

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 10 日現在

機関番号：32665
研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2010～2011
課題番号：22760377
研究課題名（和文） 階段を流下する空気混入流中の物体の抗力係数
研究課題名（英文） Drag Coefficients of Bodies in aerated flows on stepped channels
研究代表者 高橋 正行 (TAKAHASHI, MASAYUKI) 日本大学・理工学部・講師
研究者番号：10318363

研究成果の概要（和文）：空気混入流中の物体の抗力係数を空気混入水流の特性量に基づいて求める方法を提案した。すなわち、空気混入率、流速、空気混入流水深を用いて抗力係数を求める方法を確立した。この方法に基づき、階段状水路に形成される空気混入流中に基本的な形状の柱状物体（円柱、四角柱、菱形柱、脚部模型）を設置し、柱状物体の抗力係数を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, the general expression for the drag coefficient of various bodies in aerated flows is reasonably established on the basis of flow characteristics of aerated flows. Also, in stepped channels, drag coefficients of various cylindrical bodies and a model leg are obtained from aerated flow characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

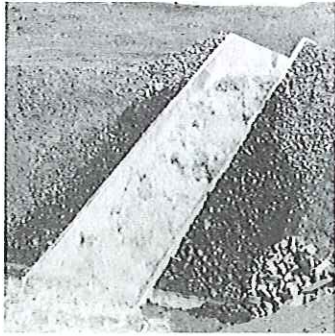
科研費の分科・細目：土木工学，水工水理学

キーワード：空気混入流，抗力，階段状水路，流体力学

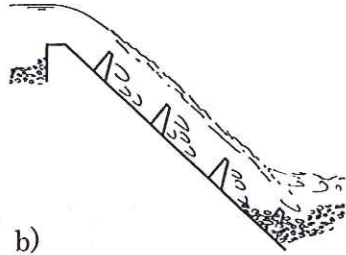
## 1. 研究開始当初の背景

急傾斜水路で生じる空気混入流中にバブルブロックや物体が設置されている場合（図-1，2 参照）。バブルブロックや物体には流体力が作用する。また、近年、市街地化された都市部で豪雨による地下街・地下室等の地下空間への浸水被害が増加している。地下空間への浸水が生じると、地上と地下空間とを結ぶ階段を氾濫水が流入し、5 から 6 段の

階段を流下すると高速の空気混入流となり、階段上や地下空間の物体には流体力が作用する。さらに、階段を使用して避難しようとする人の脚部へ空気混入流による流体力が作用し、歩行を阻害する要因となる。すなわち、水工設計上、防災上、空気混入流中の物体に作用する流体力の大きさを知ることが重要となる。



a)



b)

図一1 バッフルブロックの設置された急傾斜水路<sup>1)</sup>の一例



図二 急傾斜水路の空気混入流中の物体の一例

従来、空気中や水中の物体の抗力係数評価法は確立されている。しかしながら、水と空気が混在した空気混入流中の物体の抗力係数と抗力の評価法については、流れが飛沫を伴う空気混入流となっているため、水深、流速が定められず不明な状況である。すなわち、空気混入流中の物体の抗力が水のみの流れの中の物体の抗力に比べて大きくなるのか小さくなるのかについても全く明らかにされていない。また、地下空間への浸水被害に対する地下空間から地上への避難可能性についての従来の研究<sup>2), 3)</sup>については、石垣ら<sup>2)</sup>は空気混入流

中の階段の歩行者脚部に作用する流体力の計測を実物大階段部を作成して行った。また、後藤ら<sup>3)</sup>は粒子法を用いて、階段部の空気混入流の数値計算を試み、階段歩行者に作用する流体力の評価を試みた。しかしながら、階段部の流れは飛沫を伴う空気混入流となっており、水深と流速の評価は明確とは言えない。

研究代表者は階段部での空気混入流の水理特性について、空気混入流の流速、水深、およびエネルギーの大きさについて研究を進めており、これまで不明であった空気混入流の水深、流速、およびエネルギー評価法の確立に成功している<sup>4), 5), 6)</sup>。また、そのエネルギー評価法を用いて、広範囲な水路傾斜角度 $\theta$ とステップ高さ $S$ のもとで、空気混入流の水深、流速、エネルギーの大きさを明らかにしている<sup>7), 8), 9)</sup>。研究代表者は、これまでの成果を発展させることで空気混入流中の物体の抗力係数と抗力の評価法を提案できるものと着想した。

