

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630201

研究課題名(和文)二重性とマルチスケール相互作用に着目した粒状体の流れのメカニズム解明

研究課題名(英文) Micromechanics of granular flow with duality of particle and continuum in multi-scales

研究代表者

前田 健一 (Maeda, Kenichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50271648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：石礫型土石流の挙動把握は、減災の観点だけでなく、環境・生態系保全の観点からも重要な研究課題である。本研究では、粒子間の滑り・回転といったマイクロな現象と流れ速度、応力、間隙比といったマクロ挙動とのマルチスケールの相互作用を解明するために、粒子が鎖状に連なり力を伝える応力鎖に着目する。流れ構造を可視化するために、数値解析手法や画像解析を用いた模型実験手法を開発した。また、応力鎖の発生・消滅といった粒子群のダイナミクスと流れの中に発生する波動との二重性を考慮して粒状体流れのメカニズムの解明にチャレンジする。さらに、未解明とされる、流れ中の大きな粒子の浮き上がり現象に新たな統一的説明の成功に挑戦する。

研究成果の概要(英文)：Slope disasters inducing stony-type flow are occurring more frequently due to global climate changes, but the mechanisms of granular flow have not been thoroughly explained. The mechanism of dry granular flow was examined in micro and macro views. Flow behaviors of dry granular materials on a slope were examined using PIV image analysis and a discrete element method. Relationships exist between macro and micro behaviors during phenomena such as velocity distributions in depth stratification and uplifts of large particles that change flow grades. Stress chains are transmission paths of contact forces. The distribution of the averaged coordination number was found to correspond to the velocity distribution. This stratification could be explained by the state parameter, a relative variable dependent on void ratio, mean normal stress, and critical state. Moreover, the stress chains formed from the riverbed concentrated the larger particles and pushed them upwards towards the flow surface.

研究分野：地盤工学

キーワード：個別要素法 限界状態 応力鎖 粒子骨格構造 粒度変化 分級 逆グレーディング 土石流

1. 研究開始当初の背景

①土砂移動研究の新たな重要性 浸食・流動・堆積・浮遊等の土砂移動の研究は、土砂災害軽減だけでなく、環境や生物多様性・生態系の保全においても大気循環、水循環と同様に重要な役割を担っており、古くて新しいチャレンジに値する課題である。

②マルチスケールの重要性和流れ挙動の二重性の問題 土砂移動の中でも運動エネルギーが大きく影響力の強い石礫型土石流のメカニズム解明を難しくしている理由として、粒子濃度の高い「粒状体」が主体であることが挙げられる。力を受け変形する粒状体の内部では、粒子間の接触・剥離、滑り、回転といったマイクロ現象が生じる。その力学挙動の解明やモデル化は学際的にも重要な課題であり、土木、機械、粉体、化学、物理、農学の学際分野で研究されてきた。しかし、従来の「マクロ的手法」では、数理的表現力はあるもののメカニズム解明には至らないことも多い。一方、粒子個々に着目した「ミクロ的手法」では粒子濃度の希薄な場合には有益であるが、高い粒子濃度の場合には成功しているは言い難い。これは、流れが粒子性と波動性を同時に持ち合わせるという特徴（二重性）に起因するといえる。そこで、マクロとミクロを繋ぐ中間スケール「粒子が鎖状に繋がり力を伝える応力鎖」、「応力鎖の発生・消滅に起因する流れ中の波動伝播」と「波動伝播速度と流速とによるフルード数」に着目することでブレークスルーに挑戦した。

2. 研究の目的

大きな運動エネルギーを持つ石礫型土石流（粒状体が主体の流れ）の挙動把握は、減災の観点だけでなく、環境・生態系保全の観点からも重要な研究課題である。本研究では、粒子間の滑り・回転といったミクロな現象と流れ速度、応力、間隙比といったマクロ挙動とのマルチスケールの相互作用を明らかにするために、複数の粒子が鎖状に連なり力を伝える応力鎖に着目する。流れの内部を可視化するために、数値解析手法や高密度高周波数音響トモグラフィを用いた模型実験手法を開発する。また、応力鎖の発生・消滅といった粒子群のダイナミクスと流れの中に発生する波動との二重性を考慮して粒状体流れのメカニズムの解明にチャレンジする。さらに、未解明とされる、流れ中の大きな粒子の浮き上がり現象に新たな統一的説明の成功に挑戦する。

