

# 3次元個別要素法を用いた逆グレーディング現象の再現とそのメカニズム

名古屋工業大学 学生会員 ○ 館井 恵  
 名古屋工業大学 学生会員 福間雅俊  
 名古屋工業大学 正 会 員 前田健一

## 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(逆グレーディング現象)が知られている<sup>1-2)</sup>。逆グレーディング現象が起こると、流れ表面に浮き上がった巨礫の衝突により、堰堤の上部が危険になる。また、既報<sup>3-6)</sup>では2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ことが分かった。

本論文では2次元個別要素法と模型実験による巨礫の先端集中現象及び逆グレーディング現象のメカニズムの再検討と3次元個別要素法による逆グレーディングの再現について報告する。

## 2. 模型実験概要

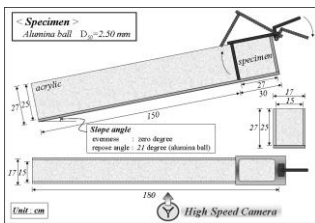


図-1 実験装置概要図

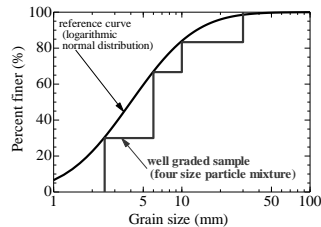


図-2 粒度分布(良配合)

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。崩壊試料には  $D=3, 6, 10, 30\text{mm}$  を用いて図-2 の正規分布に従うように配合した試料(良配合試料)を使用した。

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

### 3.1 2次元個別要素法

2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<sup>7)</sup>に詳しい。

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。傾斜角度は試料の安息角の20度、緩傾斜の10度、急傾斜の30度の3種類とし、円形粒子のみを用い、粒度分布は最小・最大粒径の範囲内において重量の対数正規分布に設定した。実験と同様に粒度の影響を考慮するため、 $R_D(=D_{\max}/D_{\min})=10$  のケース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粗度を設けた。

### 3.2 3次元個別要素法

パラメータは基本的に2次元個別要素法と同じである。ただし、ばね定数を線形から非線形に変更した。

模型実験装置と似た斜路を用いた。斜路は幅2.5m 長さ

100m、試料箱は長さ7.5mとし粒子は約4000個とした。側面は板要素にし、河床には粒子を固定し河床粗度を表した。2次元個別要素法と同様に上流の試料箱に自由落下で作成した試料に傾斜に対応した重力加速度を与え、前方の板要素を取り除いて崩壊した試料の流動挙動を再現した。逆グレーディングを観察しやすくするため崩壊試料は半径0.2mと0.5mのみの2粒径試料とした。傾斜角は25度、試料は円形粒子とした。

## 4. 逆グレーディング現象のメカニズム

本報告では、広い粒度分布を持つ試料を用いて、模型実験と2次元個別要素法により逆グレーディング現象について検討した結果を示す。既報<sup>3)</sup>では逆グレーディング現象や大径粒子の先端集中には河床粗度が大きい必要があることが分かっている。

### 4.1 逆グレーディング現象の再現の確認

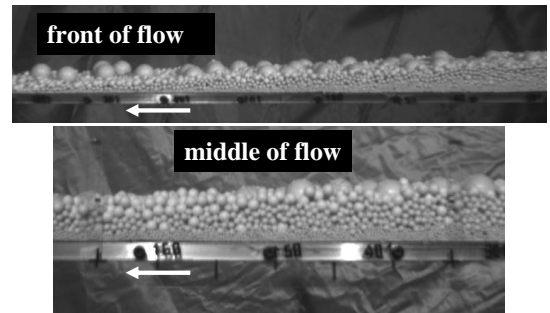


図-3 先端集積の様子(上図)、中腹部の分級の様子(下図)(実験:良配合試料)

