＝ 技 術 ノ ー ト ＝

TECHNICAL NOTE

平面壁上の正方形断面をもつ角柱まわりの流れ*¹ Flow past Rectangular Cylinder of Square Section Placed on a Plane Boundary

岡 本 史 紀*²
Shiki OKAMOTO

Key words: Turbulent flows; rectangular cylinder; surface pressure;
vortex; recirculation region

Abstract

This paper describes an experimental study of the flow past rectangular cylinder of square section placed on a plane boundary. The experiment was carried out in an N. P. L. blowdown type wind-tunnel having a working section of 500 mm × 500 mm × 2,000 mm in size at the Reynolds number 4.74×10^4 . The surface-pressure distributions on the rectangular cylinders were measured, and the vortices of two kinds generated in the flow-field around a rectangular cylinder have also been observed. Consequently, it is found that the flow patterns and vortices around a rectangular cylinder of W/D (ratio of length to width) = 1.5 is different from those for $W/D = 0.06 \sim 1.0$.

1. 緒 言

近年、地表面上の建物、ガスタンク、冷却塔などの構造物まわりの流れが構造設計上または大気汚染問題から重要視されたため、これらの三次元物体まわりの流れの研究が多く行われるようになった。平面壁上の三次元物体の研究は、表面粗さ¹⁾に関連して行ったものを初めとして、球の抗力²⁾や角柱、有限長平板の表面圧力、抗力係数³⁻⁶⁾および後流^{7,8)}を調べたものがある。しかし、三次元物体まわりの流れ、とくに物体周辺に発生する渦のようすなどを調べたものはきわめて少なく、円形断面をもつ鈍い物体⁹⁾について著者はすでに報告してあるが、角柱については、乱流境界層中に置かれた場合の研究が部分的に行われているにすぎない^{10,11)}。本研究では一様流中に置かれた平面壁上の正方形断面をもつ角柱周辺の流れの挙動の角柱の幅に対する長さの比による変化を実験的に調べたものである。

記 号

- C_p : 圧力係数 ($= (P - P_\infty) / (\rho U_\infty^2 / 2)$)
- C_p' : 圧力係数 ($= (P - P_\infty) / (P_0 - P_\infty)$)
- D : 正方形断面の幅 (辺長)
- P : 静圧
- P_0 : 角柱前面の最大圧力
- P_∞ : 主流の静圧
- Re : レイノルズ数 ($= DU_\infty / \nu$)
- U : 時間平均速度
- U_∞ : 主流速度
- W : 角柱の長さ
- X, Y, Z : 角柱の底面中心を原点とする直角座標軸、流れ方向に X 軸、水平方向に Y 軸、鉛直方向に Z 軸をとる。
- X' : 平板、角柱の前面を原点としたときの X 座標
- ν : 空気の動粘性係数
- ρ : 空気の密度

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した風洞は 500 mm × 500 mm の正方形断面をもつ、N. P. L. 式風洞で測定部の長さは 2,000 mm である (第 1 図)。地面板としては、厚さ 4 mm のアルミニウム板を用い、その前縁は流線形に削って前縁はく離を防いだ。また風洞ノズル壁面に発達した境界層を避けるため、地面板は風洞壁面から上方に 25 mm だけ離して取り付けられた。本風洞の地面板上では、前縁から 320 mm で遷移が始まり、前縁から 700 mm で遷移が終了し乱流境界層が発達する。したがって角柱の取付け位置は前縁から 500 mm 下流位置であるが、この位置における境界層は遷移境界層でその

*¹ 昭和 59 年 3 月 13 日原稿受理

*² 芝浦工業大学機械工学科

第1図 装置と座標

第2図 モデル

厚さは約6mm, 排除厚は約2mmであった。モデルは第2図に示すように幅(辺長)が $D=70\text{mm}$ の正方形断面をもつ角柱で, 角柱の特別な場合として平板をつけ加え, その長さ W は $W/D=0.06$ (平板), 0.5, 1.0, 1.5 の4種類に変えた。平板ならびに角柱の表面には $0.5\text{mm}\phi$ の静圧孔があけてあり, 底面より表面圧力を取り出せるようになっている。主流速度は $U_\infty=10.2\text{m/s}$ とし, レイノルズ数が $Re=DU_\infty/\nu=4.74\times 10^4$ の一定という条件で実験を行った。さらに物体近傍の流れの測定は, 風向が変化するので, 円柱型ピトー管を用いて行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 表面圧力分布 角柱 ($W/D=1.0$) の前面と背面の各高さ Z/D における Y 方向の圧力分布を第3図, 第4図に示す。前面の圧力分布は縦横比が大きい平板では, 中心付近で一定となる部分が存在するが, 正方形断面の角柱では端の影響が中心部まで及んでおり, 圧力は $Y/D=0$ で最大値となる。また $Z/D=$

