

定常自由表面流中の水没物体に働く流体力

HYDRODYNAMIC FORCES ACTING ON A SUBMERGED OBSTRUCTION IN STEADY FREE SURFACE FLOWS

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・野中 雅之³・浅野 孝典³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Masayuki NONAKA and Takanori ASANO

¹正会員 博士 (工学) 九州工業大学 工学部建設社会工学科 日本学術振興会特別研究員
(〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²正会員 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 工学研究科博士前期課程 (同上)

Hydrodynamic force exerting on a submerged square pillar in steady free surface shear flows were investigated experimentally. The ratio of pillar length l to pillar height k and the ratio of depth h_0 to pillar height k were changed in the range of $0.5 \sim 2.5$ and $1 \sim 2.5$, respectively. It is found that the drag coefficient C_d of a square pillar is affected by h_0/k , Reynolds number based on pillar size and Froude number when $h_0/k < 2.0$, while the values of C_d at given l/k becomes constant when $h_0/k > 2.0$. The value of C_d at given l/k in a shear flow are different from those in uniform flows. Diagrams to describe the relationships between C_d and l/k is presented.

Key Words : drag coefficient, hydrodynamic force, submerged obstruction, steady free surface flow

1. はじめに

近年, まちづくりの中核として, 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。河川再生事業計画の策定には景観, 親水や環境面での配慮が求められることから, 事業後の河川では杭群, 河畔林等の植生, 巨石などの様々なモノが比較的短い区間に空間的に配置される場合が多い。これらのモノは流れの集中や偏流, 常射混在流を生じさせ, 場合によっては不自然な流れを引き起こすことがある。また, 流水抵抗として働くため水位上昇を引き起こし, 氾濫を引き起こす危険性も孕んでいる。したがって, これらが有する流水抵抗を適切に評価することが, 再生事業後の河道内の流れを予測する上で極めて重要となる。

流体中の物体や物体群に作用する流体力については, 水工水理学のみならず風工学等の分野でも多数存在することは周知のとおりであり, 代表的な物体形状の抵抗係数については教科書等でもまとめられている^{1),2)}。

水工水理学の分野では, 河道内の橋脚や植生などを対象として, 非水没状態の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^{3),4),5),6)}や, 洪水氾濫時に堤内地の家屋やビルなどを対象として, 非水没状態の角柱あるいは角柱群に働く流体力とその抵抗係数^{7),8),9)}

について研究が重ねられている。著者らは, blockage-ratio と迎角が等流中の角柱の抵抗係数に及ぼす影響が明らかになっていないことや, 非定常自由表面流中の角柱に働く流体力とその抵抗係数が明らかになっていないことを踏まえ, これらについて検討を加えた^{10),11),12)}。

一方, 水没状態の物体に働く流体力については, 物体の高さ k と水深 h の比で表される相対水深 h/k の大きな ($h/k > 5$) 物体に働く流体力とその抵抗係数を対象として数多くの研究がなされており, その抵抗係数は, 物体の高さ k と水深 h の比で表される相対水深 h/k に依存することがわかっている^{13),14)}。このように, 非水没物体や相対水深 h/k の大きな物体に働く流体力やその抵抗係数はある程度わかっている。しかし, 相対水深 h/k が小さい場合を対象とした研究¹⁵⁾は極めて少なく, h/k の小さな水没物体の抵抗係数に関する情報は限られているのが実情である。

本研究は, 著者らが現在取り組んでいる中小都市河川の治水対策の検討が可能な平面 2 次元モデルの開発¹⁶⁾の一貫として, 平面 2 次元モデルのフレームワークにおいて巨石などの水没物体の抗力評価法の確立を目的として実施したものである。ここでは, 相対水深 h/k と物体の長さ l と高さ k の比 l/k を系統的に変化させ, 相対水深が浅い場合の定常自由表面流中に置かれた水

