特 集 低 速 風 洞 の 利 用 後 編

技 術 論 文

矩 形 断 面 の 柱 の 抗 力 に 関 す る 一 実 験*

中 口 博**・橋 本 貴 久 裕***・武 藤 真 理****

An Experimental Study on Aerodynamic Drag of Rectangular Cylinders

Hiroshi NAKAGUCHI, Kikuhiko HASHIMOTO and Shinri MUTO

Abstract

An experimental study is carried out on the aerodynamic drag of rectangular cylinders, where the REYNOLDS number ranges up to 6×10^4 . It is revealed that the drag coefficient, C_D , varies considerably with the d/h ratio of rectangles, and that the maximum value of C_D is as high as 2.6 for d/h of $2/3$ compared with C_D of about 2.0 for the cases of flat plate and square cylinder (Fig. 1). The STROUHAL number of the shedding vortices, on the contrary, remains approximately constant for d/h up to 1.0, decreases slowly for larger values of d/h , and then increases abruptly at d/h ratio of about 2.8 (Fig. 2), where the flow reattaches on the lateral surfaces of the cylinder.

種々な断面形の柱体の抗力を統一的な立場で説明しようとする試みもいくつか提案されている^{1), 2), 3)}が、未だ十分に解明されたとはいいい難い。最近、地上の建造物などについて風による荷重に関する関心が高まり、われわれの研究室でもこのような種類の柱体の抗力を測定する機会が多くなった。

ここに述べるのは矩形断面の柱体の二次元抗力係数に見出された1つの特異な性質である。抗力係数に現われる特異性は橋本が実験中に見出した⁴⁾もので、その後流れ学的な実験を追加した。これらの実験結果から見ると、上に述べたいくつかの提案はいずれも若干の修正を必要とするように思われる。

記 号

- C_D : 二次元抗力係数
- C_{pb} : 背圧係数
- d : 矩形断面の気流方向の長さ
- h : 矩形断面の気流に垂直方向の長さ
- L : 矩形柱の長さ
- n : 単位時間に発生する後流渦の数
- p_b : 背面の静圧
- p_∞ : 一様流の静圧
- St : STROUHAL 数
- St^* : wake STROUHAL 数
- U_∞ : 一様流の速度
- U_s : 剝離直後の自由流線上の速度

1, は し が き

下流に剝離した流れを伴ういわゆる bluff body の抗力の問題は、古くから多くの研究者の興味を引き、

* 昭和 42 年 4 月 7 日低速風洞の利用に関するシンポジウムにて講演, 昭和 42 年 7 月 11 日原稿受理

** 東京大学工学部

*** 日立製作所電機工場

**** 東京大学工学系大学院

2. 実験の装置と方法

(1) 二次元抗力係数の測定 bluff な断面の柱体の二次元抗力係数を測定するとき、柱体のまわりに二次元的な流れを作ることがまず問題である。われわれの研究室では、さきに報告⁵⁾したように、吹き出し口直径が 1.5 m の円形の Göttingen 型風洞を使用する場合、供試柱体の高さ h を 50 mm, 長さ L を 1,000 mm とし、これに直径 700 mm 以上の円形端板(円形にする理由は端板ごと迎角を変えられる便宜からである)を取り付けるのを標準としている。測定された抗力係数の値から判断して、二次元抗力係数が大きい平板や正方形柱でも、おおむね二次元的な流れが得られているものと判断される。抗力は吊り線および端板の抗力を含んだまま天秤によって測定し、後で吊り線および端板の抗力を差し引いて供試柱の抗力を求める。供試体の抵抗面積が大きいので、この差し引き計算による誤差は少ない。

このたびの実験もおおむね上記の標準にしたがって実施したが、断面の長短比 d/h を数多く変えながら模型の数を減らすために、 h の値は最大 74 mm, 最

小 8.2mm の間にあり、一方端板の直径は 800mm のものを使用した。なお、柱体模型は木製で、目止めの上ラッカーで仕上げ、四隅の角は工作の許す限り鋭くした。

(2) 背圧測定 (1) と同一の風洞において、 $h=50\text{mm}$ で d を変化させた模型に直径 700mm の円形端板を取り付け、模型の背面中央に内径約 1mm の静圧孔を穿って背圧を測定した。また(4)に述べる流れの観察と同時に、二次元煙風洞において、少数の模型について上面および背面の圧力分布を測った。