3. 研究の方法

研究方法の概要は次のようである。本研究では、応力鎖の発生・消滅というダイナミクス、限界状態の概念、流れ挙動や内部で発生する応力波の伝播、フルード数に着目して、

粒状体流れに関する模型実験と数値解析を実施し、それぞれの結果の比較や相互補完によって検討を進める。粒度や粒形、間隙水の有無、河床粗度、傾斜角の影響について体系的に調べる。模型実験では、画像解析による速度分布計測、解析では、二次元、三次元のDEM、DEM計算を行う。流れ中の応力・ひずみ（速度）・ダイレイタンス・間隙比のマクロ量と粒子レベルのミクロ現象との関連調べ、構造体としての応力鎖の発生条件、安定条件などを援用しながら検討する。これらの視点で巨石の浮き上がり現象を解明する。さらに、粒子法などを用いて、斜面の変状、土砂崩壊、流動、堆積といった一連のプロセスを解析可能にする。紙面の都合から、次章の研究成果では、流れ構造と大きな粒子の浮き上がり構造のみについて示す。

4. 研究成果

1. 粒状体要素の挙動

1.1 粒子接点力の繋がり（応力鎖）

図-1は、側圧一定の二軸圧縮試験を行った様子で等方圧縮時と破壊後の供試体内の粒子や接触力の分布（黒の線で表し、線の太さは力の強さに比例している）を示している。図から分かるように、全ての粒子が同じように外力を支持するわけではなく、応力鎖の発生・消滅が内部の不均質性を高くする。

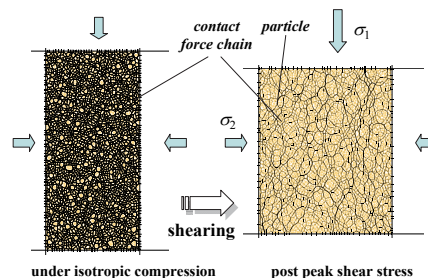


図-1 粒状体内の応力鎖（黒の線が粒子間の接触力を表し、太さがその強さを意味する）

1.2 二軸圧縮試験結果と限界状態

図-2に二軸圧縮試験結果の例を応力比、直ひずみ、間隙比 ($\varepsilon_v = \Delta e / (1 + e_{ini}) : \Delta e$, e_{ini} はそれぞれせん断による間隙比の変化、せん断初期の間隙比) の関係で示している。密詰め、緩詰め共に大きなひずみ領域（直ひずみ ε_{yy} , \geq 約 10%）では、軸ひずみが増加しても応力比や間隙比が変化しない限界状態（critical state; CS）が表現されている。間隙比と平均主応力の関係を示したのが図-3である。図中には今回用いた最も緩詰めの供試体の等方圧縮線を NCL としている。限界状態での間隙比 e_{cr} とその時の平均主応力の点を×印で示しているが、限界状態は同一線上にプロットされる（限界状態線 CSL）。CSL は材料の極限状態を表し材料に固有である。

さらに、図-4 は、図-3 の低応力領域の拡大イメージ図である。CSLに基づきステートパラメータ (state parameter) ψ_v を導入する。ここで、 ψ_v は同じ σ_m に対応した e_{cr} との相対距離で定義する。

$$\psi = e(\sigma_m, \tau_m / \sigma_m, \dots)_{\sigma_m} - e_{cr}(\sigma_m) \quad \dots (1)$$

これは、粒状体が緩いか密かということは間隙比 e の大きさで決まるものではなく、平均主応力の影響を含んだ限界状態線との相対的位置で決まる。つまり、 $\psi_v=0$ の場合は限界状態にあり、 $\psi_v>0$ (図では CSL の上) の場合には緩く、 $\psi_v<0$ (図では CSL の下) の場合には密な状態で、正のダイレイタンスを示し、強度も高い。

