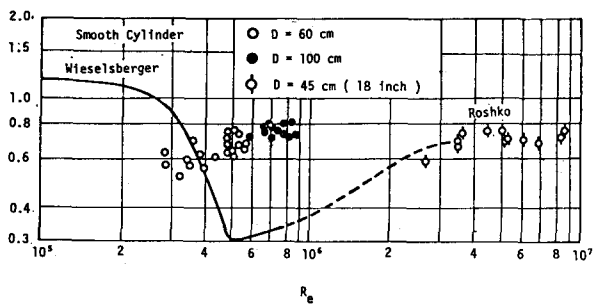


流れの場の相似性について

開水路流れおよび潮流或いは河川の流れは一般に乱流であつて、このような流れの場では乱流混合(運動量輸送)によつて、所謂レイノルズ応力が働き、⁽¹⁾このため見掛け上流れにおける粘性が増したかようになる。このレイノルズ応力は分子粘性力に比して遙かに大きいので、乱流においては分子粘性を表わす動粘性係数 ν に比して、乱流混合に基づく見掛けの粘性を表わす渦動粘性係数 E が支配的となる。したがつて、乱流場を相似にするには E によつて定められるレイノルズ数 $Re = U \cdot a / E$ (U : 代表流速, a : 代表長さ, Re を以後渦動レイノルズ数と称する)を一致せればよいと考えられる。^{(2), (3)}

円柱の抵抗係数について

水深 h , 平均流速 U なる開水路流れの中に鉛直に立てられた直径 D , 水中部分の長さ l なる円柱の抵抗係数 C_D は、一般にレイノルズ数 $Re = UD/\nu$, フルード数 $Fr = U/\sqrt{gD}$, $U/\sqrt{gl}$, 円柱の相対表面粗度 k/D , 相対長さ l/D , 相対吃水 h/l および流れの乱れの程度を表わす係数 λ 等に関係するといわれている。⁽⁴⁾ 逆波抵抗の影響および円柱端部の影響が無視される場合には、 C_D は Re と λ とに關係することが判る。実験室内(模型)で得られるレイノルズ数は通常は $Re < 10^5 \sim 10^6$ であつて、現地(実物)では $Re \approx 10^6 \sim 10^7$ と模型に比して1桁～2桁以上大きくなる。したがつて、実際の円柱構造物の C_D の値を模型実験の結果より推定することが難かしく、更に流れの乱れの程度が模型と実物とでは異なつてくるため、推定がより困難になる。表面が滑らかな円柱の C_D については $Re < 5 \times 10^5$ の範囲ではWieselsbergerによる結果が、 $Re \approx 3 \times 10^6 \sim 9 \times 10^6$ の範囲についてはRoshkoの実験結果⁽⁵⁾が図-1に実線および○で示すように得られている。図中の破線は両者を滑らかに結んだものであつて、○および●印は $D=60$ cmおよび 100 cmの耐蝕アルミニウム製円筒を用いておこなつた現地実験の結果⁽⁶⁾である。なお、現地実験の結果には逆波抵抗および円筒端部の影響はほとんど入っていない。現地実験の結果は、同じ Re の範囲におけるWieselsbergerによる結果とは違つてゐるが、 Re の値が大きなRoshkoによる C_D の値とほぼ同じになっていることを文献(6)では、円筒の表面粗度の影響によるものであるとしたが、説明が十分でなかつたことおよび先に述べたように、流れの乱れの影響が大きいことから、流れの乱れの影響を Re によつて代表させ、 C_D の Re による変化の様子を調べた。

図-1 円柱の抵抗係数 C_D のレイノルズ数 Re による変化抵抗係数 C_D と渦動レイノルズ数 Re との関係

(1) 開水路実験

水路幅 120 cm, 水深 $h \approx 50$ cm, 平均流速 $U \approx 20$ cm/s $\sim$ 60 cm/s なる流れの中に鉛直に立てられた直径 $D=20$ cmの円柱の抵抗係数 $C_D = 1.16 \sim 1.27$ と、流速の鉛直分布より定めた渦動粘性係数 $E \approx 20$ cm²/sによる Re との関係を図-2中に○印で示す。幅 55 cm, 水深 10 cm以下の乱流においては $E \approx 0.5$ cm²/s $\sim$ 31 cm²/s, 水深 10 m程度の河川では $E \approx 80$ cm²/s $\sim$ 250 cm²/sという値が得られているので、ここで用いた E の値はほぼ妥当なものである。⁽⁷⁾

(2) 現地実験⁽⁶⁾

$h \approx 22$ m, $U \approx 50$ cm/s $\sim$ 145 cm/s なる潮流中に置かれた $D=60$ cmおよび 100 cmの円筒の抵抗係数 $C_D = 0.52 \sim 0.82$ と Re との関係を図-2中に△印で示す。この場合の E の値は、流速分布の実測値および流速分布を対数分布と仮定

