

流水中の自然石に働く流体力の評価

吉田 圭介¹, 牛島 省², 田中 龍二¹, 宮木 伸³

¹岡山大学大学院 環境生命科学研究科, ²京都大学 学術情報メディアセンター, ³大成建設株式会社

1 緒言

近年, 河川のインフラ整備では構造物の堅牢さに加えて自然環境への調和が要求されており, 現地で調達した石や木などの自然素材を用いた構造物が河道内に設置される場合がある. 例えば, 適度な空隙を有する水制工, 落差工 (図 1 参照), 根固工および水深寸法以上の巨石を河道に配置した工法は, 川の流りに多様性をもたせて河川景観を創造したり, 水生生物の生息環境を保全する効果がある.

一方, 従前のコンクリート製構造物とは異なり, 自然石を用いた工法では材料の要素は必ずしも画一的ではない. そのため, 構造物の流水に対する力学的応答が明らかでない場合があり, その結果, 自然石からなる構造物の治水機能を検討することは一般に困難である. 現在, 河川実務では技術者の経験や模型実験[1]などに基づいてこうした構造物の安全度を照査したり推定するのが通例であるが, これには労力や費用が多くかかる上, 射流などの急変流場では計測が困難であるため, 設計の信頼性は必ずしも十分ではないと指摘されている.

そこで, 本研究では固気液多相場の数値解析法[2]を利用して, 一様な開水路の底面に設置された自然石に働く流体力を解析し, 併せて行った室内模型実験との比較から数値解析法の妥当性を検討することとした. 本研究の最終目標は, 流水中の自然石に働く流体力を精度良く評価できる解析手法を確立して, 水工学の実務に資することである.

2 実験

本研究では長さ 16m, 幅 0.6m, 高さ 0.4m, 勾配 1/1000 の可変勾配型循環水路 (図 2 参照) を用いた. 座標系は図に示す通りである. 実験では強化プラスチック製の自然石の模型 (図 3 参照) をアクリル製の水路底面に接着して通水し, 流水中の流体力と周辺の流れ場を測定した.



図 1 落差工 (円山川)

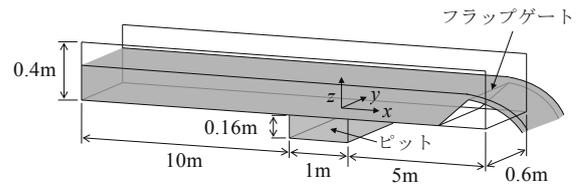


図 2 実験水路と座標系

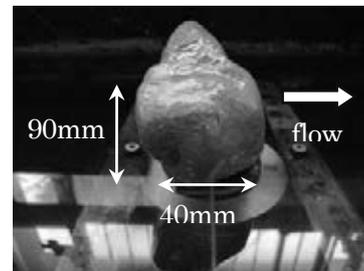


図 3 実験で用いた模型の設置状況 (側面)

表 1 実験条件

| Case | 流量 Q [l/s] | 断面平均の 主流速 \bar{U} [m/s] | フルード 数 Fr |
|------|-----------------|---------------------------------|----------------|
| 1 | 40 | 0.33 | 0.24 |
| 2 | 60 | 0.50 | 0.36 |
| 3 | 80 | 0.67 | 0.48 |

流体力の計測では水路のピット内中央部に四分力計(東京計測社製, Y116M2AG4)を設置し, 自然石に働く抗力・揚力を 30Hz の時間解像度で測定した. 水流の流速計測には 2 次元電磁流速計(KENEK 社製, VM-802H 型)を用い, 開水路の底面境界層が

表2 数値解析条件表

| | |
|---|----------------------|
| 時間刻み Δt [s] | 1.0×10^{-3} |
| 計算時間 T [s] | 30.0 |
| 空間格子幅 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) [mm] | (5.0, 5.0, 5.0) |
| 計算領域 (L_x, L_y, L_z) [m] | (3.0, 0.6, 0.2) |
| 流入条件 | 一様流速 |
| 流出条件 | 自由流出 |
| 水面条件 | Slip 条件 |
| 側壁・底面条件 | Non-slip 条件 |

