

粒状斜面の流れ場における限界状態について

名古屋工業大学 学生会員 平林大輝
名古屋工業大学 国際会員 前田健一
名古屋工業大学 学生会員 福岡雅俊

1. はじめに

著者らは土石流の流動挙動について、地盤工学の観点から模型実験、事例解析、解析的なパラメトリックスタディを通して流れのメカニズムや対策効果発現メカニズムを解明、効率的な対策工法の検討を進めている¹⁻⁴⁾。

本研究ではまず、比較的粒子の濃度が高い砂礫型の土石流について着目し、粒子群の流れを対象とする。これらに関する研究は、工学や物理の分野で古くから多くの研究がなされているがその流れのメカニズムについてまだ十分にはわかっているとはいえない。工学的に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に注意が注がれ、流下斜面勾配や地形に応じて斜面と流下物との摩擦係数を変化させるといった経験的かつ極端にマクロな手法がとられている。これらは、有益なものであろうがその理論的背景が明確でないと過去の被害事例と類似したケースでなければ現象の解釈や予測は難しいといえる。一方、物理の分野では粉体流動として多くの研究者を魅了したが、物理学の分野では現象を極端に単純化しすぎたり、粒子の運動量に着目するなど視点があまりにもミクロに偏りしすぎたりしてきた。

そこで、本報告では PIV 解析を併用した流下模型実験と個別要素法 (DEM) を用いて、河床条件や材料特性が異なる場合の流動特性について流れ全体のマクロな挙動、粒子レベルのミクロな挙動、その中間スケールの粒子塊の挙動の観察を試みた。流下速度、速度分布、渦度だけでなくマクロな流れ中に生じる粒子塊の応力一ひずみ一間隙比といった地盤力学的挙動についても調べた。実験と解析については定性的な比較のみ実施した。

2. 模型実験方法および数値解析方法

方法報告では模型実験と数値解析を併用することで典型的かつ簡単な粒状斜面の流れ場を観察した。

2.1 模型実験方法

図-1 に用いた実験装置の概要を示す。河床には傾斜角が可変なアクリル製水路（水路長 100cm, 幅 15cm）を用い、上流部に崩壊用試料を入れるアクリル製の試料箱（長さ 20cm, 幅 15cm, 高さ 15cm）を取り付け崩壊用試料の支持板を瞬時に外すことで土砂の崩壊を再現した。実験は平面ひずみ条件となる。本報告では水を含まない粒状斜面の流れについてのみに行った。崩壊用試料はアルミナボール ($D_{50}=2.5\text{mm}$) を使用した。河床の傾斜角は水平 (0 度) と安息角 (21 度) とし、崩壊量を 1500cm^3 (試料高さ $H=5\text{cm}$ × 底面積 $A=300\text{cm}^2$), 3000cm^3 ($H=10\text{cm}$), 4500cm^3 ($H=15\text{cm}$) とした。河床の種類としては滑らかな河床を想定したアクリル板 (B_w)、比較的粗い河床としてサンドペーパー (B_s)、崩壊試料と同じ試料を堆積させた河床 (B_d) の 3 種類の

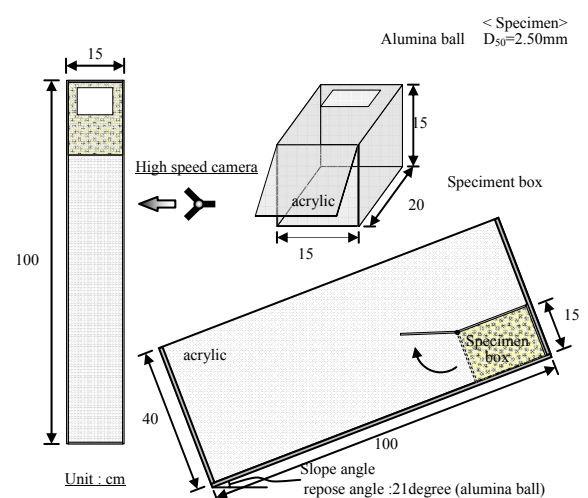


図-1 実験装置概要

河床を用いた。また、堰堤型対策工の場合には堆積河床の水路中腹に障害物を用意して表現した(図-2)。なお堰堤は水路側面に完全に固定し、斜度に関係なく重力方向に設置した。流下挙動を水路側方から、流下方向と並行に設置した高速度カメラで撮影し観察した(従って斜度 21 度の場合は画像上、堰堤型対策工が上流方向に傾いて見える)。また PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定) 法を用いて流速ベクトル分布を観察した。

2.2 数値解析方法

個別要素法 DEM を用いた粒状斜面の流動特性の検討は図-3 のような二次元単純斜面モデルを使用した。崩壊試料は斜路垂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もっとも密な状態な崩壊試料を作成した。その後所定の斜度に傾け、試料箱前面の壁を取り去ることで崩壊土塊を再現し、流動挙動を観察した。x, y 座標を図中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、傾斜角度 θ は 0 度 (水平), 10 度, 20 度の 3 種類を設定した。流下する崩壊試料は 100m^2 で約 20,000 個の粒子から成る。

