

開水路中に設置された立方体および棧の流体力評価

技研興業(株)技術研究所 正会員 ○大井 邦昭
 技研興業(株)技術研究所 正会員 前田 稔
 防衛大学校建設環境工学科 正会員 林 建二郎

1. はじめに

より経済的な河道設計への要求や多自然型工法の普及に伴い、河床に置かれた護岸ブロックや巨礫のような大型突起物に作用する流体力の定量的な評価も重要となってきた^{1), 2)}。しかし、自由水面や境界層を有する開水路流れの複雑さとこれら物体の持つ形状の複雑さのために、流体力の評価法においては未解明な点も多く、その定量的な評価はまだ不十分である。本研究は、開水路中に置かれた大きな突起高の物体に作用する流体力特性をより精度良く把握することを目的として、開水路中に水没状態で単独に置かれた立方体と棧に作用する流体力の計測とその評価法について検討したものである。また、流れの数値計算による流体力との比較・検討も行なった。

2. 実験および数値計算方法

(1) 開水路実験³⁾：開水路実験には、回流装置付き2次元水槽(幅0.8m, 高さ1m, 長さ20m)を用いた。水路床はベニヤ板製の水平床とした。水路幅中央の水路床下部に取り付けた6分力計(日章電機(株))に、高さ $h=5\text{cm}$ の立方体(5*5*5cm, アルミ製)設置し、作用流体力の x, z 方向成分である抗力 F_x と揚力 F_z を計測した。立方体底面での圧力発生条件を明確にするために、立方体下面の3点に径3mm, 長さ1.5mmの小リングを取り付け、立方体と6分力計の載荷面との間に1.5mmの間隙を設けた。

棧の場合は、本立方体の両横と水槽両側壁の間に立方体と同じ断面(高さ5cm)を有する長さ37cmの直方体を設置し、立方体に作用する抗力と揚力を計測し単独の棧に作用する流体力とした。

立方体まわりの流速計測と流況把握には、2成分レーザードップラー流速計(ダンテック社)とPIV(ダンテック社)を用いた。シート光にはダブルパルスYAGレーザを用いた。レーザシート光の幅は約1mmである。

実験条件を表-1に示す。水深は $d=30, 50\text{cm}$ の2種類とした。 F_x 数($=V_m/(gd)^{0.5}$, V_m =水深方向平均流速)は0.06~0.21の範囲である。

(2) ながれの数値計算³⁾：数値計算には、市販の3次元流体解析ソフトを使用した。本実験水深 d と同じ高さを有する2次元矩形管路の下側底面上に設置された、高さ $h=5\text{cm}$ の立方体まわりの3次元流れ解析を行った。数値計算条件の詳細を表-1に示す。

3. 結果及び考察

(1) 立方体に作用する流体力：立方体の抗力係数 C_d と揚力係数 C_L を、(1)式、(2)式でそれぞれ定義する。

$$C_d = F_x / (0.5 \cdot \rho \cdot A_d \cdot U_\infty^2) \quad \text{---(1)}, \quad C_L = F_z / (0.5 \cdot \rho \cdot A_L \cdot U_\infty^2) \quad \text{---(2)}$$

式中、 A_d, A_L ：立方体流下(x)方向・揚力(z)方向投影面積、 ρ ：流体密度、 U_∞ ：境界層外縁流速である。

本開水路流れにおいては、水路長さの不十分さや、2次流の影響のため、境界層厚さ δ は水表面まで達してなかった。立方体の上流側10cmの位置における水平速度成分 u の時間平均値 U の鉛直方向分布を計測し、その最大値を境界層外縁流速 U_∞ とした。また U_∞ の約90%の流速 U を示す位置の高さ z を境界層厚さ δ とした。

本立方体の C_d および C_L の、立方体高さ h と境界層厚さ δ の比 h/δ に対する変化特性を図-3, 4に示す。図中、●丸は本実験結果、○丸は本数値解析結果である。なお、図-3中には、風洞内の水平床面上に置いた立方体の C_d と h/δ の関係を、床面での摩擦速度 u^* をパラメータとして調べた坂本等の実験結果⁴⁾の一例($u^*/U_\infty=0.036$)を比較として示している。

