi}(X, Y) = \int_{Y_0}^Y \bar{u} \cdot dY - \int_{X_0}^X \bar{v} \cdot dX$ として求める。ここで、 X_0, Y_0 は角柱表面の座標を示す。 $\bar{\psi}(X, Y) = \text{一定}$ の線が角柱まわりの流線であるがこれらを算出する作業はすべて大型電子計算機によった。

3. 実験結果

(1) 流れのパターン

a) 迎角 0° の場合

図-2~4 には $D/H=0.4, 1.0$ および 2.0 角柱まわ

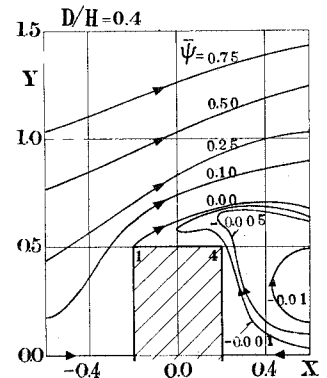


図-2(b) $D/H=0.4$ 角柱まわりの後縁付近の流線 ($\alpha=0^\circ$)

りの時間平均流線を示す。なお X 軸に対し、上下対称な流線はすべて上半分のみを示す。まず 図-2 から、0.4 角柱背後に形成された循環流の中心位置は $(X_c, Y_c) = (0.88, 0.47)$ であり、角柱表面ではなくて $\bar{u} = \bar{v} = 0$ と

なる伴流よどみ点位置は $X_{w.s.} = 1.95$ であることがわかる。また、後流の中心線上における最大逆流流速は、 $U'_{max.} = -0.42$ である。後縁付近の詳細な流線を 図-2 (b) に拡大して示すが、この付近の流れのうち、角柱

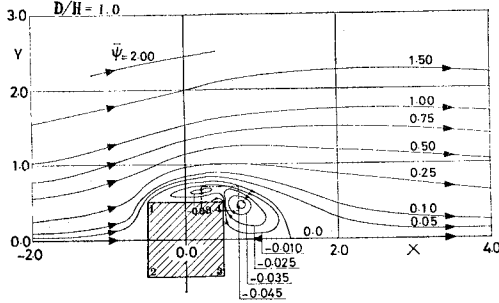


図-3 (a) $D/H=1.0$ 角柱まわりの流線 ($\alpha=0^\circ$)

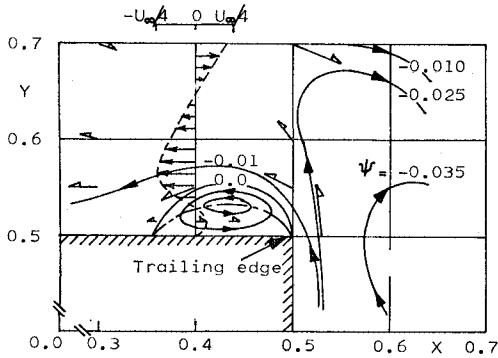


図-3 (b) $D/H=1.0$ 角柱の後縁付近の流れ ($\alpha=0^\circ$)

(図-3 (a) の2点鎖線で囲まれた部分の
流れを拡大したもの)

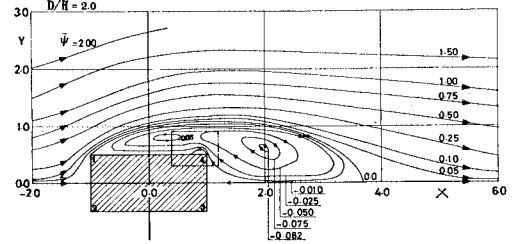


図-4 (a) $D/H=2.0$ 角柱まわりの流線 ($\alpha=0^\circ$)

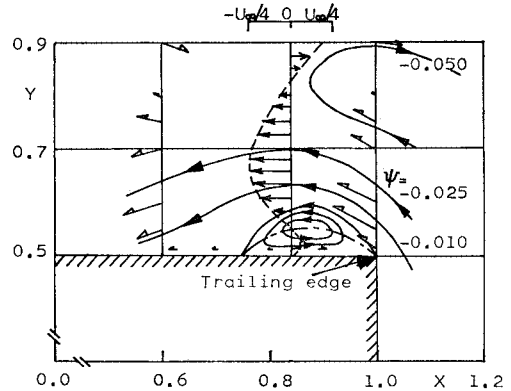


図-4 (b) $D/H=2.0$ 角柱の後縁付近の流れ ($\alpha=0^\circ$)

(図-4 (a) の2点鎖線で囲まれた部分の
流れを拡大したもの)

