

粒子構造に着目した粒状体の斜面上の流れ挙動

Flow Behavior of Granular Media on Slope with Account for Microstructure

平林大輝*・福岡雅俊**・前田健一***

Hiroki HIRABAYASHI and Masatoshi FUKUMA and Kenichi MAEDA

*工修 株式会社パスコ (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-2-13 名古屋センタービル)

**名古屋工業大学 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

***工博 名古屋工業大学 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Flow behaviors of granular materials on slope were discussed by model tests and Distinct Element Method in two-dimension. DEM simulation results can simulate the tendency of model test results. The relationships between macro and micro behaviors on typical phenomena such as the velocity distribution in depth and lift up of the coarse particle in the flow were examined on the basis of the numerical results. We focused the stress-chain formed in granular materials. It was found that the distribution of averaged coordination number was corresponded to the distribution of velocity indicating three layers structure. In addition, it was revealed that at the changing points of their distributions, both of the void ratio and the mean normal stress attach to critical state.

Key Words: granular material, flow, DEM, PIV

1. はじめに

近年、地球規模の異常気象に起因して山岳部だけでなく都市近郊においても土砂災害が多発している。一般に、このような土石流現象等のシミュレーション解析は混相流として扱う連続体力学の観点から捉えられることが多い。これらは多くの成果が挙げられており実務にも反映されている¹⁻³⁾。工学分野では伝統的に流下斜面勾配と粒子群の内部摩擦角との関係といった経験的かつ極端なマクロ手法に偏りがちであるとともにメカニズムが十分に解明されたわけではない。一方、粒子の集合体である粒状体の流れ現象は昔から物理学の魅力的なテーマである⁴⁾。しかし、物理学の分野ではときには極端な単純化やミクロ的視点に偏ったアプローチがされてきている。これら過去の経験則は有益なものではあるが、理論的背景が明確とはいえず、過去の被害事例と類似した条件でなければ現象の解釈や予測が困難であるといえる。性能設計が主流となっている昨今、土石流の再現や対策の検討ではより詳細な流動現象の評価が重要である。

粒状体の流れに関する研究はBagnold⁵⁾を始め多くの成果⁶⁻⁸⁾があげられている。しかし、様々な現象の発見やそれぞれのメカニズムを解明しようとする試みはなされてきたが、粒状体の流れに関して統一的な解釈は未だ得られておらず、ミクロな粒子レベルと流れのマクロな挙動との関係解明はまだ発展途上である。

一方、著者らは、2004年5月17日、石川県手取川上流別当谷にて発生した石礫型土石流について三次元の個別要素法 (DEM)⁹⁾シミュレーションを実施した¹⁰⁾。その結果、到達時間や著しい流れの加速、偏流等の再現が出来た。これは石礫型土石流を離散体モデルで再現が可能であることを意味している。離散体モデルでは適切なスケールでモデル化することにより地盤材料の問題も表現が可能な点から、土石流のモデル化において流体的手法のみの適用ではなくDEMなど離散体の手法を用いた考察も必要であることが分かった。

さらに、著者らは粒状体の静的な挙動である二軸圧縮試験解析を行い、マクロの挙動とミクロな量である配位数や異方性などの構造との関係について調べている¹¹⁾。その結果、粒状体の内部には応力が集中した応力鎖が発生することを確認するとともに、マクロな挙動の限界状態が構造の限界状態に支配されていることを明らかにした。また、せん断載荷に伴い配位数は低下し、粒状体内部の構造は安定性を失うこと、特に最小主応力方向に構造が失われ異方性が発生すること、配位数や異方性には材料特有の限界状態が存在することを明らかにし、応力誘導異方性が粒状体の破壊をもたらすことを示した。

そこで、本論文では、石礫型土石流の挙動解明をめざし、その第一段階として粒子同士の相互作用の影響が無視できない粒状体の斜面上の流れ挙動について検討する。粒子と粒子集合体の挙動の関係を明確にするために、水などの

流体を用いずに乾燥試料の模型実験とDEMによる数値計算を用いて粒状斜面の流動挙動のメカニズムを検討した。その際に、模型実験で特徴的な現象を捉えるとともに、模型実験結果と数値計算結果との定性的な比較から、数値計算が流れの特徴を表現できていること確認する。本論文では、粒状体流れの最も典型的な特徴¹³⁾である1) 流れの深さ方向の速度構造、2) 流れ中の巨石の浮き上がりを検討対象とし、これらの粒状体の流れのベンチマーク的現象について、ミクロ挙動とマクロ挙動の関係を調べた。

2. 模型実験方法及び数値解析方法

2.1 模型実験概要

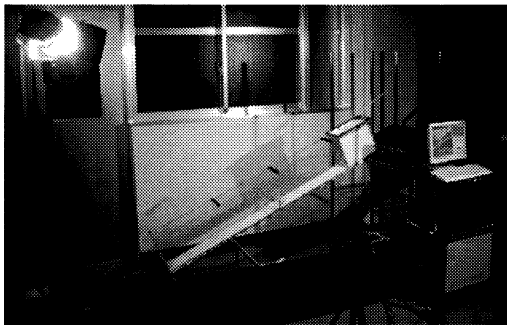


図-1 模型実験装置の概観

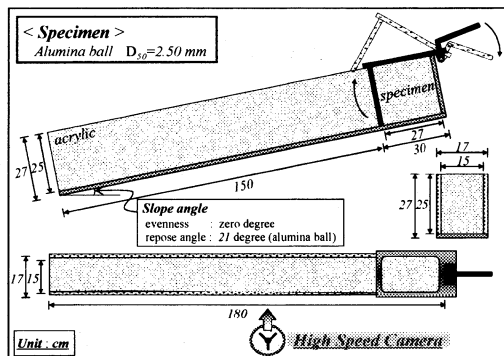


図-2 実験装置の断面・平面図

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（長さ150cm、幅15cm、高さ25cm）を用いた。斜路の上流部に試料箱（長さ27cm、幅15cm、高さ25cm）を設置した。上流部の試料箱に流動用試料を詰め、試料箱前方のアルミ板を開けて試料を崩壊させ流下挙動を観察した。流動試料は水を含まない流下粒子群の挙動を検証することから、アルミナボール（ $D_{50}=2.5\text{mm}$ ）を選定した。斜面角度は、アルミナボールの安息角である21度及び10度と30度について実験を行った。また、河床粗度の影響を検討するために、河床底面粗度が最も小さい河床として水路底面をアルミ板のままの状態（wall only: アルミ板河床）、粗度の大きい河床としてアルミナボールを敷き詰め固定させた状態（fixed ball: 粒子固定河床）、中間の底面粗度として斜路底面にサンドペーパーを敷いた状態（サンドペ

ーパー河床）を用意した。本論文では斜度21度で粒子固定河床及びアルミ板河床の結果のみ記載した。流下挙動を斜路側方から、流下方向と平行に設置した高速度カメラ（画像サイズ:640×480 pixel, フレームレート:400 frame/s, 露光時間:1/2000～1/4000 1/s）で撮影し観察した（よって、画像上水路が水平に見える）。また、輝度差累積法を用いたPIV（Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定）法を用いて速度分布を求め、ひずみ速度分布¹³⁾を算出した。

2.2 数値解析概要

個別要素法（DEM）（粒子接点モデルを図-3に示す）を用いた粒状斜面の流動特性の検討は図-4のような二次元単純斜面モデルを使用した。実験と解析は本論文では定性的比較のみを行うとする。流動試料は斜路鉛直方向重力下のもと、試料箱の中に粒子を自由落下させて作成する。本解析ではそれぞれの材料で最も密な状態の試料を作成した。その後、所定の斜面傾斜角に相当する分だけ重力方向を傾け、模型実験と同様に試料箱前面の壁を取り去ることで流動挙動を観察した。傾斜角度は解析試料の安息角と同じ20度とした。また、 x 、 y 座標を図-4に示すようにそれぞれ直線斜路流下方向、法線方向に設定した。

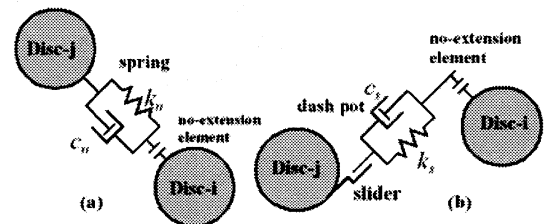


図-3 2次元DEMの接点モデル

表-1 DEM解析に用いたパラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	D (m)	0.05 ~ 0.10
粒子の密度	ρ (kg/m ³)	2700
接触面法線方向バネ定数	k_n (N/m)	1.0×10^8
接触面接線方向バネ定数	k_s (N/m)	2.5×10^7
接触面法線方向粘性定数	c_n (kg/s)	$\approx 1.0 \times 10^6$
接触面接線方向粘性定数	c_s (kg/s)	$\approx 5.0 \times 10^5$
粒子間摩擦角	ϕ (deg.)	30
計算時間刻み	Δt (s)	1.0×10^{-6}

