

マルチスケールでみた石礫流れ中の巨石のダイナミクス

名古屋工業大学 株式会社パスコ 名古屋工業大学 株式会社パスコ 株式会社パスコ	○ 福間雅俊 平林大輝 前田健一 筒井胤雄 杉井大輔
---	--

1. はじめに

石礫型土石流では流れの先端及び表面に巨礫が集中することがよく知られており、これが被害を増大するため重要な工学的问题となっている¹⁾。このメカニズムについては諸々の提案はあるものの十分に解明されているとは言えない¹⁻³⁾。

そこで、本論文では、模型実験と個別要素法(DEM)解析を行い、粒子集合体内部の巨石の運動特性について粒状体の力学とミクローマクロのマルチなスケールの視点から考察する。

2. 模型実験方法及び数値解析方法

2. 1 実験方法

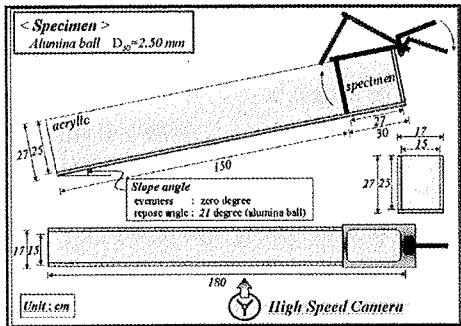


図-1 用いた実験装置

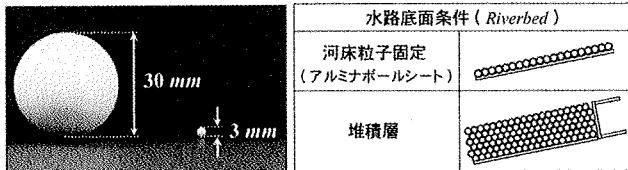


図-2 用いた試料の粒子と河床の様子

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)とアルミ板(底面)からなる斜路(長さ 150cm, 幅 15cm, 高さ 25cm)を用いた。斜路上流部の試料箱(長さ 27cm, 幅 15cm, 高さ 25cm)に流下用試料を詰め、試料箱前方のアルミ板を開けて試料を崩壊、流下させる。ここでは、水を含まない粒子群の運動を検証する。観察しやすくするためにアルミニボール($D_{50} = 2.5\text{mm}$; $D_{max} = 3.0\text{mm}$; $D_{min} = 2.0\text{mm}$)を用いた。巨石として、 $D=30.0\text{mm}$ のアルミニボールを混入した(図-2)。斜面角度は、アルミニボールの安息角である 21 度とした。また、河床として、底面にアルミニボールを敷き詰め固定したシートと粒子の堆積層を用意した(図-2)。ここでは、前者の結果のみを報告する。

流下の傾斜と同じだけ傾けて設置した高速度カメラを用いて、流下挙動を側方から撮影し観察した(画像サイズ: 640×480pixel, フレームレート: 400 frame/s, 露光時間: 1/2000~1/4000 1/s)。また、輝度差累積法を用いた画像解析手法 PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定) 法を用いて速度分布及びこれ

を用いて算出されるひずみ速度、渦度分布を観察した。

大径粒子の混合割合について事前検討を行った。流れ挙動は、二粒径のどちらかの粒子群の特性に偏らず、どちらの特性も反映されるように大径粒子の試料全体に対する質量比を 30% とした。

2. 2 解析方法

数値解析は個別要素法(DEM)を用い、図-3 のような 2 次元単純斜面モデルを使用した。

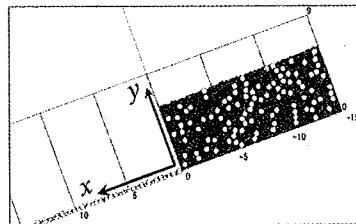


図-3 解析に用いた試料

解析に用いた主なパラメータおよび試料の作成方法は、既報⁴⁾に詳しい。本解析では材料の最密な試料を作成し、所定の斜度に対応した重力加速度を作用させ、試料箱前面の壁を取り去ることで土塊の崩壊を再現し流動挙動を観察した(x, y 座標は図のように設定)。斜面傾斜角度は 20 度である。本報告では、計算時間短縮のために少し大きめの粒子である粒径 0.05m, 0.25m の大小の二粒径の円形粒子で約 8,000 個を用いて試料を作成した。また、試料箱内(長さ 15m, 高さ 7.5m)の河床に摩擦は無い。

