

常流あるいは射流中に置かれた 水没柱状物体に働く流体力

HYDRODYNAMIC FORCES ACTING ON A SUBMERGED SQUARE PILLAR IN SUB- OR SUPER-CRITICAL FLOW

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・石原 仁³
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Jin ISHIHARA

¹正会員 博士(工学) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (同上)

Hydrodynamic force exerting on a submerged square pillar in sub- or super-critical flows were investigated experimentally. The F_r number and the ratio of depth h_0 to pillar height k were changed in the range of 0.658 ~ 1.428 and 1~2.5, respectively. It is found that the drag coefficient C_d and the lift coefficient C_l of a square pillar are constant when the flow is super-critical flow ($F_r \geq 1$), on the other hand, when the flow is sub-critical flow ($F_r < 1$), C_d and C_l are affected by h_0/k . The value of C_d becomes constant when $h_0/k > 2.0$, while the values of C_l is fluctuated in sub-critical flow. A flow chart of a estimation of C_d of a square pillar, which is emerged/submerged according to flow phenomenon, is also shown.

Key Words : drag coefficient, lift coefficient, dynamic force, submerged square pillar, sub-critical flow, super-critical flow

1. はじめに

近年、河川を本来の川らしい川に再生し、個性ある地域づくりと豊かな生活環境を創出することを目的に、河川の再生事業が中小都市河川を対象に各地で計画あるいは実施されている。事業後の河川では多くの場合、住民の要望や環境・景観面の配慮から、植生護岸、飛び石や巨石などのモノが比較的短い区間に空間的に配置される。河川景観の向上を目的に河道内の粗石が引き起こす流れを利用した試み¹⁾や、ハビタットの連続性の確保を目的に、河床勾配1/10程度の斜路とその下流に巨石を用いた減勢工を組み合わせた斜路工を落差工の代替として用いた試み²⁾などはその代表例である。

このような河道内のモノは流水抵抗として働く。近年では、河道内の流況の予測精度の向上を図るために、基礎方程式にモノが流れに及ぼす力を外力項として付加した数値モデルの開発が数多くなされている^{3)~6)}。このように、河道内のモノの流水抵抗を適切に評価することは、そこでの流況を高い精度で予測する上で極めて重要になる。

水工水理学の分野では様々な形状の物体を対象に流水

抵抗に関する研究が行われている。例えば、非水没物体については、河道内の橋脚や植生などを対象に単体の円柱あるいは円柱群に作用する流体力とその抵抗係数を調べた研究^{7)~10)}や、洪水氾濫時に堤内地の家屋やビルなどを対象とした角柱あるいは角柱群に働く流体力とその抵抗係数を調べた研究^{11)~13)}がある。また、相対水深比が大きな水没物体については、人工粗度、護床工や護岸ブロックを対象に、それらに働く流体力とその抵抗係数を調べた研究^{14)~16)}などがある。このように、非水没状態や相対水深比の大きな水没状態のモノに働く流体力やその抵抗係数はある程度わかっている。

一方で、相対水深比の小さな水没物体に働く流体力とその抵抗係数については、研究¹⁷⁾例が少なく情報が限られている。これを踏まえ、著者らは代表水深 h を等流水深 h_0 とし、代表水深 h と物体の高さ k の比で表される相対水深比 h/k を変化させた実験を行い、相対水深比が $2 < h/k \leq 2.5$ の範囲で、抵抗係数 C_d が一定値となることを示した¹⁸⁾。このように、相対水深比 $h/k \leq 2$ では抵抗係数 C_d は自由表面の影響を受けると考えられる。上記の実験は常流中で行われたものであり、射流中では自由表面と物体との位相が常流とは異なるため、射流中の抵抗係数 C_d は相対水深比に対して常流とは異なった

