

開水路粗面乱流中を流下する非球形石礫に関する数値解析

中央大学大学院 学生会員 ○高鋏 裕也
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. 序論

近年、石礫河川の土砂移動に及ぼす石礫形状の効果について、Euler-Lagrange Simulation に基づく研究が進められている(例えば APM)¹⁾。しかし、非球形粒子の運動形態を計測することが容易ではないこと、計算負荷などの理由から、壁面との接触を考慮した非球形粒子の流体中の挙動を十分に説明する事例は示されていない。

重村²⁾は、ダム排砂水路の磨耗進展機構の解明のため、大量の土砂移動による水路の磨耗実験と並行して、コンクリート製大型開水路流中の石礫(表-1)の流下挙動に関する映像を得ている(単一石礫流送実験)。著者ら³⁾は APM を用いてこれを解析したが、円盤型石礫については、図-1 に示す短軸を回転軸とした転動・跳躍(a)と長軸を回転軸として跳躍する滑空形態(b)との遷移や移動速度について説明することはできなかった(移動形態の安定する楕円体型と洋ナシ形の石礫については説明可能³⁾)。

本項では、流れの解析精度を向上すること、水路底面の局所的な凹凸を考慮することにより、円盤型石礫の移動形態の遷移を説明できることを示す。

2. 数値解析の概要

数値解析では、直径 $d = 8 \text{ cm}$ の球を重ね合わせて作成した、馬蹄型の横断面形状(図-2)を持つ長さ 45 m の水路に、定常流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を供給した。磨耗量の縦断変化、平均磨耗量、局所的な凹凸を考慮するため、水路勾配を $1/19.8$ とし、水路底部は一律に 25 mm 下げ、さらに底部を構成する球の高さに最大 $\pm 10 \text{ mm}$ のばらつきを与えた(文献³⁾では未考慮)。

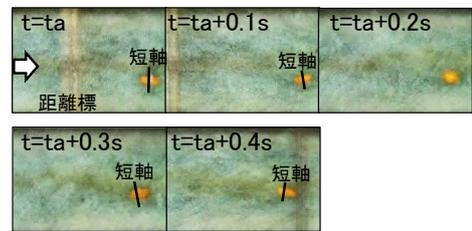
数値解析における水路中央の水深 $h = 0.20 \text{ m}$ 、水表面流速 $u_s = 4.6 \text{ m/s}$ は、実験結果($h = 0.19 \text{ m}$, $u_s = 4.7 \text{ m/s}$)に概ね対応する。

石礫は、 $x = 2.0 \text{ m}$ の位置で、高さ 0.4 m から初速度ゼロで自由落下させて投入した。

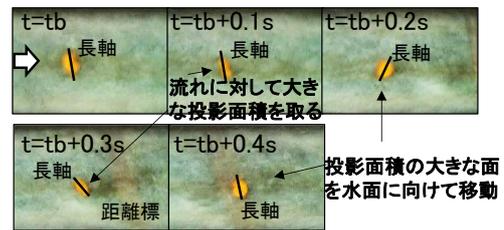
計算条件は、著者らの開水路粗面乱流に関する研究⁴⁾を参考に、計算格子幅を $\Delta = 0.008 \text{ m}$ 、サブセル幅を $\Delta/6$ とした。液相と固相の密度は $1000, 2500 \text{ kg/m}^3$ 、石礫の物性

表-1 単一石礫流送実験²⁾に使用された石礫

石礫			
石礫モデル			
粒径(等価積球の直径d)	0.075	0.105	0.135
形状名	楕円体型	円盤型	洋ナシ型
無次元長径(a/d)	1.39	1.50	1.34
無次元中径(b/d)	1.01	1.00	0.90
無次元短径(c/d)	0.79	0.60	0.83
Shape Factor = $c/(a*b)^{0.5}$	0.67	0.49	0.76
無次元最大投影面積=(最大投影面積/球の投影面積)	1.21	1.61	1.25
無次元最小投影面積=(最小投影面積/球の投影面積)	0.83	0.74	0.79



