

応力鎖に着目した石礫流れ中の速度構造化と波動伝播

名古屋工業大学大学院 ○ 館井 恵
名古屋工業大学 前田健一
名古屋工業大学大学院 福岡雅俊

1. はじめに

著者らは模型実験と個別要素法 (DEM) 解析を用いて十分にわかっているとは言えない石礫集合体の流れについて地盤工学の視点から事例解析や対策効果を含めて検討している¹⁻³⁾。本報告では、数値解析による粒子群の流れに伴う速度の遷移と内部に発生する縦波について考察を行った結果を示す。

2. 模型実験概要

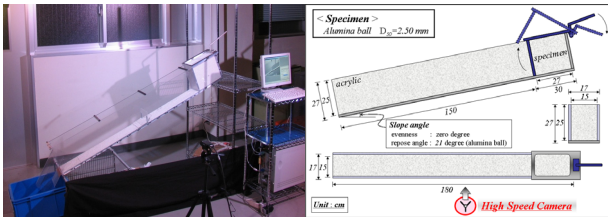


図-1 実験装置写真

図-2 実験装置概要図

図-1、図-2 に実験装置の概要を示す。傾斜角が可変なアクリル板 (側面) 及びアルミ板 (底面) から成る斜路を用いた。斜路の上流部に試料箱を設置し、試料を詰めた状態で前方のアルミ板を開けて試料を崩壊させ、流下挙動を観察した。崩壊試料には比重が土粒子に近く、可視化しやすいアルミナボールを用いた。試料は直径 $D_{50}=2.5\text{mm}$ を用いた。河床は $D_{50}=2.5\text{mm}$ の粒子固定床とし、斜路の傾斜角度は試料の安息角の 20 度とした。斜路と平行に設置した高速度カメラで流れを撮影し、輝度差累積法による PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて速度分布を求め、ひずみ速度分布を算出した。

3. 数値解析概要

DEM を用いた粒状斜面の流動特性の検討は図-3 のような二次元単純斜面モデルを用いた。図中に示すように x , y 座標を設定した。解析に用いたパラメータの詳細及び崩壊試料作成方法については既報¹⁻³⁾に詳しい。斜路上流の試料箱 (長さ 15m, 高さ 7.5m) に最密な試料を作成し傾斜に対応する重力加速度を与え、試料箱前面の壁を取り去ることで崩壊した試料の流動挙動を再現した。試料は円形粒子のみを用い、粒度分布は最小・最大粒径 ($D_{\max}$, $D_{\min}$) の範囲内において重量の対数正規分布に設定した。傾斜角度は崩壊試料の安息角の 20 度について検討した。試料の粒度は, $R_D (=D_{\max}/D_{\min})=2$ とした。河床には崩壊試料と同じ物性の粒子を固定した粒子固定河床, fixed ball (粗度: 大) とし、河床粗度を表現した。また, $R_D=2$ の流れについて、堰堤に見立てた板要素を斜面中腹に設置し、堰堤に作用する衝撃力を調べた

4. 粒状体流れにおける速度構造化について

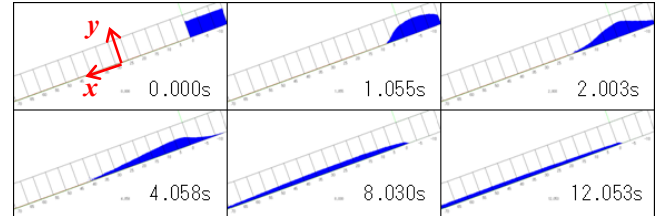


図-3 粒子群の流動挙動

図-3 に粒子群挙動の経時変化を示す。本報告では、この解析結果について、流れ全体のマクロ挙動・粒子単位のミクロ挙動・斜路全体をメッシュに分割したメッシュ単位 ($0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$) の中間スケール挙動 (粒子 4~10 個程度) といったマルチスケールでの検討を行った。

図-4 に $t=3.512\text{s}$ における粒子単位 velocity 分布 (左), メッシュ単位のせん断ひずみ速度分布 (右) を示す。また、図-5 に速度の深度分布の経時変化を示す。解析結果 (左), 実験結果 (右) である。ともに河床付近から減速し、堆積する傾向が見られる。また、河床付近では速度勾配が大きく、河床でせん断ひずみが卓越していることがわかる。図-5 (右) に示したせん断ひずみ速度分布と一致する (赤色はひずみ速度が大きい)。