した時の流速の鉛直勾配より $E \approx 250 \text{ cm/s}$ とした。樋口・中村⁽⁸⁾による潮流観測の結果では、 $E = 10 \sim 10^3 \text{ cm/s}$ であつて、海面下約5m付近で極大値をとる。また、海面下1m~3mでは $E \approx 100 \text{ cm/s} \sim 200 \text{ cm/s}$ であつて、これらの値を参考にすれば、本報告で用いた値はほぼ妥当なものと言える。

(3) Roshkoによる風洞実験⁽⁵⁾

約2.6m×3.6mの断面を有する風洞中に $D=45 \text{ cm}$ の円柱を置き、平均風速 $U \approx 20 \text{ m/s} \sim 55 \text{ m/s}$ なる風を作用させた時の円柱の抵抗係数 C_D の値を図-2中に▲印で示す。 E の値は、流速変動を平均風速の1%以下として $E \approx 3 \times 10^3 \text{ cm/s}$ にとつた。大気の流れにおいては高度が高いほど、また風速が大きいほど E の値は大きくなり、地上1mのところでは $E = 10^2 \text{ cm/s} \sim 10^3 \text{ cm/s}$ 、また地上数百メートルにわたる大規模の現象については、高度に無関係な一定値 $E = 10^4 \text{ cm/s} \sim 10^5 \text{ cm/s}$ とすれば大体的見当が得られるとされている⁽⁹⁾。このことから考えれば、 E の推定値はほぼ妥当なものであろう。

(4) Masch & Moore による速度勾配を有する開水路実験⁽¹⁰⁾

幅30cmの水路に $D=2.5 \text{ cm}$ の円柱を鉛直に立て、水深 $h \approx 25 \text{ cm}$ と一定に保ち、 $Re = 18500 \sim 22500$ 、速度勾配 $\frac{\Delta U}{\Delta z} \cdot D/U = 0.058 \sim 0.117$ となるようにして行なつた実験の結果を図-2中に●印で示す。 R_E は速度勾配より計算した。なお、ここでの C_D は水底からの高さ z における円柱の微小高さ Δz の部分に対する局所的なものである。

(5) 結果の考察

図-2中に、○および●印で示された開水路実験による C_D の R_E による変化はほぼ同じ曲線によつて表わされるようであり、 C_D または△および▲印で示された現地実験と風洞実験による C_D と R_E との関係はほぼ同じと見做せるようである。前者と後者とでは、同じ C_D の値を示す R_E の値がほぼ1桁異なっており、この理由の一つとして流れの乱れの強さが異なることが挙げられる⁽²⁾。引用した実験値あるいは実測値が数少なく不十分ではあるが、流れの乱れの強さがほぼ同じ場合には、 C_D の R_E による変化は R_E が異なる場合にもほぼ同じようになることが推測される。

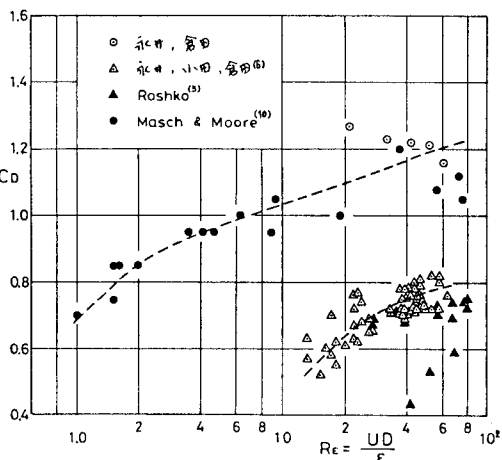


図-2 抵抗係数 C_D の渦動レイノルズ数 R_E による変化

あとがき

円柱の抵抗係数 C_D と渦動レイノルズ数 R_E との関係、換言すれば C_D に関する R_E の相似性については、以前より大阪市立大学建築学教室川村純夫教授が、その可能性を指摘されており、本報告はそれを実験値および実測値を用いて調べたものである。本検討をおこなうにあたり貴重な御意見を戴いた川村教授に対して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 例えば 永井莊七郎：改訂水理学，p.212~213，コロス社，1974年11月
- (2) 気象ハンドブック，p.383~385，朝倉書店，1979年10月
- (3) 今井 功：流体力学の理論，科学，Vol.28, No.3, pp.110~115，岩波書店，1958年3月
- (4) 例えば 土木学会編：水理公式集（昭和46年改訂版），p.46~47，土木学会，1971年11月
- (5) Roshko, A: Experiments on the Flow past a Circular Cylinder at very high Reynolds Number, Jour. of Fluid Mechanics, Vol.10, Part 3, pp.345~356, 1961
- (6) 永井, 小田, 倉田：円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究（第3報），第23回海講演文集，pp.27~31，1976年11月
- (7) 文献(1)，p.217
- (8) 樋口・中村：名古屋港の潮流観測について，京大防災研年報，No.7, pp.410~419，1964年
- (9) 谷一郎：乱流理論，p.41，克誠堂出版，1950年4月
- (10) Masch, F.D. & W.L. Moore: Drag Forces in Velocity Gradient Flow, Jour. of Hydraulics Div., pp. 1~11, Vol.86, No. HY7, July, 1960