(a) 短軸を回転軸とした転動・跳躍



(b) 滑空形態(長軸を回転軸とした跳躍)

図-1 円盤型石礫の特徴的な移動形態(平面図)

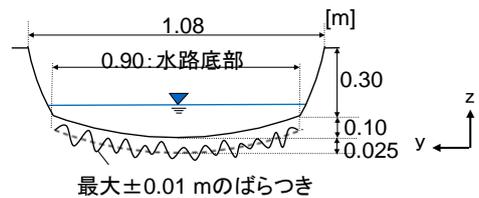


図-2 数値解析水路の横断面形状

値は弾性係数 $5.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、ポアソン比 0.23 、摩擦係数 0.2 とした。反発係数は表ら⁵⁾の岩体落下試験を参考に 0.4 を与えた。流体計算及び石礫運動の刻み時間は 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-6} 秒とした。

3. 数値解析結果と考察、画像解析³⁾と数値解析の課題

図-3 に、円盤型石礫の流下挙動(側面図)を示す。石礫は、 $7 \leq x \leq 14 \text{ m}$ にかけて短軸を回転軸とした転動・跳躍(a)

キーワード 非球形石礫, 移動形態, 開水路粗面乱流, Euler-Lagrange Simulation

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学研究開発機構福岡ユニット TEL03-3817-1615

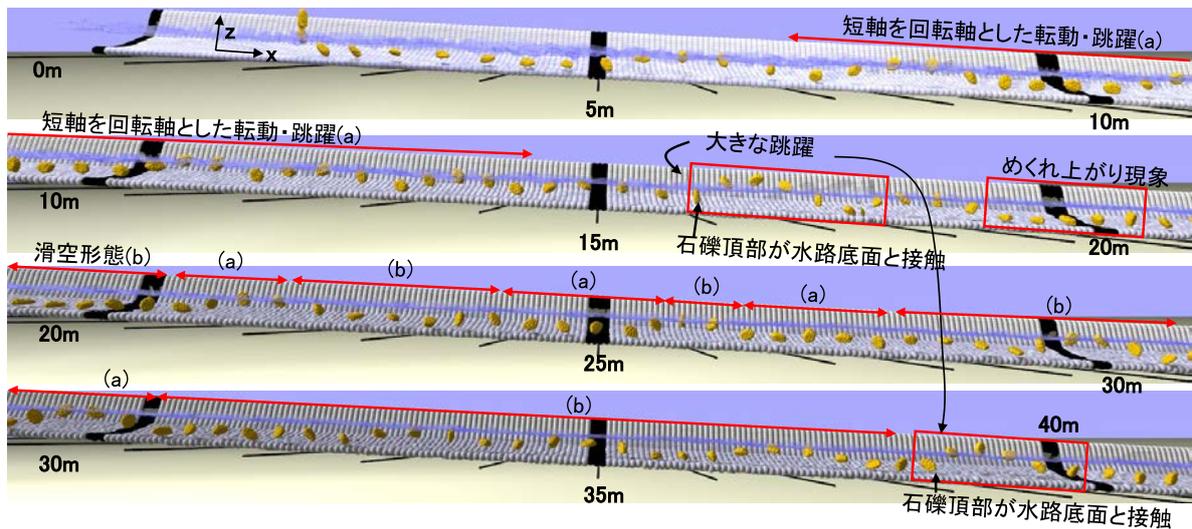


図-3 円盤型石礫の流下挙動(0.10秒ごとに石礫をプロット, 石礫投入時の水面を表示. 右岸壁は透明化.)