表-1 迎角 $\alpha=0^\circ$ の角柱まわりの時間平均流れ

D/H	Time mean flow patterns	Wake stagnation point $X_{w.s.}$	Center of circulatory flow		Maximum width of $\psi=0$	Reversing flow vel.	C_{pb}	S_t	Others
			X_c	Y_c					
0.4		1.95	0.88	± 0.47	1.62	-0.42	-1.60	0.130	
1.0		1.50	0.73	± 0.47	1.58	-0.20	-1.64	0.125	Eddy of trailing edge
			0.20	± 0.63					
2.0		3.70	2.00	± 0.60	2.22	-0.22	-0.70	0.083	Eddy of trailing edge
			0.32	± 0.80					
4.0		3.00	2.50	± 0.25	1.88	-0.08	-0.35	0.118	Reattachment point $X \approx 1.70$
			-0.35	± 0.75					

上面近くの流線はいずれも背後と連続した1個の循環流を構成している。一方、Bradbury¹⁶⁾による90°平板の場合の値はそれぞれ $(X_0, Y_0) = (0.84, 0.43)$, $X_{w.s.} = 1.96$, $U'_{max.} = -0.50$ であり、0.4角柱とほとんど等しい。なお、表-1には図-2のような時間平均流線から得られた伴流よみ点位置 $X_{w.s.}$, 循環流の中心位置 (X_c, Y_c) (ただし、1.0, 2.0, 4.0角柱には $Y > 0$ の

片側だけで2か所に循環流が形成されている), 後流の最大幅 Y_w ($\bar{\psi} = 0$ の流線で示す), 中心軸上の最大逆流流速 U'_{max} , C_{pb} , S_t , 後述する後縁付着渦の有無, 上下面で流れが再付着する場合にはその位置などを、0.4, 1.0, 2.0および4.0角柱につき比較しながら一覧表として示した。

図-3の1.0角柱では角柱背後の循環流は、0.4や2.0角柱に比べ比較的角柱に近いところに位置している。図-4の2.0角柱の後流の幅は他の角柱に比べかなり大きい。1.0, 2.0角柱とも上下面近くには背後と独立な循環流が形成されている。また図-3

(b), 4(b)にはそれぞれ図-3, 4の中で二点鎖線で囲った範囲の角柱の後縁近傍の流れの拡大図を示す。図中測定点における流速ベクトルは矢印で記入し、一点鎖線で流速零の線を示す。これらの流速ベクトルから、1.0(2.0)角柱についてそれぞれ後縁近傍の $X=0.40(0.84)$ における流れ方向の流速分布を描くと、図中点線で示すようになる。この付近の流速は、角柱の十分上方では一様流の方向を示し、 $0.53 < Y < 0.65$ ($0.55 < Y < 0.83$) では主流と逆方向に流れ、さらに表面近くの $0.50 < Y < 0.53$ ($0.50 < Y < 0.55$) で主流方向流れという複雑な流れの様相を呈している。すなわち、剝離領域内部の後縁付近で主流と反対方向の剝離が生じ、しかもそれが上面で再付着しているためである。1.0, 2.0角柱ではこのように定性的には同様の流れとなるが、2.0角柱については逆流領域が大きく、下流にまで及んでおり後流の幅も広い。

次に再付着型角柱まわりの流れとして4.0角柱の場合を図-5に示す。この場合流れは時間平均的にみれば後縁から約0.3上流の上下面で再付着しており、圧力分布にみられる角4付近における圧力回復の傾向¹⁾と

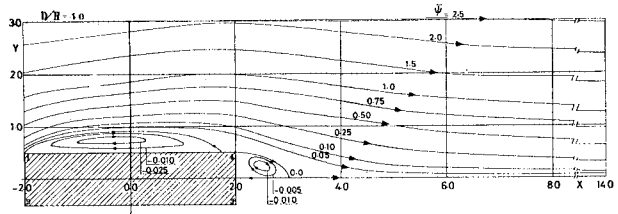


図-5 $D/H=4.0$ 角柱まわりの流線

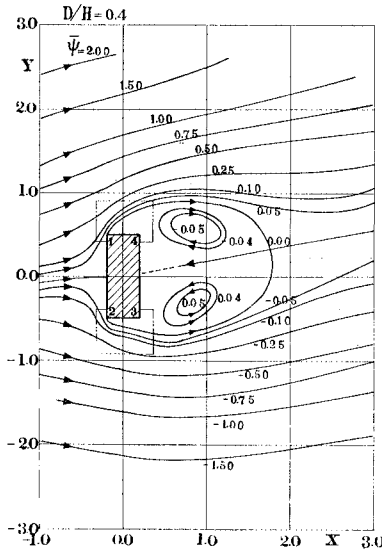


図-6(a) $D/H=0.4$ 角柱まわりの流線 ($\alpha=10^\circ$)

