正方形柱に働く抗力の軽減に関する研究*

(第1報, 小さな渦発生体による流れの制御)

五十嵐 保^{*1}, 伊藤 真一郎^{*1}

Drag Reduction of a Square Prism (1st Report, Flow Control Around a Square Prism Using a Small Vortex shedder)

Tamotsu IGARASHI and Shinichiro ITO

Experimental studies on drag reduction of a square prism were conducted. To control the flow around a square prism, a small vortex shedder was set up upstream of the prism. The side of the prism, D , was 30 mm and the Reynolds number was $Re=3.2 \times 10^4$. The diameter of the rod used as the vortex shedder, d , ranged from 1 to 6 mm, and the space between the prism and the rod, G , was varied. The results obtained are as follows. The critical space G_c , is given as $G_c=D+4.5d$, where vortex shedding from the rod disappears. The Strouhal number of the prism decreases at $G > G_c$ and increases at $G \leq G_c$. In the range of $0.1 \leq d/D \leq 0.2$, drag of the prism decreases about 50% at $G > G_c$ and 70% at $G \leq G_c$.

Key Words: Fluid Force, Drag, Flow Control, Square Prism, Pressure Distribution, Vortex, Vortex Shedder, Wake, Separation, Flow Visualization

1. ま え が き

一様流中の円柱や正方形柱の抗力係数が乱れ度の増加により減少することはよく知られている^{(1)~(3)}。また円柱の表面にトリッピングワイヤを取付けて境界層を乱流に遷移させると、抗力が著しく減少することも知られている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

著者の一人は、このような観点から物体の表面流れのみを乱流状態にしてはく離せん断層の振舞いを制御し、物体に働く抗力の軽減と伝熱促進を考えた。すなわち、物体の上流に小さな渦発生体を設置し、その後流の渦列を物体の前方岐点流れとする方法である。たとえば、はく離・再付着を伴う辺長比5の長方形柱の上流に小さな渦発生体(ロッド)を設置し伝熱促進を達成した⁽⁶⁾。この場合、前縁はく離せん断層の再付着位置が著しく前進し、前縁はく離泡が小さくなった。

そこで正方形柱⁽⁷⁾の上流側にロッドを設置し、抗力の軽減を試みた。すなわち、正方形柱前面の流れが乱流状態となり、前縁はく離せん断層が遷移し側面上に再付着する。その結果、正方形柱の後流幅が著しく狭

くなり、抵抗の軽減が期待される。なおロッド径がある程度大きく、かつロッドと正方形柱の間隔が狭い場合も、ロッドと正方形柱の間に準定常的な閉渦が形成され、抗力の軽減が期待される。

記 号

C_D, C_{DR} : 正方形柱およびロッドの抗力係数

C_{DT} : 総抗力係数

D, D_R : 正方形柱およびロッドの抗力

C_p : 圧力係数 $= (p - p_0) / 0.5 \rho U^2$

C_{pf}, C_{pb} : 前方岐点の圧力係数, 背圧係数

D : 正方形柱の辺長または円柱直径

d : 上流側渦発生体(ロッド)の直径

f : 渦放出周波数

G : ロッドと正方形柱または円柱間隔

G_c : 臨界間隔

K : 背圧パラメータ $= \sqrt{1 - C_{pb}}$

L : ロッドと正方形柱の軸中心間距離

p_0, p : 主流静圧, 壁面圧力

Re : レイノルズ数 $= UD/\nu$

S : 正方形柱のストローハル数 $= fD/U$

S_R : ロッドのストローハル数 $= fd/U$

* 平成4年4月3日 第69期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成5年2月23日。

^{*1} 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)。

U : 主流速度

ν, ρ : 流体の動粘性係数, 密度

2. 実験装置および方法

座標系と主要記号を図1に示す。実験は測定部断面 $400\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 長さ 800 mm の二次元吹出し低速風洞で行った。正方形柱は辺長 $D=30\text{ mm}$, 軸長 150 mm である。一様流速度は $U=16\text{ m/s}$, したがってレイノルズ数 $Re=3.2 \times 10^4$ の一定である。また主流乱れはほぼ 0.4% である。小さな渦発生体として直径 $d=1 \sim 6\text{ mm}$ のロッドを用意し, 正方形柱の上流側軸間距離 $L=55 \sim 120\text{ mm}$ の位置に設置した。まず抗力軽減の可能性と流れの概略を把握するため, 煙風洞による正方形柱まわりの流れの可視化を行った。なお煙風洞における一様流速度は $U=6\text{ m/s}$, レイノルズ数 $Re=1.2 \times 10^4$ である。次に正方形柱の2面に一辺当たり11個の $\phi 1.0$ の圧力孔を設け, 多管式傾斜マノメータに接続し 90° 回転して表面圧力分布を測定した。圧力