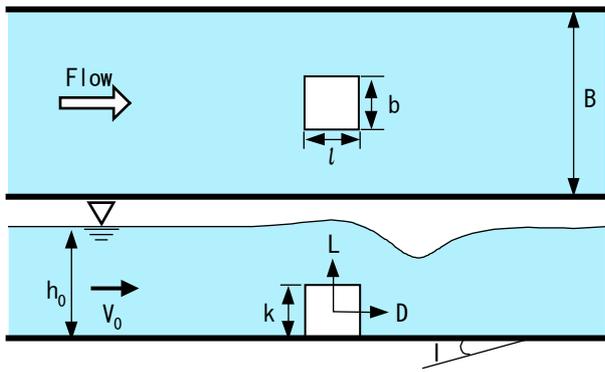


図-1 角柱の設置状況

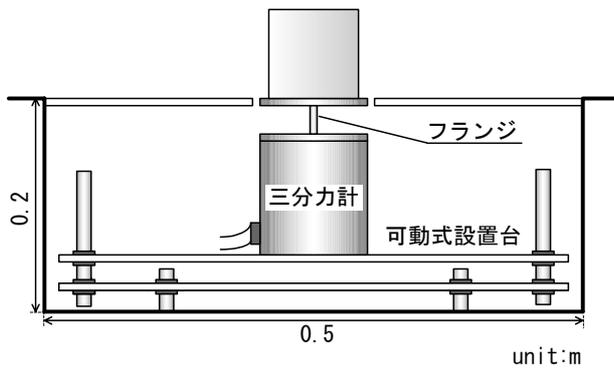


図-2 3分力計の設置図

傾向を示すと考えられる。

本研究は、著者らが現在開発中の中小都市河川の治水対策の検討可能な平面2次元解析モデル¹⁹⁾のフレームワークにおいて、常流、射流中の水没物体に働く流水抵抗の評価方法を確立することを目的としている。ここでは常流あるいは射流中におかれた代表水深 h と物体の高さ k の比で表される相対水深比 h/k が小さい場合の水没柱状物体の抗力係数 C_d の評価方法について検討するとともに、水没物体の滑動や転倒に対する安定性の照査に必要な揚力係数 C_l についても検討した。

2. 実験概要

実験装置は、長さ 20m、幅 $B=0.6\text{m}$ 、底面粗度 $n=0.01$ の矩形断面水路である。水路内には、図-1 に示すように、アクリル製の水没柱状物体が設置されている。水没柱状物体の形状としては、形状が単純な立方体(高さ k =奥行 l =幅 $b=0.04\text{m}$)を採用した。図-2 に示すように、水没柱状物体は、水路中のピット内の 3 分力計(三計エンジニアリング製、定格容量: 2kgf)に取り付けられている。

水没状態にある立方体の抗力係数 C_d の支配パラメータとしては、①流れの状態(Reynolds 数 Re_d 、Froude 数

表-1 水理条件

	流量 Q (m ³ /s)	相対水深 h_0/k	水深平均流速 V_0 (m/s)	Froude数 F_r	Reynolds数 Re_d	水路床勾配 I
Case1-1	0.0121	1.00	0.478	0.764	19125	1/1000
1-2	0.0121		0.498	0.795	19909	1/1200
1-3	0.0124		0.516	0.824	20678	1/1400
1-4	0.0125		0.520	0.831	20800	1/333
1-5	0.0163		0.681	1.088	27259	1/250
1-6	0.0184		0.773	1.235	30937	1/200
1-7	0.0216		0.894	1.428	35774	1/167
Case2-1	0.0170	1.25	0.572	0.817	22879	1/1200
2-2	0.0183		0.604	0.863	24163	1/333
2-3	0.0225		0.732	1.046	29284	1/250
2-4	0.0260		0.862	1.231	34480	1/200
2-5	0.0281		0.904	1.291	36160	1/167
Case3-1	0.0183	1.50	0.523	0.682	20923	1/1400
3-2	0.0189		0.550	0.712	21999	1/1200
3-3	0.0195		0.554	0.723	22179	1/1000
3-4	0.0265		0.742	0.967	29668	1/333
3-5	0.0303		0.825	1.076	33002	1/250
3-6	0.0338		0.931	1.214	37226	1/200
3-7	0.0381		1.025	1.337	40998	1/167
Case4-1	0.0236	1.75	0.600	0.724	24000	1/1200
4-2	0.0328		0.811	0.979	32445	1/333
4-3	0.0385		0.923	1.115	36926	1/250
4-4	0.0421		0.990	1.195	39583	1/200
4-5	0.0465		1.086	1.311	43437	1/167
Case5-1	0.0302	2.00	0.622	0.703	24888	1/1000
5-2	0.0303		0.644	0.727	25750	1/1400
5-3	0.0311		0.656	0.741	26244	1/1200
5-4	0.0409		0.889	1.004	35565	1/333
5-5	0.0477		1.036	1.170	41427	1/250
5-6	0.0530		1.129	1.275	45147	1/200
5-7	0.0568		1.256	1.418	50225	1/167
Case6-1	0.0402	2.25	0.751	0.799	30033	1/1200
6-2	0.0501		0.964	1.027	38571	1/333
6-3	0.0531		1.002	1.067	35069	1/286
6-4	0.0556		1.069	1.138	42754	1/250
6-5	0.0603		1.142	1.216	39975	1/222
Case7-1	0.0389	2.50	0.660	0.667	26394	1/1400
7-2	0.0391		0.658	0.658	26334	1/1200
7-3	0.0399		0.671	0.678	26837	1/1000
7-4	0.0444		0.722	0.730	25282	1/500
7-5	0.0563		0.934	0.943	37343	1/333
7-6	0.0632		1.073	1.084	37542	1/286
7-7	0.0661		1.150	1.161	45991	1/250