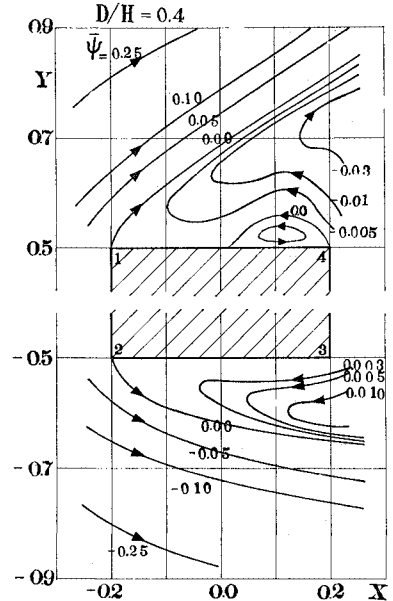


図-6(b) $D/H=0.4$ 角柱の上下面付近の流線 ($\alpha=10^\circ$)
(図-6(a)の二点鎖線で囲まれた部分の流線)

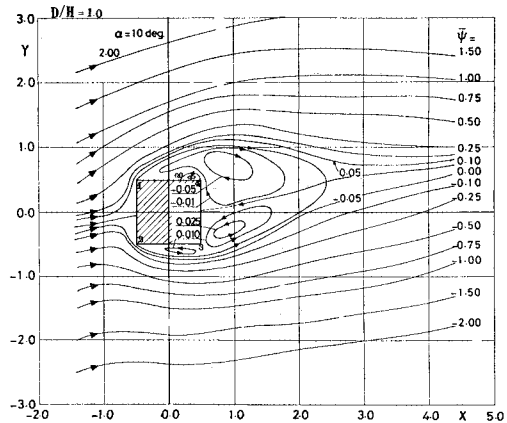


図-7 $D/H=1.0$ 角柱まわりの流線 ($\alpha=10^\circ$)

一致している。上下面近くには細長い循環流が形成されているが、角柱背後には比較的小さい循環流が再び形成されている。したがって、4.0角柱の後流幅は狭く、 $D/H > 2.8$ における S_t 数の値が急増する現象¹⁾に対応

している。なお、時間平均的に観察すれば、4.0 角柱まわりの流れは 図-5 に示すようになるが実際の流れは文献 20) に示すごとく、角柱上下面近傍の循環流は定常な状態を保っているのではなく、カルマン渦の振動数 f で振動している。

b) 迎角 10° の場合

次に一様流に対して角柱に迎角をつけた場合の流れを調べる。その代表例として、0.4, 1.0 角柱の $\alpha=10^\circ$ の流れを 図-6 (a), (b), 図-7 に示す。図-6 の 0.4 角柱については、 $\alpha=0^\circ$ の 図-2 と比較すると、伴流よみ点 $X_{w.s.}$ はわずかに角柱背面に近づき、渦の中心位置 X_0 も、 $X_0=0.90 \rightarrow 0.80$ というように背面に若干近づく。他方 図-7 の 1.0 角柱では逆に、迎角をつけることによって伴流よみ点 $X_{w.s.}$ は著しく後退し、渦の中心位置 X_0 も後退している ($X_0=0.72 \rightarrow 0.90$)。また、図-3 で示したように、1.0 角柱では $\alpha=0^\circ$ ですでに角柱の上下面近くに背面と独立な循環流が形成されている。この傾向は 図-7 で示すように迎角がつくと、下面側では $\alpha=0^\circ$ と同様であるが、上面側では背面と連続した流れになっている。また角 4 では後縁付着渦が形成されている。一方、0.4 角柱では、図-6 (b) のように、下面側における流れが背面と連続した循環流を構成し、角 4 には 1.0 角柱と同様後縁付着渦が形成されている。

(2) 圧力分布

図-8, 9 には完全剥離型角柱の中で $dC_{FY}/d\alpha > 0$ となる代表例として 0.4 角柱、 $dC_{FY}/d\alpha < 0$ の例として 1.0 角柱の表面圧力の測定結果を示す。まず 図-8 の 0.4 角柱では、 $\alpha=0^\circ$ で上下面の圧力分布が角 3, 4 に近づくにつれて若干低下し、背面ではほぼ平坦な分布を示す。上下面と背面の境で圧力差はほとんどない。 α を増加させるにつれて、前面のよみ点注1)は角 2 側へ移