図1 座標系と記号

分布を積分して求めた抗力係数は, 期待どおりの軽減を示した。またロッドおよび正方形柱後流の渦放出数を熱線流速計による変動速度波形を周波数解析して求めた。さらにロッドの表面圧力分布をロッド中央部の $\phi 0.5$ の圧力孔をベッツマノメータに接続しロッドを回転させて測定し, ロッドの付加抗力も検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 流れの可視化 煙風洞による流れの可視化の一例を図2, 3に示す。左側の写真は長時間露出, 右側の写真は瞬間写真である。図2(a)はロッドのない場合で, 大きな規則的渦が正方形柱の背後に形成されている。図2(b), (c)はロッド径 $d=6\text{ mm}$, 軸間距離 $L/D=4.0, 3.33$ の場合である。いずれの場合もロッドからの渦放出が見られる。渦列が正方形柱前面に到達しているが, その後流幅は正方形柱よりも広い。正方形柱前縁からはく離せん断層が正方形柱の側面に近づき, 渦形成位置が著しく後退している。図3(a), (b)は軸間距離 $L/D=2.67, 2.0$ の場合である。ロッド径が $d=2\text{ mm}$ の場合, ロッドからの渦放出が認められ, その渦列が正方形柱前面に衝突している。渦形成位置はロッドのない場合よりも後方に移動している。しかし, ロッド径 $d=4, 6\text{ mm}$ の場合, ロッドからの渦放出は停止し, ロッドと正方形柱が死水域でつながった一体の流れ場を呈している。これは両物体間に準

(a) ロッドのない場合

(b) $L/D=4.0, d=6\text{ mm}$

(c) $L/D=3.33, d=6\text{ mm}$

図2 煙風洞による正方形柱まわりの流れの可視化
(その1: $D=30\text{ mm}$, $U=6\text{ m/s}$, $Re=1.2 \times 10^4$)

(a) $L/D=2.67$ (b) $L/D=2.0$

図3 煙風洞による正方形柱まわりの流れの可視化
(その2: $D=30$ mm, $U=6$ m/s, $Re=1.2 \times 10^4$)

定常的な閉渦が形成されていることを示している。なお $L/D=2.0$ の場合、ロッド径が $d=4$ mm から 6 mm に増加すると渦形成位置が再び前進し、最適なロッド位置があることを示唆している。

このように適当な径のロッドを適切な位置に設置すれば、ロッドからの渦放出の有無にかかわらず正方形柱の渦形成位置が著しく後退する。この場合、正方形柱の抵抗係数は著しく減少すると期待される。

3・2 圧力分布 正方形柱まわりの圧力分布を図4, 5に示した。図4(a), (b)は $L/D=4.0, 2.0$ に対し、ロッド径 d の影響を示している。一般にロッド径が大きくなり、かつ軸間距離が短くなるにしたがい圧力係数 C_p の値は前面では低下し、側面および背面では上昇する傾向が認められる。 $L/D=4.0$ の場合、ロッド

径 $d=5$ mm が抗力の軽減に最も効果がある。同様のことが軸間距離 $L/D \geq 2.33$ でもいえ、最適ロッド径が存在する。軸間距離 $L/D=2.0$ の場合、ロッド径 $d \leq 3$ mm と $d \geq 4$ mm とで著しい差異が見られ、急激なフローパターンの変化を示唆している。また $d \geq 3$ mm では C_p の値は前縁から後縁に向かって単調に増加している。すなわち、 $d \geq 3$ mm では煙風洞写真で示されたようにロッドからの渦放出が停止し、ロッドと正方形柱間に準定常渦が形成される。特に $d=5, 6$ mm では、 C_p の値は前面ではほぼ零で、背面では -0.6 である。ロッドの設置によって正方形柱に働く抗力係数が著しく軽減されることが示された。図5(a), (b)はロッド径 $d=3, 6$ mm に対し軸間距離の影響を示している。ロッドのない場合を除けば、各面の圧力

図4 圧力分布 (その1: ロッド径の影響)

図5 圧力分布 (その2: 軸間距離の影響)