F_r)、②角柱の形状(l/k , b/k)、③水路幅と物体の投影幅の関係(B/b)、④流れと角柱との相対的な関係(h/k)が考えられる。ここに、 $Re_d=Vb/\nu$ 、 $F_r=V/(\text{gh})^{1/2}$ 、 V =代表流速、 h =代表水深、 ν =水の動粘性係数、 g =重力加速度である。

定常流中の立方体の抗力係数 C_d は、一様空気流中では①Reynolds 数 $Re_d=1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ の場合²⁰⁾、自由表面流中では②非水没状態で水路幅 B と投影幅 b の比 $B/b \geq 14$ の場合²¹⁾、③水没状態では等流水深 h_0 を代表水深 h として相対水深比 $2 < h/k \leq 2.5$ の場合¹⁸⁾、一定値をとることがわかっている。また、揚力係数 C_l については、相対水深比 $h/k \geq 6$ かつ Reynolds 数 $Re_d=1.0 \times 10^4$ のオーダーであれば、物体形状に応じた一定値となる¹⁶⁾ ことがわかっている。以上の既存の研究成果を踏まえ、表-1 に示す水理条件を決定した。なお、本論文では代表水深 h と代表流速 V には、等流水深 h_0 と水路中心軸上の水深平均流速 V_0 を採用した。ここでは流れの状態が、水没柱状物体の抗力係数 C_d および揚力係数 C_l に与える影響に着目し、相対水深比 h_0/k ごとに

Reynolds 数 R_{ed} および Froude 数 F_r を変化させた。

測定内容は、等流水深 h_0 、物体前後の水深 h_f 、 h_b 、水深方向の流速 u 、表面流速 u_s 、柱状物体に働く抗力 D および揚力 L である。等流水深 h_0 と水深平均流速 V_0 の測定は水路中心軸上において立方体の中心より柱状物体の幅 b の 75 倍上流で行った。なお、後述する速度分布から明らかかなように、この位置での流れは等流であった。水深測定については容量式波高計、流速測定については電磁流速計、表面流速測定については直径 0.006m の多数の発泡スチロール球を用いた PTV 解析より測定した。これらの測定結果に基づき、流速 u の分布を求め、それを積分し水深で除することで V_0 を算定した。抗力 D および揚力 L は 3 分力計により測定した。なお、サンプリング時間とサンプリング間隔は、水深と流速および抗力については 60 秒と 0.05 秒である。

3. 結果と考察

以下では流れの状態が、常流の場合には白抜き記号を、射流の場合には塗りつぶしの記号を用いている。

図-3は、表-1に示されたCase1~7で得られた相対水深比ごとの流速分布 u/u_* に検討を加えたものである。これより、実験条件には水路幅 B と等流水深 h_0 との比 $B/h_0 \leq 10$ が含まれるために最大流速が水面より下に表れる場合があるが、 u/u_* は式(1)で与えられる滑面对数則に概ね従っており、実験水路において等流が再現されていることが確認できる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5.3 \quad (1)$$

なお、カルマン定数 $\kappa=0.41$ 、摩擦速度 u_* の算定には Manning の粗度係数 $n=0.01$ を用いた。

次に、抗力係数 C_d と揚力係数 C_l について検討する。抗力係数 C_d と揚力係数 C_l の定義はそれぞれ次式に示す通りである。

$$C_d = \frac{2D}{\rho A_d V^2} ; C_l = \frac{2L}{\rho A_l V^2} \quad (2)$$

ここに、 A_d 、 A_l は抗力、揚力作用方向の投影面積、 ρ は水の密度である。抵抗係数 C_d および C_l は代表流速 V の取り方に大きな影響を受けると考えられる。そこで、水深平均流速 V_0 と、立方体の高さ k の半分の位置で式(1)より算定した流速を代表流速として抵抗係数 C_d および C_l を求めたところ、値には若干の違いがあったものの傾向には大きな違いが認められなかった。ここでは、平面 2 次元解析モデルのフレームワークにおいて、常流、射流中の水没物体に働く流水抵抗の評価方法を確立することを目的としているので、水深平均流速 V_0 を代表流速とした。

