論 文

CONTRIBUTED PAPERS

平板上に直立する有限直列二角柱に働く空気力^{*1} Aerodynamical Forces on Two Finite Rectangular Prisms with Straight Arrangement Placed Vertically on a Flat Plate

佐 野 学^{*2}・高 畑 義 忠^{*3}
Manabu SANO and Yoshitada TAKAHATA

Key Words: Boundary Layers, Aerodynamic Characteristics, Rectangular Prisms, Drag, Bluff Body

Abstract

It becomes important in engineering to clear the flow field around finite multi-bodies placed vertically on a flat plate. In these cases, the flow field around them are different from that around a single body by fluid dynamic interaction. In this paper, aerodynamical forces on two finite rectangular prisms placed vertically on a flat plate are experimentally studied on a straight arrangement parallel to the approaching flow in the turbulent boundary layer. Surface static pressure are measured. Then pressure drag, falling moment and force-exerted points are calculated. Aerodynamical forces for various pitch (gaps of two bodies) are related with characteristic factors of the turbulent boundary layer. In addition, flow patterns around them are visualized by oil tracer method.

1. 結 言

自然風下に存在している高層建築物、鉄塔、交通車両などに働く流体力あるいはそのまわりの気流の挙動を明らかにすることは工学的な興味だけではなく、これらの設計・施工に際して重要なことである。現実にはこれらの物体が単独で気流中に存在する場合と複数個が存在する場合があり、後者の場合には相互干渉を生じそのまわりの流れは単独の場合とは異なって複雑な様相を呈する。このようなことから複数の物体が近接した状態で流れ場中に存在する場合の相互干渉の問題を明らかにしておくことが必要となってきた。このような問題については近年数多くの研究結果が報告されている¹⁻⁴⁾

本研究で取り扱う三次元角柱まわりの流れに関する研究報告としては、角柱群まわりの流れに関する実験的研究がある⁵⁾。三次元角柱の場合、二次元角柱と比較してピッチによる抗力・揚力の変化が小さく、角柱の形状・位置・配列の違いによる角柱群周辺のうずと後流の変化が明らかにされている。また、乱流境界層内に完全に埋没した二次元平板に働く抗力に関しては、乱流境界層特性量 hu_r/ν の指数関数として表されることが報告され⁶⁾、三次元平板についても同様の結果が報告されている⁷⁾。また、単独有限角柱の場合についても定性的には同様の結果が得られることが明らかにされている⁸⁾

本研究では複数物体の相互干渉の最も単純な場合の一例として、乱流境界層内に完全に埋没した状態で流れに直列に配置された二つの有限角柱に働く干渉効果を乱流境界層特性と関係づけて説明することを目的としている。具体的には平板に沿って十分発達した乱流境界層のなかに完全に埋没した状態で有限二角柱を直列に配置し、両角柱の間隔（ピッチ）を種々に変化させて表面静圧を測定し抗力などを計算する。また、油膜トレーサ法により角柱まわりのフローパターンを得て上記の結果を補足している。

2. 記 号

C_D : 圧力抗力係数 ($=D/(1/2)\rho U_0^2 h d$)
 C_{Dr} : 圧力抗力係数 ($=D/(1/2)\rho u_r^2 h d$)
 C_{Dr0} : 単独角柱の圧力抗力係数
 C_{DrAb} : 上流側角柱後面のみの圧力抗力係数
 C_{DrBf} : 下流側角柱前面のみの圧力抗力係数
 C_M : モーメント係数 ($=M/(1/2)\rho U_0^2 h^2 d$)
 C_{Mr} : モーメント係数 ($=M/(1/2)\rho u_r^2 h^2 d$)
 C_p : 圧力係数 ($=(p-p_0)/(1/2)\rho U_0^2$)

