

階段を流下する空気混入流中の物体の抗力係数

DRAG COEFFICIENTS OF BODIES IN AERATED FLOWS ON STEPPED CHANNELS

○本田宗大¹, 高橋正行², 大津岩夫²

*Kazuhiro Honda¹, Masayuki Takahashi², Iwao Ohtsu²

Abstract: Drag coefficients of bodies in aerated flows have not yet been shown clearly. For design purposes, it is necessary to clarify the drag force acting on various bodies in high-speed aerated flows, such as baffle piers on chutes, or boulders in mountain rivers. In this report, drag coefficients of various cylindrical bodies in stepped channels are obtained from aerated flow characteristics.

まえがき

急傾斜水路あるいは階段状水路では空気混入流が生じる¹⁾。空気混入流中にバブルブロックや巨礫などの物体が存在する場合、それらの物体には流体力が作用する。また都市部において豪雨によって地上と地下空間を結ぶ階段に氾濫水が流入した事例が報告されている^{2),3)}。階段に流入した水はある程度流下すると、空気混入流となり¹⁾、階段上の歩行者脚部には流体力が作用する。

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³⁾を用いて、傾斜角度 $\theta=19^\circ$, 30° 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柱状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 $\theta=19^\circ$, 30° の階段状水路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)、菱形柱(対角線の長さ 7.1cm)および角柱(各辺の長さ 5.0cm)を水路中央部に設置(図-1a)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-1b)。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 *test section* に設置し(図-1)、柱状物体に作用する抗力 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⁴⁾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 は、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³⁾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。

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

代表長さに aerated flow depth $y_{0.9}$ 、代表流速に空気混入

表-1 実験条件

θ (deg)	S (cm)	S/d_c	$Re \times 10^{-4}$
19	5~10	0.5~1.0	4.7~9.8
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 ($Re=q_w/v_w$; v_w : 水の動粘性係数)

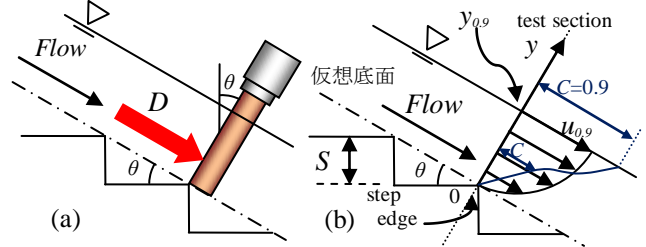


図-1 (a)設置図, (b)定義図

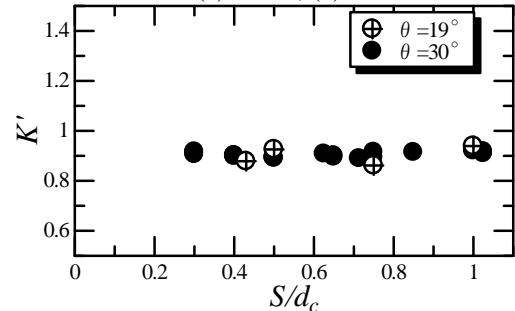


図-2 S/d_c による K' の変化

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³⁾。

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

ここに、

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

(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。

空気混入流の特性量を考慮して代表流速に V_{ave} 、代表水深に $y_{0.9}$ 、および代表密度に ρ_m を用い、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)式で定義した抗力係数 C_d と C_f の関係が明確にされた。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、 $\theta=19^\circ$, 30° , $0.3 \leq S/d_c \leq 1.0$ の場合、 $K' \approx 0.9$ となる。

1: 日大理工・院(前)・土木 2: 日大理工・教員・土木

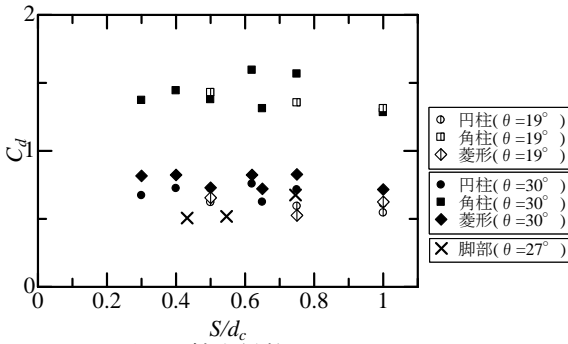


図-3 抗力係数 C_d

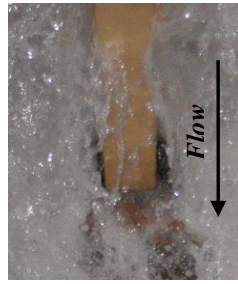


図-4 物体後方の流況
(角柱, $S/d_c=0.65$)