図-4は、 C_d 値、 C_l 値と Reynolds 数 R_{ed} との関係調べ

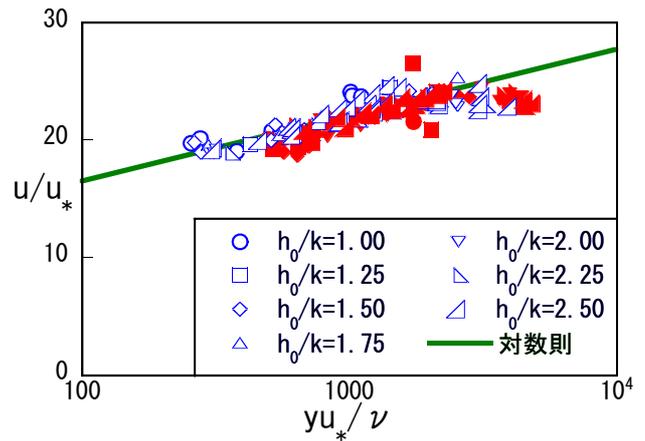


図-3 流速分布と対数則との比較

たものである。 C_d 値については一様空気流中の C_d 値 ($l/b=k/b=1$)²⁰⁾ も併せて示している。これらより、 C_l 値については変動があるものの、 R_{ed} の増加に伴い C_d 値および C_l 値のいずれも減少し、 $R_{ed} > 3.0 \times 10^4$ 程度で若干のばらつきは認められるものの平均的には一定値となることが確認できる。一様空気流中では立方体の C_d 値は $R_{ed}=1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ の場合に一定である²⁰⁾ こと、 C_l 値については、 $R_{ed}=1.0 \times 10^4$ のオーダーであれば一定値となる¹⁶⁾ ことを踏まえると、この傾向は相対水深比 h_0/k もしくは流れの状態の影響によるものと考えられる。

図-5および図-6は、それぞれ C_d 値あるいは C_l 値と Froude 数 F_r および相対水深比 h_0/k との関係を調べたものである。なお、 C_l 値については参考のために、数値解析より求められた $R_{ed}=1.0 \times 10^3$ の場合の一様空気流中の C_l 値 ($l/b=1$, $k/b=5$, 8)²²⁾ を示している。これより、 C_d 値、 C_l 値ともに流れの状態が常流と射流とで傾向が大きく異なることが確認できる。 C_d 値については常流の場合 $2.0 < h_0/k \leq 2.5$ で、射流の場合 h_0/k にかかわらず、若干のばらつきはあるものの一様空気流中の C_d 値とほぼ同程度となることが確認できる。また、 C_l 値については常流の場合 h_0/k によらず変動が激しくかなりの幅を持った値となること、射流の場合 h_0/k によらず、若干のばらつきはあるものの平均的には $C_l=0.94$ となることが確認できる。

このように、 C_d 値や C_l 値は、常流では h_0/k の影響を受け、射流では h_0/k の影響を受けないことが確認できる。この理由を推察する。図-7は物体周りの圧力分布が静水圧分布であると仮定し、 $D=\rho g b k (h_f - h_b)$ より求めた抗力 D と実測値との比較を行ったものである。図中の直線上にプロットがないことから、常流、射流のいずれにおいても、物体周辺の圧力は静水圧分布ではないことが確認できる。また、いずれも静水圧分布を仮定して求めた抗力よりも大きな値となっていることも確認できる。図-8は流れの状態が常流あるいは射流で相対水深比 h_0/k を 1.0~2.5 に変化させたときの水路中心軸上での水位を示したものである。いずれのCaseも物体中心の水深は限界