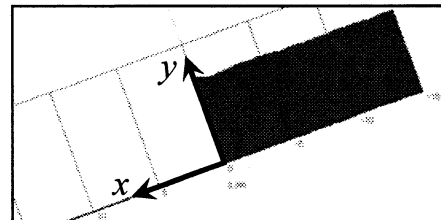


図-4 2次元単純斜面モデル：流動試料の崩壊前

解析に用いた主なパラメータを表-1に示す。本解析では円形粒子のみを用い、最大粒径 $D_{max}=100\text{mm}$ 、最小粒径 $D_{min}=50\text{mm}$ の範囲内において粒度分布は重量正規分布に

従うようにした。なお、粒度の指標として粒径比 $R_D = D_{max}/D_{min}$ を使い、本解析では $R_D=2$ とした。バネ定数は伯野¹²⁾の一次元波動の縦波、横波の伝播速度 V_p , V_s とバネ定数との関係を参考に算出した。通常、 V_p は V_s の2倍程度であるので、 k_s を k_n の1/4としている。粘性は *Viscosity damping* を使用し、粘性定数 c_n , c_s は臨界減衰(減衰定数 $h=1$)に設定した。試料箱を除く斜路の河床には流動試料と同じ物性の粒子を固定し、粗度を与えている。粒子数は約2万個(試料箱：長さ15m、高さ7.5m)とした。

3. 流れ中の速度構造の発生メカニズムの検討

3.1 模型実験結果および考察

図-5に高速度カメラで撮影した粒子固定河床上の流動の様子を示す。流動初期に流れの先端で粒子が飛躍しているのは、先端の層厚は薄く流れ形状に及ぼす流動粒子と河床粒子との衝突の影響が強い上に、粒子形状が球形であるので反発係数が高いことに起因すると考えられる。図-6は図-5のPIV解析により求めた速度分布を示している。

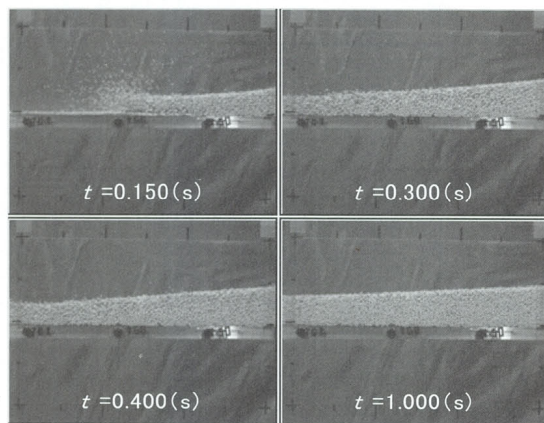


図-5 流動の様子(実験)：粒子固定河床

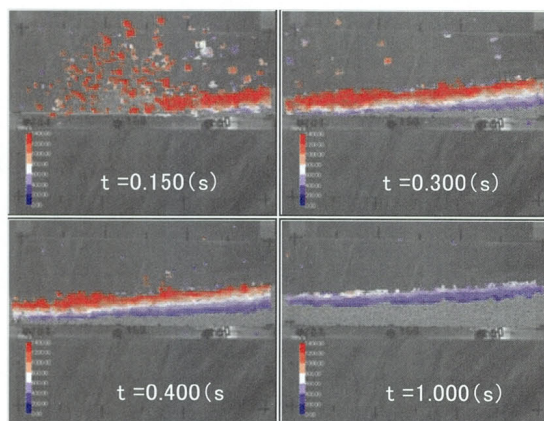


図-6 PIV解析による流動の速度分布(実験；図-5)

流動粒子群の速度は、流れ前方及び表層に近づくにつれて大きくなっている。また、時間の経過とともに斜路底面付近及び後方の粒子から順次減速し、上部の粒子群が減速した粒子の上を滑るように流れる。図-7には図-5、6の $t=0.400s$ における体積ひずみ速度分布、せん断ひずみ速度

分布、渦度分布(半時計回りを正)を示す。流れ中には圧縮領域(赤)・膨張領域(青)が交互に現れ、前方・表層にかけて反時計回りの渦(赤)が発生する。また、表層よりやや下の部分でせん断ひずみが卓越している。

図-8は速度分布に及ぼす河床粗度の影響を示す。同一時刻において、河床粗度が大きい粒子固定河床では下層で減速しているが、河床粗度の小さいアルミ板河床では底面においても高い速度が観測される。よって、河床粗度が粒子の速度を低下させ、流れ全体が減速するといえる。

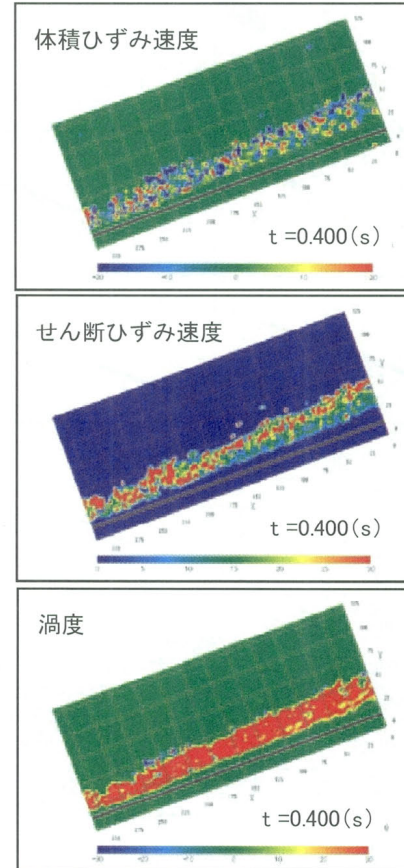


図-7 $t=0.400s$ における体積ひずみ速度分布、せん断ひずみ速度分布、渦度分布(実験；図-5)：半時計回りを正

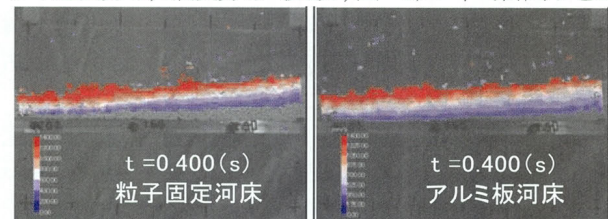


図-8 速度分布における河床粗度の影響(実験)

3.2 数値解析結果および考察：マクロ挙動とミクロ挙動

図-9に解析結果における流れ全体の挙動の経時変化を示す。本論文では、二次元DEMによる粒状斜面の解析結果について、流れ全体のマクロな挙動、粒子単位のミクロな挙動の他に、着目した領域をメッシュ(0.2m×0.2m；粒子4~10個程度)に分割しメッシュ毎で平均化した物理量¹³⁾についても考察した。マルチなスケールで観察することがメカニズム解明には重要である。以下にマルチなスケールでの検討結果を示す。

(1) 流れ全体のマクロ挙動

図-10 に解析結果のマクロな挙動として粒子先端到達距離の経時変化について整理したものを示す。時刻 $t=10$ s までは急激に先端到達距離が増加するが、その後、緩やかに増加する。これは、本解析では非定常流れを扱っており、流動開始時には流動塊質量も集中し大きな速度も維持しやすいが、その後質量が分散すると河床との摩擦による減速が顕著になるためと考えられる。

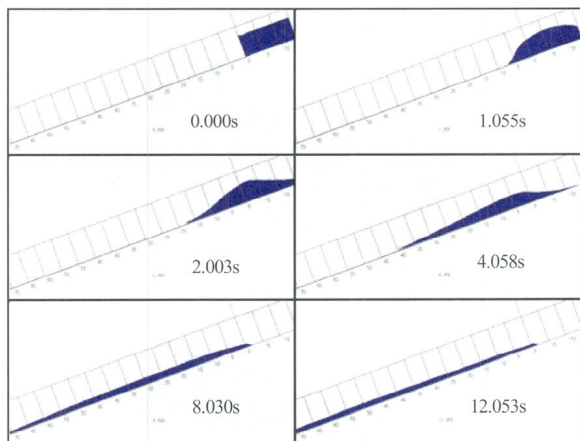


図-9 流動の様子 (解析)