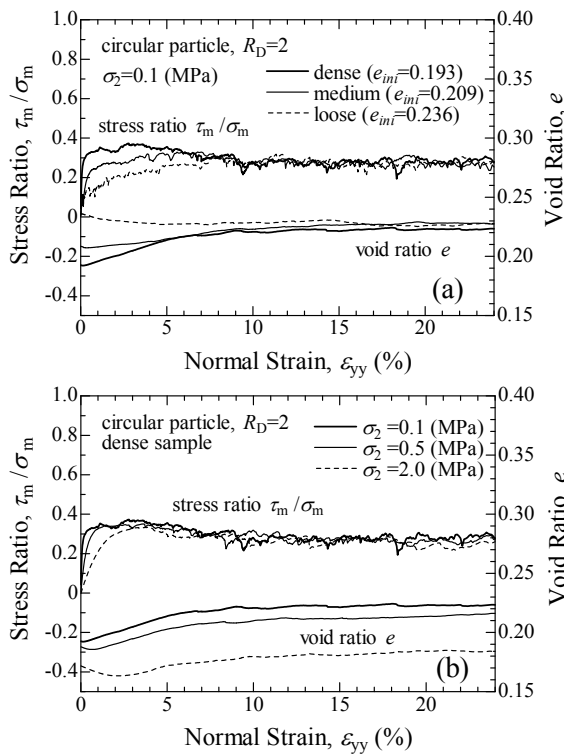


図-2 せん断時の粒状体のせん断応力比・ひずみ・間隙比の挙動；(a)密度の影響；(b)応力レベルの影響

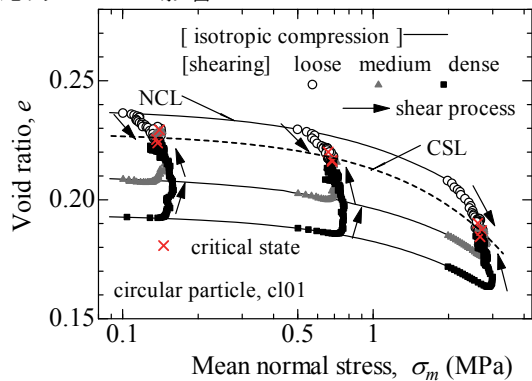


図-3 等方応力圧縮とせん断を受ける粒状体の間隙比と平均主応力の関係および限界状態線 CSL に及ぼす粒度影響；NCL と CSL ($R_D=2$)

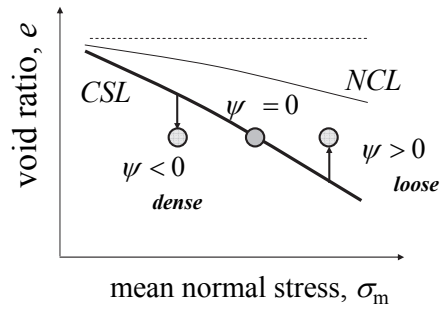


図-4 等方応力圧縮とせん断を受ける粒状体の間隙比と平均主応力の関係；NCL と CSL

2. 粒子流れのシミュレーションと力学的考察

2.1 粒子流れの DEM によるモデリング

二次元 DEM を用いた解析は、二次元単純斜面モデルを使用した。ここでは、円形粒子の結果のみについて示す。試料と同じ粒子を固定した粗な河床 (fixed ball) と粒子間摩擦係数と同じ摩擦係数の板の滑らかな河床 (wall only) を用意した。図-5 には、貧粒度のアルミナボール ($D_{50}=2.5\text{mm}$) の模型実験で高速度カメラと PIV 法によって求めた速度分布と DEM 解析によるものを示しているが、両方とも、先端・表層ほど速度が大きい。

2.2 粒子群の連続体近似

流れ全体のマクロと粒子単位のマイクロな情報の中間スケールの挙動として、図-6 のようなメッシュ内の応力等を算定した。

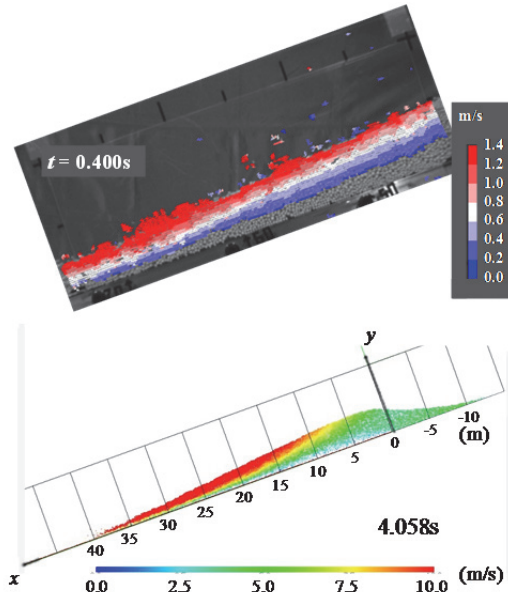


図-5 粒子流れ中の速度分布：(上) 模型実験結果を PIV 解析処理；(下) DEM 解析

2.3 貧粒度の流れ中の速度構造

分級しない貧粒度の流れ (粗な河床、傾斜角は安息角の 20 度) について、図-7~11 はそれぞれ、斜面に平行な x 方向速度 v_x 、間隙比 e 、平均主応力 σ_m 、ステートパラメータ ψ_v 、平均配位数 N_c の深度分布を示す。深度方向の速度勾配が約三区間に分けることが出