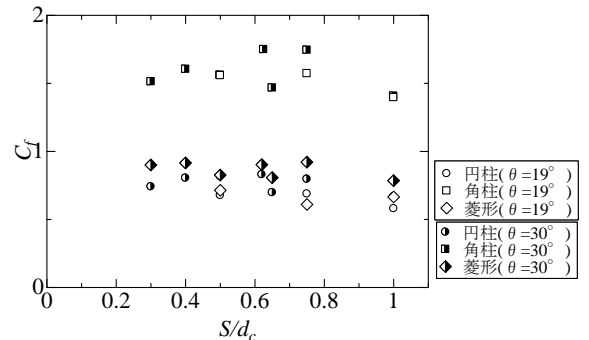


図-5 補正係数 C_f

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⁵⁾

$C_D(10^3 \leq R \leq 10^5)$

	円柱	角柱	菱形
C_D	1.17	2.05	1.55

($R=U_\infty b/v$; U_∞ :一様流の流速)

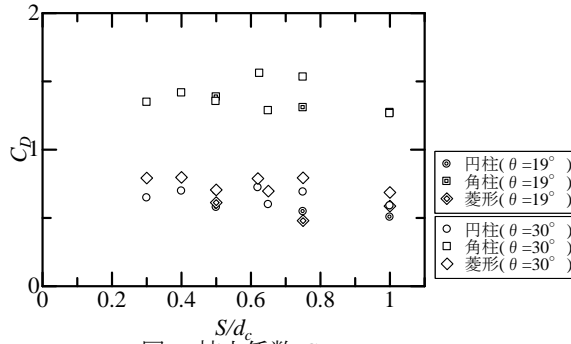
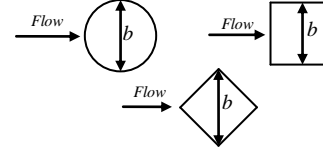


図-6 抗力係数 C_D

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).図-3 に示されるように, C_d は与えられた θ および物体の形状に対して, S/d_c の変化に関わらずほぼ一定値である.また C_d の値は,角柱が最も大きく,菱形と円柱はほぼ等しい値となった.これは,空気混入射流中の物体前面での流れを遮る効果と物体背面側に形成される air-pocket の大きさ(図-4)が柱状物体の形状によって異なるためと考えられる.

石垣らによる脚部模型の抗力係数と比較すると,脚部模型の抗力係数は菱形および円柱の抗力係数より幾分か小さい値となった.これは脚部模型形状の影響によるものと考えられる.

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-5).

大気中の物体の抗力係数と空気混入流中の物体の抗力係数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,

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

なお,階段状水路上の空気混入流は射流であり,物体背面は air-pocket が形成されているため,物体背面に作用する圧力は考慮していない.(6)式から求められた C_D を図-6 に示す.また,表-2 は風洞実験により求められた各 2 次元物体における抗力係数 C_D である.図-6 と表-2 を比較すると,空気混入流中の物体の抗力係数 C_D は大気中の物体の場合,物体後方にできる wake vortex 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-4 参照),流れが射流であり物体後方に空洞(air-pocket)が生じて大気中 2 次元物体後方のような wake vortex 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

- 円柱,菱形柱,四角柱の C_d の値を明らかにした(図-3).
- また, S/d_c の変化に関わらず抗力係数 C_d はほぼ一定となった. さらに,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.
- 脚部模型の抗力係数は菱形および円柱の抗力係数より幾分か小さい値となった.
- (1)式の仮定と実際との補正係数 C_f の値が示された.
- 流体運動による抗力係数 C_D は大気中の 2 次元物体よりも,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)Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Flow characteristics of stepped channel flows, *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 2)石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一: 実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する研究, *水工学論文集*, 第 50 巻, pp.583-588, 2006.
- 3)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,pp685-690, 2007.
- 4)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.
- 5) Hoerner, S. F.: *Fluid-Dynamic Drag*, Hoerner Fluid Dynamics, Bakersfield, USA, 1965.