

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

九州工業大学工学部 正会員

重枝 未玲

九州工業大学工学部 フェロー会員

秋山壽一郎

九州工業大学大学院 学生会員

○石原 仁

1. 目的

近年、環境・景観面の配慮から、中小都市河川で飛び石や巨石などのモノを河道内に配置するケースが増えてきている。このような場での流況を高い精度で予測するためには、流れの状態により水没・非水没状態となる物体に働く抗力の評価が極めて重要となる。本研究は、水没物体に働く流体力の把握を目的として、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立方体(高さ k =奥行き l =幅 $b=0.04\text{m}$)を採用した。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。

定常流中の立方体の抗力係数 $C_d (=2D/(\rho A_d V^2))$ は、一様空気流中では
 ① Reynolds 数 $Re_d (=Vb/\nu) = 1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ の場合、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、
 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、一定値をとることがわかっている。また、揚力係数 $C_l (=2L/(\rho A_l V^2))$ 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ことがわかっている。ここに、 V =代表流速、 ν =水の動粘性係数、 g =重力加速度、 A_d 、 A_l =抗力、揚力作用方向の投影面積、 ρ =水の密度である。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 Re_d および Froude 数 $F_r (=V/(gh)^{1/2})$ を変化させた。

測定項目は、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。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。

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の記号を、射流の場合には塗りつぶしの記号を用いている。図-2 は、 C_d 値、 C_l 値と Reynolds 数 Re_d との関係を調べたものである。 C_d 値については一様空気流中の C_d 値 ($l/b=k/b=1$) 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、 Re_d の増加に伴い C_d 値および C_l 値のい

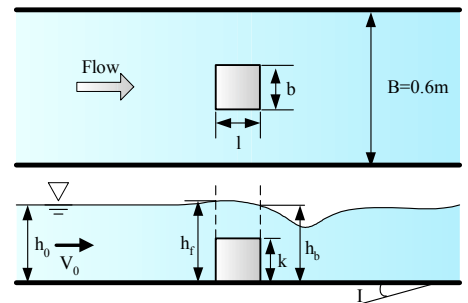


図-1 角柱の設置状況

表-1 水理条件

	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	相対水深比 h_0/k	水深平均流速 $V_0(\text{m/s})$	Froude数 F_r	Reynolds数 Re_d	水路床勾配 I
Case1-1 ~1-7	0.0121 ~0.0216	1.00	0.478 ~0.894	0.764 ~1.428	19125 ~35774	1/1000 ~1/167
Case2-1 ~2-5	0.017 ~0.0281	1.25	0.572 ~0.904	0.817 ~1.291	22879 ~36160	1/1200 ~1/167
Case3-1 ~3-7	0.0183 ~0.0381	1.50	0.523 ~1.025	0.682 ~1.337	20923 ~40998	1/1400 ~1/167
Case4-1 ~4-5	0.0236 ~0.0465	1.75	0.600 ~1.086	0.724 ~1.311	24000 ~43437	1/1200 ~1/167
Case5-1 ~5-7	0.0302 ~0.0568	2.00	0.6222 ~1.256	0.703 ~1.418	24888 ~50225	1/1000 ~1/167
Case6-1 ~6-5	0.0402 ~0.0603	2.25	0.751 ~1.142	0.799 ~1.216	30033 ~42754	1/1200 ~1/222
Case7-1 ~7-7	0.0389 ~0.0661	2.50	0.660 ~1.150	0.667 ~1.161	26394 ~45991	1/1400 ~1/250

れも減少し、 $Re_d > 3.0 \times 10^4$ 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。

図-3 および図-4 は、それぞれ C_d 値あるいは C_l 値と Froude 数 Fr および相対水深比 h_0/k との関係調べたものである。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 $Re_d = 1.0 \times 10^3$ の場合の一樣空気流中の C_l 値 ($l/b=1$, $k/b=5, 8$) を示している。 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樣空気流中の 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-5 は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

限界水深 h_c よりも小さくなること、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、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を確認できる。

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、一樣空気流の場合により近い流況になるためと推察される。

