

階段を流下する空気混入流中の物体の抗力係数

日本大学大学院	学生会員	○本田	宗大
日本大学大学院	学生会員	鶴見	直樹
日本大学	正会員	高橋	正行
日本大学	フェロー会員	大津	岩夫

表-1 実験条件

$\theta(\text{deg})$	$S(\text{cm})$	S/d_c	$Re \times 10^{-4}$
30	2.5~10	0.3~1.0	2.8~7.8

S : ステップ高さ, d_c : 限界水深 $\{d_c = (q_w^2/g)^{1/3}; q_w$: 水の単位幅流量, g : 重力加速度 $\}$, Re : レイノルズ数 ($Re = q_w/\nu_w$; ν_w : 水の動粘性係数)

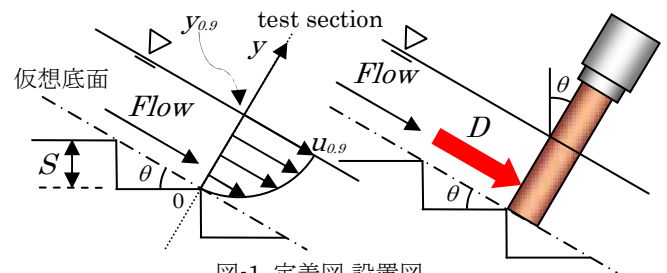
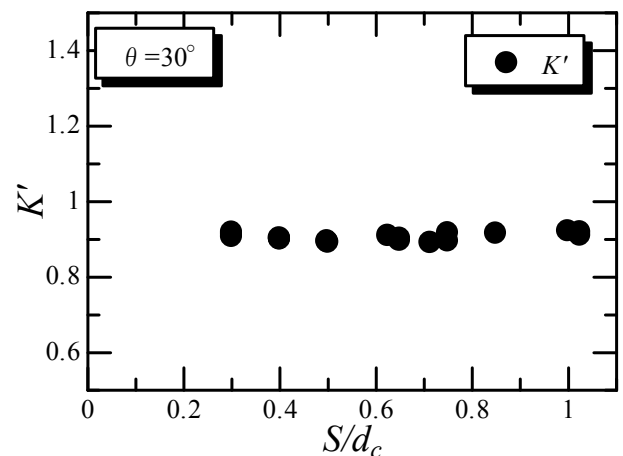


図-1 定義図, 設置図

図-2 S/d_c による K' の変化

ここに,

$$K' = \frac{1}{1 - \int_0^1 C_d dY} \frac{\int_0^1 (1 - C) U^2 dY}{\left(\int_0^1 U dY \right)^2} = \frac{\int_0^{y_{0.9}} \rho u^2 dy}{(\rho_m V_{ave} y_{0.9}) V_{ave}} \quad (4)$$

(4)式から K' は aerated flow の運動量と aerated flow depth $y_{0.9}$ 内の断面平均密度 ρ_m および断面平均流速 V_{ave} を用いた運動量との比を示すことが理解される。

代表流速に V_{ave} , 代表水深に $y_{0.9}$, および代表密度に ρ_m を用いた抗力係数 C_d を定義すると(5)式が示される。

$$C_d = D / \left(\frac{1}{2} \rho_m V_{ave}^2 b y_{0.9} \right) \quad (5)$$

(3),(5)式から $C_d = C_f K'$ となり, (5)式で定義される抗力係数 C_d の意味が明確にされた。空気混入流の C と U を用いて K' を算定した結果, 図-2 が得られ, $\theta=30^\circ, 0.3 \leq S/d_c \leq 1.0$ の場合, $K' \approx 0.9$ となる。

空気混入流の C と u の測定値を代入して算定した V_{ave} および ρ_m と測定した D とを(5)式に代入すると C_d が得られる(図-3 参照)。

まえがき

急傾斜水路では空気混入流が生じる。空気混入流中のバブルブロックや急流河川の巨礫などの物体には流体力が作用する。また豪雨による浸水時, 地上と地下空間を結ぶ階段を氾濫水が流入し, 空気混入流となり^{1)~3)}, 階段上の歩行者や物体には流体力が作用する。

従来, 空気混入流中の物体の抗力係数の評価法については不明である。

ここでは, 高橋らにより提示されている空気混入流中の物体の抗力係数評価法⁴⁾を用いて, 傾斜角度 $\theta=30^\circ$ の階段状水路の skimming flow(各ステップ隅角部で常に渦が形成される流況)を対象に空気混入流中の物体の抗力係数を求めた。また, 大気中の物体の抗力係数との比較を行った。