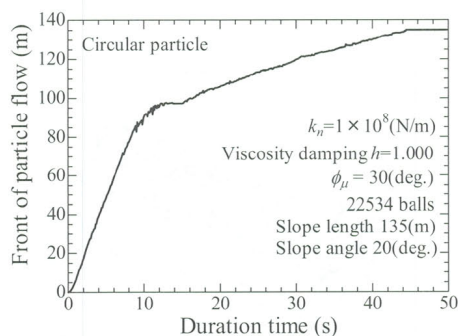


図-10 先端到達距離の経時変化

図-11 に、 $t = 3.512$ s, 4.058 s, 7.370 s における粒子の速度分布 (粒子単位) の速度を示したものを示す。速度分布は図より先端・表層ほど速度が大きくなっており、図-6 における実験結果と定性的に一致している。

つぎに、図-12 に流れ全体の平均配位数 N_c の経時変化を示す (実線は全接点、破線は力を伝えている接点のみの場合)。配位数とは、1つの粒子当たりの接触点数で粒子特性や密度の影響を受ける。図-13 は配位数 N_c の力学的意味を考察したものである。図上部に示すトラス構造を考えると、未知の部材力数 (例えば S_1, S_2, S_3) と釣合い式の数 (x, y 方向の二つ) との差が大きな不静定構造の方が安定である。図(a)の場合は、釣り合うまでに大きな変位が必要で不安定である。同様に粒子総数 M 個の粒状体について考えると、未知の接点力数 (接点力2成分×接点数 N) と釣合い式の数 (x, y の二方向と回転の計 $3 \times M$) との差が安定性を示す。つまり、平均配位数 $N_c (=2N/M)$ が大きいほど粒子構造は安定した状態にある。図-12 より、マクロな平均配位数は試料の流下と共に低下し、停止

に向かうにつれて構造的に安定である $N_c=3$ に近づく。

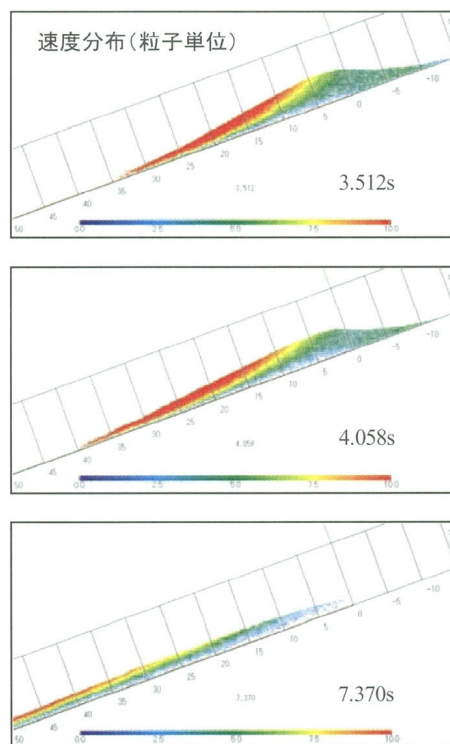


図-11 粒子単位の流速分布 (解析)

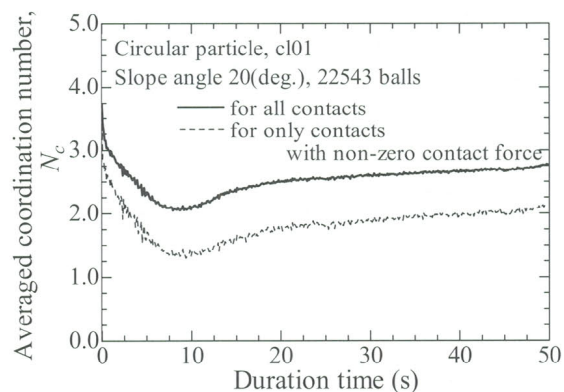


図-12 流れ全体の平均配位数の経時変化 (解析)

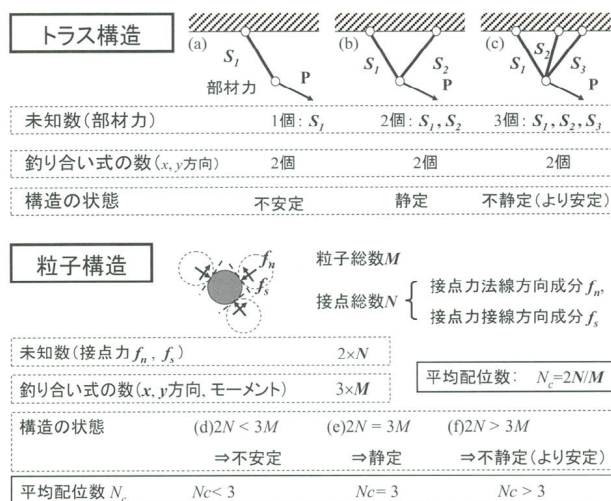


図-13 トラス構造と粒子構造の安定性

(2) 中間スケール（メッシュ）の挙動

図-14にメッシュ単位の間隙比 e の分布を示す。流動が始まると、流れ後方の赤い部分で示されている $e=0.18$ 以下の密な状態に対し、先頭付近では青い部分で示されている $e=0.30$ 以上の極端に緩い状態となる。特に、河床付近に間隙比の高い部分が発生する。それは、先頭部の河床付近の粒子は河床の固定粒子に衝突、減速し、その上部を速度の大きい粒子が通過するためと考えられる。以下に $t=4.058s$ の時点の様々な物理量について考察する。

図-15にメッシュ単位の平均主応力 σ_m の分布を示す。流下中は斜路垂直方向よりやや上流に傾いた σ_m の分布が流下方向に発生と消滅を繰り返すことが確認できた。上層の重さを支える応力が集中した領域と極端に応力が低い領域とがみられる。これは、河床粒子全体が一樣に荷重を支えるのではなく、粒子レベルで応力鎖構造が形成されていることを示唆する。特に河床付近で低い応力状態となっている箇所ではより不均質な状態であるといえる。図-16、図-17、図-18はメッシュ単位の体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ 、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_m$ 、渦度 ω_z を示す。体積ひずみ速度分布より、粒子群の流れ中では圧縮・膨張が交互に現れている。また、定点で観測しても圧縮・膨張がほぼ交互に表れることを確認している。これらは図-15の応力が集中した箇所の発生と消滅と対応しているとおもわれる。したがって、流動中の粒子群内に圧縮ひずみ増分の不均質性をもたらす、流れ方向に縦波振動が発生していると考えられる。また、せん断ひずみ速度分布より河床付近でせん断ひずみ速度が卓越し、渦度分布を見ると左回転の渦を巻いていることが分かった。

図-19にメッシュ単位の配位数 N_c の分布を示す。崩壊前は構造が安定な状態を示す $N_c=3$ 以上（赤色）を示しているが、流下中はほとんどの領域で $N_c=2$ を下回っている。流動が減速・静止した部分から $N_c=3$ 以上となる。流下中、配位数 $N_c=3$ 以上の部分では間隙比が小さく、強い応力が発生しているようである。

(3) ミクロ挙動

図-20に $t=7.370s$ における粒子単位の応力分布を示す。赤色は高い応力を分担する。応力が集中した粒子が並んだ応力鎖部分と応力をほとんど受け持たない部分が流れ方向に傾きながらほぼ交互に形成されている。動画の観測から応力鎖は流れ中に消滅と発生を繰り返す。図-15に示したメッシュ単位の平均主応力の強い部分と弱い部分の発生と消滅はこのミクロの応力鎖によるものである。また、図-16の圧縮ひずみ増分の不均質性もこの応力鎖の発生と消滅に対応した変形と考えることができる。さらに、図-21にメッシュ内の平均化された応力について、最大主応力方向の主応力比をそれぞれの線方向と色（赤色：主応力比が大きい、青色：主応力比が小さい、また、ゼロの箇所も含む）で示す。最大主応力方向の向きがミクロな応力鎖の傾斜方向に対応している。ただし、深度で向きが異なるようである。