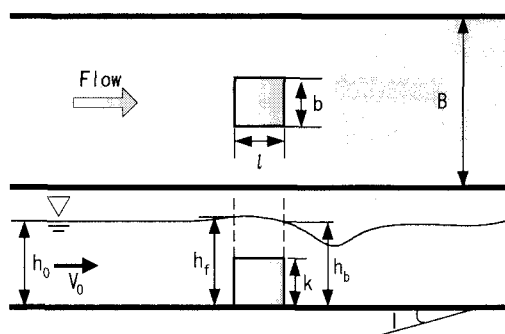


図-1 角柱の設置状況

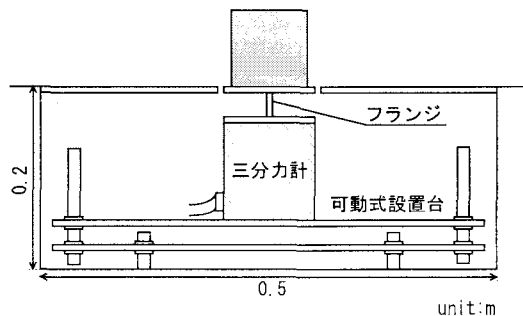


図-2 3分力計の設置図

没物体の抵抗係数 C_d について調べた。

2. 実験の概要

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、アクリル製の水没物体が設置されている。水没物体としては形状が単純な角柱（幅 $b\text{m}$ 、高さ $k\text{m}$ 、奥行き $l\text{m}$ ）を採用した。物体は、図-2 に示すように、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。

非水没物体の抵抗係数 C_d の支配パラメータとしては、以下が考えられる（図-1 参照）。

- 流れの状態： Re_d , Fr
- 角柱の形状： l/k , b/k
- 水路の形状と物体の相対的な関係： B/b
- 角柱と流れの相対的な関係： h_0/k

ここに、 $Re_d = V_0 \cdot b / \nu$, $Fr = V_0 / \sqrt{gh_0}$, V_0 = 水深平均流速, h_0 = 水深, ν = 水の動粘性係数, g = 重力加速度である。なお、記号に付された添字 0 は、等流中の値であることを表している。自由表面流中の非水没状態の正角柱については、水路幅と角柱幅の比 $B/b \geq 14$ であれば、 B/b の影響は無視でき、抵抗係数は 2.21 の一定値をとること¹⁰⁾がわかっている。また、自由表面流中の水没状態となる角柱（ $b=0.2\text{m}$, $k=0.03\text{m}$ ）については、水深と水没物体の高さの比 $h/k > 2$ であれば、 h/k の影響は無視でき、抵抗係数は 1.2 の一定値をとること¹⁵⁾がわかっている。また、一様空気流中では $Re_d = 1.0 \times 10^4$

～ 1.0×10^6 であれば、 Re_d 数の影響は無視でき、抵抗係数値は物体の長さ l と高さ k の比 l/k が、 $l/k < 1$ の場合 1.20, $l/k=1$ の場合 1.05, $l/k \geq 2$ の場合 0.74 の一定値をとること²⁾がわかっている。以上を踏まえて、表-1 に示す実験条件を決定した。角柱幅 b は $b=0.04\text{m}$ とした。ここでは、等流水深と水没物体の高さの比である相対水深 h_0/k と水没物体の長さ l/k に着目し、これらが水没状態にある角柱の抵抗係数に与える影響を調べた。角柱幅と高さの比 b/k については一定とした。なお、表-1 に示すように、水路幅 B と水深 h_0 の比 B/h_0 は 6～15 の範囲であり、最大流速が水面より下に現れる $B/h_0 \leq 10$ も含まれるが、後に示す流速分布はほぼ log 則に従っていることから、その影響は小さいと考えられる。