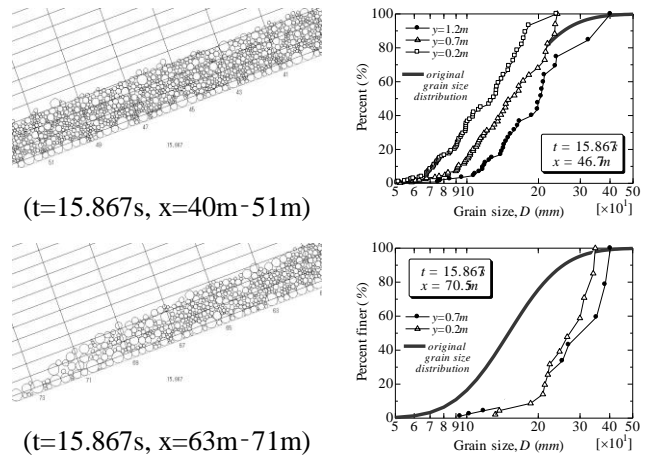


図-4 左図: 流れの様子, 右図: 深度方向にとったメッシュ単位の粒度分布

図-3 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逆グレーディング現象が起こっている。

図-4 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、時間と位置  $x, y$  を変えて調べた結果を示す(解析)。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(●:上層部, △:中央部, □:下層部). 崩壊前は深度方向にはほぼ同じである. 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といえる.

#### 4.2 傾斜角の違いによる影響

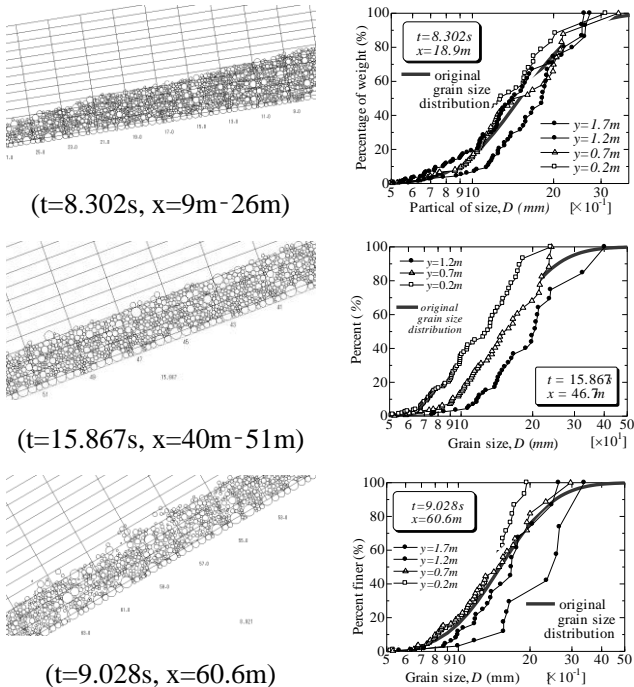


図-5 各傾斜角 (上段: 10度, 中段: 20度, 下段: 30度) における逆グレーディングの様子 (左図: 流れの様子 右図: 深度方向にとったメッシュ単位の粒度分布)

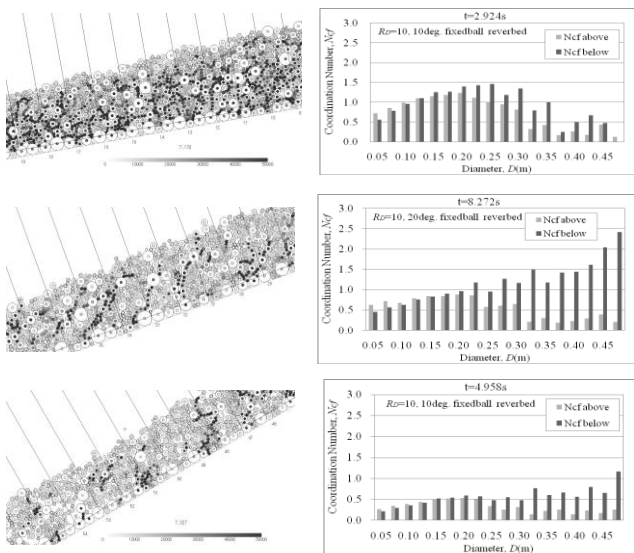


図-6 各傾斜角 (上段: 10度, 中段: 20度, 下段: 30度) における内部構造の様子 (左図: 粒子単位の応力分布 右図: 粒径の違いによる配位数分布)

図-5 には, 傾斜角の異なる 3 種類の斜面の任意の時間の様子(左)と任意の箇所の粒度分布(右)を示す. 傾斜角が安息角の 20 度では表層付近に大径粒子が, 河床付近に小さい粒子が集まり, 逆グレーディング現象が生じている. 一方, 傾斜角が緩傾斜の 10 度, 急傾斜の 30 度では逆グ

レーディング現象が生じていない.