用いた河床条件は二種類で、摩擦係数を粒子同士間の $\tan\phi_f = 0.50$ と同じにした板の場合(wall only)と流下試料と同じ粒子を河床に固定して粗度を表現した場合(fixed ball)である。

3. 実験・解析結果及び考察

3. 1 マクロな観察

図-4 に高速カメラで捉えた大径粒子の典型的な動きを示す。流れの先端でその表面から少し上に跳躍する様子 ((a), (b)) や、一度潜り込み(c)、再度、表面に浮き上がりながら流れる様子(d) が観察できる。

粒子の浮き上がり現象に関して様々な考え方方が提案され、高橋によってまとめられている¹⁾。浮き上がり現象が水の流れを主要因とする考えについては、今回のように固体である粒状体のみの流れにおいても生じることから、不十分であるといえる。また、大径粒子と周辺粒子との速度差に着目する考え方や大径粒子の回転と周辺の渦度に關係する考え方、今回の実験で有意な傾向はみられなかったことから、正確でない。小径粒子が大径粒子の下に入り込むからという考え方もあるが、自由な小径粒子が重力によって空いた間隙に入り込むことは確かであるが、浮き上がりの原動力を説明できるものではない。

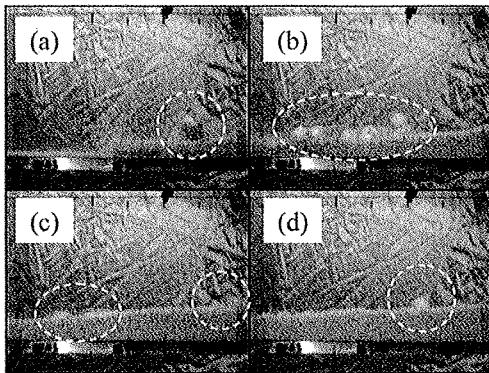


図-4 実験で見られる流れ中の大径粒子の浮き上がりと潜り込み(実際の河床は右から左に 21° 傾いている)

そこで、数値解析からミクロな視点で大径粒子を含む流れを調べた。図-5 に河床に粒子が固定され大きな粗度がある場合の結果を示す。図-4 に見られるように浮き上がりや沈み込み現象が見られ、大径粒子が表面近くに集中している。比較のために河床粗度無しの場合(板要素のみ)の解析結果を図-6 に示す。大径粒子はあらゆる深度に分布し、浮き上がり現象は確認できない。さらに、図-7、図-8 にそれぞれのケースについて、ある大径粒子の移動した軌跡($x-y$ 平面)とその大径粒子が位置した x 座標に対する表面の y 座標も示す。二つの軌跡を比べれば流下中に大径粒子がどの深さに位置するかがわかる。河床粒子の粗度有りの場合(図-7)では浮き上がり、殆ど二つの軌跡が一致しているが、河床粒子なしの場合(図-8)では大径粒子は一定の深度に潜ったまま流れ、浮き上がらないことがわかる。



図-5 流れの解析結果:河床は粒子固定の粗度有り

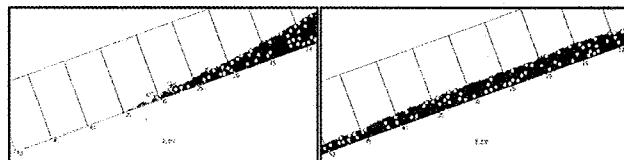


図-6 流れの解析結果:河床は板要素のみの粗度無し

3. 2 ミクロな観察

図-9、10 はそれぞれ図-5、6 のケースの粒子単位の応力分布を示す。図中の濃色の粒子が高い応力を分担し、薄い色の粒子は分担量が少ない。両ケースにおいて、応力が集中した粒子が列なった応力鎖が間隔をおいて形成されている。粗度が高く底面に発生できるせん断応力が高い場合(図-9)、応力鎖は流れに逆らい右上方向に強く発達する。しかし、粗度が無く底面のせん断強度が極端に低い場合(図-10)、河床にはほぼ平行で応力レベルも低い。これは、著者らの研究⁴⁻⁶で流れ中の粒状体であっても表層以外はせん断現象に支配されているためである。また、応力鎖は大径粒子を伝うように形成されている。

