

水没状態にある柱状物体に働く流体力

九州工業大学工学部 正会員 秋山壽一郎 重枝 未玲  
九州工業大学大学院 学生会員 ○野中 雅之 浅野 孝典

1. はじめに

水没物体の流水抵抗を適切に評価することは、巨石等が配置された河道内の流況予測や家屋等が水没状態となった際の氾濫流の挙動予測を行う上で、重要である。

本研究は、定常自由表面流中に置かれた水没物体の抵抗係数  $C_d$  がよくわかっていることを踏まえ、物体の高さ  $k$  と水深  $h$  の比で表される相対水深  $h/k$  と物体の長さ  $l$  と高さ  $k$  の比  $l/k$  を変化させ、相対水深が小さい場合について調べたものである。

2. 実験の概要

実験装置は、長さ 20m, 幅  $B=0.6m$ , 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  $b$ m, 高さ  $k$ m, 奥行き  $l$ m)を採用した。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。

非水没物体の抵抗係数  $C_d$  の支配パラメータとしては、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 ( $h_0/k$ ) が考えられる。ここに、 $Re_d$ =Reynolds 数( $=V_0 b/\nu$ ),  $Fr$ =Froude 数( $=V_0/(gh_0)^{1/2}$ ),  $V_0$ =水深平均流速,  $h_0$ =等流水深,  $\nu$ =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。水路床勾配  $I$  を 3 通りに変化させ、水理条件を表-1 に示すように決定した。ここでは、相対水深  $h_0/k$  と水没物体の長さとお高さの比  $l/k$  を変化させ、水没状態にある角柱の抵抗係数に与える影響を調べた。

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、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。水深を容量式波高計、流速を電磁流速計、表面流速  $u_s$  を直径 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。これら流速測定結果より得られる  $u$  分布より、代表水深平均流速  $V_0$  を算定した。抗力  $D$  は、物体に取り付けた3分力計により測定した。

3. 結果と考察

図-2 に  $h_0/k$  を 1.0~2.5 に変化させたときの水路中心軸上水位変化を示す。この図から、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が確認できる。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。以下では、抵抗係数  $C_d=(2D)/(\rho dh_f V^2)$  を用い、流体力の予測手法について検討する。

図-3 は、Pattern2 について、 $h_0/k$  を 1 から 2.5 まで変化させた時の抵抗係数  $C_d$  と Reynolds 数  $Re_d$  との関係を示したものである。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: 1.05,

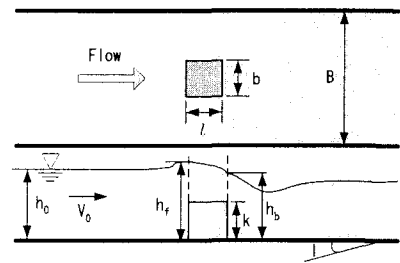


図-1 角柱の設置状況

表-1 実験条件表

(a)水理条件

	$Q(m^3/s)$	$V_0(m/s)$	$h_0(m)$	$Fr$	$Re_d$	$I$
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	
Case2-1	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	
Case3-1	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

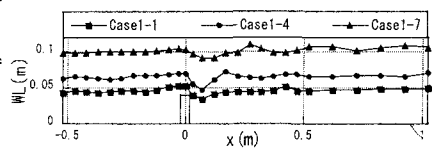


図-2 水路中心軸上の水位変化

$l/k > 2$  の場合 : 0.74)となる<sup>1)</sup>が、図-3より抵抗係数  $C_d$  は、いずれの  $l/k$  に対しても  $Re_d$  の増加に伴って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、 $h_0/k > 2.0$  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。

図-4は、 $C_d$  と等流水深と物体の高さの比  $h_0/k$  との関係を示したものである。ここでは、Pattern2 および 3 についてのみ示している。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 ( $b=l$ )<sup>2)</sup>、一様空気流中の 2 次元物体の  $C_d$  値 ( $b=l$ )<sup>1)</sup>、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 :  $l/k=b/k=1$ , 形状 2 :  $l/k > 2, b/k=1, Re_d=10^4 \sim 10^6$ )<sup>1)</sup> もあわせて示している。図-4 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、 $h_0/k$  の増加に伴って減少し、 $h_0/k > 2.0$  では  $C_d$  値が一定になることが確認できる。また、物体の長さ高さの比  $l/k$  が小さくなると、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。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を確認できる。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 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  $Re_d$  の影響を受け、相対水深  $h_0/k > 2.0$  では  $h_0/k, Re_d$  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を確認できる。

以下では、抵抗係数  $C_d$  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、 $C_d$  と物体の長さ高さの比  $l/k$  との関係について検討する。図-5 は、 $C_d$  と物体の長さ高さの比  $l/k$  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  $Re_d$  の影響を受けるが、相対水深  $h_0/k > 2.0$  では  $h_0/k, Re_d$  の影響を受けず、表-2 に示すほぼ一定値をとる。

#### 4. 結論

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  $h_0/k$  に依存する。

2. 相対水深  $h_0/k > 2.0$  では、 $C_d$  値は  $h_0/k, Re_d$  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検討を加える予定である。

参考文献 : 1) Hoerner, S.F.: Fluid-dynamic drag, 1965

2) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小林俊彦, 大田和正: 水工学論文集, 第 46 巻, pp827-831, 2002

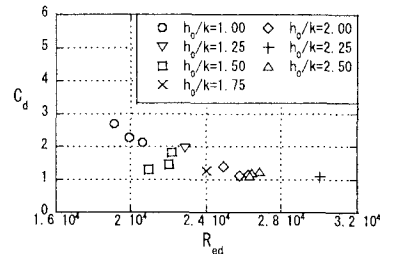
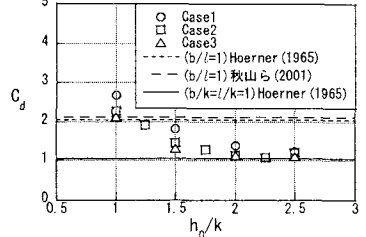
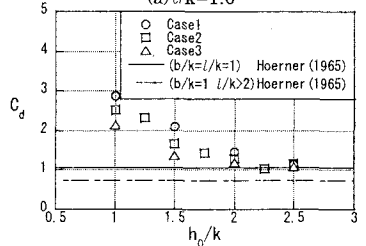


図-3  $C_d$  と  $Re_d$  の関係



(a)  $l/k=1.0$



(b)  $l/k=1.5$

図-4  $C_d$  と  $h_0/k$  の関係

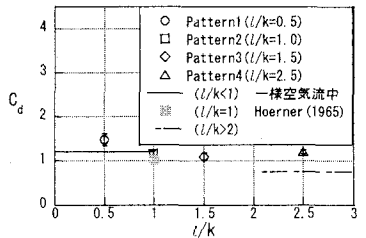


図-5  $C_d$  と  $l/k$  との関係

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