粒子要素間バネの硬さは媒質中を伝わる弾性波動の速度と媒質の剛性の関係⁵⁾に基づいて算出している。用いたパラメータを表-1 に示す。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。粒子要素間に働く減衰作用には粘性減衰を使用し臨界減衰に設定した。また、本報告では円形粒子のみを用いた(したがって、転がり摩擦はない)。図-4 に示すような最大粒径 $D_{max}=100\text{mm}$ のもとで最小粒径 D_{min} を変化させ広範な粒度の試料を作成した。粒度の指標として $R_D=D_{max}/D_{min}$ ($=1,2,5,10$) を用いた。また、河床の粗度の検討として、粒子間と同じ摩擦係数をもつ壁要素を用いた河床 (B_w) と流下試料と同じ粒子を固定した河床 (B_p) の 2 種類を用いた。

事前に、解析に用いた試料の二軸圧縮試験のシミュレーションを行い、異なる密度、拘束圧下での結果をまとめている⁴⁾。間隙比と平均有効主応力関係についても調べ、粒度分布が良い試料ほど初期間隙比が小さくなりやすく、限界状態線の傾きが若干小さくなることを確かめている。また、崩壊斜面の先端の到達距離や流下速度についてバネ定数や摩擦係数の影響を調べたところ、通常地盤材料として想定される範囲であるバネ定数 $k_n=10^6\sim10^{10}(\text{N/m/m})$ 、摩擦係数 $\tan\phi_\mu=0.18\sim0.84$ ではほとんど影響がないことを確かめた²⁾。

3. 結果および考察

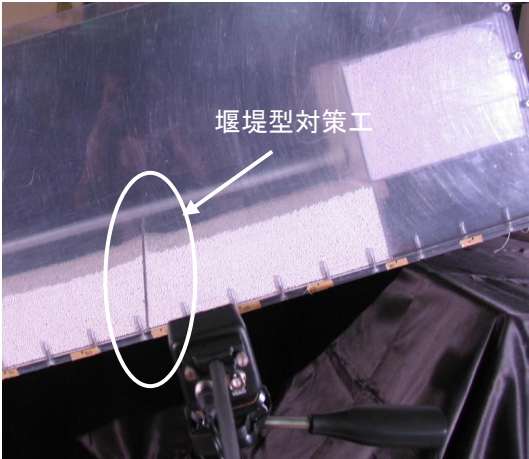


図-2 対策工模型

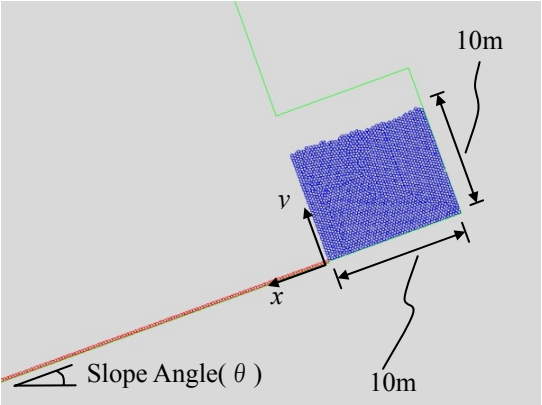


図-3 解析モデル概要

表-1 解析に用いたパラメータ

パラメータ (単位)	設定値
(粒子単位, 接触モデル)	
粒子の密度: ρ_s (kg/m^3)	2600
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
粒子間摩擦角: ϕ_μ (deg.)	30
計算時間刻み: Δt (s)	1.0×10^{-5}
(パラメータ算定に用いた粒子集合体としての参考値)	
密度: ρ (kg/m^3)	1800
P 波速度: V_p (m/s)	266
S 波速度: V_s (m/s)	133

注: V_p , V_s の端数値はその値を用いて算定されるバネ定数が簡単な適当な値になるように調整した

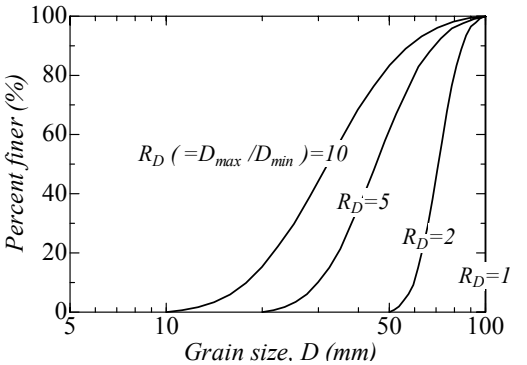


図-4 解析に用いた試料の粒度分布

本報告では、粒状体の流動に関するマクロな量として流下斜面先端到達距離と時間、ミクロな量として流速ベクトル、粒子塊の量として流下斜面内を適当な大きさに分割しその領域で定義されたひずみ速度、渦速度、応力、間隙比について着目した。

3.1 典型的な流動挙動

図-5 に 3000cm^3 , B_a の場合の実験結果を示す。図-6 には PIV 解析により求めた流速分布を示している。流下中は斜面の先端、表面に大きな速度が分布していることがわかる。この流動挙動については詳細に検討する。また、図-7 には堰堤型対策工を設置した場合の速度分布を示す。堰堤に衝突後、先頭の粒子群は堰堤を