測定内容は、水深 h 、水深方向の流速 u 、表面流速 u_s 、角柱に働く流体力 D である。等流水深 h_0 と流速 V_0 を代表水深と代表流速とし、それらの測定は測定位置の角柱を取り除いた、その中心位置で行った。水深測定は容量式波高計で、流速測定は電磁流速計を用いて行った。表面流速 u_s は、直径 0.006m の多数の発泡スチロール球を多数投入し、CCD カメラで水路上部から撮影した連続する 4 枚の画像より得られる発泡スチロール球の動きを追跡し、これを PTV 解析することで求めた。これら流速測定結果に基づき、流速 u の分布を近似曲線で表し、それを積分し水深 h_0 で除することで、代表水深平均流速 V_0 を算定した。抗力 D は、図-2 に示すように物体に取り付けた 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、それぞれ水深と流速については 50 秒と 0.05 秒、抗力については 600 秒と 0.05 秒である。

3. 結果と考察

図-3 に水路底面を基準とした水面形状 (Case1-4) と h_0/k を 1～2.5 に変化させた時の水路中心軸上の水位変化を示す。なお、図-3 中の白線は、非水没物体の設置位置を表している。この図から、物体を越流した流れにより、物体背後の水路中心軸上で水位が最小となり、その下流で水位が上昇し、 $x=0.17\text{m}$ 付近で最大となること、物体背後で斜めに水位が上昇している様子や x が大きくなるにつれて水位がほぼ一定となることが確認できる。また、水路中心軸上の水位変化から、水深と水没物体の高さの比 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様子も確認できる。いずれの Case, Pattern においても、等流水深 h_0 と物体前面の水深 h_f の間には相関があり、物体中心での水深は限界水深 h_c よりも小さかった。

物体に働く流体力 D は、物体周りの圧力分布を静水圧分布で近似すると、非水没物体の場合は式 (1) で、水

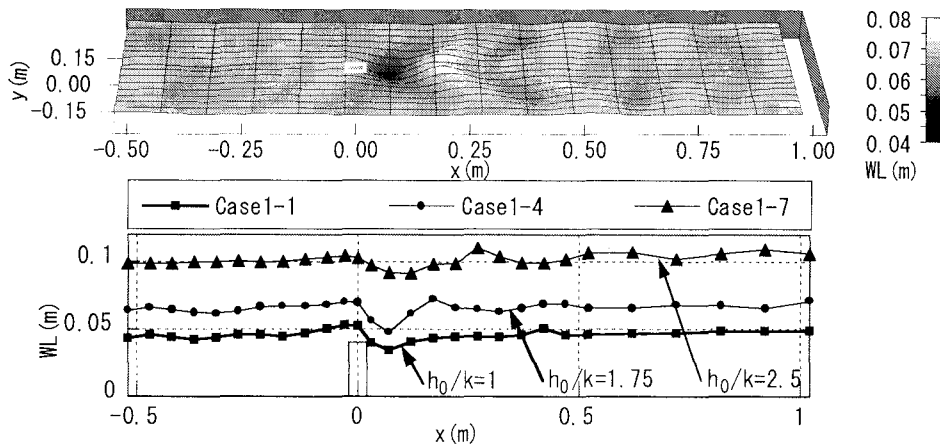
表-1 実験条件表

(a) 水理条件

	流量 Q (m ³ /s)	水深平均流速 V (m/s)	水深 h_0 (m)	Froude 数 F_r	Reynolds 数 Re_d	水路床勾配 I
Case1-1	0.0121	0.498	0.04	0.795	19909	1/1200
1-2	0.0170	0.572	0.05	0.817	22879	
1-3	0.0189	0.550	0.06	0.712	21999	
1-4	0.0236	0.600	0.07	0.724	24000	
1-5	0.0311	0.656	0.08	0.741	26244	
1-6	0.0402	0.754	0.09	0.799	30033	
1-7	0.0389	0.660	0.10	0.667	26394	
Case 2-1	0.0121	0.478	0.04	0.764	19125	1/1000
2-2	0.0195	0.554	0.06	0.723	22179	
2-3	0.0302	0.622	0.08	0.703	24888	
2-4	0.0399	0.671	0.10	0.678	26837	
Case 3-1	0.0124	0.516	0.04	0.824	20678	1/1400
3-2	0.0183	0.523	0.06	0.682	20923	
3-3	0.0303	0.644	0.08	0.727	25750	
3-4	0.0391	0.658	0.10	0.658	26334	