#### 参考文献

- 1) Peterka, *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*, Engineering Monograph, Vol.25, U.S. B. R., 1978.
- 2) 石垣ら, 水工学論文集, 50 巻, pp.583-588, 2006.
- 3) 後藤ら, 水工学論文集, 50 巻, 865-870, 2006.
- 4) Takahashi et al., *J. Hydraul. Res.*, IAHR, Vol. 44, No.6, pp. 857-860, 2006.
- 5) Ohtsu et al., *Proc. 31<sup>st</sup> IAHR Cong.*, IAHR, pp. 2890-2899, 2005.
- 6) Ohtsu et al., *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 7) 高橋ら, 水工学論文集, 土木学会, 52 巻, pp. 787-792, 2008.
- 8) Takahashi et al., *Proc. 32nd IAHR Congress*, IAHR, CD-ROM, 2007.
- 9) 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, 土木学会, 54 巻, 1057-1062.

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに得られた空気混入流の水深，流速，エネルギー評価法の知見を発展させることで，急傾斜水路の空気混入流中の物体に作用する抗力係数評価法を開発し，空気混入流中の柱状物体の抗力係数を明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

### ・ 空気混入流中の物体の抗力係数評価法の開発

一般に流れの中の物体の抗力係数を評価する場合，抗力係数  $C_d$  が普遍的な値となるように，代表流速  $V$  を適切に選び，抗力係数を定義している．空気混入流中の物体に抗力が作用する場合，抗力係数の値が普遍的に定まるように代表水深，代表流速，および流体の密度を選ぶ必要がある．空気混入流中の物体の抗力係数評価法の検討では，代表水深に空気混入率  $C$  (= 空気の体積 / (水の体積 + 空気の体積)) が 0.9 となる aerated flow depth  $y_{0.9}$  を(図-3 参照)，代表流速に空気混入流の断面平均流速  $V_{ave}$  を，流体の密度に空気混入流の断面平均密度  $\rho_m$  を用い，抗力係数  $C_d$  の普遍的な表示を次式で定義した。

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

ここに，

$$V_{ave} = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} u dy = u_{0.9} \int_0^1 U dY \quad (2)$$

$$\rho_m = \frac{\int_0^{y_{0.9}} \rho u dy}{\int_0^{y_{0.9}} u dy} = (1 - C_m) \rho_w \quad (3)$$

なお， $C_m$  は断面平均空気混入率， $\rho_w$  は水の密度である．(1)式による抗力係数  $C_d$  の定義に基づき空気混入流中の種々の物体の抗

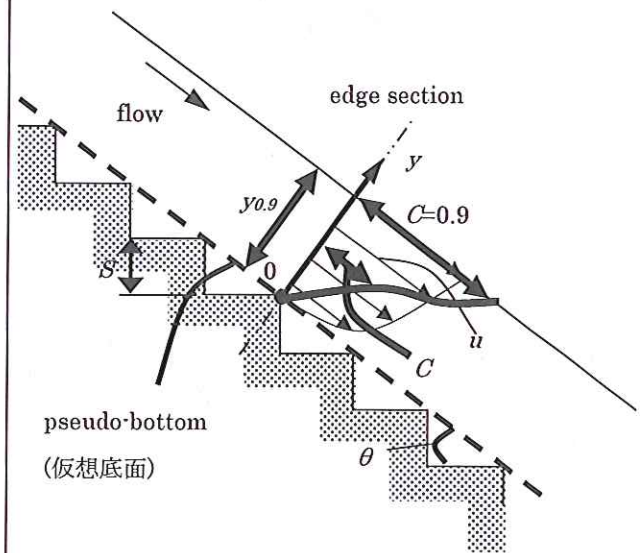


図 - 3 定義図

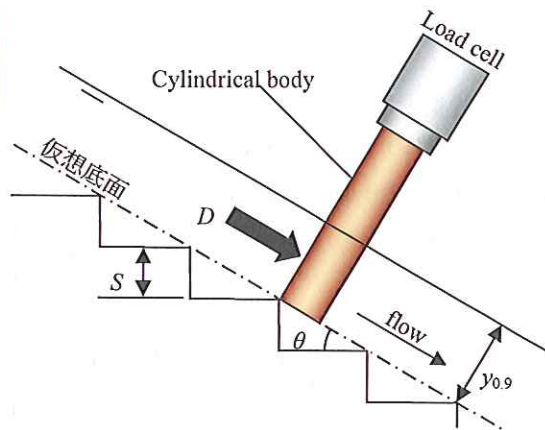


図-4 柱状物体の設置状況 (Case A)