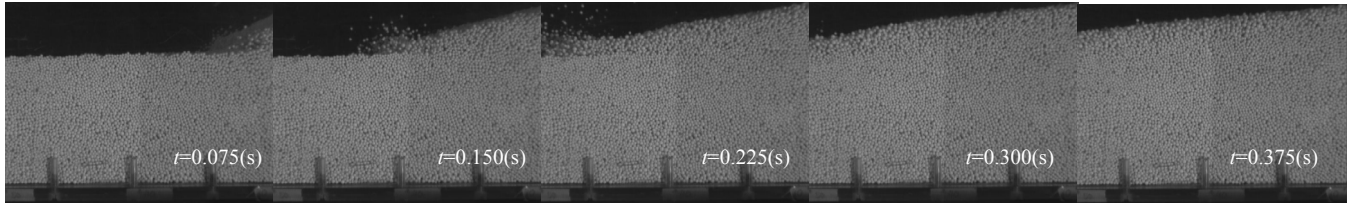


図-5 流動挙動の経時変化(実験結果, 3000cm^3 , B_a , $\theta=21\text{deg.}$)

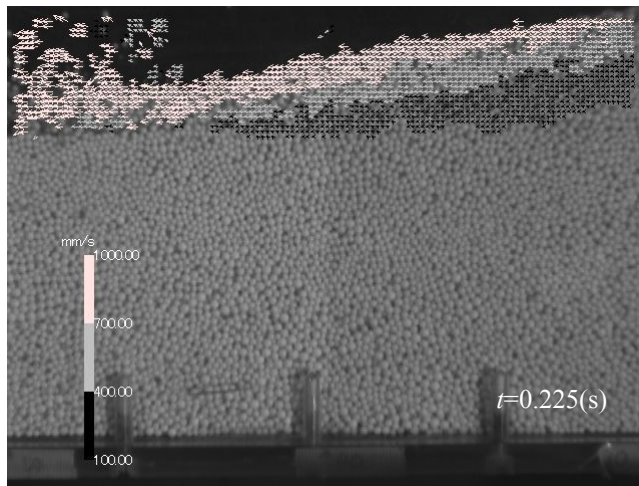


図-6 図-5 の PIV 解析による流速分布
(実験結果, 3000cm^3 , B_a , $\theta=21\text{deg.}$)

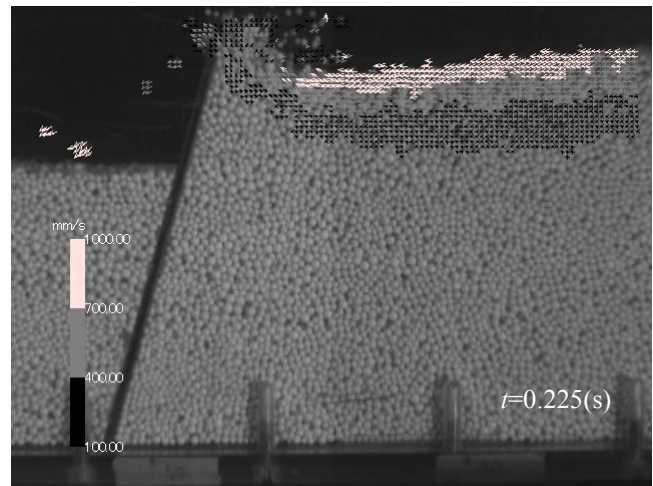


図-7 堰堤型対策工設置時の PIV 解析による流速分布
(実験結果, 3000cm^3 , B_a , $\theta=21\text{deg.}$)

越えずにその場で静止し、くさび型の粒子不動体を形成しているのがわかる。流速分布は粒子不動体に沿って堰堤の頂点まで曲げられ、速い部分がこれによって阻害されている。

3.2 流動挙動に及ぼす粒度分布の影響

斜面が水平 ($\theta=0$ 度) の場合の流下斜面の先端の到達距離と時間との関係を DEM 解析で調べた結果を図-8 に示す。図中には参考のために水柱の崩壊 (ダム・ブレイク) 実験の結果を破線で示している⁶⁾。到達距離 x を供試体の寸法 (奥行き) L で正規化し、時間 t は重力加速度 g と L を用いて正規化している。水柱の実験では正規化した到達距離と時間の関係はただ唯一の関係で表現可能であることが知られている。河床の凹凸による粗度がない場合 (B_w)、図から粒状体の結果はいずれの場合も流体を下回る速さで流下している。粒度が良いほど図中のプロットは流体のものに近づく。しかし、 $R_D=2$ と $R_D=5$, $R_D=10$ ではほとんど差がなくなっており先端の到達距離と時間との関係には限界線が存在するようである。この結果は到達時間の予測に有益な結果であるといえる。また、粒度が良くなっても流体とは異なった挙

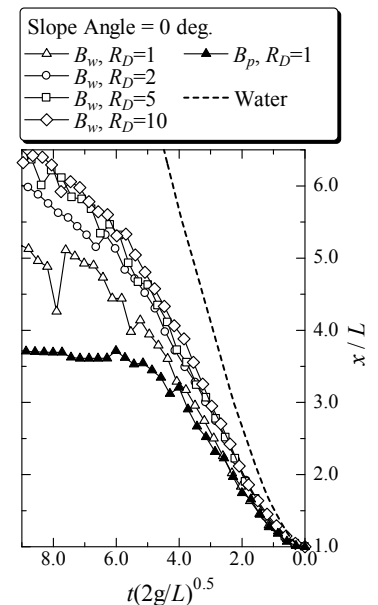


図-8 流下斜面先端到達距離と時間の関係に及ぼす粒度および河床粗度の影響
(解析結果, $\theta=0^\circ$)