(b) 角柱形状

	b/k	l/k
Pattern1	1.0	0.5
2	1.0	1.0
3	1.0	1.5
4	1.0	2.5

図-3 水面形状 (Case1-4) と h_0/k を 1~2.5 に変化させた時の水路中心軸上の水位変化

没物体の場合は式 (2) 表される。

$$\text{非水没状態} : D = \rho g b (h_f^2 - h_b^2) / 2 \quad (1)$$

$$\text{水没状態} : D = \rho g b k (h_f - h_b) \quad (2)$$

ここに、 h_f =物体前面の水深、 h_b =物体後面の水深である。図-4 は、式 (2) より求めた抗力と実験より直接測定した抗力を比較したものである。なお、図中には非水没物体に働く流体力¹⁰⁾の関係についても示している。これより、非水没物体の場合には静水圧分布により物体に働く抗力は式 (1) で計算可能であるが、内田ら¹⁵⁾が指摘している通り、水没物体では実測された抗力は静水圧分布を仮定して得られる抗力よりも大きくなる。図-5 は、実測された抗力と静水圧分布を仮定して得られる抗力の比と相対水深 h_0/k との関係を表-1 に示したものである。これより、全体的な傾向に着目すると、実測された抗力は、 h_0/k の増加に伴い式 (2) より得られる抗力よりも大きくなる。また、物体の長さ¹⁰⁾と高さの比 l/k が

小さいほど、その度合いは大きくなることも確認できる。これから、水没物体周辺では水面形の曲率が大きな 3 次元性の強い流れが生じ、物体背後の圧力が静水圧に比べ低下するために、水没物体に働く流体力が式 (2) で評価できなくなると推察される。

以下では、式 (3) で定義される抵抗係数 C_d を用い、流体力の予測手法について検討する。

$$C_d = \frac{2D}{\rho A V_0^2} \quad (3)$$

図-6 は、表-1 に示された Case1~3 で得られた流速分布 u/u_* について検討を加えたものである。これより、 u/u_* は式 (4) で与えられる滑面対数則にほぼ従っており、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。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{u_* y}{\nu} + 5.3 \quad (4)$$