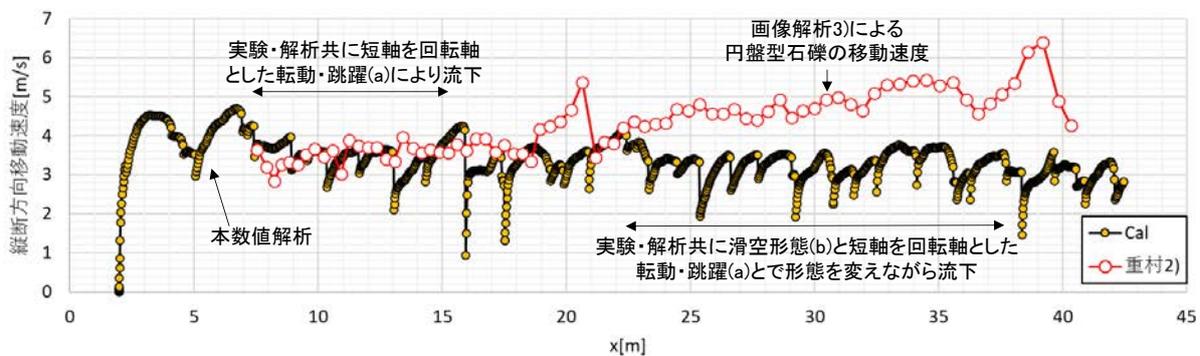


図-4 円盤型石礫の移動速度(数値解析:0.01秒ごとに, 画像解析結果は0.10秒ごとにプロット.)

により流下し, また $x > 20 \text{ m}$ においては, 滑空形態(b)と短軸を回転軸とした跳躍(a)の2つの形態が移り変わりがながら流下している. 特に, 既往研究³⁾では石礫が一度倒れると継続的に底面を這うように移動($19 \leq x < 20 \text{ m}$ の状態が継続)していたが, 本稿では, 石礫が底面の局所的な凸部と接触することにより, めくれ上がる現象($x = 20 \text{ m}$)が確認された. 上記の結果は, 水路底部の局所的な凹凸を考慮したこと, また, 計算格子幅等を細かくし, 石礫周りの流れの解析精度が向上したことによるものであり, 既往研究³⁾からの進展は大きい.

一方, 本稿においても2つの課題が残されている. 第一に, 石礫の跳躍高さである. 実験²⁾では石礫は水面までしか跳躍しないが, 解析では石礫は水面から飛び出る($16 \leq x \leq 18 \text{ m}$, $38 \leq x \leq 40 \text{ m}$). これは, 石礫の頂部が水路底面に接触し, 縦断方向の運動量が鉛直方向の運動量に大きく変換されるためである. 反発係数を0.4から0.3, 0.2に変更しても同様の跳躍が発生しており, 石礫形状の再現性の問題と考えている. 今後, 短軸周りの輪郭を修正し, 跳躍高や接触力に及ぼす輪郭形状の影響を調べる.

第二の課題は, 石礫の移動速度の再現性である(図-4).

実験映像²⁾では $x < 20 \text{ m}$ においては, 主に短軸を回転軸とした転動・跳躍で流下している. 数値解析においても同様の形態で流下する $x < 15 \text{ m}$ の移動速度は実験結果を説明する. 一方, 2つの移動形態に遷移しながら流下する際の数値解析の移動速度は実験結果と比べてかなり小さくなる($20 \leq x \leq 38 \text{ m}$). この要因の1つに, 画像解析の精度³⁾が挙げられる. 実験では, 図-1に示すような距離標は水路の一部にしか配置されておらず, 画像解析において, 距離標の無い区間の移動速度は線形補間し, 速度を過大に評価している可能性がある. 2つ目の要因として, 石礫周りの流れの解析精度が挙げられる. 既往研究⁴⁾では, 球の直径 d に対する計算格子幅 Δ の影響を検討しているが, 円盤型石礫の代表長さの一つは短径 c であり, これを解像するように計算格子幅 Δ を設定すべきと考えている($c/\Delta \geq 10$).

参考文献

- 1)Fukuoka ら, *Adv. Water Resour.*, Vol.72, 84-96, 2014.
- 2)重村, 広島大学大学院工学研究科修士論文, 2004.
- 3)Takakuwa ら, *THESIS-2016*, Tokyo, Japan.
- 4)高鋸ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75(2), 589-594, 2019.
- 5)表ら, 土木学会北海道支部論文報告集, 第65号, C-6, 2008.