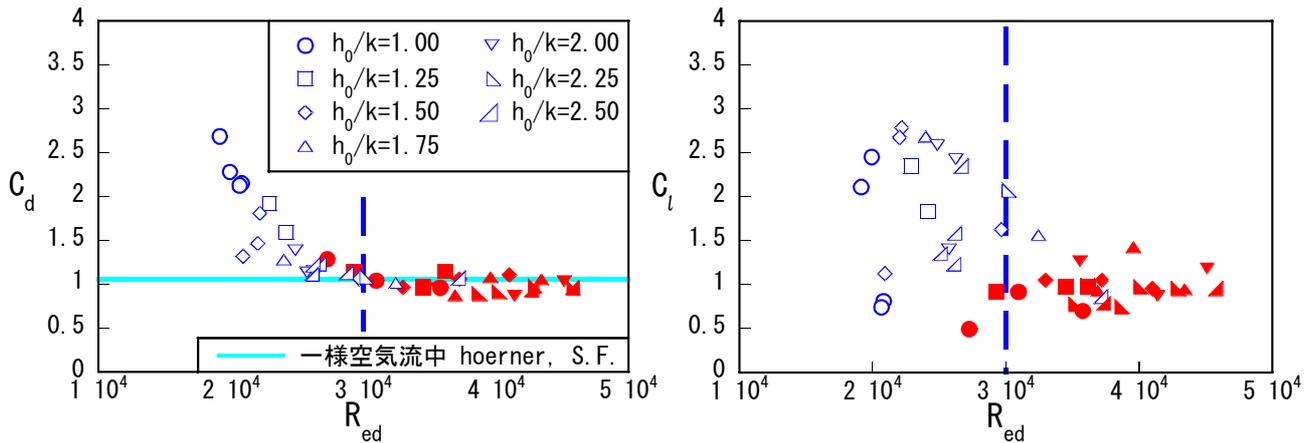


図-4 C_d あるいは C_l と Re_d との関係

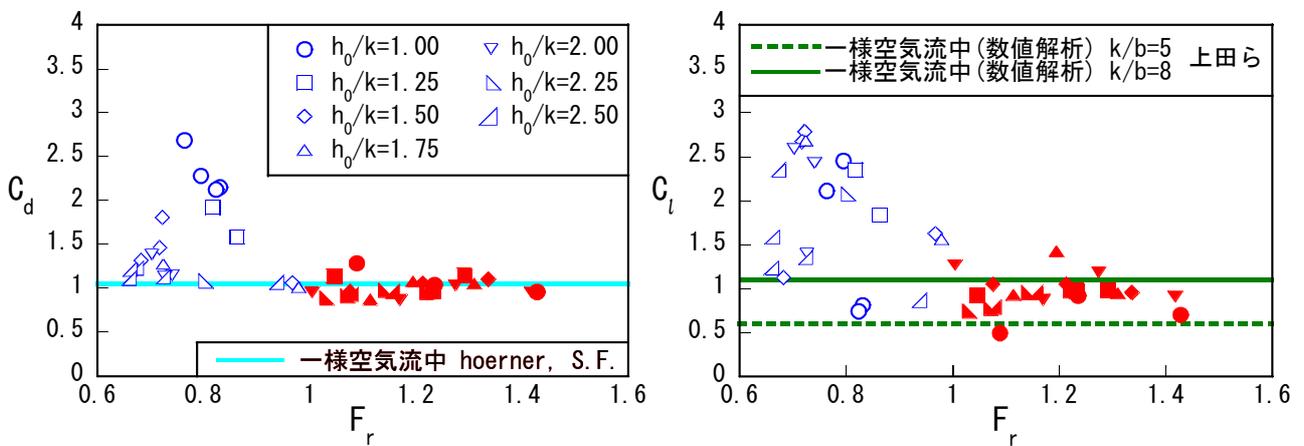


図-5 C_d あるいは C_l と Fr との関係

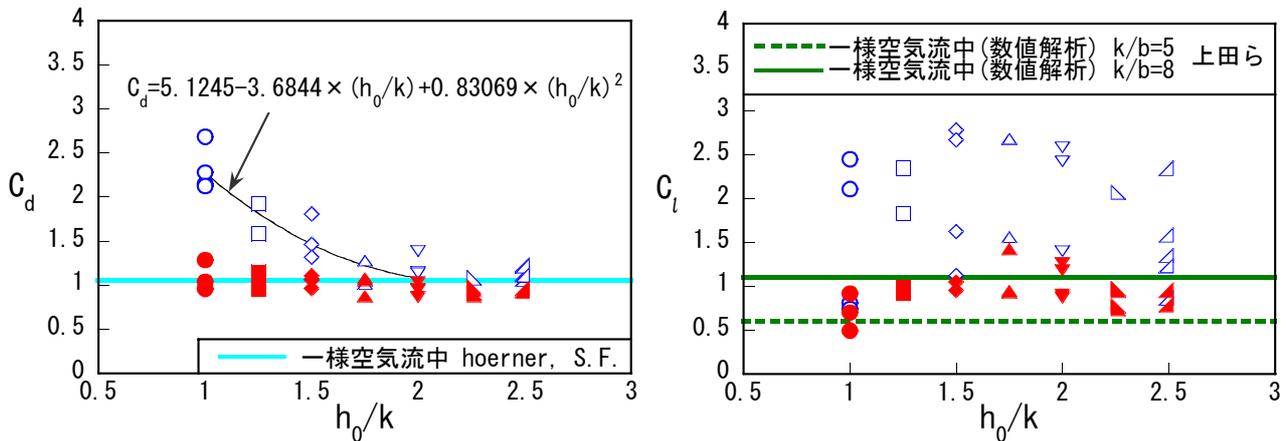


図-6 C_d あるいは C_l と h_0/k との関係

水深 h_c よりも小さく、常流、射流のいずれも相対水深比 h_0/k が大きくなると、物体背後での水面勾配が緩やかになることが確認できる。このように、水没物体周辺では水面形の曲率が大きく、鉛直方向に変化の激しい流れが生じていることが確認できる。そのため、物体背後の圧力が静水圧分布に比べて低下もしくは負圧が生じたと推

察される。さらに、図-8から、常流の場合には水没物体上で水位が減少するが、射流の場合には水没物体上で水位が最大となること、常流と射流との間の相違点であると確認できる。これは、流れの状態で物体に対する水面形の位相が変化し、物体前面より剥離する流れが水面の影響を受けたためと考えられる。そのため、常流と射