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 $n=0.01$ を用いている。

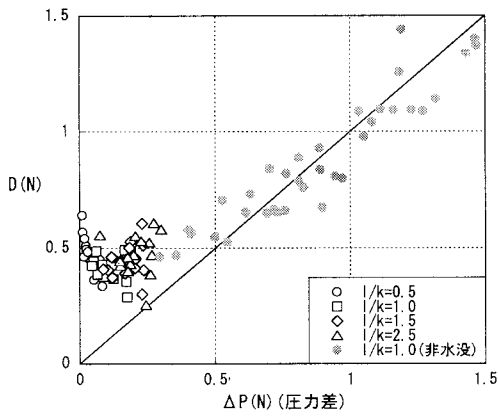


図-4 抗力 D の比較

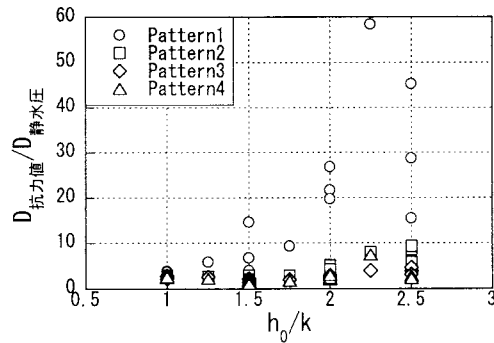


図-5 抗力の比と相対水深 h_0/k との関係

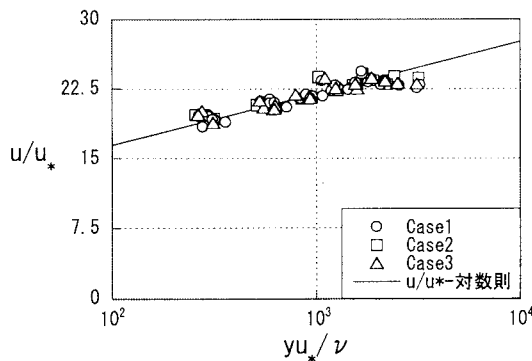
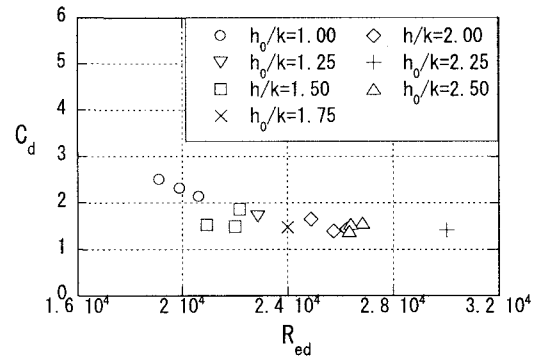


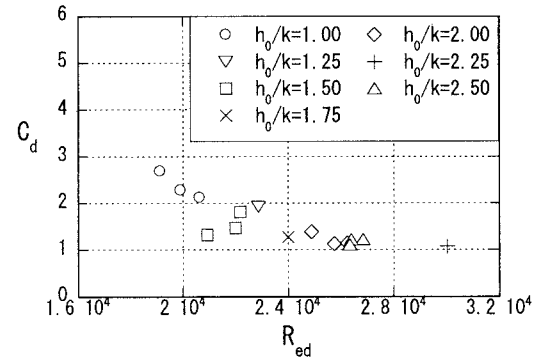
図-6 流速と対数則との比較

図-7 および図-8 は、それぞれ h_0/k を 1 から 2.5 まで変化させた時の抵抗係数 C_d と Reynolds 数 Re_d および F_r 数との関係を各 Pattern ごとに示したものである。一様空気流中では $Re_d = 1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ であれば C_d 値は一定値 ($l/k < 1$ の場合: 1.20, $l/k = 1$ の場合: 1.05, $l/k > 2$ の場合: 0.74) となる²⁾が、図-7 より抵抗係数値 C_d は、いずれの l/k に対しても Re_d の増加と共に減少する傾向が認められる。しかし、この傾向は相対水深 h_0/k の影響を含んだものである。そこで、各 h_0/k について比較すると、 C_d 値は、 $h_0/k \approx 2.0$ までは Re_d の影響を受け、 $h/k > 2.0$ では C_d 値は Re_d 数によらず、ほぼ同程度の値になっていることが確認できる。また、図-8 から Re_d 数と同様に、 C_d 値は $h_0/k \approx 2.0$ までは F_r の影響を受け、 $h_0/k > 2.0$ では C_d 値は F_r 数によらずほぼ一定であることが確認できる。