^{*1} 昭和 61 年 1 月 8 日原稿受理

^{*2} 金沢大学工学部

^{*3} 石川島播磨重工業(株)

d : 角柱の底辺の長さ
 D : 圧力抗力
 h : 角柱の高さ
 h^* : 壁面から力の作用点までの距離
 H : 形状係数
 M : モーメント
 p : 表面静圧
 p_0 : 主流の静圧
 Re : レイノルズ数 ($= hu_\tau/\nu$)
 R_θ : 境界層レイノルズ数 ($= U_0\theta/\nu$)
 S : 直列二角柱の間隔 (ピッチ)
 u : 流速
 U_0 : 主流流速
 u_τ : セン断速度 ($= \sqrt{\tau_0/\rho}$)
 Δu_{rms} : 主流方向の乱流成分
 x, y, z : 原点における座標系
 h/d : アスペクト比
 δ : 境界層厚さ
 δ^* : 排除厚さ
 τ_0 : 壁面せん断応力
 ρ : 流体の密度
 ν : 流体の動粘性係数
 θ : 運動量厚さ
 添字
 A: 上流側角柱
 B: 下流側角柱
 b: 角柱後面
 f: 角柱前面

3. 実験装置および実験方法

風洞は、断面 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 長さ 2.59 m の吹出し型風洞である。平板としては厚さ 10 mm のアクリル板を用い、先端部の影響を除くために約 17° のエッジに加工してある。また、平板先端から原点 (角柱取付位置) までの距離は 1646 mm である。第1図に座標系および記号の定義を示す。

抗力の測定のために用いた角柱は、乱流境界層特性 hu_τ/ν を広範囲に変化させるために高さ h を $h=16, 22, 28, 40, 59, 77\text{ mm}$ とし、幅は $d=40\text{ mm}$ で一定とした。材質はアクリルであり、角は鋭く加工してある。表面圧力分布の測定用の角柱には直径 0.5 mm の圧力孔が一面に 81 個あけてある。圧力測定はこれら圧力孔における静圧をステンレス管およびビニール管を介してベッツ形マノメータに導くことによりおこなった。

角柱表面上の圧力孔から測定した圧力から抗力係数 C_D , C_{Dr} を計算する。圧力係数 $C_p = (p - p_0)/(1/2\rho U_0^2)$ として、

第1図 座標系と記号

$2\rho U_0^2$ として、 $C_D = D/(1/2)\rho U_0^2 h d = \int_0^1 \int_{-0.5}^{0.5} (C_{pf} - C_{pb}) d(z/d) d(y/h)$, $C_{Dr} = D/(1/2)\rho u_\tau^2 h d$ と定義される。また、モーメント係数についても同様に $C_M = M/(1/2)\rho U_0^2 h^2 d = \int_0^1 \int_{-0.5}^{0.5} (C_{pf} - C_{pb}) d(z/d) \cdot (y/h) d(y/h)$, $C_{Mr} = M/(1/2)\rho u_\tau^2 h^2 d$ と定義される。具体的には数値積分により計算することになる。

油膜法による可視化は平板上および角柱の各面についておこなった。実験条件は圧力測定と同一である。トレーサとしてはオレイン酸と二酸化チタンの混合剤を使用している⁹⁾。

4. 乱流境界層特性

二角柱の干渉に関する実験の前に平板上に発達する乱流境界層の特性を調べるにより、圧力こう配のない完全に発達した乱流境界層が実現されているかどうかの検討をおこなう。

測定部での圧力変化は主流動圧の 0.5% 以下であり、圧力こう配については良好な状態が実現されていると考えられる。第1表に示すように主流流速 U_0 を 19.2 m/s , 20.6 m/s の2通りとし、平板先端にトリッピングワイヤを設置することにより乱流境界層特性を変化させている。第2図に示すように乱流境界層内では境界層外端近傍を除いては Klebanoff の測定結果¹⁰⁾とも一致している。速度分布についても一般に乱流境界層の速度分布として知られているべき乗則に合