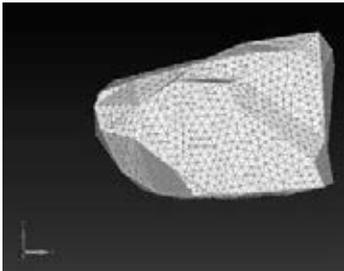


図4 自然石模型の4面体分割 (yz平面)

十分に発達して、主流速の鉛直分布が対数則分布を示すことを確認した。実験条件は表1の通りである。

3 数値解析

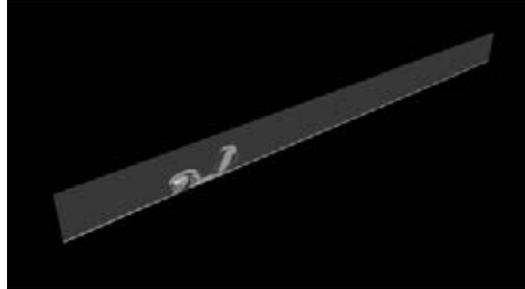
本研究では牛島ら[2]の数値解析手法を用いて、自然石に働く流体力を解析した。牛島らの手法では固気液多相場を一流体モデルとして扱い、混合体に対する連続式と運動方程式を非圧縮性条件の下でDNS (直接数値計算) により解く。また、任意形状の固体は四面体要素の集合として表現され、固体領域に働く流体力は抗力係数などの経験的なパラメータからではなく、直接的に適切に算定される。

本研究では実験で用いた模型の3次元形状測定を行って、数値解析に必要なデータを作成した (図4参照)。数値解析の条件は表2に示す通りである。解析では自然石を剛体とみなした。また、解析では直方体格子を用い、 x, y, z 各方向に均一に格子分割を行っている。なお、負荷軽減のため、解析では領域分割による並列計算を行っている。

4 結果と考察

図5は数値解析結果の一例であり、模型石を通る鉛直断面 (xz 平面) における渦度コンターを示した。模型石周辺では準周期的な渦構造が生成され、それらが移流された後に、上面境界付近で拡散する様子が観察される。

$t = 1.0$ s



$t = 3.0$ s

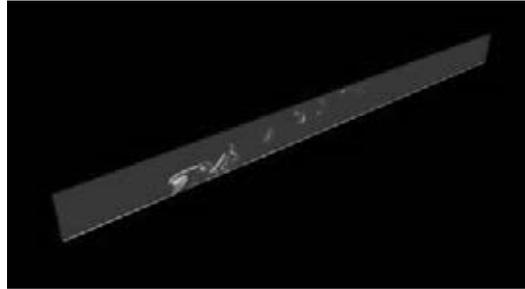


図5 模型石を通る鉛直断面の渦度のコンター (計算結果, Case3, t : 計算初期からの経過時間)

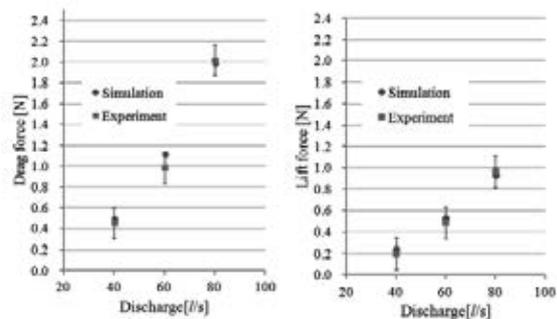


図6 流量と抗力・揚力との関係

図6には水理実験と数値解析から求めた、流量毎の抗力と揚力の算定値を示す。図中、実験値にはエラーバーを付した。定性的には流量と抗力には比例関係が認められる。また、定量的には実験値と解析値は概ね一致する。今後は条件の詳細を検討するなどして、流体力評価の再現性を向上させたい。

5 参考文献

- [1] (財)土木研究センター: 護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル (第2版), 2003.
- [2] 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集 B, Vol.64, pp.128-138, 2008.