

応力鎖の発生・消滅に着目した石礫流れの逆グレーディングのメカニズム

名古屋工業大学大学院 ○ 福岡雅俊
名古屋工業大学 前田健一
名古屋工業大学大学院 館井 恵
(株)パスコ 平林大輝

1. はじめに

石礫型土石流では巨礫の先端集中現象、及び堆積層の上部に向かって粒径が大きくなる現象(分級:逆グレーディング)が知られているが、この原因については十分に解明されていない。このような複雑な離散体としての kinematics の解明が効率的な土石流対策に繋がると考えられる。本報告では模型実験と個別要素法(DEM)解析を用いて、ミクロ・マクロのマルチスケールから粒状体流れの運動と分級メカニズムについて考察を行った結果を示す。

2. 模型実験概要

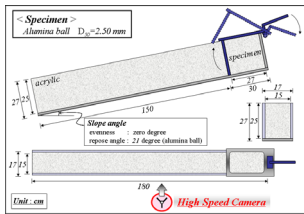


図-1 実験装置概要図

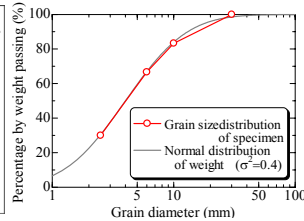


図-2 粒度分布(良配合)

図-1 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。崩壊試料にはアルミナボールを用いた。粒度の影響を考慮するため、直径 $D=3\text{mm}$ 粒子のみを用いた試料(単一粒径試料)、 $D=3, 6, 10, 30\text{mm}$ を用いた広い粒度分布を持った試料(良配合試料)について検討した。良配合試料は図-2 の対数正規分布(標準偏差 σ)に従うように配合した。河床は $D=3\text{mm}$ 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

二次元斜面(流下方向に x 軸)における粒子群の流下に関する DEM 数値解析に用いた主なパラメータの詳細は既報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、及び、10 度、30 度について

検討した。粒度の影響を考慮するため、 $R_D(=D_{\max}/D_{\min})=2, 5, 10, 15, 20$ について解析を行った。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)及び、摩擦のある板要素のみの板要素河床, wall only (粗度:小)について河床粗度の影響を検討した。

4. 粒状体流れにおけるパラメータの影響について

河床粗度, 粒子間摩擦, 傾斜角度, 粒度, 減衰定数を変化させ、粒状体流れのマクロ挙動について検討を行なった。図-3 に流れ中に生じた損失エネルギーを粒子間摩擦と幾何学的河床粗度を変化させた場合について比較した結果を示す。横軸は流れ全体の重心位置で整理した。損失エネルギー: E_L は(1)式により定義した。

$$E_L = E_0 - \left(\frac{1}{2} \sum m_i v_i^2 + \sum m_i g h_i + \frac{1}{2} \sum I_i \omega_i^2 \right) \quad \dots(1)$$

ここに、 E_0 :初期の位置エネルギーのみ、 i :粒子番号、 m :質量、 v :速度、 h :位置、 I :慣性モーメント、 ω :角速度である。

図-3 より、河床粗度と粒子間摩擦は、粒状体流れ中でのエネルギー散逸機構に大きな影響を与える。紙面の都合上省略したが、他のパラメータによる損失エネルギーの影響はこれらと比べて十分小さい。本報告では、河床粗度及び粒子間摩擦が流れ中に生じる分級機構に与える影響についてミクロ視点から考察を行った結果を示す。

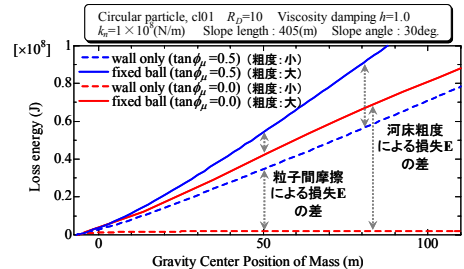


図-3 流れ中のエネルギー散逸における摩擦と粗度の影響

5. 実験結果及び解析結果

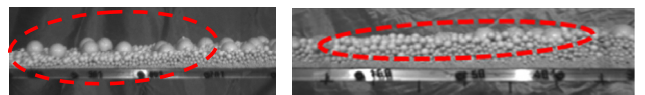


図-4 先端集積の様子(左図), 中腹部の分級の様子(右図)
(実験:良配合試料)

図-4 に良配合試料の中腹部及び、先端部における流れの様子(実験)を示す。流れの先端部では、粒径の大きな粒子が集積しており、中腹部では河床付近から表層に向けて粒径が大きくなっており分級していることが確認できる。

図-5 には、河床粗度の大きな粒子固定河床において、着目メッシュ(2.0m×0.5m)毎の粒度分布を、時間と x 、 y を変えて調べた結果を示す(解析: $R_D=10$)。崩壊前の試料箱の中心付近($t=0.000s$, $x=-7.0m$)、崩壊後の流れの中腹($t=15.867s$, $x=46.7m$)、流れの先端部($t=15.867s$, $x=70.5m$)である(赤:上層部, 緑:中央部, 青:下層部)。崩壊前は深度方向にほぼ同じである。一方、流れの斜路中腹では河床から表層に向かうにつれて粒径の大きい粒子が多くなり、小さい粒子が少なくなる。また、流れの先端部では細かな粒子は存在しない。

図-6 には、河床粗度の小さな板要素河床において、崩壊後の流れの中腹($t=5.514s$, $x=19m-22m$)における粒度分布を示す。粒度分布は深度方向にほぼ一定となり、分級しているとはいえない。