第1表 乱流境界層特性

No	U_0 m/s	δ mm	δ^* mm	θ mm	R_o	U_τ/U_o	H
1		41.3	6.0	3.8	4960	0.0406	1.59
2	19.2	52.8	6.8	4.3	5620	0.0402	1.59
3		88.6	10.2	6.3	8230	0.0388	1.63
4	20.6	98.0	14.3	9.6	13500	0.0387	1.49

第2図 速度分布および乱れ

致している。

第1表に原点における乱流境界層特性を示す諸量, すなわち, 境界層厚さ $\delta(=0.99U_0)$, 排除厚さ $\delta^*(=\int_0^\infty [1-(u/U_0)]dy)$, 運動量厚さ $\theta(=\int_0^\infty (u/U_0)[1-(u/U_0)]dy)$, 境界層レイノルズ数 $R_\theta(=U_0\theta/\nu)$, 形状係数 $H(=\delta^*/\theta)$ およびせん断速度 $u_\tau(=\sqrt{\tau_0/\rho})$ を示す。乱流境界層の壁面に近い位置(内層領域)では, 一般に次式で表される速度分布式(壁法則)が成立する。ここで,

$$u/u_\tau = A \log_{10}(yu_\tau/\nu) + C \quad (1)$$

定数 A, C については種々の提案がなされているが,

Clauser¹¹⁾による $A=5.62, C=4.9$ あるいは Coles¹²⁾ による $A=5.75, C=5.1$ が広く採用されているようである。本研究でも上式により最小二乗法を用いてせん断速度 u_τ を算出し, Clauser の定数による場合と Coles の定数による場合の計算値の平均値を採用している。第3図に u/u_τ と yu_τ/ν の関係を示す(図中の実線は Clauser の式を示している)。また, 境界層内の流れの二次元性は測定部中心線上 $-100 < z < 100$ mm の範囲で良好に実現されている。

5. 実験結果および考察

5.1 角柱周辺のフローパターン 本研究では, 角柱の高さ h を 28, 40, 77 mm とし, ピッチ S/h を 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 とした場合について角柱まわりのフローパターンを比較する。

第4図は $h=40$ mm の場合の直列二角柱周辺のフローパターンである。 $S/h=2.0$ では角柱 A のアーチ形渦の根元部分と馬てい形渦, 角柱 B のアーチ形渦の根元部分は観察されるが角柱 B の馬てい形渦は明確ではない。しかし, それに類似したパターンが見られる。また, 角柱 A 前面からはく離流が角柱 B の前面に衝突することにより, 角柱 A 後面方向への逆流を生じている。ピッチ S/h が小さい場合には角柱 A からはく離流が角柱 B の上面に付着するようになり, この逆流は消滅しているようである。 $S/h=1.0$ の場合には角柱 A のアーチ形渦の根元部の間隔が単独角柱のそれよりも大きくなることが明らかとなった。これは角柱 B から角柱 A 後面への逆流の作用によるものと考えられる。 $S/h=0.5$ の場合には角柱 A のアーチ形渦の根元部は不明確となる。図としては示さないが $h=77$ mm の場合にはアーチ形渦の根元部は明らかに存在している。 $S/h=0.25$ の場合についても同様である。このように h/d が大きい場合に S/h が小さくなくてもアーチ形渦の根元部が観察されることから, このアーチ形渦の根元部は角柱側端でのく

第3図 乱流境界層の壁法則

$S/h=0.25$ $S/h=0.5$ $S/h=1.0$ $S/h=2.0$

第4図 平板上のフローパターン
($h=40\text{ mm}$, $u_\tau/U_0=0.0387$, $hu_\tau/\nu=2120$)