来そうであり、図中には折れ曲がり点とおもわれる箇所矢印を挿入した。

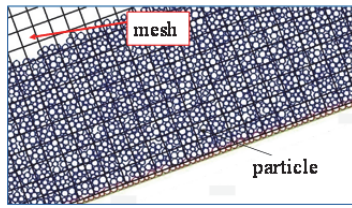


図-6 連続体近似を行う空間メッシュ

間隙比や平均主応力は、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。そこで、ステートパラメータ ψ_v の深度分布をみてみると、 $\psi_v=0$ (限界状態) となっている深さがちょうど図-7 の速度勾配が大きく変わる箇所 (せん断ひずみ速度が卓越している部分) と一致しているようである。内部構造の安定性の指標である平均配位数の深度分布 (図-11) と比較した。

図-12 に考察のまとめを示す。表層から順に、ゆるく衝突が主な S 層、比較的安定した M 層、大きなせん断ひずみが局所的に生じる B 層に分けた。それぞれの境界に限界状態に達している遷移領域を考えた。

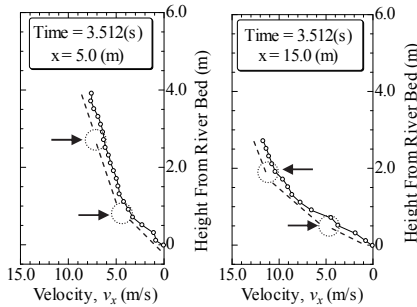


図-7 速度 v_x の深度分布

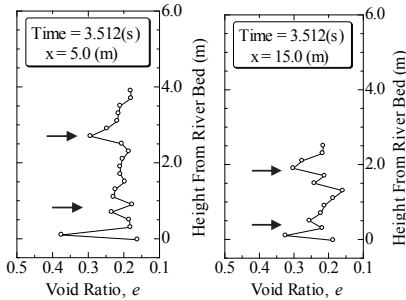


図-8 間隙比 e の深度分布

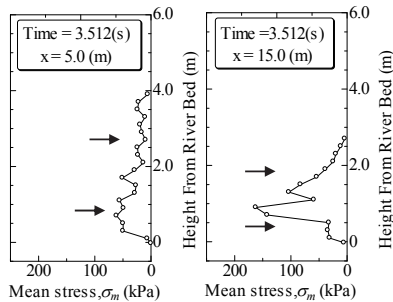


図-9 平均主応力 σ_m の深度分布

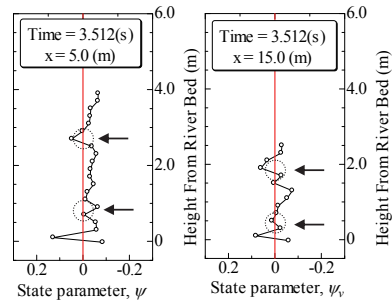


図-10 ステートパラメータ ψ_v の深度分布

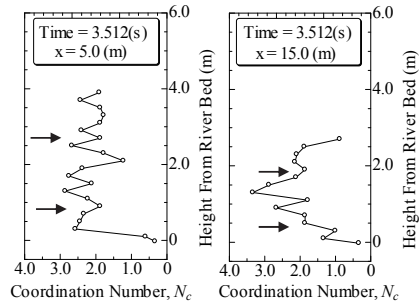


図-11 平均配位数 N_c の深度分布

したがって、粒子流れでは深さ方向に統一した構成モデルを考えるというよりも、粒状体のせん断と粒子間の衝突が、流れの境界条件 (自由表面の存在、河床条件) に応じて深さ方向に発生していると捉える方が合理的と考えられる。この場合、限界状態の概念を持つモデルを用いることが有用と考える。