実験方法

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ の階段状水路上で生じる空気混入流中の物体の抗力係数を求めるため, 表-1 の実験条件のもと, 擬似等流区間(各ステップ上で同じ流況が繰り返し形成される状態)に円柱(直径 5.0cm)および角柱(各辺の長さ 5.0cm)を水路中央部に設置し, 各柱状物体に作用する抗力を測定した。また, 仮想底面と垂直な step edge 断面を抗力評価断面とした(図-1)。ここに, 図-1 中の y は仮想底面からの垂直距離であり, $y_{0.9}$ は物体設置前の aerated flow depth ($C=0.9$ となる y の値), u は物体設置前の aerated flow の流速, $u_{0.9}$ は $y=y_{0.9}$ での流速である。2成分分力計に取り付けた柱状物体をそれぞれステップエッジに合わせ(図-1), 柱状物体に働く抗力 D の測定(採取間隔 0.05sec, 採取時間 200sec)を行った。なお, C と u の値は高橋・大津の実験値³⁾を用いた。

空気混入流中の物体の抗力係数

空気混入流中の柱状物体に作用する抗力 D について, 空気混入率の変化を密度変化として表現し, 運動エネルギーが圧力に変換されるものと解釈⁴⁾すると, 次のように表示される。

$$D = C_f \int_0^{y_{0.9}} \frac{1}{2} \rho u^2 b dy \quad (1)$$

ここに, C_f は(1)式の仮定と実際との違いを補正する係数, b は柱状物体の幅である。また, $Y=y/y_{0.9}$ および $U=u/u_{0.9}$ を用いると(1)式は次のようになる。

$$D = C_f \frac{1}{2} \rho_w u_{0.9}^2 b y_{0.9} \int_0^1 (1 - C) U^2 dY \quad (2)$$

空気混入流の特性量を考慮して代表長さに aerated flow depth $y_{0.9}$, 代表流速に空気混入流の断面平均流速 V_{ave} , 代表密度に断面平均密度 ρ_m を用いると(2)式は次のようになる⁴⁾。

$$D = C_f K' \frac{1}{2} \rho_m V_{ave}^2 b y_{0.9} \quad (3)$$

キーワード 抗力, 抗力係数, 階段状水路, 空気混入流

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

TEL 03-3259-0676

C_d は図-3に示されるように、各柱状物体の形状に対して、 $0.3 \leq S/d_c \leq 1.0$ の範囲ではほぼ一定である。また与えられた S/d_c に対して形状の違いによる抗力係数 C_d の変化は、角柱が最も大きく、菱形と円柱はほぼ等しい値となった。このことは、角柱は円柱や菱形に比べ流れを遮る効果が大いことから理解される。

求められた各柱状物体の抗力係数 C_d と K' より仮定と実際との違いを補正する係数 C_f が得られる(図-4)。 C_f は図-4に示されるように、与えられた柱状物体の形状に対して $0.3 \leq S/d_c \leq 1.0$ の範囲ではほぼ一定である。

大気中の物体の抗力係数 C_D と空気混入流中の物体の抗力係数 C_d との比較を行うため、流体運動によって生じる抗力による抗力係数 C_D を求める。 C_D は抗力 D から物体前面に作用する静水圧による全圧力 P_w を除き、次のように示される。

$$C_D = (D - P_w) / \left(\frac{1}{2} \rho_m V_{ave}^2 b y_{0.9} \right) \quad (6)$$

ここに、

$$P_w = b \int_0^{y_{0.9}} \rho g \cos \theta dy \quad (7)$$

また(6)式から求められた C_D を図-5に示す。また、表-2は風洞実験により求められた各柱状物体における抗力係数 C_D である。この2つの抗力係数を比較すると、静水圧による全圧力を除いた抗力係数 C_d が風洞実験により求められた抗力係数 C_D より小さくなっている。これは大気中の物体の場合、物体後方にできる渦による圧力低下が確認されている⁵⁾ものの、空気混入流中の物体では(図-6参照)、物体後方に空洞(air-pocket)が生じて大気中のような渦による圧力低下が発生しなかったためと考えられる。

まとめ

- ・与えられた柱状物体形状に対して S/d_c に関わらず抗力係数 C_d はほぼ一定となった。
- ・与えられた S/d_c に対して柱状物体の形状の違いによる抗力係数 C_d の値については、角柱が最も大きく、菱形と円柱はほぼ等しい値となった。
- ・(1)式の仮定と実際との補正係数 C_f の値が示された。
- ・流体運動による空気混入流中の物体の抗力係数 C_D と大気中の物体の抗力係数 C_D とを比較すると、空気混入流中の物体の抗力係数 C_D の方が小さくなった。