離と関係づけて考えることができる¹³⁾。

5.2 直列二角柱の流力特性を支配するパラメータ
滑らかな平板上に発達する圧力こう配のない乱流境界層の特性は一般に主流流速 U_0 , せん断速度 u_τ , 境界層厚さ δ , 流体の動粘性係数 ν により記述される。また、有限直列二角柱の幾何学的関係を規定するパラメータは高さ h とピッチ S の二つである。したがって、流体の密度 ρ とすれば角柱に作用する抗力 D とモーメント M は式(2), (3)のように表される。

$$D=f_1(U_0, u_\tau, \delta, \nu, h, S, \rho) \quad (2)$$

$$M=f_2(U_0, u_\tau, \delta, \nu, h, S, \rho) \quad (3)$$

式(2), (3)に関して次元解析をほどこせば式(4), (5)のように書ける。

$$C_{Dr}=f_3(u_\tau/U_0, hu_\tau/\nu, h/\delta, S/h) \quad (4)$$

$$C_{Mr}=f_4(u_\tau/U_0, hu_\tau/\nu, h/\delta, S/h) \quad (5)$$

一方、平板上に発達する圧力こう配のない乱流境界層については4.の式(1)で表される関係式が成立する¹²⁾ことから式(4), (5)に含まれる u_τ/U_0 , hu_τ/ν , h/δ なる3個のパラメータは相互に関係づけられ独立に変化させることができるのは2個だけとなる。したがって C_{Dr} , C_{Mr} は式(6), (7)のように三つのパラメータにより支配されることになる。

$$C_{Dr}=f_5(u_\tau/U_0, hu_\tau/\nu, S/h) \quad (6)$$

$$C_{Mr}=f_6(u_\tau/U_0, hu_\tau/\nu, S/h) \quad (7)$$

直列二角柱の場合には下流側角柱は上流側角柱の後流域の中に置かれることになるのでその周辺の流れは乱流混合の大きい複雑な流れとなり、単独角柱のようにその周辺流れが平板上に発達した乱流境界層の特性を表すウォールバリアブル u_τ , ν の特性を残しているかどうか問題となる。 S/h をパラメータとして下流側角柱に対する流力特性を hu_τ/ν に対して整理してみると第5図および第6図のようになり、 $S/h > 2$ では単独角柱の場合とほぼ同様の形で表せる。また、 $2 > S/h > 1$ は遷移域のようであり、図には示せないが

第5図 下流側角柱の抗力係数

$u\tau/U_0=0.0406$ で $S/h=1$ の場合 $hu\tau/\nu$ が大きいところでは C_{DrB} の値は小さくなりついには負の値を示すようになる。 C_{MrB} では負となることはないが同様に小さくなる。 このように、二角柱が非常に近接した場合には下流側角柱の流力特性は壁面上に発達する乱流境界層に影響されるというよりむしろ上流側角柱により作られる強い乱流混合を含む複雑な三次元流れに支配されると考えられる。 この場合にどのような特性量によりデータを整理すればよいかはむずかしい問題であり、これについてはさらに詳しく研究する必要がある。 ここでは第5図、第6図からも推察できるように上流側角柱の後流の乱流混合作用はある程度まで壁面上に発達する境界層の影響を受けていることから二角柱全体としては $S/h<2$ の場合についても $S/h>2$ と

第6図 下流側角柱のモーメント係数

同様にウォールバリアブルによりデータを整理する方法を拡張して採用した。

5.3 角柱に働く抗力 直列二角柱に働く抗力として前方角柱(角柱A)と後方角柱(角柱B)の抗力係数 C_{DrA} と C_{DrB} とピッチ S/h の関係を第7図に示す。角柱Aは $S/h<0.5$ の場合に図中一点鎖線で示した単独角柱の抗力係数の値より大きな値を示している。また、 $0.5<S/h<3.0$ の範囲では単独角柱の値より小さくなっている。これは角柱Aからの離流が角柱Bの前面に衝突し、平板面に達した後角柱Aの後面に向かって逆流し、その結果角柱Aの後面の圧力が