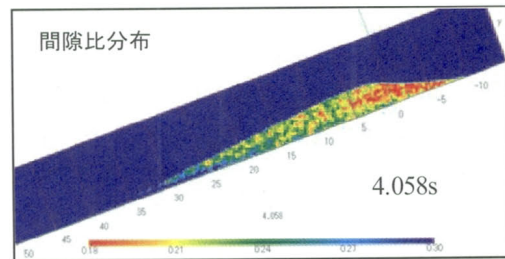


図-14 メッシュ単位の間隙比 e 分布（解析）

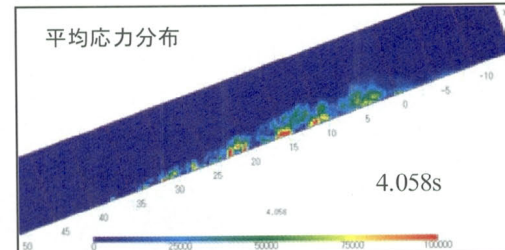


図-15 メッシュ単位の平均主応力 σ_m 分布（解析）

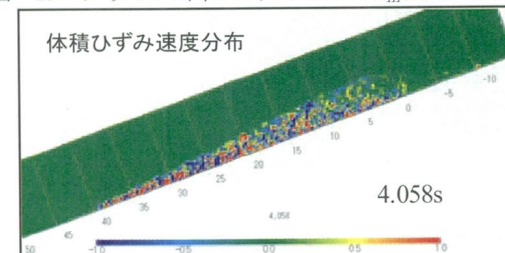


図-16 メッシュ単位の体積ひずみ速度分布（解析）

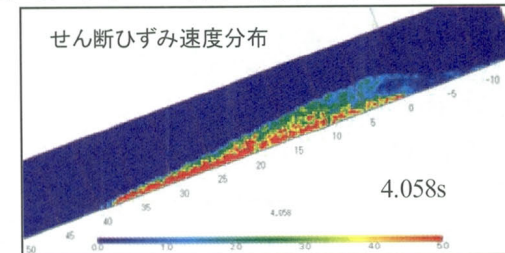


図-17 メッシュ単位のせん断ひずみ速度分布（解析）

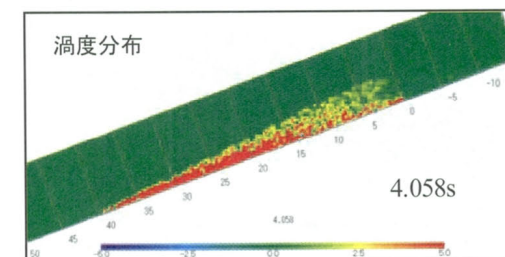


図-18 メッシュ単位の渦度分布（解析）

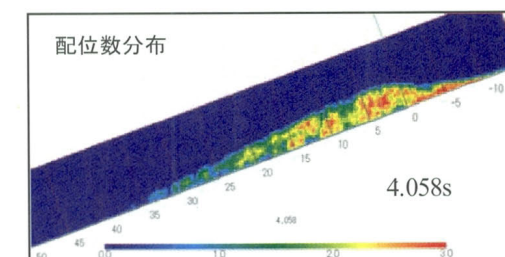


図-19 メッシュ単位の配位数分布（解析）

図-22 に $t=7.370s$ における各粒子単位の配位数分布(力を伝えている接点についてのみ)を示す。また、図-23 に $t=7.370s$, $x=34.0m$ 地点における平均配位数の深度分布を示す。図から、表面付近では速度が大きく(図-11)粒子が希薄で衝突現象が主であるため、平均配位数が低く構造が不安定であることがわかる。また、河床付近では、速度は小さいもののせん断ひずみは大きく(図-17)、平均配位数が低い。これは変形が局所化しせん断帯が形成されることで、疎な構造が発達し間隙比が高いためと考えられる。一方、流れ表面付近と河床付近とに挟まれた中間層では配位数は高い値を示す。図-22 から流れ中央部の配位数が高い値を示していることが確認できる。このように粒子流れの中央部では比較的安定な構造状態である。

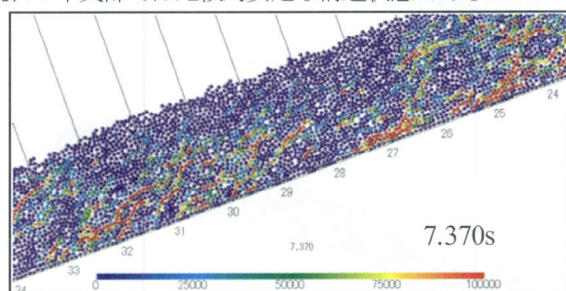


図-20 粒子単位の応力分布(解析) : $t=7.370s$, $x=24-34m$

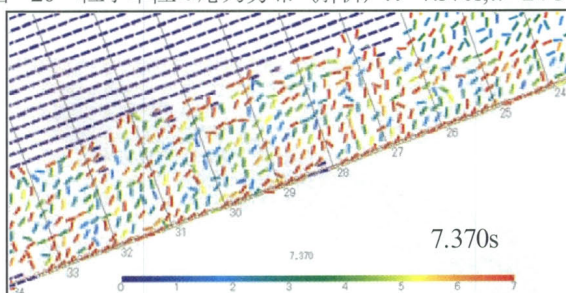


図-21 主応力比と最大主応力方向(解析) : $t=7.370s$, $x=24-34m$

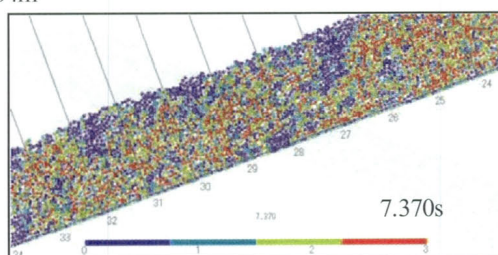


図-22 粒子単位の配位数分布(解析) : $t=7.370s$, $x=24-34m$

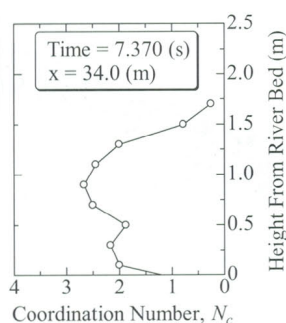


図-23 平均配位数の深度分布(解析) : $t=7.370s$, $x=24-34m$

つぎに、粒子同士の接触方向の集中度の指標であるファブリックテンソル^{14) 15)}を見てみる。ファブリックテンソルは、下記のような二階のテンソルである。

$$F_{ij} = \frac{1}{2M} \sum_{c=1}^{2N} n_i^c n_j^c \quad (1)$$

ここに、 n_i^c は粒子間接触点の単位法線ベクトル(図-13 参照)である。ファブリックテンソルの主軸(最大主値の方向)は粒子接触面が集中している方向、つまり異方性が発達した方向を表し、主値(二次元では最大・最小値 F_1 , F_2)の比やその偏差は異方性の強さを示す。また、その定義から $F_1 + F_2 = 1$ が成立し、接触方向がランダム(等方状態)の場合、 $F_1 = F_2 = 0.5$ となる。準静的な粒子集合体のせん断試験下では異方性の主軸は最大主応力方向に誘導され、異方性は主応力比の 1/2 乗で発展することが分かっている¹¹⁾。図-24 はメッシュ毎の粒子群のファブリックテンソルで、接触方向(異方性)が卓越した最大主軸方向を直線で示した例である。

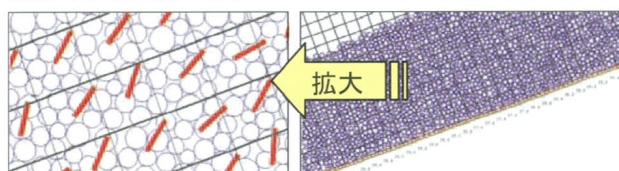


図-24 メッシュ毎の粒子集合の異方性配向性(解析)

図-25 にファブリックテンソルの主値の方向と主値比(異方性の度合い)を示す(赤色:異方性度が高い、青色:異方性度が低い。また、ゼロの箇所も含む)。表層では河床に対して平行で、深くなると傾きが大きくなり、右斜め方向に傾斜し最大主応力方向(図-21)に配向している。配位数に関する考察と合わせると、表層以外は準静的な粒子集合体のせん断挙動時と同様なマクロ-ミクロ関係が観察され、この領域の力学挙動は粒状体のせん断挙動として理解できるといえる。