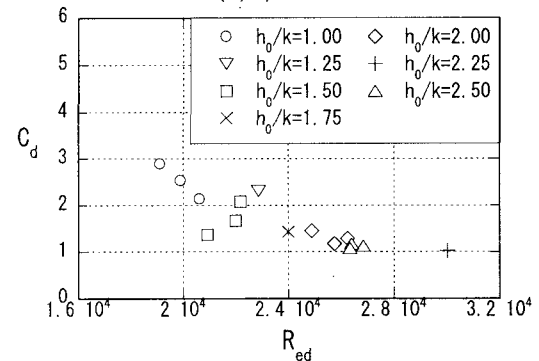
図-9 は、 C_d と等流水深と物体の高さの比 h_0/k との関



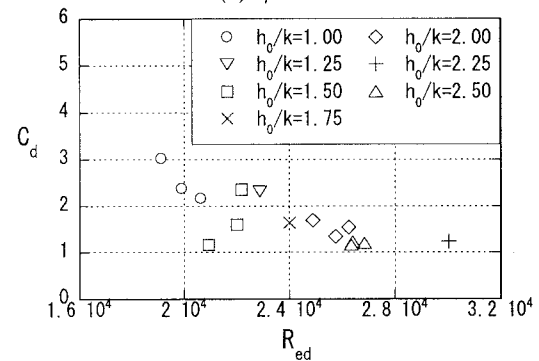
(a) $l/k = 0.5$



(b) $l/k = 1.0$



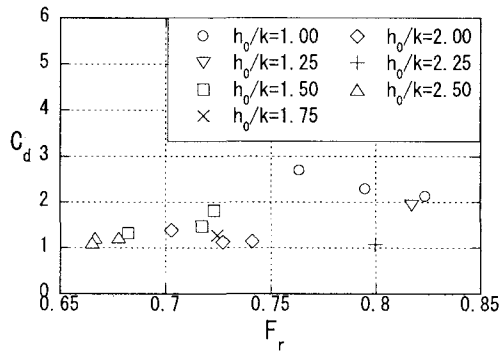
(c) $l/k = 1.5$



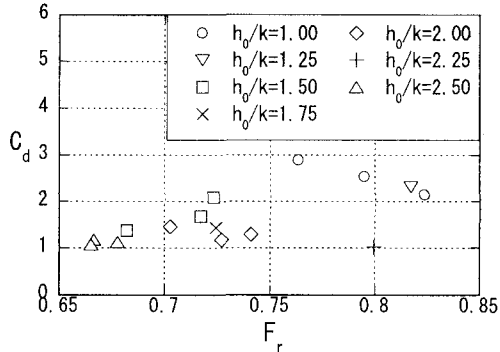
(d) $l/k = 2.5$

図-7 l/k を変化させた時の C_d と Re_d との関係

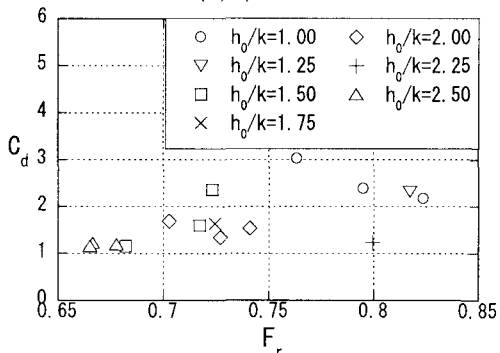
係を各 Pattern ごとに示したものである。なお、図中には、水路幅投影幅比と Reynolds 数の影響を受けない範囲でのせん断流中の非水没正角柱の C_d 値 ($b=l$)¹⁰⁾、一様空気流中の 2 次元物体の C_d 値 ($b=l$)²⁾、底面に置かれた一様空気流中の 3 次元物体の C_d 値 (形状 1: $l/k < 1$, $b/k = 1$, 形状 2: $l/k = b/k = 1$, 形状 3: $l/k > 2$, $b/k = 1$, $Re_d = 10^4 \sim 10^6$)²⁾ もあわせて示している。図