動を示し、流体とは本質的に違う流れのメカニズムがあることを示唆している。

3.3 流動挙動に及ぼす河床の粗度の影響

図-8 中の河床 B_w の $R_D=1$ と B_p の $R_D=1$ を比較すると B_p は B_w よりも流動が早く停止している。これは実験結果と一致している。

河床粗度の影響について詳細に検討するために、図-9, 10 にある時刻における流下斜面内の河床付近の速度分布をそれぞれ実験結果、解析結果について示している。実験・解析ともに B_w より B_p (粗度が高い方) が河床付近で速度が小さくなっている。図-9 では黒いベクトルで表示された流速の小さな部分が B_w に比べ B_p では多くなっている。図-11 には図-10 の場合の流動開始 1.95 秒後、 $x=1.5(\text{m})$ における斜面に水平な方向の速度の深度分布を整理した。深度分布は流体のように滑らかな分布にはなっていないが、粗度が低い B_w の場合には河床付近では粒子が slip し、

粗度が高い B_p の場合には non-slip 状態になっているようである。したがって、粗度が高い方が流下速度の深度分布の勾配は大きい。

さらに速度構造を詳しく調べるために、 B_p における渦度について図-12 に示す。先端・

河床付近で反時計周りの流動方向への渦が発生

していることが分かる。この渦運動によって、河床に堆積層がある場合には、流下に伴い堆積層の土砂を巻き上げると理解される。粒子塊同士の回転がミクロな粒子間摩擦に起因する以外の応力を斜面内に発揮させると考えるのが自然である。これは通常の連続体の流体的取り扱いでは解決できない課題である。

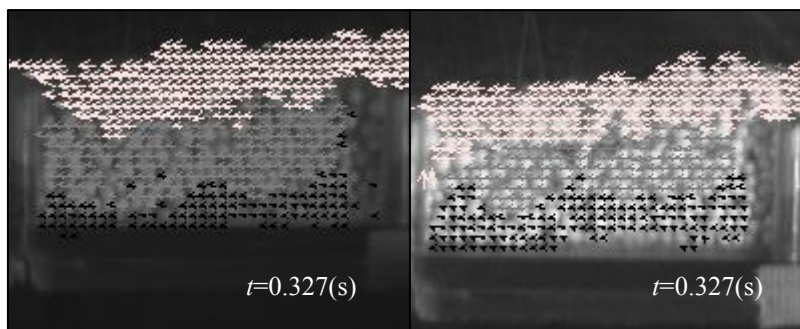


図-9 速度ベクトル分布に及ぼす河床粗度の影響
(実験結果, 3000cm^3 , 左: B_w , 右: B_p , $\theta=21\text{deg.}$)

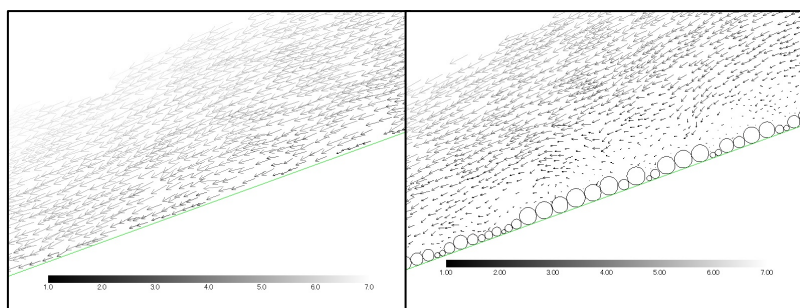


図-10 速度ベクトル分布に及ぼす河床粗度の影響
(解析結果, $R_D=5$, 左: B_w , 右: B_p , $\theta=20\text{deg.}$)

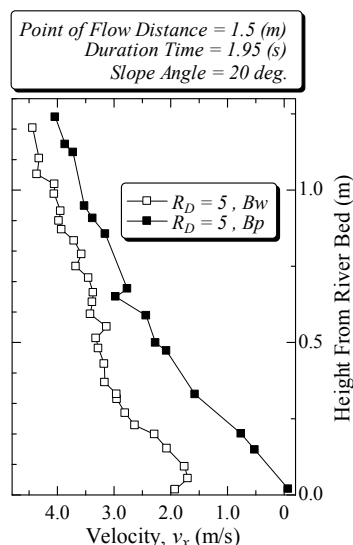


図-11 速度の深度分布に及ぼす河床粗度の影響
(解析結果, $R_D=5$, $\theta=20^\circ$)