謝辞：著者の一人(高橋正行)は本研究の一部に科研費(22760377)の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)高橋,安田,大津:階段状水路における空気混入流の特性,水工学論文集,第49巻,pp.829-834,2005.
- 2)Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Energy Head of Aerated Flows in Stepped Channels, Proc. of IAHR Congress, IAHR, Seoul Korea, pp.2890-2899, 2005.
- 3)高橋,大津:階段状水路の空気混入流特性に対する水路傾斜角度の影響,水工学論文集,第54巻,pp.1057-1062,2010.
- 4)高橋,安田,大津:階段を流下する空気混入流中の物体の抗力係数,水工学論文集,第51巻,pp.685-690,2007.
- 5) Naudascher, E. Hydrodynamic Force, IAHR Hydraulic Structures Design Manual No.3, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1991.

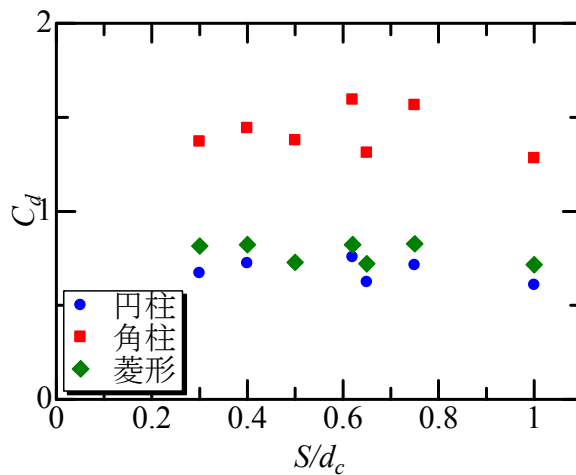


図-3 抗力係数(C_d)

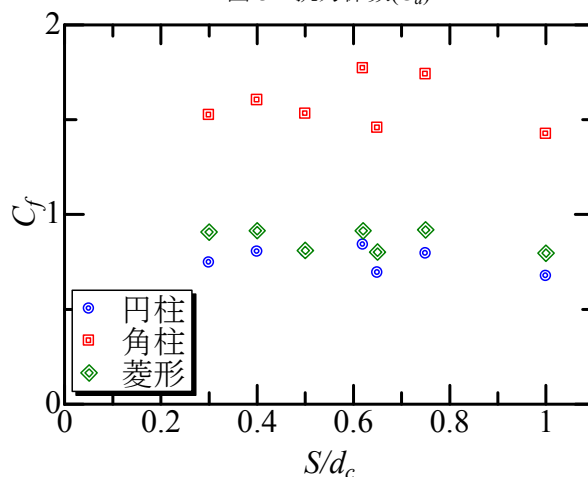


図-4 補正係数(C_f)

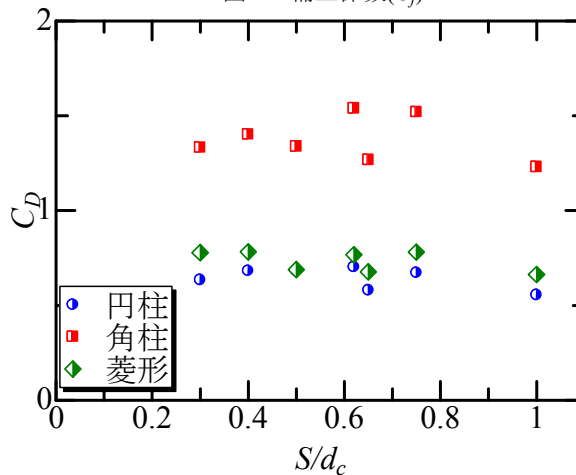


図-5 流体運動によって生じる抗力の抗力係数(C_D)

表-2 風洞実験より求められた大気中2次元物体の抗力係数
 $C_D (10^3 \leq R \leq 10^5)$

	円柱	角柱	菱形
C_D	1.17	2.05	1.55

($R = U_\infty b / \nu$; U_∞ :一様流の流速)

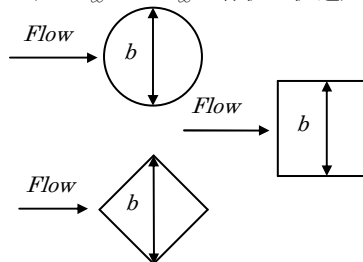


図-6 物体後方の流況(角柱, test A, $S/d_c = 0.65$)