# 粒状体流れ中の圧縮波発生と分級のメカニズム

## 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)が知 られている.流れ中に分級が起こると,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)</sup>では図-1 に示すように二次元個別要素法 (DEM)結果から,堰堤に作用する衝撃力は,大きな振 動を伴い遷移することが分かった.

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.本論文で はミクロー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-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. 粒度の影響を考慮するため,直径 D=3mm 粒子 のみを用いた試料(単一粒径試料), D=3, 6, 10, 30mm を用いた広い粒度を持った試料(良配合試料),また, D=3mm, 30mm のみを用いた試料(良配合試料),また, D=3mm, 30mm のみを用いた試料(2粒径試料)につ いての3ケース行った. 良配合試料は図-3の正規分 布に従うように配合した.2粒径試料は全質量に対す る大径粒子の質量比が 25%となるよう配合した.

河床は D=3mm 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

名古屋工業大学	学生会員	0	舘井	恵
名古屋工業大学	学生会員		福間邪	隹俊
名古屋工業大学	正 会 員		前田俄	建一

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. 数值解析概要

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<sup>1)-3)</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度とした.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<sub>D</sub>(=D<sub>max</sub>/D<sub>min</sub>)=2, R<sub>D</sub>=5, R<sub>D</sub>=10の3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.また, R<sub>D</sub>=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. 堰堤に作用する衝撃力の振動についての考察

図-4 に先端到達距離の経時変化(解析:R<sub>D</sub>=2)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-5 に粒子単位の流れ中の応力分布(解析: R<sub>D</sub>=2)を 示す. 図中の色の濃い粒子が高い応力を分担し, 薄い 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 滅を繰り返す.図-6(a)には実験結果(単一粒径試料) より算出した流れ中の体積ひずみ増分を、図-6(b)には、 解析結果(Rp=2)において,着目した領域をメッシュ(大 きさ:0.2×0.2m)に区切り、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(黒:膨張, 白: 圧縮)を示す. また, 図-7 には任意の固定メッシュ要 素(大きさ:0.2×0.2m)(位置:x=20m, y=5m)において体 積ひずみ増分を定点観測した経時変化(解析:R<sub>D</sub>=2)を 示す. 応力鎖が流下挙動に対してストッパーとなり. 体積 ひずみを定点観測した結果を示している図-7のように、 体積ひずみ増分が圧縮・膨張を繰り返す.これは、流れ 中に圧縮波が存在することを示唆している. 堰堤の衝撃 力が振動を伴う原因は粒状体流れ中に存在する圧縮波 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-4 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-8 に良配合試料の流れの様子(実験)を示す.流

れの先頭部と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. 図-9 には,着目メッシュ(2.0m ×0.5m)毎の粒度分布を,t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 (〇:上層部, $\Delta$ :中央部,□: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.このような流れによって生じる粒 度の変化,分級メカニズム解明は条件が分かり易い2粒 径試料について行なった.

# 5.2 2 粒径試料(R<sub>D</sub>=5)の流れ

図-10 に 2 粒径試料の流れの様子(実験)を示す. 30mmの大径粒子が流れ中に浮き上がっている.図-11, 図-12 にの流れ(解析: *R*<sub>D</sub>=5)について河床粗度有りと 無しのケースにおける粒子単位の応力分布を示す.



図-10 大径粒子浮き上がりの様子(実験:2 粒径試料)



図-11 流れ中の応力鎖 (解析:R<sub>p</sub>=5):粗度有り

図-12 流れ中の応力鎖 (解析:R<sub>D</sub>=5):粗度無し

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 -11)では応力鎖は流れに逆らい右上(上流表面)方向 に強く発達している.一方、図-12 では応力鎖は河床に 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せず発達しにくいた 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.

参考文献: 1) 平林,福間,前田: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. and Hirabayashi, H.: J. of Appl. Mech., 9, JSCE, pp.623-630, 2006,5) 高橋保:土石流の機構と対策,近未来社, 2004,6) Bagnold: Sedimentology, 10, pp.45-46, 1968