第3図 角柱前面の圧力分布 ($W/D=1.0$) 第4図 角柱背面の圧力分布 ($W/D=1.0$) 第5図 等静圧線図 ($W/D=1.0$)

第6図 角柱側面の等静圧線図

0.79, 0.93 を除いて, 前面圧力はほとんど差異がない。一方, 背面圧力はほぼ $C_p=-0.40\sim-0.60$ 付近の値を示している。第5図に角柱 ($W/D=1.0$) の前面ならびに背面の等静圧線図を示す。前面では中心付近で圧力が高くなるようであるが, 背面では圧力は下方にむけて高い値を示す。第6図は角柱の側面の等静圧線図を示す。 $W/D=1.5$ の場合は, $W/D=0.5, 1.0$ の場合と異なり, $X/D=-0.3$ 付近で圧力が低くなる部分が存在するが, この付近に前端よりはく離れた流れが角柱側面に再付着するものと考えられる。

$Y/D=0$ における前面ならびに背面の圧力分布を第7図, 第8図に示す。第7図の破線は二次元平板の結果^{12,13)}を示したものである。第7図によれば平板, 角柱の前面の最大圧力点(すなわち前面のよどみ点)は球, 半球柱体⁹⁾と同様, 約 $Z/D=0.45$ である。この位置は角柱前方の平面壁上ではく離れた流れが, 角柱に再付着する位置を示す。この再付着点は, 二次元平板の実験によれば $Z/D=0.6$ であった。この相違は,

第7図 前面の圧力分布 ($Y=0$) 第8図 背面の圧力分布 ($Y=0$) 第9図 平面壁上的はく離線 ($W/D=1.0$)

正方形断面の角柱の場合では、上側のほかに両側面に流れることに起因すると考えられる。第8図は $Y=0$ における背面圧力分布を示すが、 $W/D=0.06$ と 0.5 の場合はほとんど同じ値であり、 W/D の値が増すにつれ、背面圧力は高い値を示す。この背面圧力は角柱後方に形成される再循環領域の影響を強くうけるが、第8図によれば、 $W/D=0.06$ と 0.5 は再循環領域の長さはほぼ等しく、 $W/D=1.5$ の場合は再循環領域の長さが短くなると推測される。

3.2 平面壁上的はく離線と馬てい渦 第9図は表面塗布法によって可視化した角柱 ($W/D=1.0$) の場合の平面壁上的はく離線を示す。前面を原点としたときの X' 座標で表わし、他の角柱のはく離線と比較すれば、第10図に示すように、ほとんど差異が見られない。このはく離線の内側に馬てい渦が生ずるものと考えられるが、はく離線がほぼ一致することは、同じような馬てい渦が存在するものと思われる。これを確認

第10図 はく離線の比較

第11図 馬てい渦 (a) $W/D=0.5$, (b) $W/D=1.0$, (c) $W/D=1.5$

するために、回流水槽を用いてインキ流しの方法によって流れの可視化観察を行うと、第11図(a)~(c)に示すように馬てい渦の存在が確認された。この馬てい渦の存在は三次元物体が二次元物体と大きく異なる点である。すなわち、馬てい渦の生成によって、その外側では吹き上げ、内側には吹きおろしが生じ、それによって角柱背後のダウンウォッシュは二次元物体と比較

して強められると考えられる。しかし、 W/D が増すと馬蹄渦は同じように存在するが、前面上端ではなく離れた流れが上面に再付着するようになるため背面圧力は高い値になり、 $W/D=1.5$ の角柱では $W/D=0.5$ と $W/D=1.0$ の角柱に比べて、ダウンウォッシュは相対的に弱まるものと推察される。

3.3 再循環領域、アーチ渦 第12図は角柱($W/D=1.0$)の中央面($Y=0$)における速度ベクトルの分布を示す。速度ベクトルは円柱型ピトー管を用いて測定した速度と流れの方向を同時に表わしたものである。これによれば、角柱の端から離れた流線は下流で平面壁上に再付着し、この流線で囲まれた内側に再循環領域が形成される。再循環領域の長さは、平面壁上の等静圧線図(第15図)より求める。すなわち平面壁上の等静圧線図の最大圧力点は角柱を越した流れが吹きおろされ、平面壁上に再付着する位置であると考えられ、その位置を再循環領域の長さとする。その長さ(再付着点の角柱底面中心よりの距離、 l)は第13図に示すように、 W/D が増すにつれて減少する。このことは前述の角柱背面の圧力分布から推測されたことを実証するものである。