第7図 二角柱の抗力係数

第8図 二角柱の抗力係数

高められることによると考えられる。角柱 B は $S/h < 1.0$ で負の抗力を示している。このことは角柱 B が角柱 A 側へ引かれていることを意味している。また、 $S/h \approx 1.0$ で抗力がゼロとなり対称流れとなっていると考え、横方向には力が働かないから、この場合に働く力は揚力のみとなる。前述のフローパターンからも明らかなように $S/h \leq 0.5$ で見られる角柱 A の後面付近のアーチ形渦の消滅は角柱 A の抗力を増加させる一因となり、 $S/h \leq 1.0$ で見られる角柱 B の前面下端部付近の馬蹄形渦の消滅は角柱 B の抗力が負となったことを示す一つの指標であると考えられる。

第8図に直列二角柱に働く抗力に現れる干渉の影響を示す。縦軸には単独角柱に働く抗力との差を横軸にはピッチをとっている。角柱 A についてはレイノルズ数 Re が 2120 以上になると $S/h \leq 0.5$ で単独角柱の抗力値よりも大きくなっていて、その傾向はレイノルズ数が大きいほど著しい。下流側角柱 B はかなり大きなピッチの値になるまで干渉の影響を受ける。 $S/h < 3.0$ ではレイノルズ数により異なった変化を示すようになり、レイノルズ数が大きくなる程干渉の影響も著しいことが明らかである。これに対して、 $S/h \geq 3.0$ ではレイノルズ数による差異はなくなりゼロに漸近している。ピッチがさらに大きくなると C_{DrA} と C_{DrB} は単独角柱の値に漸近している。

角柱 A および角柱 B の間隙の影響を明らかにするために角柱 A の後面における局所抗力係数 C_{DrAb} と角柱 B の前面の局所抗力係数 C_{DrBf} のピッチによる変化を第9図に示す。両者の変化について見ると、ピッチが小さくなるにともなって C_{DrAb} と C_{DrBf} の値は

第9図 上流側角柱後面および下流側角柱前面の抗力係数

互いに漸近してくる。つまり、二角柱間にはさまれた領域の圧力分布状態が均一になってくることを示している。この状態をフローパターンから考えてみるとアーチ形渦が二角柱の間隙が小さくなるにともなって弱くなり、遂には不明確になってくることに対応しているようである。

5.4 角柱に働くモーメントおよび力の作用点 建築物などの設計に際しては、物体に作用する圧力、抗力、揚力の他にモーメントおよび抗力の作用点を明らかにしておくことは重要である。直列二角柱に働くモーメント C_{MrA} 、 C_{MrB} とピッチとの関係を第10図に示す。 C_{MrA} はピッチが変わってもほとんど変化していない。 C_{MrB} については干渉の影響が著しく現れ $S/h \approx 0.9$ で $C_{MrB} = 0$ となり、前方角柱 A についてはモーメントに関して干渉の影響はほとんど見られないが、後方角柱 B についてはモーメントが作用しないようなあるピッチの値が存在することが明らかとなった。

第11図にピッチの変化にともなう角柱 A および角柱 B のモーメント係数の変化を示す。モーメント係数については角柱 A はレイノルズ数とピッチの変化にはほとんど無関係で単独角柱と大差がない。しかし、 $S/h \leq 0.5$ でレイノルズ数が大きい場合には単独角柱の場合よりわずかに大きくなっている。角柱 B については $S/h \geq 3.0$ では $C_{MrB} - C_{Mr0}$ の値はレイノルズ数によらず一様に変化している。これに対して $S/h < 3.0$ ではレイノルズ数により干渉の影響に差異が見られレイノルズ数が大きいほどその影響が著しい。

壁面から角柱 A の抗力の作用点までの距離 $(h^*/h)_A$ とピッチとの関係を第12図に示す。 $(h^*/h)_A$ は単独角柱の値とほとんど変りないが $0.25 \leq S/h \leq 2.0$ の範囲でわずかに大きな値を示している。これは角柱 A 後面のアーチ形渦が角柱 B の近接により影響を受けることによると考えられる。第13図に壁面から角柱 B