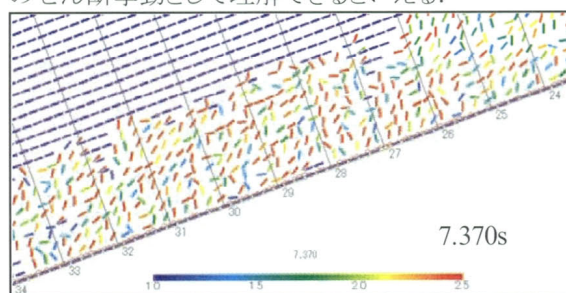


図-25 ファブリックテンソルの主値の方向と主値比(解析) : $t=7.370s$, $x=24-34m$

以上のように、ミクロ挙動とマクロ挙動を結びつけることでより明確な石礫流れの理解と効率的な対策が可能と考えられる。

(4) 流れ中の間隙比と応力状態の関係

粒状体の力学挙動において間隙比と応力状態の関係は重要である。それが例え流れ中であっても同様であること

は明らかである。そこで、流れ解析に用いた粒状試料の二軸圧縮試験を行った。二軸供試体の様子を図-26に示す。試験は、等方圧縮後、ひずみ制御で側圧一定の単調載荷試験を行った。図-27に二軸圧縮試験結果の例を応力比と体積ひずみ、軸ひずみの関係で示している。密詰めはせん断に伴い応力比のピーク値を持ち、体積ひずみは軽い圧縮の後膨張傾向にある。一方緩詰めは緩やかに応力比が増加していることが確認できる。密詰め、緩詰め共に大きなひずみ領域では同一の応力比を有することが分かる。

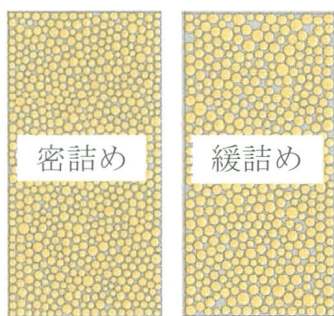
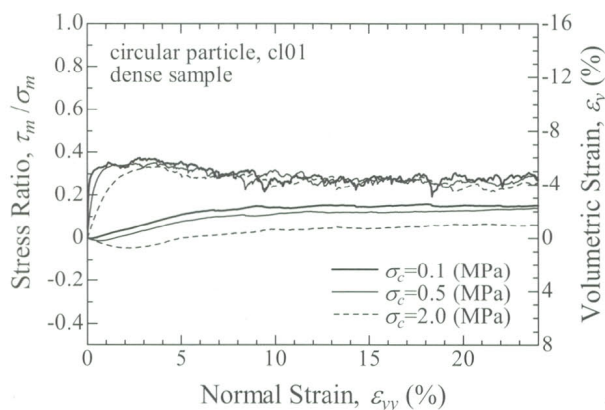
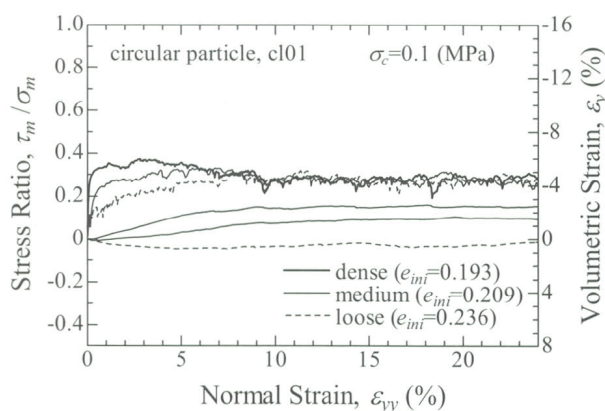


図-26 二軸試験供試体内部の様子 (解析)



(a)拘束圧依存性



(b)密度依存性

図-27 二軸供試体の載荷試験の解析結果：平均主応力-ひずみ関係 ((a)密詰めの拘束圧依存性；(b)密度依存性)

さらに、間隙比-平均主応力の関係を示したのが図-28である。また、図-29は図-28の拡大図である。黒い点線は等方圧縮時、黒い実線はせん断時である。また、軸ひずみが増加しても応力比や体積ひずみが変わらない大変形状態（限界状態）での間隙比と平均主応力の状態を×印で示した。限界状態は同一線上にプロットされ、地盤力学で広く用いられている限界状態線（CSL）が存在することが確認できる。低拘束圧下では限界状態線が最緩揺詰め試料の圧縮曲線に漸近しており、低拘束圧下では正のダイレイタンシー特性が顕著になる。

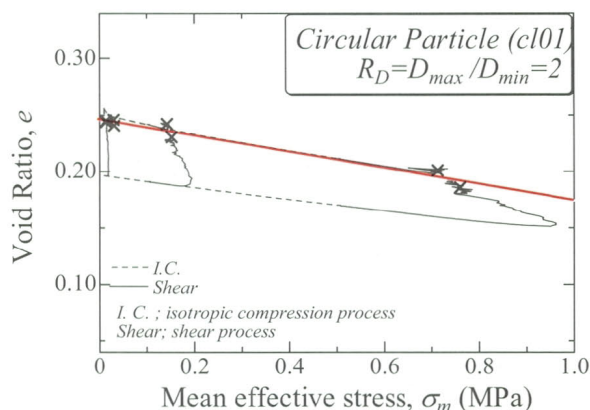


図-28 二軸試験の解析結果：間隙比-平均主応力

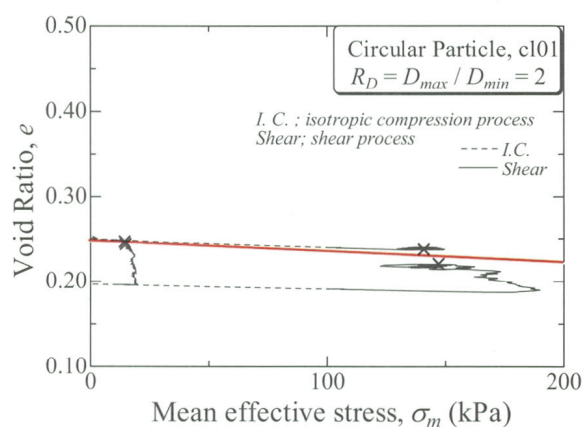


図-29 二軸試験の解析結果：間隙比-平均主応力（図-20の拡大図）

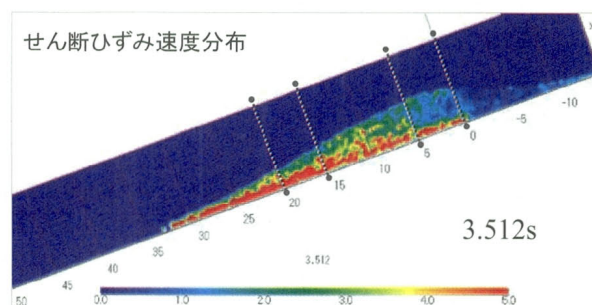


図-30 せん断ひずみ速度分布 (解析)： $t=3.512s$

図-30 に $t = 3.512\text{s}$ におけるせん断ひずみ速度分布を示す。図-31 には図-30 における任意地点の斜路に平行な速度 V_x の深度分布を示す。

図-31 の $x=0.0\text{m}$ (より上流) 地点では試料箱内で河床が板要素であるために、河床での粒子のスリップが大きく深度方向にはほぼ一定値をとっている。それ以外の $x>0$ では固定粒子による河床のために速度分布が変曲点をもち、深度方向の速度勾配が3区間あることが読み取れる。例えば $x=20\text{m}$ について、河床付近である深さ $0.0\sim 0.6\text{m}$ では河床粒子の影響から速度勾配が非常に高くなっている。一方、表層付近の深さ $1.2\sim 2.0\text{m}$ では速度自体は 10m/s であるが速度勾配は小さい。また、その二つに挟まれた中間層が確認される。つぎに、このような速度構造が粒状体の流れの中のどのような物理量と関連しているのかを調べる。

図-32、図-33 にはそれぞれ図-30 における間隙比 e と平均主応力 σ_m の深度分布を示す。通常の粒状体の堆積層のように、深いほど平均主応力が高く、間隙比が小さくて密になっているという傾向はみられない。むしろ中央部で平均主応力や密度が高いようである。また、両者の変動関係には相関がみられない。また、平均主応力と間隙比のそれぞれの深度分布は速度の深度分布とも相関はみられない。そこで、試料に特有の e と σ_m の関係である限界状態線との関係を調べるために、state parameter ψ_v ¹⁶⁾を導入する。ここで、 ψ_v は、着目した領域 (メッシュ) 毎の e と σ_m が、同じ σ_m に対応した図-29 の限界状態線との e 軸方向の位置関係を示すものである。これは、粒状体が緩いか密かということは間隙比 e の大きさで表せるものではなく、その粒状体に固有の限界状態線との相対的にきまるという考えに従ったものである。つまり、 $\psi_v=0$ の場合は限界状態にあり、 $\psi_v>0$ の場合には着目した箇所の間隙比は限界状態よりも大きく緩い状態にある。一方で、 $\psi_v<0$ の場合には密な状態を意味する。図-34 は図-30 におけるstate parameter ψ_v の深度分布であり、図中の赤線は $\psi_v=0$ の状態を示している。図から $\psi_v=0$ となっている深さでは、図-31 の速度勾配が変化する点が一致していることが読み取れる。このことから、粒状体の流れ特性は、粒状体の圧縮・せん断過程を記述する限界状態の概念に支配されているといえる。