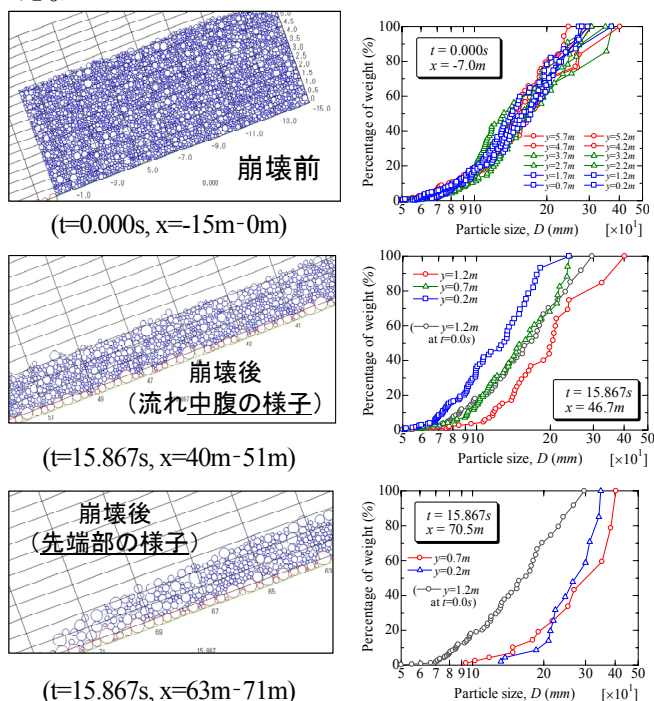


図-5 左図:流れの様子(解析: $R_D=10$, 粒子固定河床), 右図:深度方向にとったメッシュ単位の粒度分布

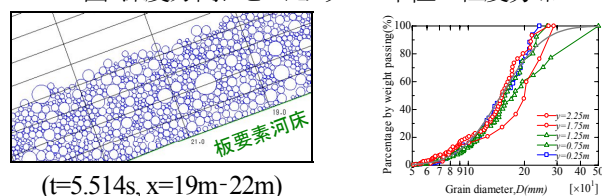


図-6 左図:流れの様子(解析: $R_D=10$, 板要素河床), 右図:深度方向にとったメッシュ単位の粒度分布

6. 粒度変化メカニズムについての考察

図-7に任意の大径粒子の軌跡(灰), その x 座標に対応した流れ表面の y 座標の軌跡(青)と y 方向の粒子の不釣り合い力(赤)を示す(解析: $R_D=10$)。赤で示した粒子の不釣り合い力が大きな値を示した後、大径粒子は流れ表面へ浮き上がる。

図-8に粒子固定河床における $x=25.08m$ での速度の深度分布の経時変化を示す(解析: $R_D=10$)。河床付近で、大きな速度勾配が存在し、せん断ひずみが卓越している。

図-9に河床粗度大と小のケースにおける粒子単位の応力分

布(解析: $R_D=10$)を示す。赤粒子が高い応力を分担し、無色の粒子は応力を分担していない粒子である。応力が集中した応力鎖が間隔を置いて形成されている。応力鎖は時間が経過するごとに間欠的に発生し、消滅する。

両ケースとも応力鎖が間隔をおいて形成されているが、河床粗度が高く発生できるせん断応力が高い場合(図-9, 左図)では応力鎖は流れ上流表面方向に強く発達している。一方、図-9, 右図では応力鎖は少なく、配向は河床に対してほぼ平行でせん断応力も低い。また、大径粒子は周りの粒子集合体に比べて剛性が高く応力鎖も集中している。したがって、大径粒子には、発達した複数の応力鎖が下方から集まりやすく持ち上げるように働く。さらに表層付近では拘束圧が低く応力鎖が安定しないため下層の粒子を押さえ込むことが難しい。よって、大径粒子が浮き上がると考えられる。また、速度の大きい表層に浮き上がった大径粒子は大きな運動量を得て、先端に速く流されると考えられる。さらに、分級で流れ中に粒度変化が生じるので材料特性が変化しながら変形することを考慮しながら現象を理解する必要がある。

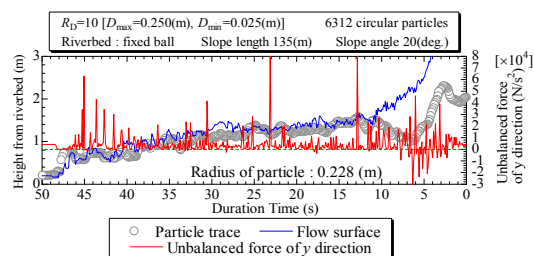


図-7 任意の大径粒子が受ける不釣り合い力と流下軌跡(解析: $R_D=10$, 粗度大)

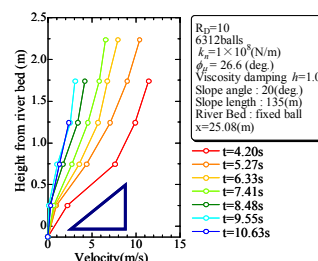


図-8 河床での大きな速度勾配(解析: $R_D=10$, 粗度大)

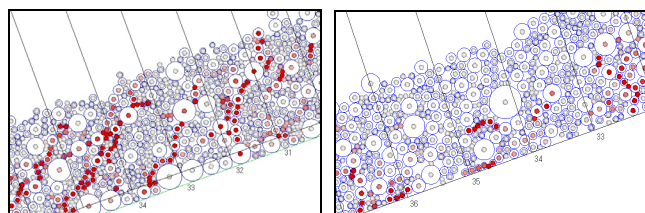


図-9 流れ中の応力鎖

左:(解析: $R_D=10$, 粗度大), 右:(解析: $R_D=10$, 粗度小)

- 参考文献:** 1) 平林他:土木学会応用力学論文集 Vol.11 :2008, 2) 福間他: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 : 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