キーワード 流体力, 多分力計, 数値計算, 揚力係数, 抗力係数, 立方体, 棧粗度

連絡先 〒193-0801 東京都八王子市川口町1540 技研興業株式会社総合技術研究所 技術部 TEL0426-54-4331

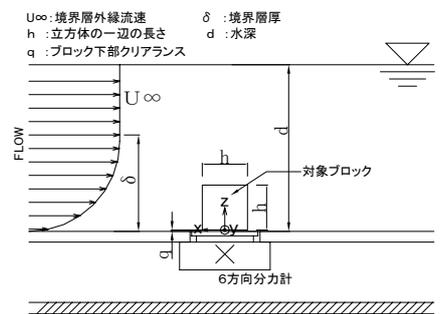


図-1 模型設置状況および諸量の定義

表-1 開水路実験および数値計算条件

・開水路実験		
水深 d mm	流入平均流速 V_m cm/s	
500	29.7, 25.8, 17.5, 12.6	
300	36.6, 35.8, 26.7, 19.7	
・数値計算条件		
計算領域	200.000mm × 800mm × d (管路)	
解析対象流体	非圧縮流体	
計算格子	非構造格子(vertex-based-scheme)	
アルゴリズム	simplex	
移流項差分スキーム	muscl法(2次)	
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ 2方程式モデル	
境界条件	上面、側面	free slip
	物体表面	no slip (滑面)
	下面	no slip (相当粗度1.5mm)
流出境界条件	圧力規定	
流入境界条件	流入流速規定 V_m	

※ d および V_m は実験と計算共通条件

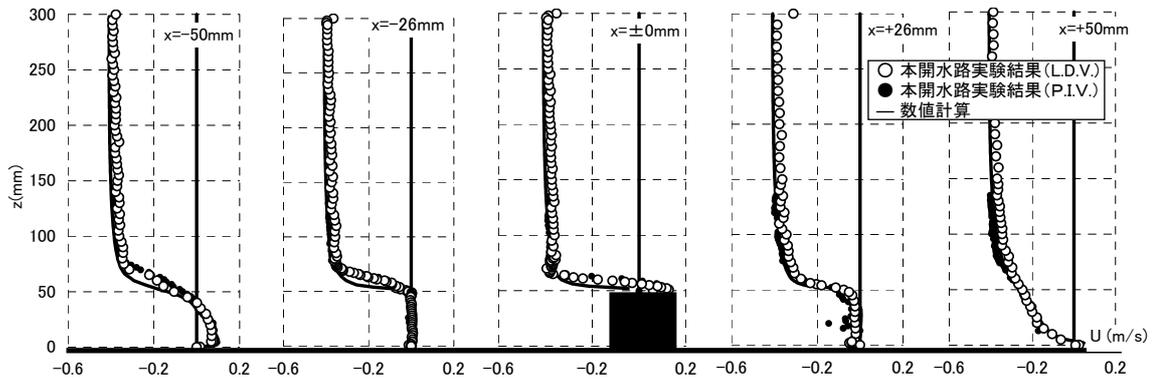


図-2 立方体周りの水平流速 U の鉛直分布 (水深 $d=30\text{cm}$, 流入断面($x=50\text{mm}$)での平均流速 $U_m=37\text{cm/s}$ の場合)

図より、開水路中に置かれた立方体の C_d および C_L は、風洞中に置かれ場合と同様に h/δ の増加に伴い大きくなるのがわかる。しかし、開水路中の C_d は、風洞実験の場合よりも大きくなっている。この原因としては、開水路における自由水面の存在が考えられるが、その確認についてはまだ不明確である。

数値計算の C_d , C_L は、開水路実験結果より小さい。数値計算の C_d は、風洞実験結果と良く一致している。この理由としては、数値計算では管路上面の境界条件を free-slip 条件としたため、自由表面を有しない点では風洞実験と同一条件であり、境界層外縁での流れの境界条件が類似していることが挙げられる。