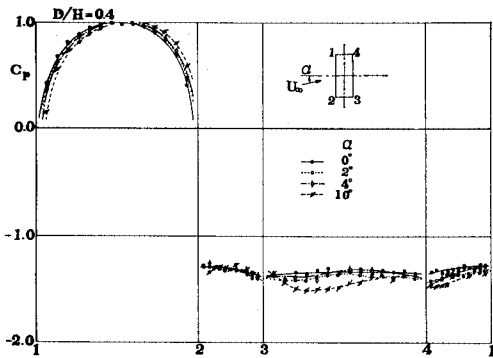


図-8 D/H=0.4 角柱の表面圧力 ($\alpha=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 10^\circ$)

注1) ここでは、ごく常識的に前面の圧力分布が最大となる位置をよみ点とする。

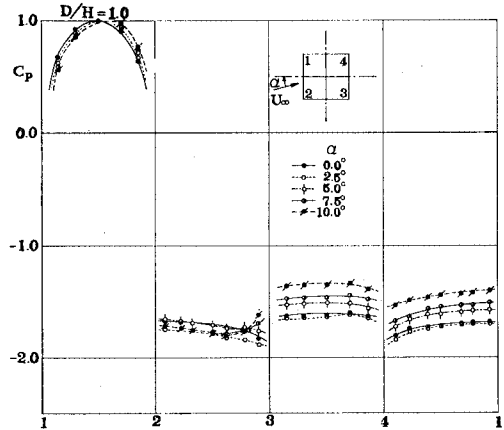


図-9 D/H=1.0 角柱の表面圧力 ($\alpha=0^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ$)

動する。そして下面における圧力の分布は $\alpha=10^\circ$ に至るまでほとんど変化しないが、上面の圧力分布は α の増加とともに一様に低圧となる。また角 1 から角 4 に向かって圧力はより低くなる。そのため角 4 における圧力の段差は増し、角 3 ではほぼ連続的につながっている。その結果迎角の変化に対し、上面の圧力が下面に比べより低くなり、 $dC_{FY}/d\alpha > 0$ となる。

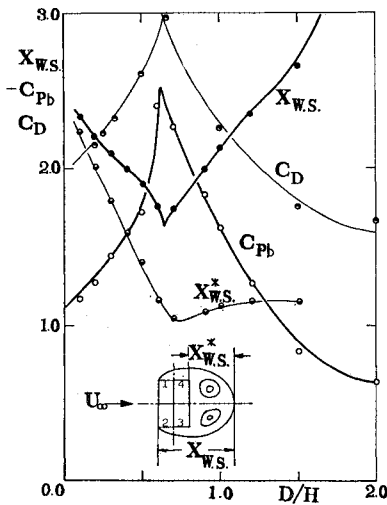
一方、1.0 角柱では 図-9 に示すようにまず $\alpha=0^\circ$ で上下面の圧力分布は、0.4 角柱と同様に角 3, 4 に向かって徐々に低下している。 $\alpha=0^\circ$ ですでに角 3, 4 を境に上下面と背面の間に圧力の段差が存在する。 α を増加させても、上面および背面の圧力の分布形状には大きな変化はなく、 $\alpha=2.5^\circ$ を除いて一様に回復する。下面では、 $\alpha=2.5^\circ$ でわずかにいったん低下するが、 $\alpha=5^\circ$ に至るまで分布形状にはあまり変化はなく上面に比べより低圧である。 $\alpha=7.5^\circ$ に至って角 3 近くで、圧力が回復する傾向が現われる。 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ へと α を増加させるにつれ後縁での圧力の段差は角 3 で増し、角 4 では減少する。1.0 角柱に関するこれらの結果は、他の実験値¹³⁾とほぼ一致しているが、背面の圧力の分布形状に若干差異がみられる。

圧力分布に関する以上の結果をまとめると、両角柱とも α の増加とともに下面の圧力はほとんど変化しない。上面および背面の圧力は、1.0 角柱では一様に回復することに対し、逆に 0.4 角柱の場合はより低下する。したがって、 $dC_{FY}/d\alpha$ は 1.0 角柱では負となり、0.4 角柱では正となる。

4. 考 察

(1) 流れと抗力特性

前章では種々な断面比の角柱まわりの時間平均的な流



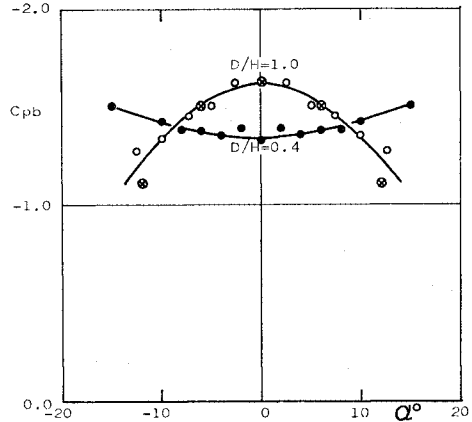
図一10 角柱断面比と伴流よどみ点、背圧係数および抗力係数 ($\alpha=0^\circ$)