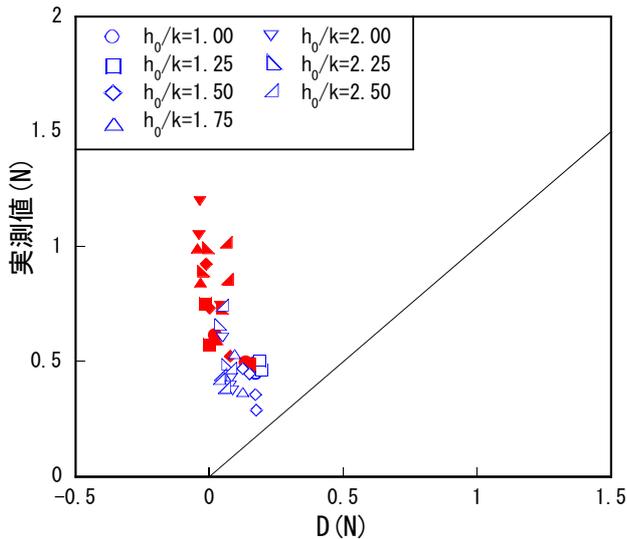


図-7 抗力Dの比較

流とは剥離渦の発生状況が異なると考えられる。

図-9は、 $(h_f - h_b)/h_0$ とReynolds数 R_{ed} との関係を調べたものである。これより、流れが射流の場合、 $(h_f - h_b)/h_0$ は一定となることが確認でき、射流では下流の自由表面の位置の影響を受けず、物体前面から剥離する流れが物体周辺の流れを規定していると推察される。

以上から、常流で C_d 値が h_0/k の影響を受けるのは、物体より剥離した渦が物体下流の水位の影響を受け、物体背後の圧力を変化させるためであり、一方、射流で一定値をとるのは、下流の水位の影響を受けないために、物体前面から剥離する流れにより物体周辺の流れが決まり、一様空気流中の場合により近い流況になるためと推察される。