再循環領域ではアーチ渦の生成が考えられるが、第14図(a)~(c)は回流水槽においてインキ流し法によってアーチ渦の生成を可視化したものである。(a)の $W/D=0.5$ と(b)の $W/D=1.0$ の角柱では、背後にアーチ渦が生成されている様子が明らかであるが、(c)の $W/D=1.5$ の角柱ではアーチ渦の存在が明らかではない。これは第6図の角柱側面の等静圧線図で $X/D=-0.3$ 付近に圧力が低くなる部分が存在することを示したが、この部分によってアーチ渦が側面

第12図 速度ベクトル ($W/D=1.0$)

第13図 再循環領域の長さ

(a)

(b)

(c)

第14図 アーチ渦 (a) $W/D=0.5$, (b) $W/D=1.0$, (c) $W/D=1.5$

第15図 平面壁上の等静圧線図

に引き寄せられあたって消滅し、後方ではその存在がはっきりとは確認できないものと考えられる。これは第15図に示した平面壁上の等静圧線図からもうなずける。この図によれば、 $W/D=1.5$ の場合を除いて、角柱のうしろに最小圧力の部分が一對存在するが、これはアーチ渦の根元の位置であると思われる。この位置では平面壁上に歯みがき粉を水に溶いたものを薄く

塗ることによって一對の渦が存在することが確認された (第9図)。アーチ渦はこの位置を軸にして、後方に傾いて倒れるものと考えられる。一方、 $W/D=1.5$ の角柱の場合は再循環領域が縮小し、アーチ渦の根元の位置が判然と認められなかった。これは角柱の前端ではなく離れた流れが側面に引き寄せられるため、アーチ渦があたって消滅したことによると考えられる。

4. 結 論

本研究によって得られた結果を要約すれば次のとおりである。

- 1) 平面壁上の正方形断面をもつ角柱の前面圧力は W/D によって差はほとんどない。一方、背面圧力は W/D が増すにつれ、高い値となる。
- 2) 角柱まわりの流れの場に馬てい渦、アーチ渦という2種類の渦が生成される。馬てい渦は W/D の値によらず生成されるが、アーチ渦は $W/D=0.06\sim 1.0$ の角柱では、後方でその存在が明らかであるが、 $W/D=1.5$ の角柱ではその存在が認められない。
- 3) 再循環領域は W/D の値が増すとともに縮小する。

参 考 文 献

- 1) Schlichting, H.: Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem, Ing. Arch., **7** (1936), pp. 1-34.
- 2) Klemin, A., Schaefer, E.B. and Beerer, J.G.: Aerodynamics of the Perisphere and Trylon at World's Fair, Trans. Am. Soc. Civ. Eng., No. 2042 (1939), pp. 1449-1472.
- 3) 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, 機械学会論文集, **46** (1980), pp. 1437-1446.
- 4) 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 (第1報) 平板に作用する圧力および抗力, 機械学会論文集, **48** (1982), pp. 1674-1682.
- 5) 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 (第2報) ストローハル数およびフローパターン, 機械学会論文集, **48** (1982), pp. 1683-1691.
- 6) Castro, I. P. and Robins, A. G.: The Flow around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, J. Fluid Mech., **79** (1977), pp. 307-335.
- 7) Peterka, J. M. and Cermak, J. E.: Turbulence in Building Wakes, Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Building and Structures, 1977, pp. 447-463.
- 8) Sforza, P. M. and Mons, R. F.: Wall-wake: Flow behind a Leading Edge Obstacle, AIAA J., **8** (1970), pp. 2162-2167.
- 9) 岡本史紀: 平面壁上の円形断面をもつ鈍い物体まわりの流れ, 日本航空宇宙学会誌, **32** (1984), pp. 242-248.
- 10) Hunt, J. C. R., Abell, C. J., Peterka, J. A. and Woo, H.: Kinematical Studies of the Flow around Free or Surface-Mounted Obstacles; Applying Topology to Flow Visualization, J. Fluid Mech., **86** (1978), pp. 179-200.
- 11) 高野 暉, 新井 勲, 松坂正芳: 角柱まわりの流れ, 日本航空宇宙学会誌, **31** (1983), pp. 485-495.
- 12) Good, M. C. and Joubert, P. N.: The Form Drag of Two-Dimensional Bluff-Plates Immersed in Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech., **31** (1968), pp. 547-582.
- 13) 岡本史紀: 平面上の直立平板の後流に及ぼす風洞上壁の閉塞影響に関する実験的研究, 日本航空宇宙学会誌, **30** (1982), pp. 90-96.