れのパターン、および圧力分布について述べた。それをもとにして、ここでは断面比の変化に伴う抗力係数の特異な変化と流れのパターンの対応について検討する。

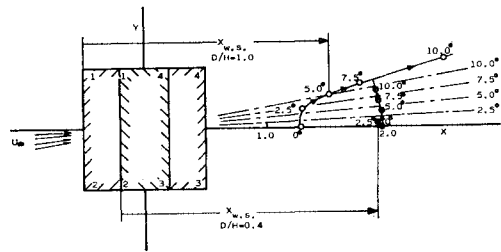
中口¹⁾は、抗力係数が特異な変化をすること、剥離せん断層が、角柱背後で巻き込む曲率が增大することとの関係を煙観察によって明らかにしている。一方、Bearman ら²⁾は、この場合、後流の非定常な渦の巻き込み位置が角柱背面に最も接近することを水槽実験によって観察している。

そこで、まず図一10には角柱断面比 $D/H=0.1\sim 2.0$ について、伴流よどみ点位置 $X_{w.s.}$ と背圧係数 C_{pb} 、抗力係数 C_D を比較して示す。図に示すごとく、 C_{pb} の値は $D/H=0.62$ で最小値となるのに対し、伴流よどみ点も $D/H=0.62$ で角柱に接近している。そしてそれらの位置の表示として流れが剥離する角柱の前面を基点とした距離 $X_{w.s.}$ をとると、その値は $D/H=0.62$ で鋭く、カスプ (Cusp) 状に最小値となる。 $X_{w.s.}$ と ($-C_{pb}$) の変化はちょうど反対の形状をしている。前縁で剥離した流れが後流となって逆流する領域を形成するが、その形成領域が角柱に近づくほど、背圧は低下し、抗力は大きな値となるといえる。なお、 D/H に対してたとえば角柱背面から測った伴流よどみ点までの距離 $X_{w.s.}$ をプロットすると、T型ピトー管を使った圧力の測定による林ら¹⁾の結果と同様に $X_{w.s.}$ の最小値が $D/H=0.72$ で生ずるなど、 C_{pb} の変化との整合性はあまりよくない。

そして既述のように角柱の迎角を $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=10^\circ$ へと増加させると、伴流よどみ点と渦中心位置は 0.4 角柱では接近するのに対し、1.0 角柱では後退して、断面比によって逆の変化を示した。これらの両角柱の α の変



図一11 角柱の迎角と背圧係数 ($D/H=0.4, 1.0$)
(\otimes 印は文献 13) による)



図一12 迎角の変化に伴う伴流よどみ点の移動 ($D/H=0.4, 1.0$)

化に対する背圧係数 C_{pb} と伴流よどみ点 $X_{w.s.}$ の変化の様子を図一11, 12 に示す。 C_{pb} は図一11 に示すように、1.0 角柱では、 $\alpha=0^\circ$ に凸部をもち、0.4 角柱では凹部を有するように逆の傾向を示す。すなわち迎角 α をつけた場合、0.4 角柱と 1.0 角柱の C_{pb} の値は前者ではより低下し、後者では回復する傾向をもつ。他方 $X_{w.s.}$ の値は図一12 に示すようにちょうど逆で、前者では前進し、後者は後退する。

このように断面比 D/H および迎角 α のいずれを変化させても背圧係数 C_{pb} は変化するが、その場合、背圧係数 C_{pb} と伴流よどみ点 $X_{w.s.}$ の変化は非常によく対応性を示し、しかも敏感であることが明らかとなった。

(2) 流れと揚力特性

a) 角柱断面比と揚力特性

図一13には角柱断面比を $D/H=0.2\sim 50$ の広い範囲にわたって変えたときの $\alpha=0^\circ$ 付近の $dC_{FY}/d\alpha$ の変化を示す。図中 \circ 印は角柱に加わる空気力から、 \bullet 印は表面圧力分布から求めた値である。前者は、角柱に加わる空気力を角柱支持棒につけたストレン・ゲージにより直接検出したもので、粘性せん断力による成分が含まれている。後者は表面圧力分布の積分により求めたもので粘性せん断力が入っていない。粘性せん断力による寄与