4. 流れの状態により水没・非水没状態となる立方体の抵抗係数の設定方法

流れの状態により水没・非水没状態となる物体の抗力を評価することは、大型粗度のある河道流れや家屋等が存在する汜濫解析を行う上で重要である。ここでは、以上の結果に加え、著者らが非水没状態の角柱に対して行った研究結果²¹⁾を踏まえ、非水没状態から相対水深比 h_0/k が2.5までの水没・非水没状態の立方体の抵抗係数の設定方法について示す。図-10に抵抗係数設定のためのフローチャートを示す。まず、①水位と物体高さの関係から、水没・非水没状態を判断する。非水没状態の場合には $C_d=2.21$ とする。水没状態の場合には②を検討する。②流れの状態が射流かどうかを判断する。射流の場合本研究結果より得られた $C_d=1.05$ とする。常流の場合には③を検討する。③相対水深比 $h_0/k > 2.0$ かどうかを判断する。 $h_0/k > 2.0$ の場合、本研究結果と既存の研究結果^{17), 18)}を踏まえた $C_d=1.05 \sim 1.20$ とする。 $h_0/k \leq 2.0$ の場合には図-6から C_d 値を決定する。なお、図-6から得られ

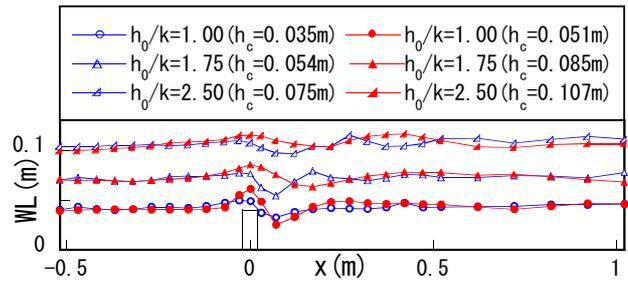


図-8 水路中心軸上水位変化

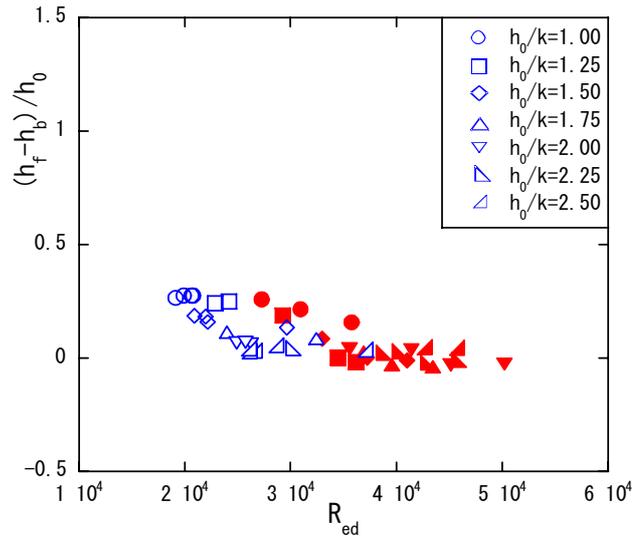


図-9 $(h_f - h_b)/h_0$ と R_{ed} の関係

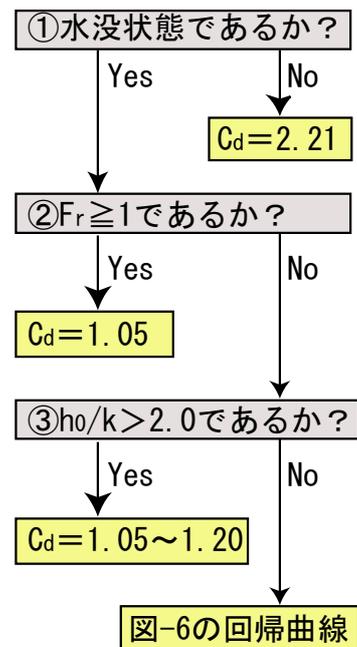


図-10 非水没状態から相対水深比 h_0/k が2.5までの立方体の抵抗係数の設定方法

た回帰曲線は $C_d=5.1245-3.6844 \times (h_0/k)+0.83069 \times (h_0/k)^2$ となる。これにより、水没・非水没状態となる立方体の抵抗係数の算定が可能となる。ただし、Reynolds数 $R_{cd}=1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ の場合、水路幅 B と投影幅 b の比 $B/b \geq 14$ の場合を満たす場合に限る。

5. おわりに

定常自由表面流中に水没柱状物体を設置し、相対水深比 h_0/k ごとにReynolds数 R_{cd} およびFroude数 F_r を変化させ、水没柱状物体の抗力係数 C_d および揚力係数 C_l に与える影響を調べた結果、相対水深比 $h_0/k \leq 2.5$ の場合、Reynolds数 $R_{cd}=1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ の場合、水路幅 B と投影幅 b の比 $B/b \geq 14$ の場合を満たす範囲で以下のような知見が得られた。