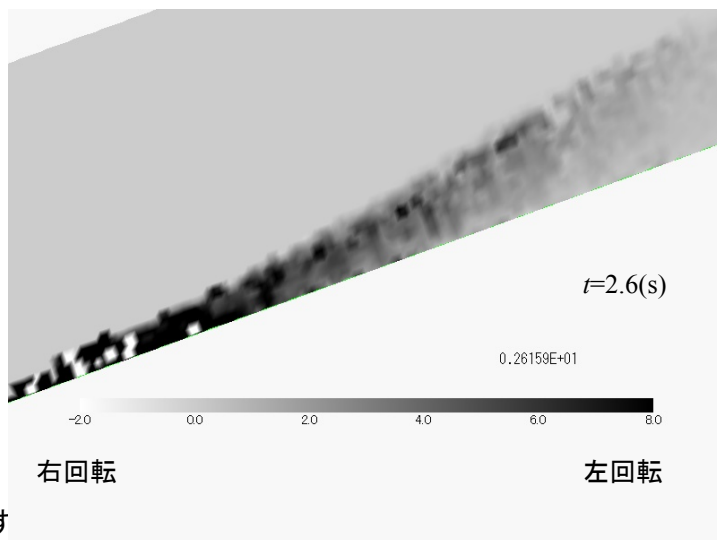


図-12 渦度分布に及ぼす河床粗度の影響
(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

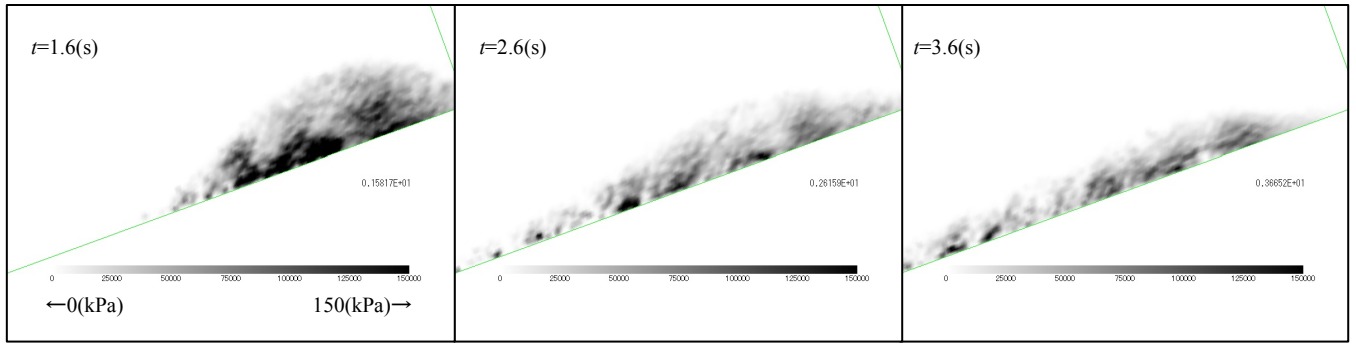


図-13 流動斜面内に発生する応力成分 σ_{xx} の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

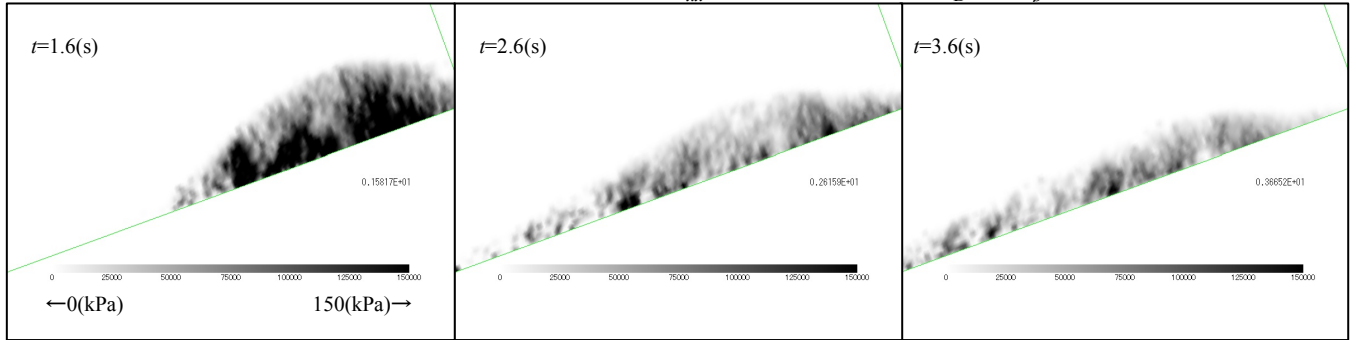


図-14 流動斜面内に発生する応力成分 σ_{yy} の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

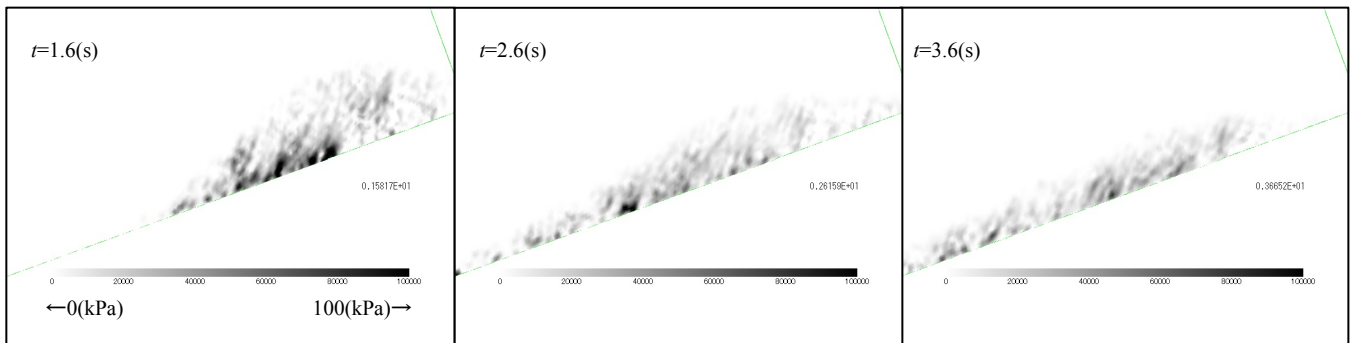


図-15 流動斜面内に発生する応力成分 τ_{yx} の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