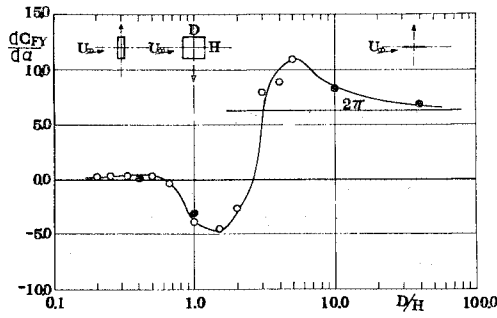


図-13 角柱断面比と $dC_{FY}/d\alpha$ ($\alpha \approx 0^\circ$)

分はきわめて微小であり、測定法は違っていても両者の $dC_{FY}/d\alpha$ はほぼ同じ値になっている。 D/H の増加に伴い 90° 平板 ($D/H=0$) から 0° 平板 ($D/H=\infty$) へと角柱の形状が大きく変化する。しかし、 $dC_{FY}/d\alpha < 0$ となるのは $D/H \approx 0.6 \sim 2.8$ の間の狭い範囲に限定されており、 $D/H = 1.5 \sim 1.6$ で $dC_{FY}/d\alpha$ の値は最小となる。 $D/H > 2.8$ では再付着型の流れとなって、 $dC_{FY}/d\alpha > 2\pi$ となるが、 0° 平板に近くなるにつれ理論値、 2π に漸近する。 $0 < D/H < 2.8$ の完全剥離型の角柱において従来から行われている $dC_{FY}/d\alpha < 0$ となる流れの定性的説明^{(12), (18)} に従えば、 $0 < D/H < 2.8$ のすべての角柱で $dC_{FY}/d\alpha < 0$ となるわけである。しかし、図-13の実験結果にみるように、 $D/H < 0.6$ では、非常に小さな値であるが、 $dC_{FY}/d\alpha > 0$ となっていることは注目すべきことである。

b) 角柱近傍流れ

図-14, 15には0.4, 1.0角柱の上下面付近の流速分布 \bar{W} を $\alpha=0^\circ, \alpha=10^\circ$ について示す。1.0角柱の場合 $\alpha=10^\circ$ では、 X —一定における \bar{W} の最大値は $-0.5 < X < -0.1$ の領域では上下面ともほぼ同一値を示すが、 $0.1 < X < 0.5$ では上面側に比べ下面側の方がより加速されていることがわかる。一方、0.4角柱においては $\alpha=10^\circ$ の場合、 $-0.2 < X < 0.0$ で上面側の \bar{W}

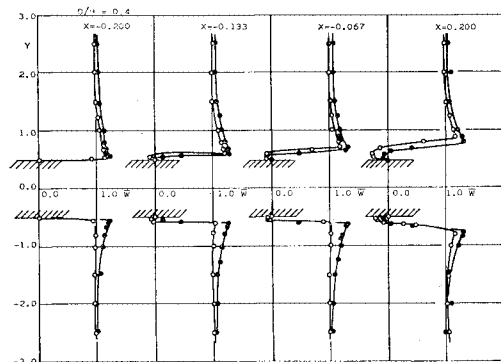


図-14 $D/H=0.4$ 角柱の上下面付近の流速分布 ($\alpha=0^\circ$ (●), 10° (○))

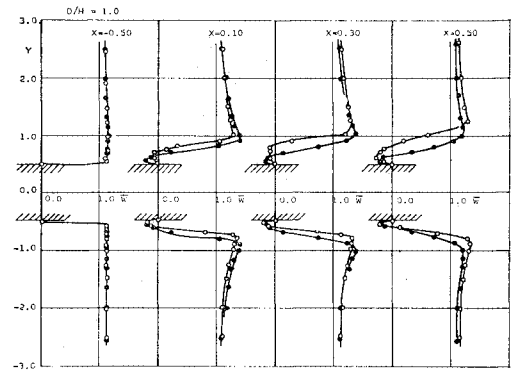


図-15 $D/H=1.0$ 角柱の上下面近くの流れ分布 ($\alpha=0^\circ$ (●), 10° (○))

の最大値が下面側のそれより大きく、流れは上面側で加速され、1.0角柱と逆の傾向を示す。この様相は、図-8, 9に示した圧力分布や図-13に示した0.4, 1.0角柱の両者の $dC_{FY}/d\alpha$ の符号の相違とよく対応していることがわかる。