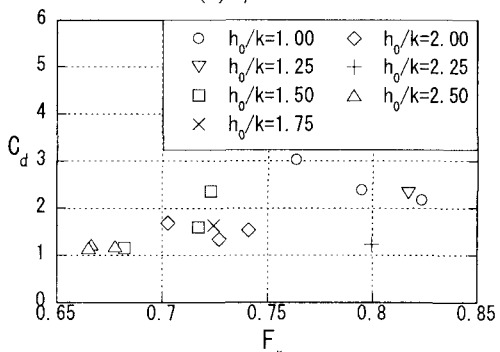
(a) $l/k=0.5$



(b) $l/k=1.0$

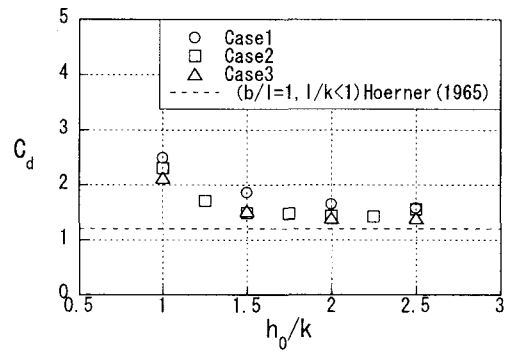


(c) $l/k=1.5$

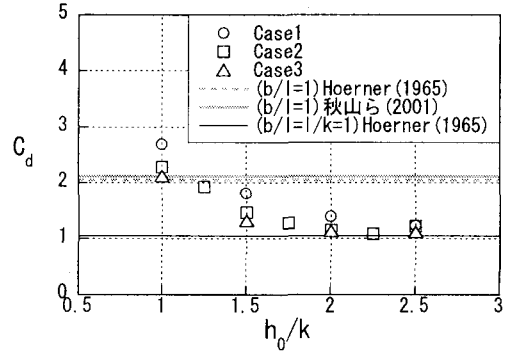


(d) $l/k=2.5$

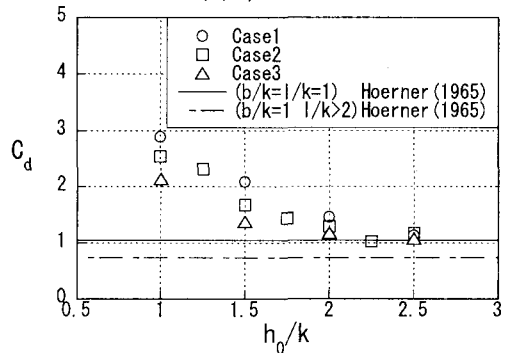
図-8 l/k を変化した時の C_d と F_r との関係



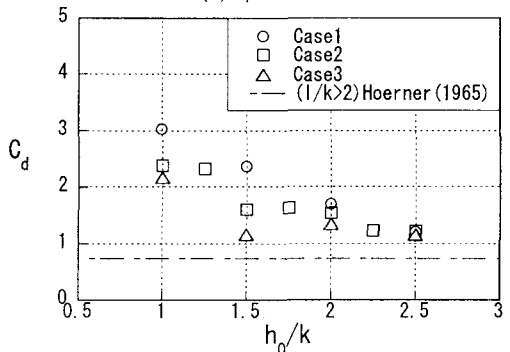
(a) $l/k=0.5$



(b) $l/k=1.0$



(c) $l/k=1.5$



(d) $l/k=2.5$

図-9 l/k を変化した時の C_d と h_0/k との関係

-9 から、いずれの Pattern においても、自由表面流中の水没物体の C_d 値は、 h_0/k の増加にともない減少し、 $h_0/k > 2.0$ では C_d 値が一定になることが確認できる。また、物体の長さ と高さの比 l/k が小さくなるほど、小さな相対水深 h_0/k で C_d 値が一定となることがわかる。一般に、物体の長さ と高さの比 l/k が小ければ、流れの剥離点が安定しやすい。上記の結果から、

l/k の小さな物体の方が、小さな相対水深 h_0/k で角柱背後で発生する剥離渦が安定すると推察される。また、Pattern2($b=l=k$) の C_d 値は、一様空気流中の角柱および自由表面せん断流中の角柱 (非水没状態) の C_d 値より、最大で 1.3 倍程度大きくなることも確認できる。さらに、自由表面流中の水没物体の C_d 値は、いずれの相対水深 h_0/k 、Pattern においても、一様空気流中の 3