(3) 後流渦の周期測定 後流にできる交番渦の周期を、(1)と同じ模型を用い、1.5m Göttingen 型風洞で測定した。受感部は直径 15μ のタングステン線をを用いた熱線風速計で、その出力を直流増幅器を介してペン書きオシログラフにつなぐ。受感部の位置は、オシログラフの波型がきれいな位置を選んで設置したが、結果的には、模型断面の下流側の一角から約 20° 外向きに引いた直線上にある。

(4) 流れの観察 二次元煙風洞において流れの観察を行なった。この風洞は測定室の幅が 100mm、高さが 1,500mm、観測部の長さが 2,000mm で、流線の観測が可能な風速は約 15m/s までである。模型は $h=50\text{mm}$ とし、 d の異なる 13 種類を用意した。

3. 実験結果

(1) 二次元抗力係数 矩形柱の 1 辺を気流に垂直に置いたときの抗力係数 C_D と断面の長短比 d/h との関係を示す。測定時の風速は 12~15m/s、相当するレイノルズ数は $2\sim 6\times 10^4$ の程度

であって、実験した範囲内の風速では、レイノルズ数による C_D の変化はほとんどない。図中の黒丸は DELANY および SORESENSEN⁶⁾ の実験値で、今回の値とはほぼ一致している。破線は HOERNER⁷⁾ が各種の測定値を参照して引いた線で、今回の実験値はその下限線にはほぼ一致している。

今回の実験結果で最も著しいのは、 $d/h=0.7$ 付近に C_D の最大値が見出されたことであって、その値は平板(流れに垂直におかれた)または正方形柱の C_D より 30% 程度大きい。

(2) 背圧 風速 8~20m/s、レイノルズ数 $2.7\sim 7\times 10^4$ の範囲で背圧を測定した。背圧を無次元係数

$$C_{pb} = (p_b - p_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$$

で表わし、これと d/h との関係を第 1 図の白い角点で示す。黒い角点は FAGE および JOHANSEN¹⁾ の測定値である。 C_{pb} と d/h との関係は、 C_D と d/h との関係にはほぼ平行しており、その差 ($C_D - C_{pb}$) は 0.8 前後で、大部分が C_D に対する前面の寄与であることを考えれば、ほぼ妥当な値であろう。ただし、 $d/h=1$ 付近では、この差がいくぶん小さくなっている。

(3) 後流渦の周期 風速、したがってレイノルズ数を(2)と同様の範囲で測定した。後流渦の周期を STROUHAL 数

$$S_t = nh/U_\infty$$

で表わし、これと d/h との関係を第 2 図に白い丸点で示す。影をつけた点は、それぞれ FAGE および JOHANSEN¹⁾、ROSHKO²⁾、および VICKERY⁸⁾ の実験値で、今回の測定値とはほぼ一致している。この実験結果

第 1 図 C_D および C_{pb} と d/h との関係 ($R=2\sim 6\times 10^4$)

 第2図 S_t と d/h との関係 ($R=2\sim6\times 10^4$)

で注目されるのは、 C_D の曲線に異常が現れた $d/h \approx 0.7$ 付近で S_t の値は幾分低下するけれども、特に目立った変化を示さない一方、 C_D 曲線がなだらかに減小する $d/h=2.8$ 付近で S_t が急増することである。後者は、(4)に述べるように、前面の縁で剥がれた流れが、流れに平行な上下の面に再復帰することに対応しており、 d/h が 2.8 以下では剥がれた流れが復帰しないのに、2.8 以上の場合には再び復帰する。第3図は、二次元煙風洞で測定した上面および背面の圧力分布(負圧を外向きにとってある)であって、 $d/h=4.0$ の

第3図 上面および背面の圧力分布 (参考)

場合の上面に見るように、下流側で圧力が上昇していて、流れの再復帰を示している。

(4) 流れの観察 二次元煙風洞で撮影した流れの写真を第4図に示す。これらの写真は風速が 12.5 m/s (レイノルズ数 4×10^4)、SSS フィルム使用、絞り F 1.5、露光時間 1/30 s で撮影したものである。後に述べるような注意を必要とするけれども、これらの写真で注目される事柄は、 d/h が 0.1 から 0.6 ないし 0.7 まで増すにつれて後流の巻き込みが強くなり、0.7 を越えて増すと再び緩くなることである。比較をはっきりさせるために、岐点を通る煙線の隣の線(第5図、上図の太線)について、それらが最も巻き込んだ位置を重ねて描くと第5図下図のようになる。この図によると、前面の縁をまわる流れは $d/h=0.4\sim 0.8$ で最も強く加速され強く巻き込むことを示している。第6図は第5図の流跡線の最高点位置 x_1/h と d/h との関係をプロットしたものであって、 $d/h=0.6\sim 0.7$ 付近に x_1/h の極小値があり、それから d/h が増大するにつれて x_1/h が増してゆき、流れの再復帰が起こると再び減少することが分かる。