1. 開水路中に置かれた立方体の C_d 値と C_l 値は、射流では若干のばらつきはあるものの平均的には $C_d=1.05$ と $C_l=0.94$ となる。
2. 常流では C_d 値は h_0/k に依存し、 $h_0/k > 2.0$ で一定値となり、 C_l 値は自由表面の影響を受け大きく変動する。
3. 非水没状態から相対水深比 h_0/k が2.5までの水没・非水没状態の立方体の C_d 値は図-10のように求めることができる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金基盤研究B（課題番号：17360237、研究代表者：秋山壽一郎）の援助を受けた。また、元本学大学院生浅野孝典君および本学学部4年生田村和寛君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安田陽一：局所流を利用した流れの景観へのアプローチ、流体力とその応用に関する研究論文集、第3巻、pp.9-17, 2004.
- 2) 渡辺義則、釘原直樹、秋山壽一郎、永瀬英生、廣岡明彦、寺町賢一、鬼束幸樹：平成16年度九州工業大学地域貢献特別支援事業報告書、2004.
- 3) 池田駿介、大田賢一、長谷川洋：側壁部植生境界の周期渦の発生機構、土木学会論文集、No.443/II-18, pp.47-54, 1992.
- 4) 灘岡和夫、八木宏：SDS & 2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論文集、No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 5) 重枝未玲、秋山壽一郎：数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹木帯の治水機能の検討、土木学会論文集、No.740/II-64, pp.19-30, 2003.
- 6) 川口広司、福岡捷二、渡邊明英：設置角度の異なる越流型水制周辺の流れと流体力分布特性、水工学論文集、第48巻、pp.811-816, 2004.
- 7) 林健二郎、藤井優広、重村利幸：開水路中における円柱群に作用する流体力に関する実験、水工学論文集、第45巻、pp.475-480, 2001.
- 8) 斉藤隆、羽田野袈裟義、奥野雅晴：直列2円柱に作用する流体力、水工学論文集、第34巻、pp.229-234, 1990.
- 9) 宮川朝浩、福岡捷二、名尾耕司：近接した円柱橋脚まわりの河床変動と流体力、水工学論文集、第44巻、pp.1059-1064, 2000.
- 10) Li, R. and Shen, H. W. : Effect of tall vegetations on flow and sediment, *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.99, pp.793-814, 1973.
- 11) 高橋保、中川一、加納茂紀：洪水氾濫流による家屋流失の危険度評価、京都防災研究所年報、第28巻、pp.455-470, 1985.
- 12) 栗城稔、末次忠司、海野仁、田中義人、小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル、土木研究所資料、第3400号、1996.
- 13) 福岡捷二、川島幹雄、横山洋、水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究、土木学会論文集、No.600/II-44, pp.23-36, 1998.
- 14) 足立昭平：人工粗度の実験的研究、土木学会論文集、No.104, pp.33-44, 1964.
- 15) 足立昭平：人工粗度の実験的研究 - 棧型粗度と溝型粗度 -, 京都大学防災研究所年報、第4号、pp.185-193, 1961.
- 16) 山本晃一、林健二郎、関根正人、藤田光一、田村正秀、西村晋、浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について、水工学論文集、第44巻、pp.1053-1058, 2000.
- 17) 内田龍彦、福岡捷二、福島琢二、田中正敏：大型粗度群上の浅い流れの平面2次元解析とその応用、土木学会論文集、No.691/II-57, pp.93-103, 2001.
- 18) 重枝未玲、秋山壽一郎、野中雅之、浅野孝典：定常自由表面流中の水没物体に働く流体力、水工学論文集、第48巻、pp.877-882, 2004.
- 19) 秋山壽一郎、重枝未玲、鬼束幸樹、白川寛樹：平面2次元数値モデルによる急流都市河川の流況解析、水工学論文集、第48巻、pp.631-636, 2004.
- 20) Hoerner, S. F. : *Fluid-dynamic drag*, 1965.
- 21) 秋山壽一郎、重枝未玲、浦勝、小林俊彦、大田和正：定常自由表面流の正角柱に働く流体力、水工学論文集、第46巻、pp.827-831, 2002.
- 22) 上田俊弘、六郷彰、岡島厚：スパン方向に有限な柱状物体まわりの流れの数値シミュレーション、第17回数値流体力学シンポジウム、D3-3, 2003.

(2005. 9. 30受付)