さらに、内部構造の安定性を調べるため、図-23 と同様に、図-35 は図-30 における平均配位数の深度分布を示している。配位数は、先頭部に近いほど (この場合、 x 座標が大きいほど)、また、せん断が卓越する河床付近、拘束圧がなく流れの速い表層では低く、構造は不安定になっていることがわかる。

図-36 に粒状体の流れ中の速度の深度分布、state parameter の深度分布、配位数の深度分布の概念図を示す。ここでは、速度構造を三層とみなしたモデルで示している。深い方から、1) 最深部の極河床付近では上部粒子に圧縮され密な状態を示すが、その少し上部ではせん断層が形成

されることで、緩く粗で不安定な構造である。2) せん断帯の上部で、せん断が起きているが比較的密で構造も他と比べて安定した中間層である。下層との境界では限界状態に達することになる。3) 表面近くでは拘束圧が低く正規圧密状態、さらに平均配位数が1もしくは1以下であることから分かるように粒子濃度が低く不安定で、粒子の衝突状態が主である。図-29 から非常に低拘束圧下では正規圧密状態と限界状態が近接していることから、中間層と表層との境界で限界状態が実現されていると考えてよさそうである。これについては、注意深く考察する必要がある。速度構造とマイクロ構造との関連づけは流れのメカニズムを解明することにおいて非常に有益である。

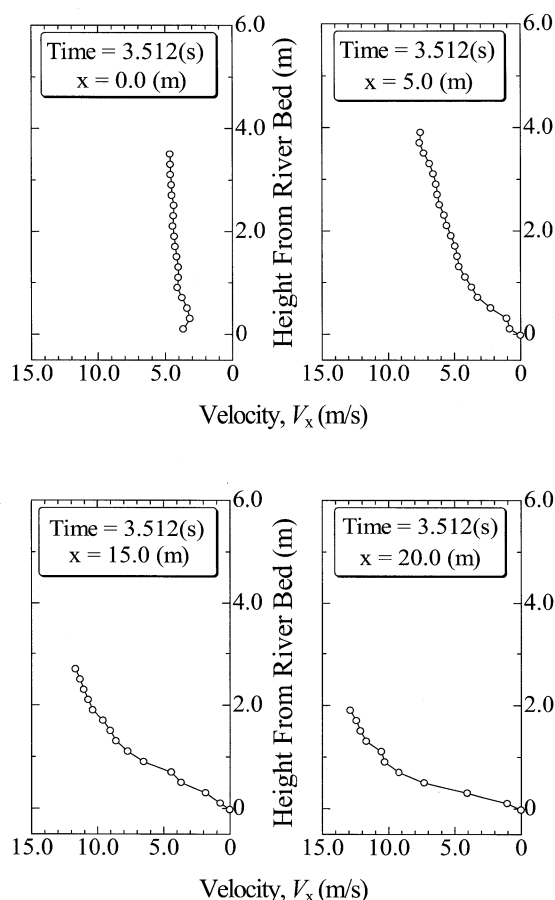


図-31 図-22 の任意地点の速度の深度分布 (解析) : $x=0.0$ 地点 (左上図) のみ試料箱内であり河床粗度および摩擦がない。

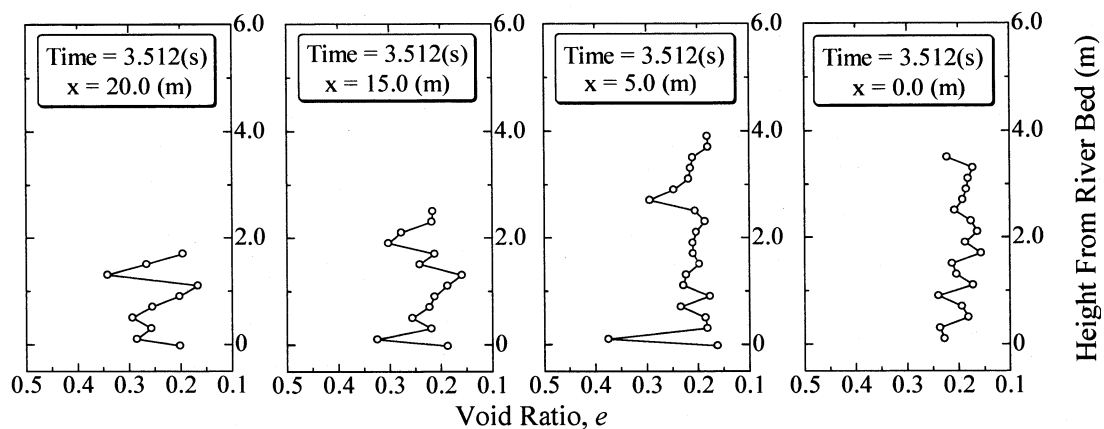


図-32 図-30における間隙比の深度分布 (解析)

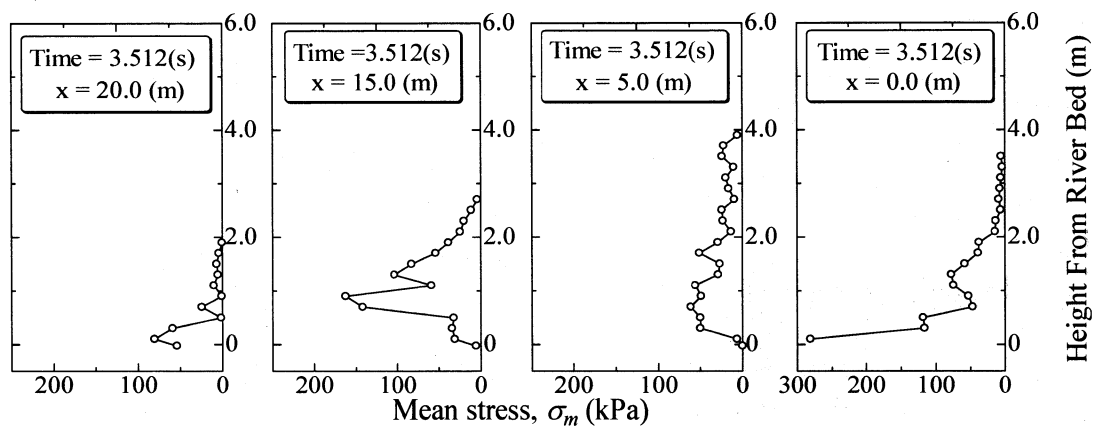


図-33 図-30における平均主応力の深度分布 (解析)

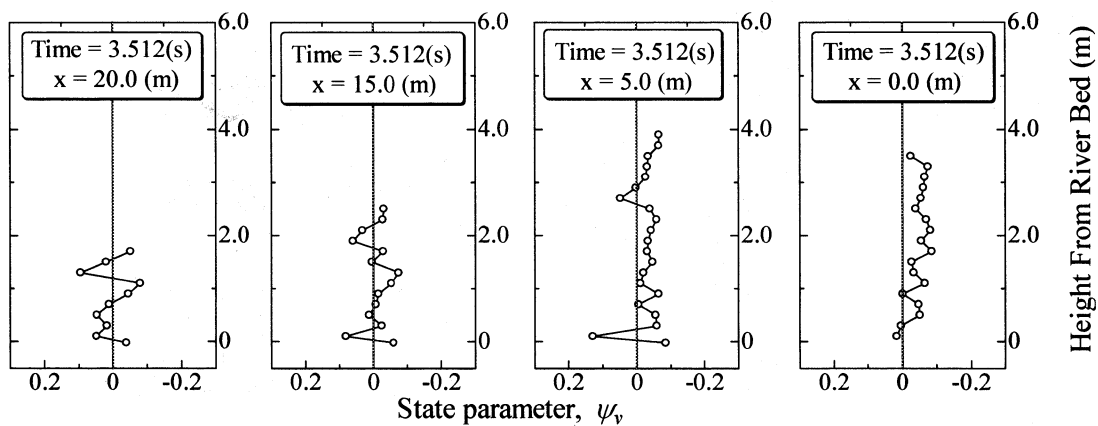


図-34 図-30における地点のstate parameterの深度分布 (解析)