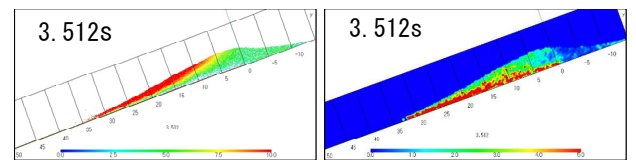
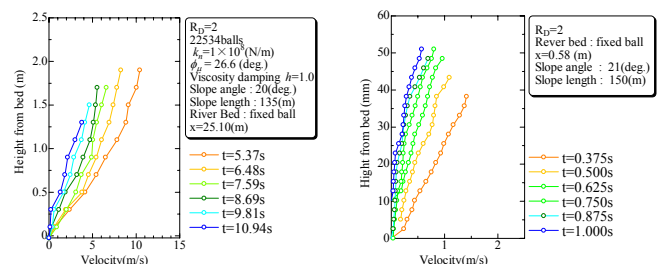


図-4 速度分布 (左), せん断ひずみ速度分布 (右)



(解析結果)

(実験結果)

図-5 速度の深度分布の経時変化

既報²⁾では、粒状体流れ中のメッシュ要素単位における静的な限界状態を State Parameter: ψ_v を用いて表すことによって、2 箇所の速度勾配の変曲点が、 $\psi_v=0$ (限界状態) となる点と深度方向に一致しており、速度構造化が 3 層構造を成していることがわかっている。また、 $\psi_v=0$ (限界状態) となる点ではせん断ひずみ速度が卓越しており、粒子流れ特性はせん断現象に支配されているといえる。

5. 堰堤に作用する衝撃力の振動についての考察

二次元個別要素法(DEM)結果から、堰堤に作用する衝撃力は大きな振動を伴い遷移する³⁾(図-6). このような離散体としての複雑な挙動を理解することが重要である.

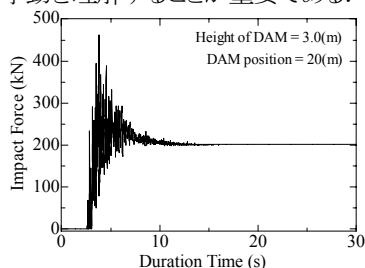


図-6 堰堤に作用する衝撃力(二次元 DEM 解析結果)

図-7 に先端到達距離の経時変化(解析)を示す. 先端到達距離は崩壊後, 先端粒子群の流下に伴い急激に増加し, やがて先端粒子が静止し短時間一定となる. その後, 後続の粒子群に押され緩やかに増加する.

図-8 に粒子単位の流れ中の応力分布の経時変化(解析)を示す. 図中の赤色の粒子が高い応力を分担し, 青色の粒子は分担量が少ない. 流れ内部では応力が不均一に発生し, 応力の高い部分が連なった応力鎖が発生と消滅を繰り返している. 応力鎖は河床に卓越する粒状体のせん断に伴い, 最大主応力方向である斜め上流方向に配向する²⁾.

図-9 には各メッシュ要素について平均化した流れ中の体積ひずみ増分のコンター図(赤:膨張, 青:圧縮)を示す(左:実験結果, 右:解析結果). また, 図-10 には解析結果による, 任意の固定メッシュ要素(中心位置: $x=20\text{m}$, $y=5\text{m}$)において, 定点観測した体積ひずみ増分の経時変化を, 図-11 には実験結果による固定メッシュ(中心位置: $x=137\text{m}$, $y=47\text{m}$)における体積ひずみ増分の経時変化を示す.

図-10, 図-11 のように, 応力鎖が流下挙動に対してストップとなることで, 体積ひずみ増分が圧縮・膨張を繰り返す. これは, 流れ中に縦波が存在することを示唆している. つまり, 定点観測した速度分布が振動を伴うことを示している. このことは実際の土石流現象でも観測されている⁷⁾.

また, 図-12 にメッシュの y 位置を固定したときの, 斜路 x 方向(流下方向)における体積ひずみ増分の推移を示す. 流れとともに振動分布が広がり, 流れが収束するに従い, 減衰していくことが確認できる. 粒状体流れの速度は, 流体とは異なり, 振動を伴いながら遷移し, 収束することがわかった.

堰堤の衝撃力が振動を伴う原因は応力鎖の形成と消滅に起因する粒状体流れの縦波特性によるものであると考えられる.