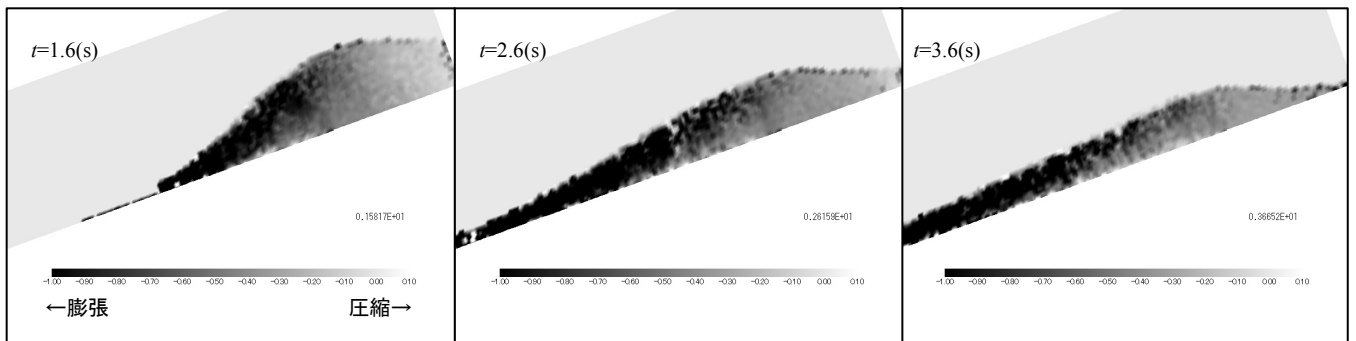


図-16 流動斜面内に発生する体積ひずみ速度成分 $\dot{\epsilon}_v$ の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

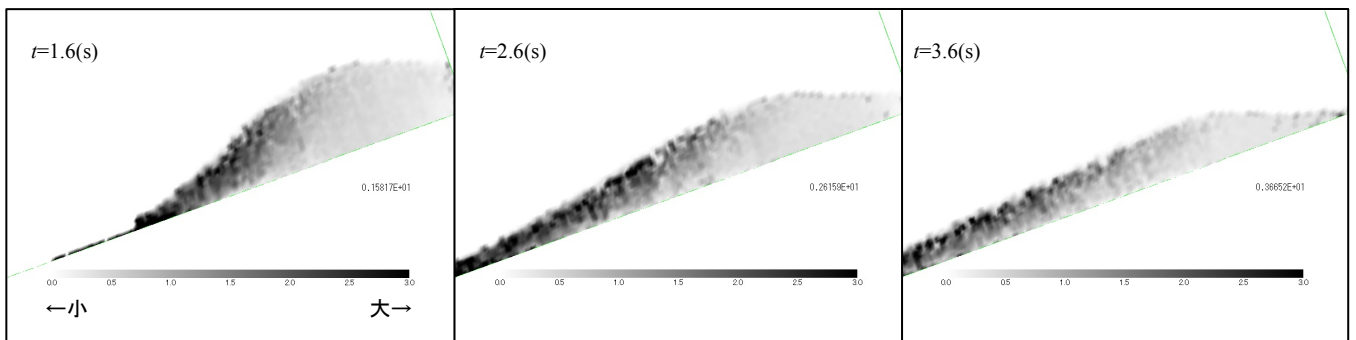


図-17 流動斜面内に発生する最大せん断ひずみ速度成分 $\dot{\gamma}_m$ の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

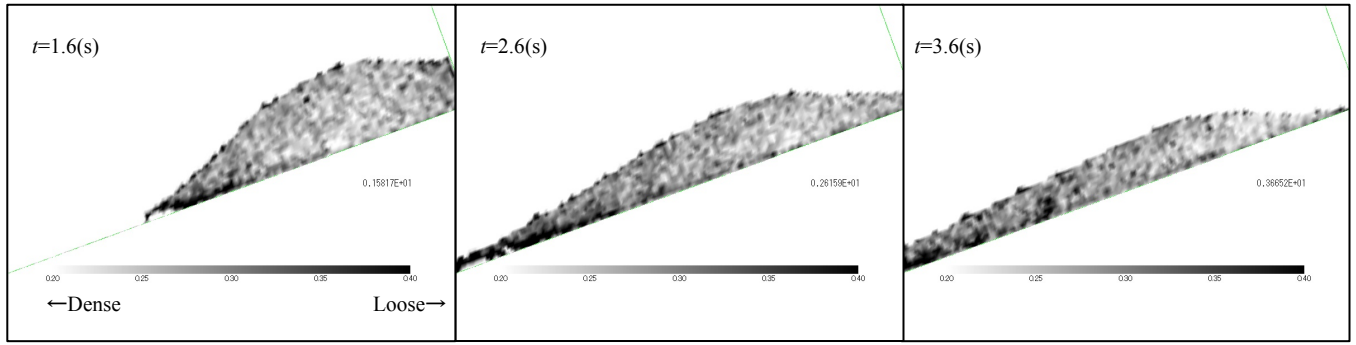


図-18 流動斜面内に発生する間隙比 e の変化(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$)