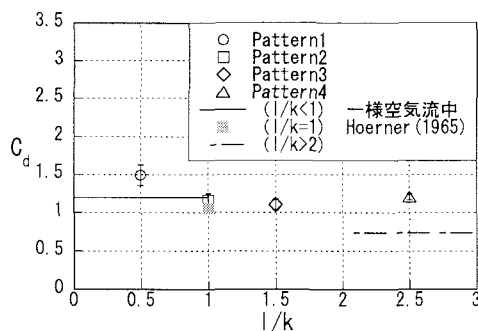


図-10 C_d と物体の長さ と高さの比 l/k との関係

表-2 相対水深 $h_0/k > 2.0$ での C_d 値

	l/k			
	0.5	1.0	1.5	2.5
抵抗係数 C_d	1.49	1.16	1.10	1.20

次元物体の C_d 値よりも大きくなることも確認できる。

以上をまとめると、水没状態にある角柱の C_d 値は、相対水深 $h_0/k \approx 2.0$ までは、 h_0/k および Re_d と F_r の影響を受け、相対水深 $h_0/k > 2.0$ では h_0/k 、 Re_d と F_r の影響を受けずほぼ一定となる。また、 C_d 値は、いずれの相対水深 h_0/k 、Pattern においても、一様空気流中の 3 次元物体の C_d 値よりも大きくなることから、

以下では、抵抗係数値 C_d が、 h_0/k 、 Re_d 、 F_r に依存しない $h_0/k > 2.0$ の範囲を用いて、 C_d と物体の長さ と高さの比 l/k との関係について検討する。図-10 は、 C_d と物体の長さ と高さの比 l/k との関係を示したものである。図中には、上述した一様空気流中の 3 次元角柱の C_d 値もあわせて示している。また、図中のプロットは $h_0/k > 2.0$ を満たす条件での C_d の平均値を、エラーバーは標準偏差を表している。この図から、水没物体の抵抗係数 C_d は、 $0.5 < l/k < 1.0$ で減少し、 $l/k \geq 1.0$ ではほぼ一定となる。各 l/k の C_d 値はそれぞれ表-2 に示す値となる。これらの値は一様空気流中の値よりも大きくなっており、特に $l/k=2.5$ の場合にその差が著しい。この理由としては、流れが一様空気流と自由表面せん断流の違いがまず考えられるが、その詳細については不明である。

以上より、本研究の結果に基づけば、水没状態にある角柱の C_d 値は、相対水深 $h_0/k \approx 2.0$ までは、 h_0/k および Re_d と F_r の影響を受けるが、相対水深 $h_0/k > 2.0$ では h_0/k 、 Re_d と F_r の影響を受けずほぼ一定となり、その値は表-2 のようになる。

4. おわりに

定常自由表面流中に置かれた水没角柱の形状と角柱高さ と水深比 h_0/k を系統的に変化させ、その抵抗係数

について調べた結果、以下のような知見が得られた。

1. 相対水深 $h_0/k \approx 2.0$ までは、一様空気流中では Re_d 数の影響を受けない $Re_d \geq 1.0 \times 10^4$ の範囲であっても、抵抗係数 C_d 値は Re_d 数の影響を受ける。また、 C_d 値は F_r の影響を受け、 h_0/k に依存する。
2. 相対水深 $h_0/k > 2.0$ では C_d 値は h_0/k 、 Re_d および F_r の影響を受けずほぼ一定となり、表-2 のようになる。

今後は、相対水深 $h_0/k < 2.0$ の範囲について、より広範囲な実験条件下での検討が必要である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、本学学部 4 年生の下出 昌毅君および白川 寛樹君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 椿東一郎: 水理学 II, 森北出版, 1991.
- 2) Hoerner, S. F.: Fluid-dynamic drag, 1965.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 高橋保, 中川一, 加納茂紀: 洪水氾濫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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 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.
- 11) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小林俊彦, 大田和正: 非定常自由表面流中の正角柱に働く流体力, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 1205-1210, 2002.
- 12) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 大田和正: 迎角をもってダム破壊流れ中に置かれた正角柱に作用する流体力, 水工学論文集, 第 47 巻, pp. 799-804, 2003.
- 13) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第 104 号, pp. 33-44, 1964.
- 14) 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.
- 15) 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, Vol. 691/II-57, pp. 93-103, 2001.
- 16) 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, 2004.

(2003.9.30受付)