分布のプロファイルはロッドからの渦放出の有無に対応した二つに大別される。フローパターンの変化以外は軸間距離の影響は比較的少ないといえる。

3・3 抗力係数 3・2節の圧力分布より求めた正方形柱の抗力係数 C_d に及ぼすロッド径と軸間距離の影響を図6, 7に示した。抗力係数はロッド径が小さい $d \leq 2\text{ mm}$ では軸間距離によらずほぼ一定である。ロッド径 $d \geq 3\text{ mm}$ では、抗力係数は軸間距離が減少するとわずかながら減少し、特定の軸間距離でロッドがないときの値の1/3以下に激減している。この抗力係数の不連続変化は先述のフローパターンの変化、すなわちロッドからの渦放出のあるパターンAからロッドからの渦放出が停止するパターンBへの変化と対応する。パターンAでは、抗力係数の減少割合はロッド径にほぼ比例している。パターンBでは、ロッド

図6 抗力係数 (その1: ロッド径の影響)

図7 抗力係数(その2:軸間距離の影響)

図9 抗力係数と前方・後方岐点の圧力差との関係

図8 抗力係数と背圧パラメータの関係

図10 ロッドと正方形柱のストローハル数

と正方形柱間に準定常閉渦が形成されるため有為な差異はない。

一様流中の物体の抵抗係数はその背圧係数(背圧パラメータ)と一定の関係にある⁽⁸⁾ことはよく知られている。これは物体に働く抵抗は前面よりも背面の負圧が支配的なためである。そこで抵抗係数と背圧パラメータの関係を調べ、図8に示した。フローパターンAに対してはほぼ次式の関係が得られる。

$$C_D = 0.48 K^{3.3} \dots \dots \dots (1)$$

しかし、パターンBには適用できない。図8中の点線はパターンA, Bに対する近似式である。

$$C_D = 4.2 K - 4.5 \dots \dots \dots (2)$$

一方、本モデルでは正方形柱は前方の小さなロッドの後流中にあるため、近寄り速度が一様流の場合とは異なる。そこで、前方岐点と後方岐点の圧力差と抵抗係数の関係を図9に示した。抵抗係数はフローパターン

に無関係に次式で与えられる。

$$C_D = 0.88 \Delta C_p + 0.11 \dots \dots \dots (3)$$

換言すれば、前方岐点と後方岐点の圧力差のみで抵抗係数を求めることができる。

3・4 ストローハル数 ロッドと正方形柱からの放出渦周波数を求めた。鈍い物体の後流渦放出数、すなわちストローハル数は後流の流れ場を表現する重要な因子である。得られた結果の一例を図10に示す。ロッド単独の場合のストローハル数 S_R は0.21であるが、軸間距離が減少すると S_R 数は0.16まで減少している。その減少割合はロッド径に比例している。一方、正方形柱の St 数はロッドのない場合よりもやや減少するが、軸間距離の影響は少ない。 $L/D=2.0$, $d=4$ mmの場合ロッドからの渦放出が認められない。このとき正方形柱の St 数は0.20以上に急増している。次に正方形柱のストローハル数に及ぼすロッド径と軸間

距離の影響を図 11 に示す。ロッド径 $d=1\text{ mm}$ では St 数は軸間距離が減少してもほとんど変化せず、ロッドのない場合の値よりわずかに小さい。 St 数は $d=2\text{ mm}$ では $L/D=1.83$ のとき、 $d=3\text{ mm}$ では $L/D=2.0$ において St 数は急増している。これはロッドからの渦放出の停止に関連し、抗力係数で示されたフローパターンの急変、すなわちパターン A からパターン B への変化に対応している。ロッド径が $d=4, 5, 6\text{ mm}$ と増加するとフローパターンの変化する軸間距離は長くなる。このとき St 数はパターン A では次第に減少し、パターン B では増加している。

3・5 臨界間隔 檜和田⁽⁹⁾によれば、異径直列 2 円柱(小円柱が上流側にある)において、その流れ特性が直径比 D/d に対し一定の間隔 G/d で急変する。この間隔を臨界間隔と呼び、次式で与えた。

$$G_c/d = D/d + 1.5 \quad (1.9 \leq D/d \leq 7.7) \quad \cdots \cdots (4)$$

著者の一人⁽¹⁰⁾は類似の系に対し、ロッドからの渦放出

の有無により臨界間隔を求め同一の式を得た。

$$G_c/d = D/d + 1.5 \quad (4.0 \leq D/d \leq 20) \quad \cdots \cdots (5)$$

本実験においても先述の抗力係数やストローハル数が急変する臨界間隔が存在した。そこで D/d と G/d を両軸にとり、上流側のロッドの後流にカルマン渦列が形成されるパターン A とロッドと正方形柱の間に準定常的閉渦が形成されるパターン B に分類して図 12 に示した。臨界間隔は次式で与えられる。