3.4 流動挙動に及ぼす流動斜面内の不均質性の影響

ここでは、解析結果に基づき流下過程における流動斜面内での応力—ひずみ—間隙比分布を調べる。図-13, 14, 15 には $R_D=2$, B_p の場合の応力成分の変化 σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{yx} をそれぞれ示している。また、図-16, 17 にはひずみ増分成分の変化 $\dot{\epsilon}_v$, $\dot{\gamma}_m$ をそれぞれ示している。直応力(図-13,14), 体積ひずみ(図-16) とともに流下方向、深度方向になめらかな分布にはなっておらず不均質である。つまり応力が強く発生しているところと弱い箇所があり、いわゆる応力鎖が発生している。これはつまりあいから流下斜面内部に波動が生じることを意味している。また、図-17 から大きなせん断ひずみ速度分布は表層よ

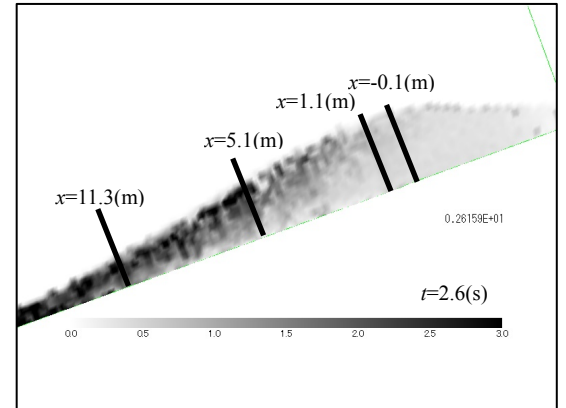


図-19 間隙比 e と平均有効主応力 σ_m についての検討断面(最大せん断ひずみ速度分布上)

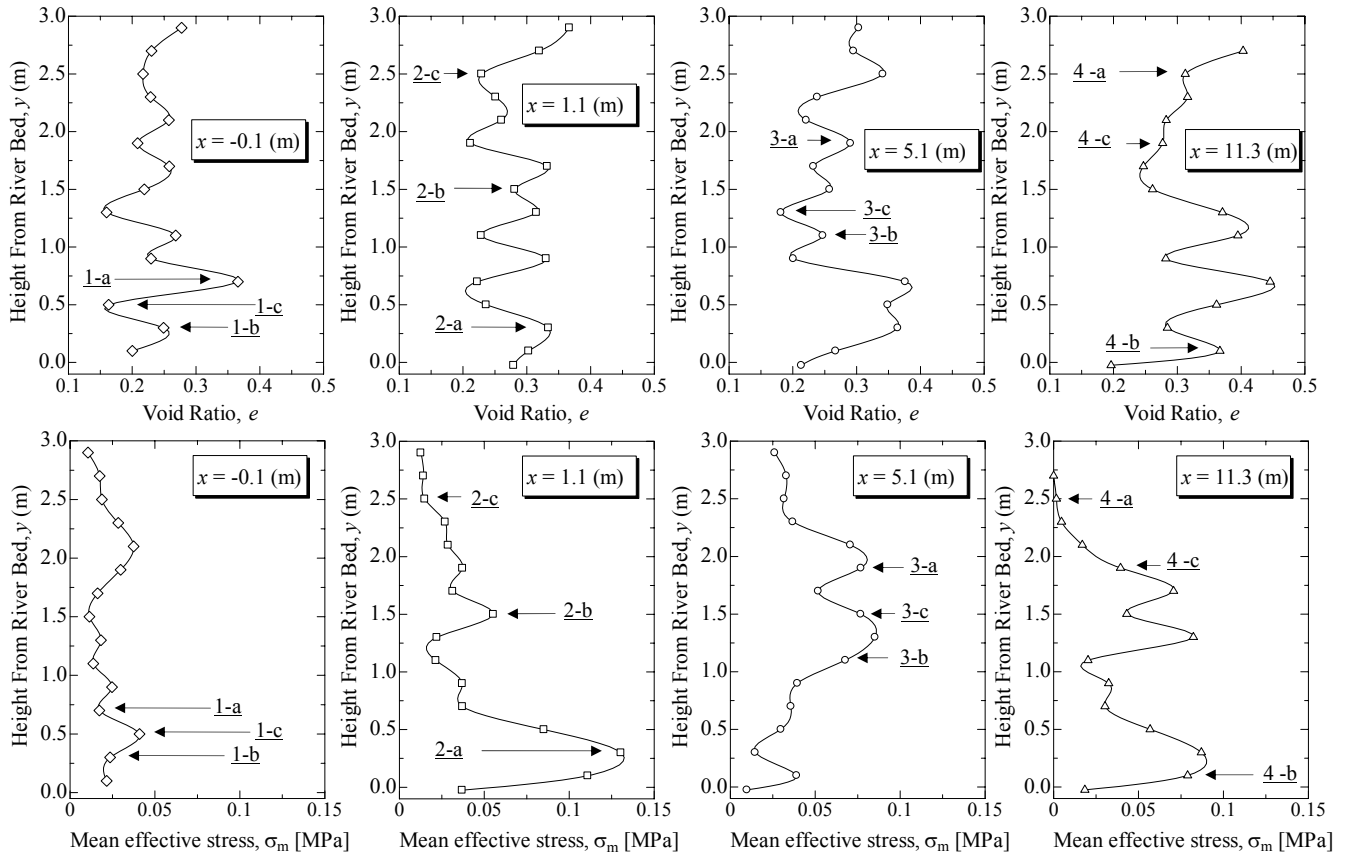


図-20 図-19 の各断面における流動斜面内に発生する間隙比 e と平均有効主応力 σ_m の深度分布(解析結果, $R_D=2$, B_p , $\theta=20^\circ$, 上段: e , 下段: σ_m)