他方、Owen⁽¹⁹⁾ は角柱断面比の変化に応じ0.6角柱で抗力係数に鋭いピークが発生することについて、「垂直 (90°) 平板から断面の厚さを増加させるにつれて、剥離せん断層の取り込み作用 (entrainment) によってせん断層と物体表面の間の領域への強い逆流が誘起され、それが物体後縁からの二次的なせん断層を発生させる。断面比が0.6になったとき後縁からのせん断層が前縁からのそれと交わって物体表面から遠ざかり、その結果として位置も形状も変化しやすく、圧力差も発生しやすくなる」と推測している。角柱まわりには前縁から剥離した流れによって広い剥離領域が形成されるが、その剥離領域の内部では角柱背後の逆流によって角柱後縁で再び流れの剥離が生じて、二次的な剥離せん断層が生ずると考えられる。3.(1) a), b) 項で述べた後縁付着渦はこの二次的な剥離せん断層の存在を示唆するものと考えられる。そこで、 $\alpha=0^\circ$ において D/H の変化に基づく後縁

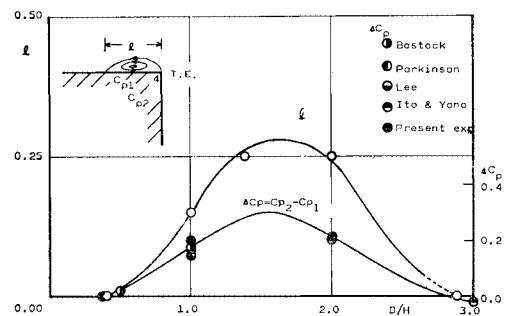


図-16 角柱断面比と後縁付着渦の長さ、圧力の段差

付着渦の長さ l 、および後縁を境にした、上面と背面^{注2)}の後縁付近の圧力の差 ΔC_p を図—16 に示す。 l 、 ΔC_p も $D/H=1.5\sim 1.6$ で最大値をとる。また、この断面比は、図—13 に示したように $dC_{FY}/d\alpha$ が最小値となる D/H とほぼ一致する。すなわち前述の Owen が角柱について推測した後縁から発生するせん断層の役割は、むしろ $dC_{FY}/d\alpha < 0$ となることと上記のように対応している。

次に、0.4、1.0 角柱の近傍流れについて $\alpha=10^\circ$ の場合をまとめる。0.4 角柱では、 $\alpha=0^\circ$ に比べて、背後の伴流よどみ点や渦の中心位置も若干角柱に接近し(図—6(a))、上面側の剝離領域の外側の流速は下面側のそれに比べて増速する(図—14)。上面と背面の圧力は低下するが、下面はあまり変化せず(図—8)、角 4 には後縁付着渦が形成されている(図—6(a))。1.0 角柱の $\alpha=10^\circ$ の場合は逆に、 $\alpha=0^\circ$ に対して背後の伴流よどみ点や渦の中心位置は大きく後退し(図—7)、上面側の剝離領域の外側の流速は下面側のそれに比べ遅く(図—15)。上面と背面の圧力は大きく回復する(図—9)。このような相違によって 0.4 角柱は $dC_{FY}/d\alpha > 0$ 、1.0 角柱は $dC_{FY}/d\alpha < 0$ と逆になる。

c) 伴流よどみ点の移動

ここでは角柱の迎角 α を細かく変化させたときの伴流よどみ点 $X_{w.s.}$ の移動と C_{FY} の変化との関連性に注目する。 α の変化に伴う $X_{w.s.}$ の移動の様子は背圧係数 C_{pb} との関連性において 図—12 にすでに示した。同図にみられるように、まず 1.0 角柱では、 $X_{w.s.}$ は α の増加とともに大きく後退し、かつ α で示す流れの中心線よりもさらに上方に位置する。すなわちこの場合の循環は反時計回りである。一方 0.4 角柱の場合、 $X_{w.s.}$ は逆に流れの中心線よりも下方に位置し、循環は時計回りを示す傾向である。これらの循環の方向はおのおのの角柱の C_{FY} の値が負および正となることによく対応している。

5. 結 論

風洞実験により一様流中にある種々な断面比の角柱まわりの時間平均流れおよび平均圧力分布を測定した。流速の測定には、逆流域でも測定可能なタンデム型熱線流速計プローブを用いた。流速の測定結果から、完全剝離型の 0.4、1.0、2.0 角柱と再付着型の 4.0 角柱の剝離領域内部を含めた時間平均流れが定量的に明らかになった。そして、抗力、揚力等の断面比や迎角の変化に対す

る特性と流れのパターンとの対応について議論した。得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) 角柱断面比の相違に基づく背圧係数および抗力係数の変化と伴流よどみ点位置の変化はよく対応している。しかもその対応関係は伴流よどみ点位置を前縁の剝離点から測った水平距離によってよく表示される。