$$G_c/d = D/d + 4.5 \quad (5 \leq D/d \leq 15) \quad \cdots \cdots (6)$$

正方形柱の場合は前面形状からして閉渦が容易に形成されるため、その臨界間隔は円柱に比べ著しく長い。

3・6 総抗力係数 ロッドの設置により正方形柱の抗力係数の軽減が得られた。そこでロッドの付加抗力を考慮した総抗力係数について検討する。ロッドまわりの圧力分布の一例として、ロッド径 $d=4.0\text{ mm}$ を図 13 に示す。ロッドの背圧は一樣流の場合に比べて

図 11 ストローハル数

図 13 ロッドまわりの圧力分布

図 12 臨界間隔

図 14 総抗力係数

著しく高い値を示している。特に渦放出が停止し正方形柱との間に準定常渦が形成される $L/D=2.0$ の場合は背圧係数 C_{pb} が正の値となっている。ロッドの抗力係数は図 13 中に示したように小さい。正方形柱およびロッドに働く抗力 D, D_R は次式で与えられる。

$$D=C_D(0.5\rho U^2 D), D_R=C_{DR}(0.5\rho U^2 d) \cdots (7)$$

ここで C_{DR} はロッドの抗力係数である。ロッドの付加抗力を考慮した系の総抗力係数 C_{DT} を次式で定義する。

$$C_{DT}=(D+D_R)/(0.5\rho U^2 D) \\ =C_D+C_{DR}(d/D) \cdots \cdots \cdots (8)$$

ロッドの抗力係数と正方形柱の総抗力係数を図 14 に示す。ロッドの付加抗力は正方形柱の抗力の軽減分に比べてたかだか 10%以下で、無視できる程度である。

4. 結 論

一様流中におかれた正方形柱の上流側に小さな渦発生体(ロッド)を設置し、正方形柱まわりの流れを制御した。正方形柱の辺長 $D=30\text{ mm}$, $Re=3.2\times 10^4$ に対し、適当なロッド径とロッド位置において著しい抗力の軽減が実現した。得られた主要結果は次のとおりである。

(1) ロッドからの渦放出が停止する臨界間隔 G_c は次式で与えられる。

$$G_c/d=D/d+4.5 \quad (5\leq D/d\leq 15)$$

(2) ストローハル数は臨界間隔以上では減少し、

臨界間隔以下では増加する。この傾向はロッド径が大きいほど著しい。

(3) ロッド径 $d/D=0.1\sim 0.2$ のとき、抗力係数は臨界間隔以上では最大 50%減少し、臨界間隔以下ではほぼ 70%減少した。ロッドの付加抗力は軽減された抗力のたかだか 10%以下である。

文 献

- (1) Fage, A. and Warsap, J. H., The Effects of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of Circular Cylinder, *ARC RM*, 1283 (1930).
- (2) Bearman, P. W., An Investigation of the Forces on Flat Plates Normal to a Turbulent Flow, *J. Fluid Mech.*, **46**-1 (1971), 177.
- (3) Gartshore, I. S., The Effects of Free Stream Turbulence on the Drag of Rectangular Two-dimensional Prisms, *BLWT-4-73* (1973).
- (4) Wieselsberger, C., Der Luftwiderstand von Kugeln., *ZFM*, **5** (1914), 140.
- (5) 五十嵐, 円柱まわりの流れに及ぼすトリッピングワイヤの効果, 機論, **52**-473, B (1986), 358.
- (6) 真弓・五十嵐, わずかな傾きのある長方形柱の伝熱促進, 機講論, No. 910-84 (1991), 142.
- (7) 五十嵐, 正方形柱まわりの流れ特性, 機論, **50**-449, B (1984), 210.
- (8) 五十嵐・平田, はく離流の熱伝達に関する研究(第3報, 正三角柱の場合), 機論, **41**-348 (1975), 2437.
- (9) 檜和田・ほか3名, 直列異径2円柱における流動と熱伝達に関する実験, 機論, **44**-385 (1978), 3134.
- (10) 五十嵐・神戸, 小さな渦発生体による円柱まわりの流れの制御, 機講論, No. 920-17 (1992), 302.