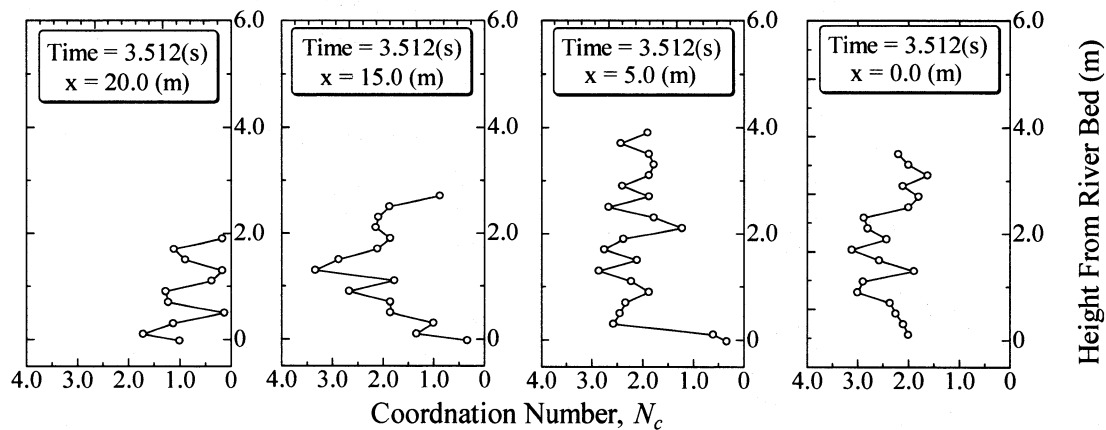


図-35 図-30における地点の配位数の深度分布 (解析)

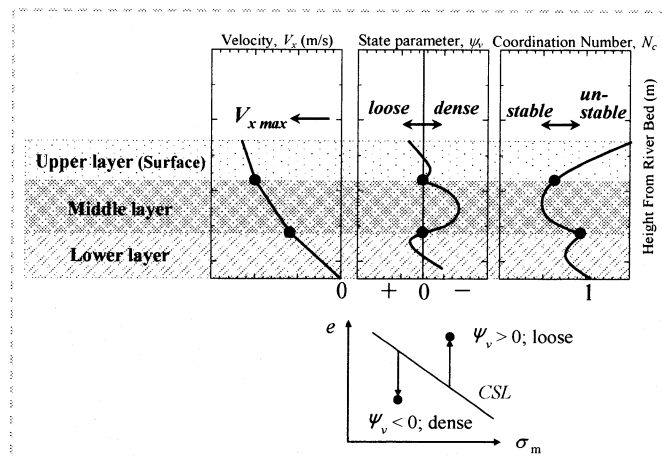


図-36 粒状体の流れ中の三層構造による速度の深度分布, state parameter の深度分布, 配位数の深度分布の概念図

4. 巨石の浮き上がり現象のメカニズムの検討

4.1 模型実験方法及び数値解析方法

(1) 模型実験方法

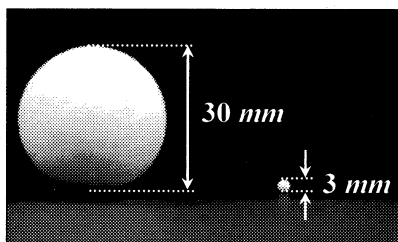


図-37 実験で用いた試料とその粒子径

模型実験は図-1, 図-2 に示した装置を用いた。流動試料はアルミナボール ($D_{50} = 2.5\text{mm}$; $D_{max} = 3.0\text{mm}$; $D_{min} = 2.0\text{mm}$) に加え、巨石として $D=30.0\text{mm}$ のアルミナボールを混入した2粒径とした(図-37)。水路の河床は3mm径の粒子固定河床について実験を行った。

大径粒子 $D=30.0\text{mm}$ のアルミナボールの混合割合について事前検討を行い、流れ挙動が大小2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) 数値解析方法

数値解析は個別要素法(DEM)を用い、図-38 のような2次元単純斜面モデルを使用した。

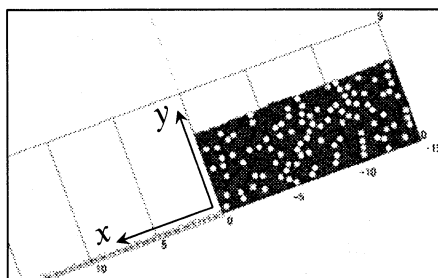


図-38 解析に用いた試料の初期堆積状況

解析の詳細は、2.2 節で示した通りである。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2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2種類で、摩擦係数を粒子同士間の $\tan\phi_p=0.50$ 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。

4.2 実験・解析結果及び考察

(1) マクロな挙動

図-39 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。

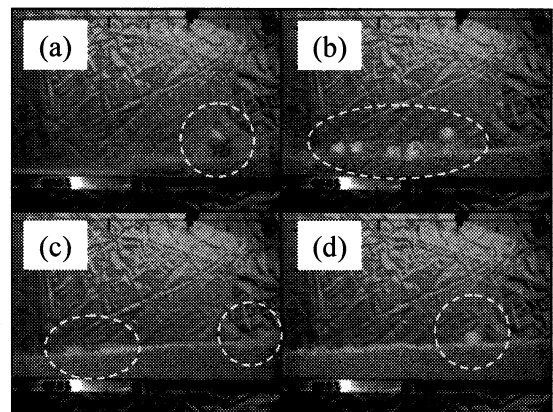


図-39 実験で見られる流れ中の大径粒子の浮き上がりと潜り込み(実際の河床は右から左に21°傾いている)

粒子の浮き上がり現象に関して様々な考え方が提案され、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だけ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関する考え方は、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。

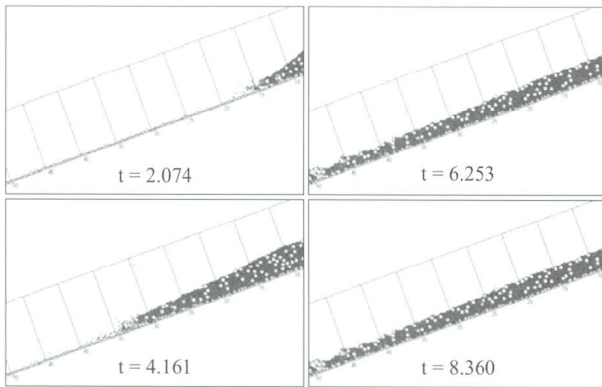


図-40 流動の解析結果：河床は粒子固定の粗度有り

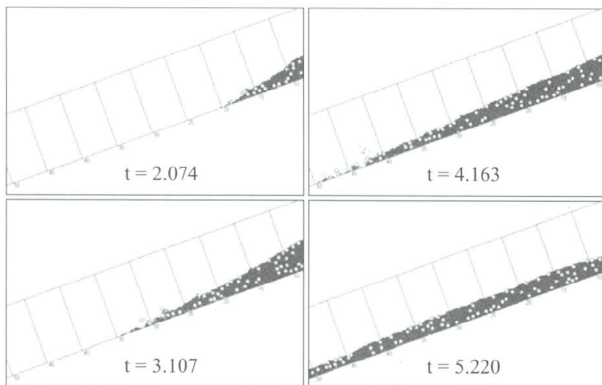


図-41 流動の解析結果：河床は板要素のみの粗度無し

そこで、数値解析から大径粒子を含む流れを調べた。図-40 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-39 に見られるように、先端に大径粒子が集まっているとともに、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ことが分かる。DEM で巨石の浮き上がりが再現できることになる。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-41 に示す。大径粒子はあらゆる深度に分布し、表面への浮き上がり現象は確認できない。

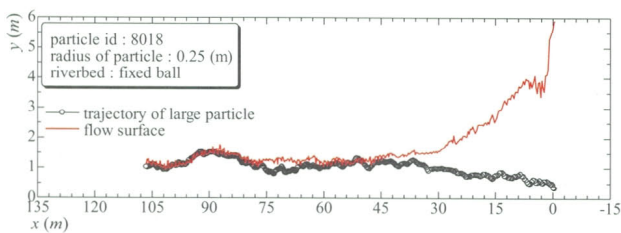


図-42 大径粒子の軌跡と流れ表面の位置 (解析)：河床は粒子固定の粗度有り (図-40 に対応)