図-6 は傾斜角の異なる 3 種類の斜面の任意の時間の粒子単位の応力分布(左)と配位数の頻度分布(右)である. 配位数とは一粒子あたりの接点数のことで, 本論文では, 力を伝えている接点のみを数えた. 黒い粒子ほど分担している応力が高い. 緩傾斜では(上段図), 応力鎖が, 密にしかもランダムに成長しており, 応力が高くて一様に部分している. 一方, 急傾斜では(下段図), 応力の大きい粒子が少なく, 応力鎖の形成度は低い. 安息角に近い流れでは(中断図), 斜面に垂直方向から斜め上流方向に, 応力の高い粒子が連なった「応力鎖」が, 発生している. しかも, 応力鎖は大径粒子に集まっているようである. そこで, 本報告では, 配位数のうち, 各粒子の中心より上側の配位数 ( $N_{cf \text{ above}}$ )と下側の配位数をそれぞれ棒グラフにした. 逆グレーディング現象が生じた安息角流れでは(中断図), 明らかに, 粒径が大きくなるほど下から力を与える配位数が卓越している. 一方, 緩傾斜(上段図)では中程度粒子に配位数が集中し, 急傾斜(下段図)では配位数の値が安息角流れ(中断図)の半分程度とかなり小さい.

つまり, 逆グレーディング現象が生じるためには安息角付近の傾斜である必要がある. 傾斜が緩いと流下距離が短く, すぐ堆積してしまい, 傾斜が急だと粒子の接触が少ない. そのため緩傾斜や急傾斜では逆グレーディング現象が生じないといえる. 粒状体みの流れで逆グレーディング現象が生じたことから, この現象は粒子同士の接触によるものである. つまり激しい衝突のような接触ではなく, 河床付近で粒子集合体のせん断現象が発生し, 応力鎖が形成されることが逆グレーディング現象の引き金となるといえる. 著者らは, 粒度変化を伴う粒子集合体の構成モデルも開発している<sup>8)</sup>.

#### 4.3 3次元個別要素法による解析結果

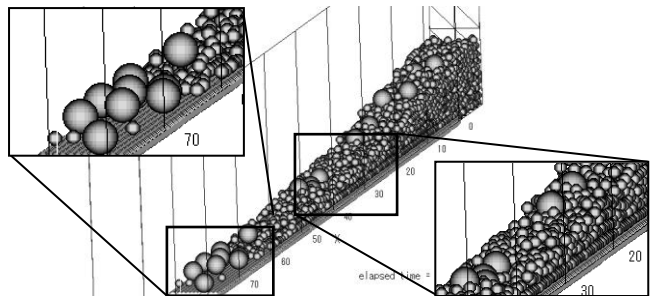


図-7 3次元個別要素法による逆グレーディング再現の様子 (左上: 先端部, 中: 全体図, 右下: 中腹)

図-7 に 3次元個別要素法による解析結果を示す. 左上の先端部の拡大図や右下の中腹の拡大図より, 2 粒径試料において大きな粒子の先端部への集中と浮きあがり現象の再現ができた. 今後は広い粒度分布を持つ試料において逆グレーディング現象の再現を行い, 3次元でのメカニズムの説明とその砂防事業における効率的な利用を試みる.

**参考文献:** 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004, 2) Bagnold: *Sedimentology*, 10, pp.45-46, 1968. 3) 平林, 福間, 前田: 土木学会応用力学論文集 Vol.11 : 2008, 4) 福間他: 第44回地盤工学研究発表会: 788-789, 2009, 5) 福間他: 第43回地盤工学研究発表会: 1017-1018, 2008, 6) 平林他: 第42回地盤工学研究発表会: 1991-1992, 2007, 7) MAEDA, K. and Hirabayashi, H. : *J. of Appl. Mech.*, 9, JSCE, pp.623-630, 2006. 8) D.M. Wood, K. Maeda and E. Nukudani, *Geotechnique*, 2010.