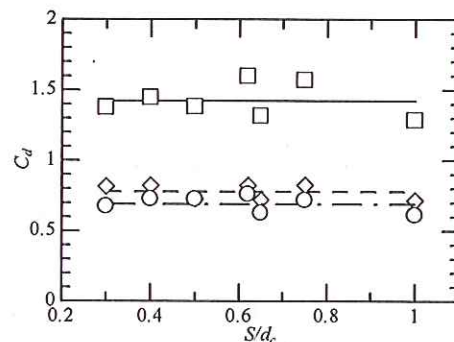


図-5 抗力係数  $C_d$  (Case A)

〔□〕 四角柱，〔◇〕 菱形柱，〔○〕 円柱〕

力係数と抗力を以下のようにして明らかにすることが可能となった。

・ 空気混入流中の柱状物体の抗力係数

階段部での空気混入流中の物体の抗力係数を評価するため、抗力係数に対する水路傾斜角度  $\theta$ 、相対ステップ高さ  $S/d_c$ 、および物体の形状の影響について検討する。物体の抗力係数を評価するために、物体を設置していない状態での空気混入流中の空気混入率  $C$ 、流速  $u$  を測定 (図-3 参照) し、その後、基本的な形状の柱状物体 (円柱、四角柱、菱形柱) を設置して物体に作用する抗力  $D$  を測定した (図-4 参照)。  $C$  と  $u$  の測定には 2 点電極型ボイド率計を用いた (採取時間 20s, 採取間隔 0.05s) また、抗力  $D$  の測定には、2 成分分力計を用いた。

4. 研究成果

階段状水路の skimming flow の擬似等流中に設置した柱状物体の抗力係数  $C_d$  について次元解析的考察より次の関係が得られる。

$$C_d = \text{func} \left( \frac{S}{d_c}, \theta, R, \text{Shape} \right) \quad (4)$$

空気混入流中の柱状物体を図-4 のように設置した場合の抗力係数  $C_d$  の値は  $D$  の測定値、および  $C$  と  $u$  の測定値から得られる  $y_{0.9}$ ,  $V_{ave}$ ,  $\rho_m$  の値を(1)式に代入することで求められる。(4)式の関係で  $C_d$  の値を整理すると図-5 が得られる。図-5 に示されるように、四角柱の  $C_d$  の値は円柱と菱形柱よりも大きく、円柱の  $C_d$  の値は菱形の  $C_d$  よりも幾分小さい値を示す。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 (図-6) の大きさが柱状物体の形状によって異なるためと考えられる。

空気混入流中の物体を図-7 のように設置した場合については、抗力係数  $C_{dH}$  の値が次式によって求められ、図-8 が得られる。

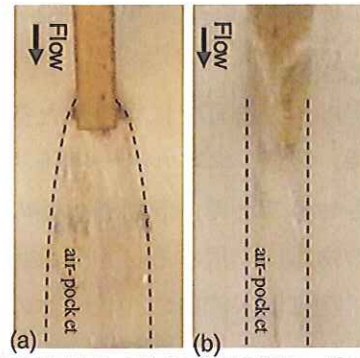


図-6 空気混入流中の物体背面の流況 ( $S/d_c=0.3$ )