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-6 に抵抗係数設定のためのフローチャートを示す。ただし、Reynolds 数 $Re_d = 1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ 、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。

4. おわりに

定常自由表面流中に置かれた立方体の C_d 値と C_l 値は、相対水深比 $h_0/k \leq 2.5$ の場合、Reynolds 数 $Re_d = 1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ 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次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-6 のように求めることができる。

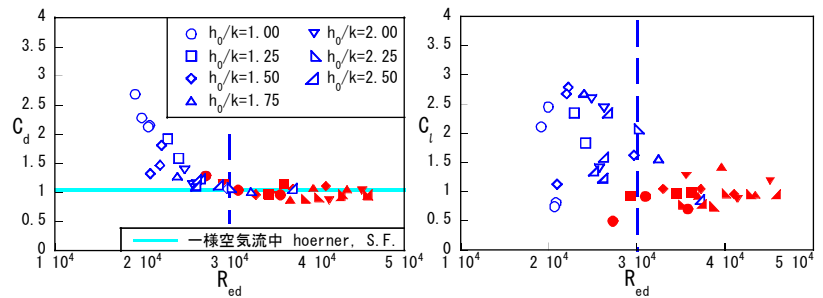


図-2 C_d あるいは C_l と Re_d との関係

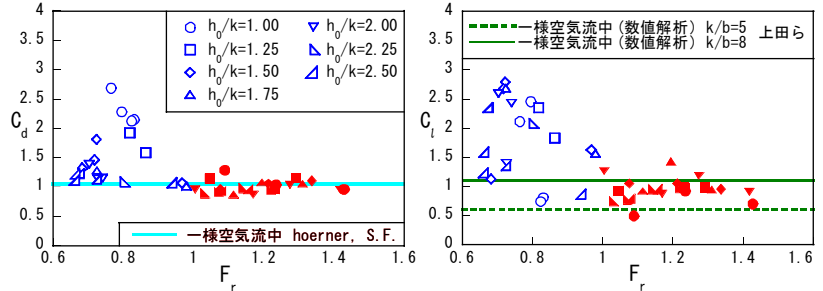


図-3 C_d あるいは C_l と Fr との関係

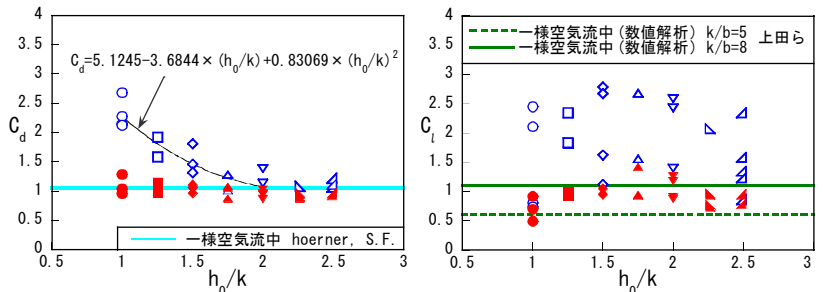


図-4 C_d あるいは C_l と h_0/k との関係

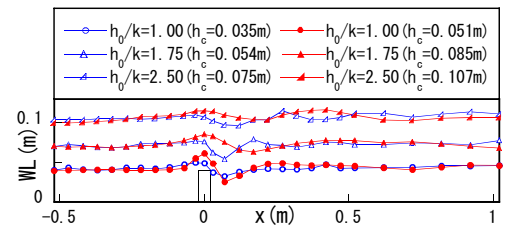


図-5 水路中心軸上水位変化

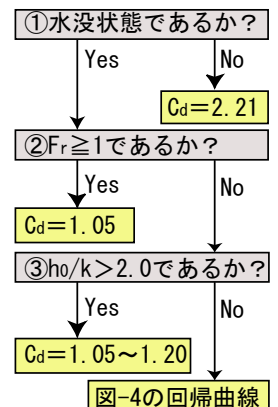


図-6 非水没状態から h_0/k が 2.5 までの立方体の抵抗係数の設定方法