なお、 $d/h=3.0$ および 4.0 (第4図参照) で流れの再復帰の傾向が見られる。

ここで注意を要するのは、二次元煙風洞の実験では、 $h=50$ mm、 $L=100$ mm で正面から見たときの縦横比が小さいため、側壁の境界層の剥離の影響が著しく現われることである。第7図は $d/h=2.0$ の模型のまわりの流れを斜上流側から見たところ、模型のやや上流からも煙を出している。模型の中央部の流れは

第4図 流れの二次元煙風洞による写真

第5図 流跡線の巻き込みの比較 (その1)

第6図 流跡線の巻き込みの比較 (その2)

第7図 矩形柱と壁面との交叉部にできる
襟巻き形の渦

細い白線で示されるように、模型の前面に当たって上下にわかれるが、同時に左右の壁に向かって流れ出す。一方、壁面の境界層は模型のかなり上流で剥離しているから、模型前方の壁面には強い逆流を生じ、結局模型をとり巻いて襟巻き形の渦が形成される。図の太い白線は、壁面から出た煙がこの渦に巻き込まれた状態を示している。このようなわけで、たとえば背圧を二次元煙風洞で測定すると、第1図に示した L/h が十分大きい場合に比べて絶対値がかなり小さい。

4. 考 察

(1) 1辺を気流に垂直に置いた矩形柱のまわりの流れは、上下の縁で剥離して巻き込むが、渦の形成は上下の面および背面によって拘束される。剥離直後の自由流線上の速度 U_s をベルヌイの法則から

$$\frac{U_s}{U_\infty} = \sqrt{1 - C_{pb}}$$

とすれば、 U_s/U_∞ の値は平板の場合の 1.48 から d/h を増すにしたがって増大し、 $d/h=0.66$ 付近で 1.73 程度の極大値に達する一方、巻き込みの領域は縮小する。 d/h をさらに増せば U_s/U_∞ は逆に減少し、巻き込みの領域は拡大する。この現象は ROSKHO が提案した可変速自由流線モデルによる不連続流の計算²⁾ 結果と傾向的には一致している。

(2) 後流渦の S_i と d/h との関係を見ると、すでに述べたように、 C_D および C_{pb} が急変する $d/h=0.6\sim 0.7$ において S_i はなだらかに変化し、 C_D および C_{pb} がなだらかに変化している $d/h=2.8$ 付近で S_i は逆に急変する。ROSKHO は、bluff body から出る渦の周期が、物体の形にかかわらず後流の状態から決定されると推論し、

$$S_i^* = \frac{nh'}{U_s} = S_i \frac{h'}{h} \frac{U_\infty}{U_s}$$

によって定義される wake STROUHAL 数は一般的な常数になるものと主張している²⁾。ただし h' は ROSKHO による不連続流の計算から求められる後流の幅である。しかし上述の実験結果から見ると、この結論は若干の修正を必要とするように思われる。

(3) 岐点を通る流線の上下の振幅 (第4図で漏斗形に見える) から見て、変動する揚抗力の振幅も $d/h=0.6\sim 0.7$ 付近で大きくなるものと考えられる。

(4) 以上の結果から見て、bluff body の抗力は剥離点から下流部分の形に強く影響されることがあって、このような場合を含めて統一的に説明するためには今後さらに研究を重ねる必要があるものと考えられる。

文 献

- 1) PAGE, A. & JOHANSEN, F. C.: The structure of vortex streets. ARC R & M No. 1143, 1928.
- 2) ROSKHO, A.: On the wake and drag of bluff bodies. JAS Vol. 22 1955, pp. 124~132.
- 3) 今井功: 流体抵抗の理論. 科学, Vol. 28 No. 3, 1958, pp. 110~115.
- 4) 松川安広, 橋本貴久裕, 川上速水: クレーンの風圧の研究. 第2報, 日立製作所電工工場, 研究報告, 1476, 1965.
- 5) 中口博, 新井勲, 松坂正芳: トラス構造塔体の静的風圧荷重. 日本航空学会誌 Vol. 12, No. 121, 1964, pp. 29~36.
- 6) DELANY, N. K. & SORESENSEN, N. E.: Low-speed drag of cylinders of various shapes. NACA TN 3038, 1953.
- 7) HOERNER, S.: Fluid Dynamic Drag.
- 8) VICKERY, B. J.: Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream. J. Fluid Mech. Vol. 25 part 3, 1966, pp. 481~494.