第10図 二角柱のモーメント係数

第11図 二角柱のモーメント係数

第12図 力の作用点 (上流側角柱)

第13図 力の作用点 (下流側角柱)

の抗力の作用点までの距離 (h^*/h)_B とピッチとの関係を示す. (h^*/h)_B には干渉の影響があらわれ大きな変化を示している. $h^*/h = C_M/C_D$ であるから $C_D = 0$ のときには $h^*/h = \infty$ となる. また, C_M , C_D は正と負の値を示すことがあり負から正へ移るピッチがそれぞれ異なっているので $C_D = 0$ となるピッチを漸近線として $+\infty$ へ漸近する場合と $-\infty$ へ漸近する場合が存在する. $C_D = 0$ 付近では不安定な状態となる. この状態は角柱 A からの離れ流れが角柱 B の前面に衝突し, 角柱 B からのもはく離が生じ始めるピッチにほぼ対応していることが可視化の結果から明らかである.

6. 結 言

本研究の結果は以下のように要約できる.

- (1) 直列に配置された二角柱の干渉効果を抗力, モーメントおよび壁面から抗力の作用点までの距離とピッチとの関係について検討し, これらを乱流境界層の特性量 $hu\tau/\nu$ と関連づけて明らかにした.
- (2) 直列二角柱周辺のフローパターンが明らかにされた. 二角柱の間隔が小さくなるとその間隙部に生成するアーチ形渦の消滅がこの領域での負圧の絶対値を高めることに関係していることが明らかとなった.

参考文献

- 1) 谷口清一, 坂本弘志, 森谷 優, 有江幹男: 乱流境界層内に存在する近接した直立2円柱の干渉, 日本機械学会論文集 B, 47 (1981), pp. 592-601.

- 2) 五十嵐保：異径直列2円柱まわりの流れ，日本機械学会論文集 B, 47 (1981), pp. 1197-1206.
- 3) 森谷 優，坂本弘志，木谷 勝，有江幹男：直列2円柱に作用する変動圧力および流体力，日本機械学会論文集 B, 49 (1983), pp. 1364-1372.
- 4) 阪田一郎，木谷 勝：直列配列2円柱に作用する変動流体力 (第2報)，日本機械学会論文集 B, 49 (1981), pp. 2618-2623.
- 5) 高野 暉，新井 勲，松坂正芳：角柱群まわりの流れの実験的研究，日本機械学会論文集 B, 47 (1981), pp. 982-991.
- 6) Good, M. C. and Joubert, P. N. : The Form Drag of Two-Dimensional Bluff-Plates Immersed in Turbulent Boundary Layers, *Journal of Fluid Mechanics*, 31, Part 3 (1968), pp. 547-582.
- 7) 坂本弘志，森谷 優，谷口清一，有江幹男：乱流境界層内に埋没する有限幅平板周辺の流れ，日本機械学会論文集 B, 48 (1982), pp. 1674-1691.
- 8) 坂本弘志，谷口清一，森谷 優，有江幹男：乱流境界層の中にある正方形柱周辺の流れに関する研究 (乱流境界層特性と抗力係数との関係)，日本機械学会論文集 B, 46 (1980), pp. 1437-1446.
- 9) 浅沼 強：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，東京，1977, pp. 96-142.
- 10) Klebanoff, P. S. and Diehl, Z. W. : Some Features of Artificially Thickened Fully Developed Turbulent Boundary Layers with Zero Pressure Gradient, NACA Technical Report, No. 1110 (1952), pp. 1-27.
- 11) Clauser, F. H. : The Turbulent Boundary Layer, *Advances in Applied Mechanics*, 4 (1956), pp. 1-51.
- 12) Coles, D. : The Law of the Wake in the Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 1, Part 1 (1956), pp. 191-226.
- 13) 坂本弘志，森谷 優，有江幹男：乱流境界層の中にある角柱および円柱からの放出渦，日本機械学会論文集 B, 49 (1983), pp. 44-52.