(2) 1.0~2.0 角柱では後縁におけるせん断層の 2 次的な剝離に基づく後縁付着渦の存在が確認され、この渦の長さと同様に後縁を境にした上(下)面と背面の圧力の段差および $dC_{FY}/d\alpha$ の対応関係を示した。

(3) 迎角 10° における 0.4、1.0 角柱のまわりの時間平均流れが明らかになった。そして前者では $dC_{FY}/d\alpha > 0$ 、後者では $dC_{FY}/d\alpha < 0$ になる場合の流速、表面圧力および後縁付近の流れについて比較を行った。

(4) 迎角の変化に伴う伴流よどみ点の位置の変化が、0.4、1.0 角柱について明らかになった。そして、よどみ点は迎角の増加とともに前者では前進し、かつ反時計回り方向の循環を示し、後者では逆に大きく後退し時計回り方向の循環を示す。これらの結果は、いずれも背圧係数が前者でより低下すること、後者でより回復すること、および揚力がおのおの正および負になることなどよい対応性を示した。

謝 辞：本研究を進めるにあたり種々ご助言下さった九州大学応用力学研究所 中村泰治教授、大分工業大学工学部 友成義正講師に厚くお礼申し上げます。また、始終ご激励下さった有明工業高等専門学校校長 吉村虎蔵教授(研究当時、九州大学工学部土木工学科教授)に謝意を表する次第である。実験結果の解析は九州大学応用力学研究所電子計算機システム FACOM 230-48、MELCOM COSMO 900 によった。研究の一部は文部省科学研究費によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 中口 博・橋本貴久裕・武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験、航空学会誌、第 16 巻、第 168 号、pp. 1~5、1968 年 1 月。
- 2) Bearman, P.W. and D.M. Trueman: An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, The Aeronautical Quarterly, Vol. 23, pp. 229~237, August 1972.
- 3) Bostock, B.R. and W.A. Mair: Pressure Distributions and Forces on Rectangular and D-shaped Cylinders, The Aeronautical Quarterly, Vol. 23, pp. 1~6, February 1972.
- 4) 伊藤 学・矢野善章：構造断面における風圧分布と風力、土木学会第 25 回年次講演会講演集、第 1 部、pp. 433~436、昭和 45 年 11 月。
- 5) 中村泰治・溝田武人・吉村 健：矩形および H 型断面柱の空力 3 分力特性について、九州大学応用力学研究所報、第 40 号、pp. 245~255、昭和 48 年 11 月。

注 2) 角柱背面の圧力分布は 0.5~0.9 角柱の範囲で平坦ではなく、特に 0.6 角柱では中央に大きな低圧部が存在する^{11), 2)}。

- 6) 藤井邦雄ほか：箱型建物模型の風洞実験，清水建設研究所報，第18号，pp. 109~142，昭和46年10月。
- 7) 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，pp. 15~23，1978年10月。
- 8) Lee, B.E. : The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 69, Part 2, pp. 263~282, 1975.
- 9) Vickery, B.J. : Fluctuating and Drag on a long Cylinder of Square Cross-Section in a Smooth and in a Turbulent Stream, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, Part 3, pp. 481~494, 1966.
- 10) 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，pp. 27~36，1973年11月。
- 11) Nakamura, Y. and T. Mizota : Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 101, No. EM 6, pp. 855~871, December 1975.
- 12) Parkinson, G.V. : Aeroelastic Galloping in One Degree of Freedom, *Proceedings of Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*, Vol. II, HMSO, London, pp. 582~609, 1965.
- 13) Parkinson, G.V. and N.P.H. Brooks : On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 28, pp. 252~258, June 1961.
- 14) 溝田武人：はく離流中における非定常流速測定法の研究，土木学会論文報告集，第278号，pp. 53~60，1978年10月。
- 15) Delany, N.K. and N.E. Sorensen : Low-Speed Drag of Cylinders of Various Shapes, *National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 3038*, pp. 1~22, 1953.
- 16) Bradbury, L.J.S. : Measurements with a Pulsed-Wire and a Hot-Wire Anemometer in a Highly Turbulent Wake of a Normal Flat Plate, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 77, Part 3, pp. 473~497, 1976.
- 17) 林 正徳・大屋裕二ほか：二次元柱の抗力および後流に関する一実験，九州大学工学集報，第50巻，第6号，pp. 767~773，昭和52年12月。
- 18) Den Hartog, J.P. : *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1956.
- 19) Owen, P.R. : *The Aerodynamics of Aircraft and Other things*, *Aeronautical Journal*, Vol. 77, pp. 383~405, August 1973.
- 20) 溝田武人・岡島 厚：角柱まわりの非定常流れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第312号，pp. 49~57，1981年8月。

(1980.5.20・受付)