(a) 四角柱, (b) 円柱

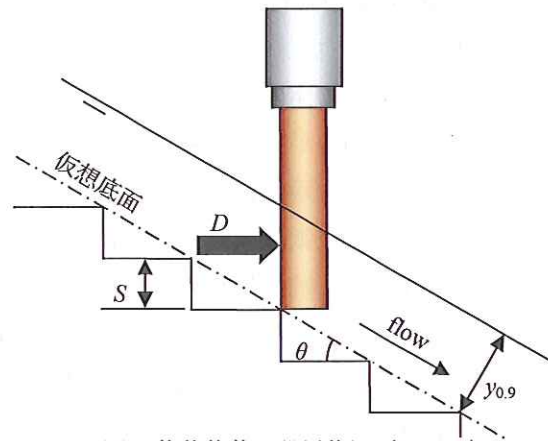


図-7 柱状物体の設置状況 (Case B)

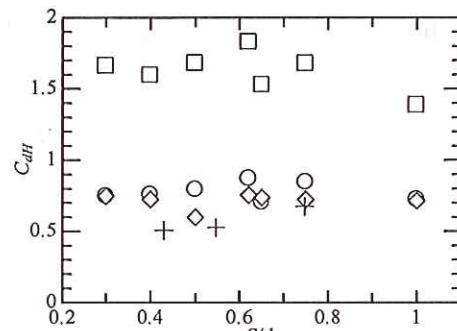


図-8 力係数  $C_{dH}$  (Case B)

[(□)四角柱, (◇)菱形柱, (○)円柱, (+)脚部模型<sup>2)</sup>]

$$C_{dH} = \frac{D_H}{\frac{1}{2} \rho_m (V_{ave} \cos \theta)^2 b \frac{y_{0.9}}{\cos \theta}} \quad (5)$$

階段上の脚部の抗力係数の値を知るため、石垣らによって測定なされた上流側を向いた脚部模型 (図-7 のように設置) に作用する抗力<sup>4)</sup>  $D_H$  の大きさを使用すると図-8 の+印が得られる。図-8 示されるように、脚部

の  $C_{dH}$  の値は円柱の  $C_{dH}$  の値より幾分小さい値を示した。これは、脚部模型形状の影響によるものと考えられる。

#### ・抗力の算定法

擬似等流状態の *skimming flow* 中に柱状物体が設置されている場合、水路傾斜角度  $\theta$ 、ステップ高さ  $S$ 、単位幅流量  $q_w$  (もしくは限界水深  $d_c$ ) が与えられると高橋・大津の階段状水路の空気混入流特性量を求める実験式を用いて  $\rho_m$ ,  $V_{ave}$ ,  $y_{0.9}$  が求まる。それらの値と図-5の抗力係数  $C_d$  (あるいは図-8  $C_{dH}$ ) の値を用い、(1)式 (あるいは(5)式) に代入することで柱状物体に作用する抗力  $D$  (あるいは  $D_H$ ) の大きさを算定できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1)高橋正行, 大津岩夫: 階段状水路における空気混入流中の物体の抗力係数, 土木学会論文集 B1(水工学), 68 巻 4 号, I\_883-I888, 2012, 査読有.

(2)Takahashi, M., and Ohtsu, I.: Drag Coefficients of Bodies in Aerated Flows on Stepped Channels, Proc. 34<sup>th</sup> IAHR World Cong., IAHR, pp. 2593-2600, 2011, 査読有.

[学会発表] (計4件)

(1) 本田宗大, 高橋正行, 大津岩夫: 階段を下流する空気混入流中の物体の抗力係数, 第54回日本大学工学部学術研究報告会講演概要集, 54 巻, pp.79-82, 2011 年 12 月 3 日, 日本大学工学部.

(2) 本田宗大, 高橋正行, 大津岩夫: 階段を下流する空気混入流中の物体の抗力係数, 第55回日本大学工学部学術講演会, 55 巻, H3-17, CD-Rom, 2011 年 11 月 26 日, 日本大学工学部.

(3) 本田宗大, 高橋正行, 大津岩夫, 鶴見直樹: 階段を下流する空気混入流中の物体の抗力係数, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, 66 巻, pp.57-58, 2011 年 9 月 7 日, 愛媛大学.

(4) 本田宗大, 高橋正行, 大津岩夫: 階段を下流する空気混入流中の物体の抗力係数, 第53回日本大学工学部学術研究報告会講演概要集, 53 巻, pp.98-101, 2010 年 12 月 4 日, 日本大学工学部.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 正行 (Takahashi Masayuki)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号: 10318363