以上のことから、マクロな粒子集合体のせん断現象に伴ってミクロな応力鎖が間隔をおいて発達し、柱状の高い圧力域が河床

から上流表面に向かって成長し大径粒子に集中することで、大径粒子を浮き上がらせるといえる。このように、ミクローマクロの相互作用を考慮することが石礫型土石流の運動特性のより深い理解をもたらし、工学的発展性を有すると考えられる。

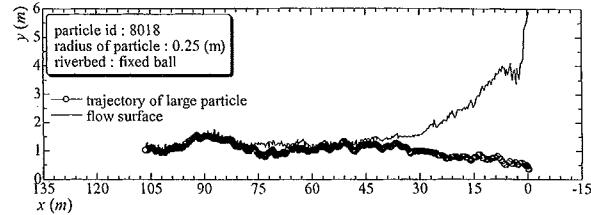


図-7 大径粒子の軌跡と流れ表面の位置:河床は粒子固定の粗度有り(図-5 のケースに対応)

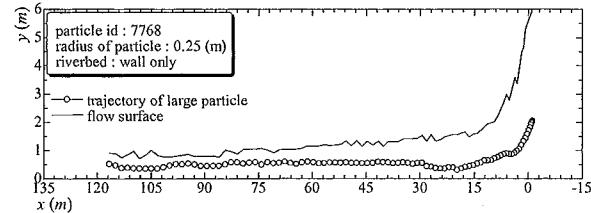


図-8 大径粒子の軌跡と流れ表面の位置:河床は板要素のみの粗度無し(図-6 のケースに対応)

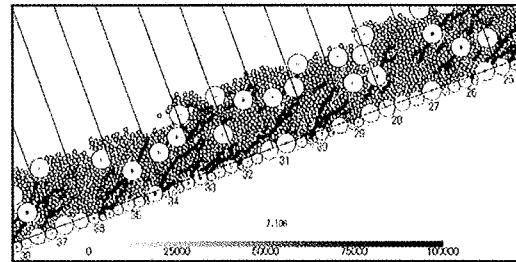


図-9 流れ中の応力鎖:粗度有り(図-5 のケースに対応)

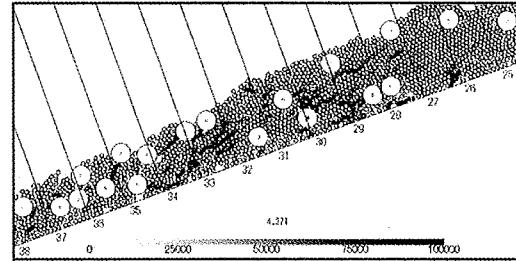


図-10 流れ中の応力鎖:粗度無し

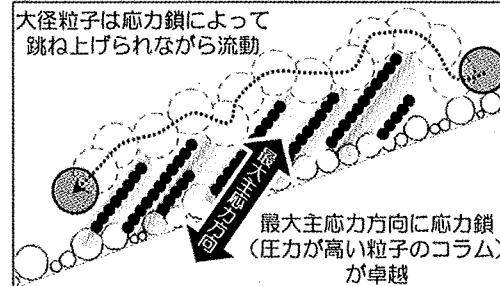


図-11 巨径粒子浮き上がりの概念図

- 参考文献: 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004. 2) 例え、Bagnold: Sedimentology, 10, pp.45-46, 1968. 3) 例え、里深他: 平成 18 年度砂防学会研究発表会, pp.72-73. 2006. 4) 平林他: 平成 20 年度砂防学会研究発表会, [掲載予定], 2008. 5) 平林他: 第 42 回地盤工学研究発表会 pp.1991-1992, 2007. 6) 福間他: 第 43 回地盤工学研究発表会[掲載予定], 2008.