水路幅中央線上 ($y=0\text{mm}$) における U (流れ方向を-) の鉛直方向流速分布の流下方向変化を LDV と PIV を用いて計測した結果を、数値計算結果と併せて図-2 に示す。図より LDV と PIV の計測値は良く一致しており、立方体を越す流れについては $x=0\text{mm}$ で立方体上面の極近傍に逆流域が存在していることが分る。計算結果は、立方体の上流側 ($x=50\text{mm}$, 26mm) や後流域 ($x=-50\text{mm}$) における流速分布の実測値を上手く評価しているが、立方体上面の $x=0\text{mm}$ における逆流領域を再現していない。剥離流れのモデル評価が不十分なためと考えられる。

(2) 単独の棧に作用する流体力：

本実験における単独の棧の C_d と C_L を (5), (6) 式で定義する。

$$C_d = F_x / (0.5 \cdot \rho \cdot A_d \cdot U_m^2) \quad \text{--- (5)}, \quad C_L = F_L / (0.5 \cdot \rho \cdot A_L \cdot U_m^2) \quad \text{--- (6)}$$

式中、 F_x , F_L ：側面に立方体を近接した立方体に作用する抗力・揚力、 A_d , A_L ：立方体の流下・揚力方向投影面積、 U_m ：水深方向平均流速である。

(5), (6) 式を用いて算定した C_d と C_L の棧高さ と水深の比 h/d に対する変化特性を図-5, 6 に示す。図-5 中には、無限間隔となる棧粗度 (= 単独の棧) の C_d に関する足立の実験結果⁵⁾を比較として示す。本実験で得られた単独な棧の C_d は、足立の実験結果⁵⁾と同様に h/d の増加に伴い大きくなっている。本実験で得られた単独の棧の C_L も、 C_d と同様に h/d の増加に伴い大きくなっている。

参考文献

- 1) 護岸ブロック試験法検討委員会編：護岸ブロックの水理特性値試験法マニュアル，財団法人土木研究センター，1999.7.
- 2) 赤司信義ほか：不完全越流時のステップ上の物体に働く抗力の評価について，第4回流体力の評価とその応用に関する講演集，pp.45-50, 2006.
- 3) 林建二郎ほか：護岸ブロックの水理特性値に関する基礎的研究，第4回流体力の評価とその応用に関する講演集，pp.45-50, 2006.
- 4) 坂本弘志ほか：乱流境界層の中にある正方形柱周辺の流れに関する研究，日本機械学会論文集，46巻408号，1980.
- 5) 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.

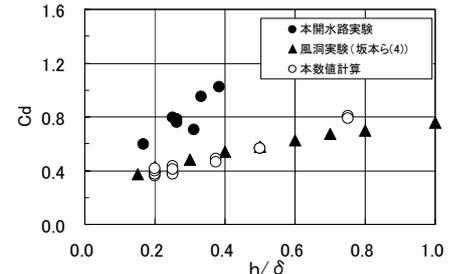


図-3 立方体の抗力係数 C_d

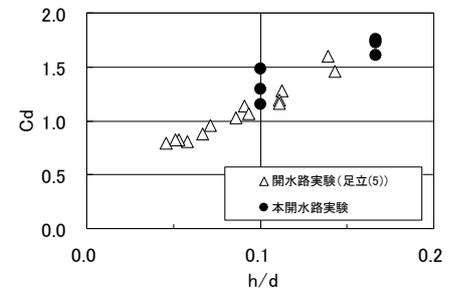
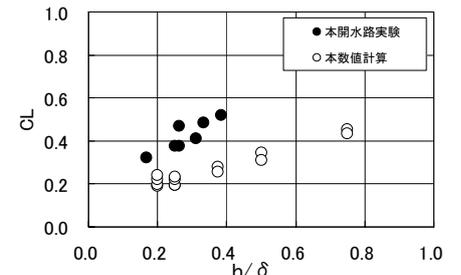


図-5 単独な棧の抗力係数 C_d

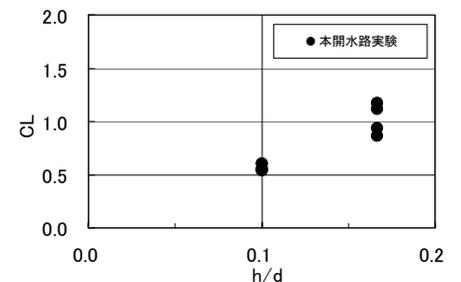


図-6 単独な棧の揚力係数 C_L