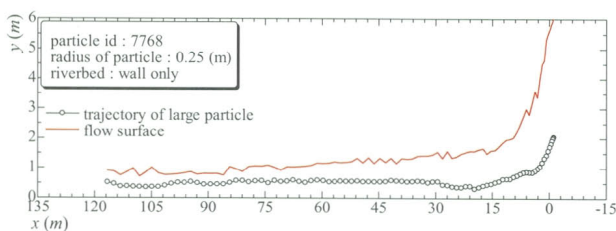


図-43 大径粒子の軌跡と流れ表面の位置 (解析)：河床は板要素のみの粗度無し (図-41 に対応)

さらに、図-42、図-43 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 座標を示す。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-42)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-43)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。

(2) ミクロな挙動

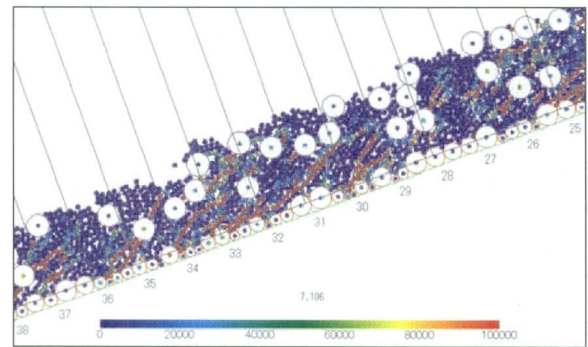


図-44 流れ中の応力鎖(解析)：粗度有り(図-40 に対応)

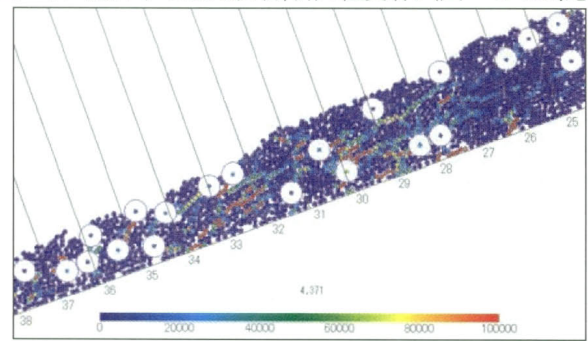


図-45 流れ中の応力鎖：粗度無し(図-41 に対応)

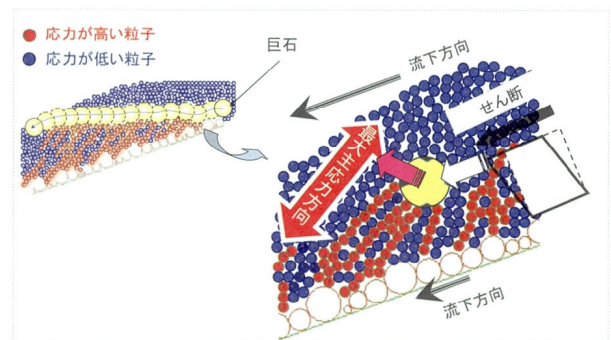


図-46 巨径粒子浮き上がりの概念図

図-44、図-45 はそれぞれ図-40、図-41 のケースの粒子単位の応力分布を示す。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。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-44)、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。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-45)、応力鎖は河床にほぼ平行で分担する応力レベルも低い。これは、3.2(3)で示したように、表層以外は粒状体のせん断現象に支配されて

いるので、河床で分担するせん断応力に対応した応力鎖が河床を中心に発達するためである。また、大径粒子が含まれると、大きな粒子は周りの粒子集合体に比べて剛性が高いために応力が集中しやすく、応力鎖も集中していることが分かる¹⁷⁾。したがって、大きな粒子には、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明らかに応力鎖が安定せず発達しにくいために下層の粒子を押さえ込むような効果は働きにくいと考えられる。以上のことから、粒子集合体のせん断現象に伴って、強い応力鎖が高い圧力域を河床から上流表面に向かって成長させ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。以上の概念を図-46にまとめる。

よって、ミクロ-マクロの相互の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す、工学的発展性を有すると考えられる。ここでは、粒子回転の影響については言及しなかったが、応力鎖の安定性は粒子回転抵抗(非円形粒子のインターロッキング効果)に大きく支配される¹¹⁾。したがって、粒子回転について考察する際には大きな粒子の回転にのみ着目するのではなく、それを取り囲む応力鎖の安定性と関連付けながら考察する必要がある。

5. おわりに

粒状体の斜面上の流れ挙動について PIV 画像解析を併用した模型実験と二次元格子要素法 (DEM) 解析によって検討した流れの速度構造(深度分布)と巨石の浮き上がり現象といった典型的な流れの特性の発現機構をマクロとミクロのマルチなスケールから考察を試みた。主な結果は以下のようである。

(1) 流れ中には応力鎖が最大主応力方向に向かって発生、消滅を繰り返し、それと対応して、圧縮、膨張変形が生じていることが分かった。また、流れの内層部には粒子接触面の異方性が誘導され、表面では流れに平行に、深いところではせん断現象によって最大主応力方向に発達することが明らかになった。

(2) 粒状体の流れ中の速度の深度分布、state parameter の深度分布、配位数の深度分布や相互の関係を調べた。速度勾配の変化点について地盤力学の観点からも考察した結果、速度構造が概ね三層を成し、以下のような構造を形成していると考えられる。1) 最底層の極河床付近では圧縮力で密な状態となるが、その少し上部ではせん断ひずみが大きくせん断層が形成され、緩く粗で不安定な構造となる。2) せん断帯の上部で、せん断が起きているが比較的密で構造も他層に比べて安定した中間層である。したがって、下層との境界では限界状態に達することになる。3) 表面近くでは拘束圧が低く正規圧密状態、さらに平均配位数が1もしくは1以下であることから分かるように粒子濃度が低く不安定で、粒子の衝突状態にある。つまり、速度構造とミクロ構造との関連づけは、粒状体のせん断機構で説明可能であることが示唆された。

(3) 流れ中の巨石の浮き上がり、沈み込み現象も流れ中の粒状体のせん断機構によって説明されることがわかった。応力鎖が最大主応力方向である上流・表層の斜め方向に形成・発達しその高圧領域が巨石の沈み込みを防いでいることが示された。

粒状体のせん断メカニズムが粒状体の流れのダイナミクスを

支配していることをより明確に示すとともに、それを考慮した流れの抑制効果を引き出すことで斜面災害の軽減につながると思われる。

参考文献

- 1) 高橋 保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004.
- 2) 池上 浩: 土石流災害, 岩波新書, 1999.
- 3) 地盤工学会 土石流編集委員会: ジオテクノート12 土石流, 社団法人 地盤工学会, 2003.
- 4) 早川尚男: 散逸粒子系の力学, 岩波書店, 2003.
- 5) Bagnold, R.A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Roy. Soc., London A 225, pp.49-63, 1954.
- 6) Savage, S.B.: The stress tensor in a granular flow at high stress rates, J. Fluid Mech., 110, pp.255-272, 1981.
- 7) Shenn, H. H.: Rapid flow of granular materials (Chapter 5), Mechanics of granular materials, A. A. Balkema, 1999.
- 8) 岩下和義, 一場勝幸, 小田 匡寛: 高速せん断試験装置による粒状体の流動特性の研究, 土木学会論文集, No.764 (2004/06/21) pp.147-156, 2004.
- 9) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack: A Discrete Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 10) 中谷洋明・前田健一・菅井径世・筒井庸雄・杉井大輔: 急勾配区間での土石流に関する運動学的特性の再現手法について, 砂防学会誌 第58巻 第4号(通巻261号), pp.35-39, 2005.
- 11) Maeda, K. and Hirabayashi, H.: Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, Journal of Applied Mechanics, JSCE, pp.623-630, 2006.
- 12) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版株式会社, 2004.
- 13) 原 嘉教, 前田健一, 大野了悟, Azam Syarif Zahar: DEM 解析による周面摩擦の異なる杭の鉛直支持力に及ぼす密度・土被り圧の影響, 第47回地盤工学シンポジウム, Vol.47, pp.255-262, 2002.
- 14) Satake, M.: Fabric tensor in granular materials. IUTAM-Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, pp. 63-68, 1982.
- 15) M. ODA and K. Iwashita: An Introduction Mechanics of Granular Materials, A.A.BALKEMA, 1999.
- 16) WOOD, M. D.: Soils behavior and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, 1990.
- 17) D. M. WOOD and K. MAEDA: Changing grading of soil: effect on critical states, Acta Geotechnica, Vol. 3, No. 1, pp.3-14, 2008.

(2008年4月14日受付)