このような流れ内部のミクロな挙動が図-7 に示すマクロな流下挙動を支配している. 石礫型土石流では定常流ではなく, 非定常流として考察することが現象の理解や効率的な対策に繋がると考えられる.

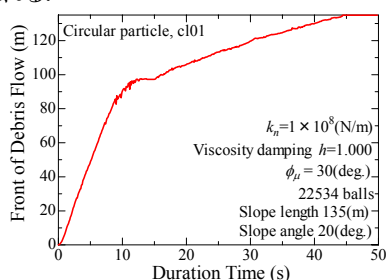


図-7 先端到達距離の経時変化(解析)

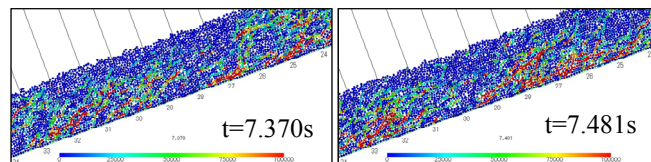


図-8 粒子単位の応力分布の経時変化(解析)

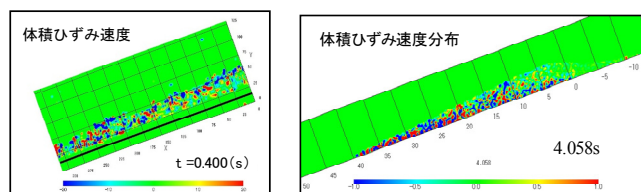


図-9 体積ひずみ速度分布

左:(a)実験結果, 右:(b)解析結果

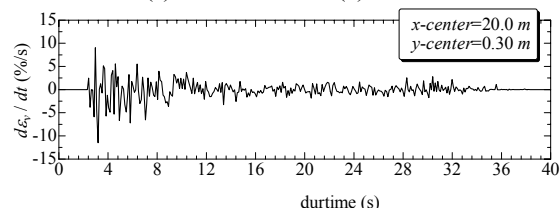


図-10 定点観測による体積ひずみ増分の振動分布(解析)

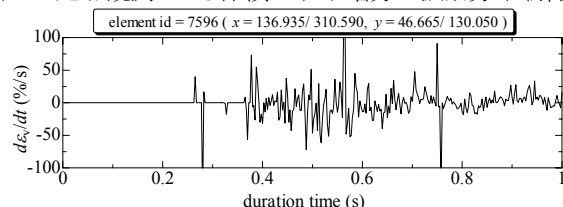


図-11 定点観測による体積ひずみ増分の振動分布(実験)

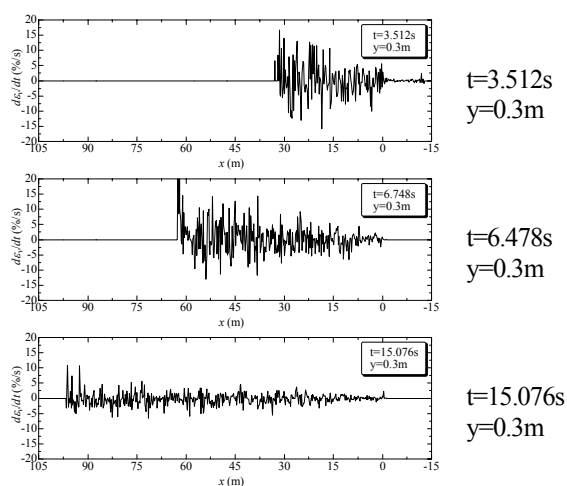


図-12 斜路 x 方向の体積ひずみ増分の経時変化(解析)

参考文献: 1) 平林, 福岡, 前田: 土木学会応用力学論文集 Vol.11 :2008, 2) 福岡他: 第 43 回地盤工学研究発表会: 1017-1018, 2008, 3) 平林他: 第 42 回地盤工学研究発表会:1991-1992, 2007, 4) Wood, D.M.: *Geotechnical modeling*, Spon Press., 2004. 5) MAEDA, K. and Hirabayashi, H. : J. of Appl. Mech., 9, JSCE, pp.623-630, 2006, 6) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004, 7) Bagnold: *Sedimentology*, 10, pp.45-46, 1968, 8) F. Imaizumi and S. Tsuchiya, 4th ICSE 2008, E-8, CD-ROM.