り少し深いところである幅の部分に集中しており、流動する斜面内にもせん断による変形の局所化が発生していることは興味深く、これが流動の促進や抑制に大きく関係することは明らかである。せん断応力の分布は粒状材料であるのでその箇所におけるせん断強度とせん断ひずみ、平均有効主応力 σ_m に支配される。せん断強度は間隙比 e と σ_m 面上で限界状態線 (critical state line) からの距離である state parameter で規定される⁷⁾。そこで、流下斜面内の間隙比 e の変化を図-18に示す。さらに、図-19のせん断ひずみ速度分布上の断面で e と σ_m の深度分布を調べた結果を図-20に示す。前述したように、深度方向に e と σ_m は滑らかな分布とはなっていない。流動が停止している $x=-0.1(\text{m})$ 地点では他の断面に比べ間隙比が低くなっているようである。

さらに、斜面内の e と σ_m の関係について調べるために、この材料の限界状態線に対して、図-20の場合についてまとめたのが図-21である。図-21上の(4-c)点に代表されるように、図-19の最大せん断ひずみ速度成分の大きな箇所の e と σ_m は限界状態線上にある。したがって、流動斜面内では流体近似では表せない地盤力学に沿った状態が出現しているといえる。限界状態線の上部に対応する箇所ではゆるく、限界状態線の下部に対応する箇所では密もしくは応力履歴を受けた箇所であるということになる。

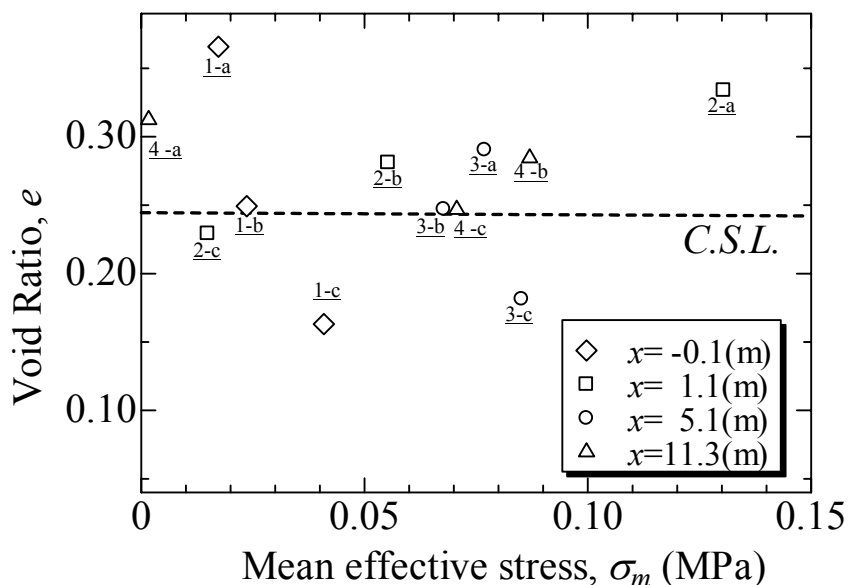


図-21 流動斜面内の間隙比 e と平均有効主応力 σ_m の関係

4. おわりに

粒状斜面の流動特性について、斜路の模型実験および2次元DEM解析を行った。その結果、以下のよう

- (1) 実験と数値解析では定性的な一致が確認された。
- (2) 流動過程にある斜面では前方かつ表面に最大速度が観察されるが、変形速度の局所化は表面より少し深いところで発生することがわかった。
- (3) 流れ先端の到達時間は粒度の影響がみられるものの粒度分布がある程度 ($D_{max}/D_{min} > 5$) 以上ではほとんど変わらず粒度の影響がみられない。
- (4) 河床の粗度が高くなると流下速度の深度分布の勾配は大きくなり、渦度が高くなる。
- (5) 斜面内の応力は不均質であり応力鎖ができ、流動する斜面内では波動が発生すると考えられる。
- (6) 最大せん断ひずみ速度が発生している箇所では粒状材料の限界状態にある。したがって、流動する斜面内に発生するせん断強度は state parameter などを用いて示すことができるといえる。砂防などの蓄積された経験的手法の成果と物理のミクロな結果を地盤力学の観点から繋ぐことができるのではと考えられる。さらに、非円形粒子の導入により転がり抵抗やインターロッキング効果も観察する必要があるとおもわれる。

参考文献

- 1) 中谷・前田・菅井・筒井・杉井: 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, Vol.58, No.4, pp.35-40, 2005.

- 2) 平林・前田・菅井: 粒状斜面の流動特性に及ぼす河床の粗度特性の影響, 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp.2353-2354, 2005.
- 3) 平林・前田・菅井: 粒状斜面の流動挙動に及ぼす粒子特性の影響に関する DEM 解析, 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp.2193-2194, 2006.
- 4) 前田・平林・大村: DEM を用いた異なる粒度分布を有する粒状材料の変形・破壊挙動と構造, 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp.403-404, 2006.
- 5) 伯野元彦, 破壊のシミュレーション, 森北出版株式会社, pp. 40-51, 2004.
- 6) Martin, J.C. and Moyce, W.J.: An experimental study of the collapse of liquid column on a rigid horizontal plane, Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol.244, pp.312-324, 1952.
- 7) Wood, D.M.: *Geotechnical modeling.*, Oxon: Spon Press., 2004.