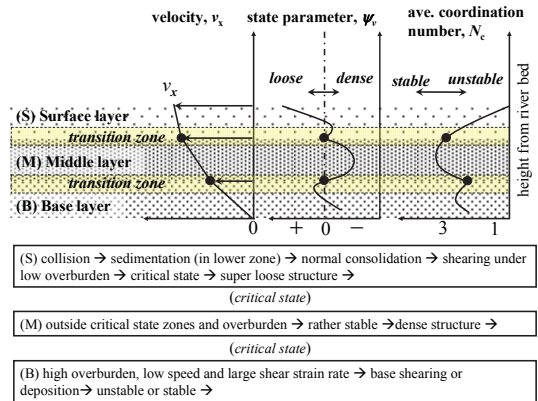


図-12 粒子流れ中の三層構造：速度、state parameter、平均配位数の深度分布の概念図

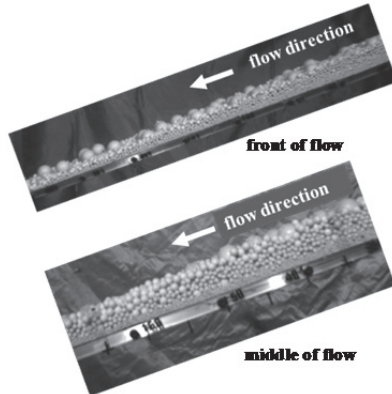


図-13 模型実験による流れの先端と中腹の分級の様子

2.4 広範な粒度の流れ中の分級

図-13に、良配合試料(直径3, 6, 10, 30mm)の模型実験において、流れの先端部での大径粒子の集積、中腹部での河床付近から表層に向けて粒径が大きくなる大径粒子の浮き上がり現象が起きている。図-14には、粗な河床で傾斜角が安息角の20度に等しい場合において、メッシュごとの粒度分布を調べた結果を示す。流れる前の試料の粒度分布を太い実線で示し、流れの中腹、流れの先端部について調べている(それぞれ、●:上層部, △:中央部, □:下層部)。実験と同様に、流れの先端部では大きな粒子ばかりで、小径粒子はほとんど無い。流れの斜路中腹では河床から表層にかけて粒径の大きい粒子の割合が多くなる。また、著者らは同様の解析を3次元においても同様の傾向を確認している。

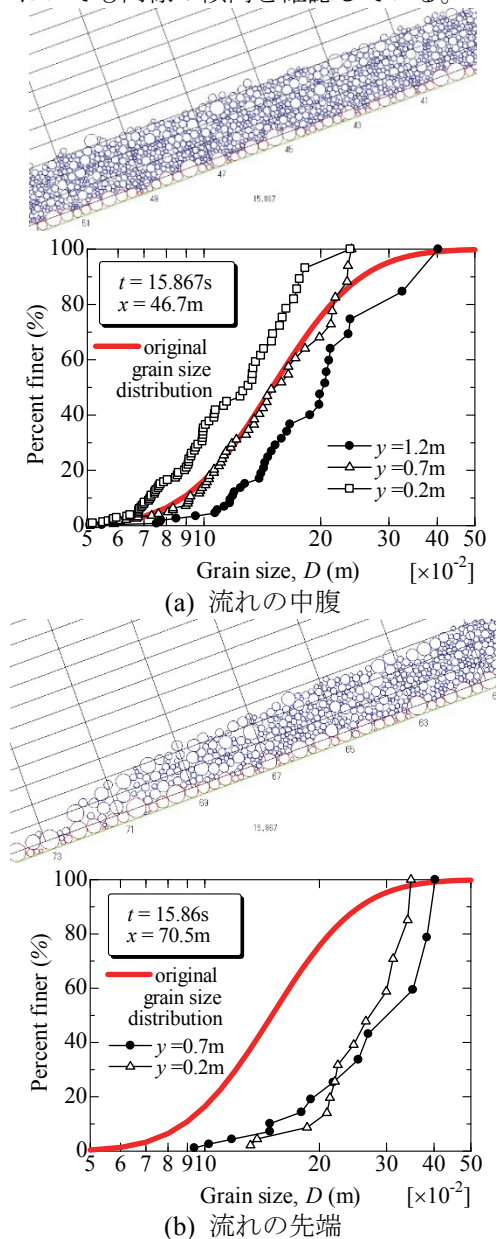


図-14 DEMによる流れと分級の様子 ($R_D=10$, 傾斜角20度=安息角20度, 粗な河床)

図-15, 16には、それぞれ、急傾斜の30度と緩傾斜の10度の結果を示しているが、いずれの場合も大径粒子の浮き上がりが生じていない。急傾斜30度(図-15)の場合には流れ中に大きな間隙があることがわかる。急傾斜の場合には流速が大きいため流れ全体が表層S層になっており、大径粒子が沈んでしまうと考えられる。図-17は滑らかな河床の場合、河床底面で発揮されるせん断応力が極端に小さく、分級は生じていない。

図-18に、粒子単位の応力分布を示す。大径粒子が浮き上がる状態B,Fでは河床からの伸びた複数の応力鎖が大径粒子に下部から達して押し上げている。一方、状態Dでは大径粒子下部の応力鎖が消失しており下部からの支えが無い。さらに、図-19(a,b)はそれぞれ、流れ前の試料箱内の試料および大径粒子が浮き上がる状態Bのときの粒径ごとの配位数を調べた。ただし、配位数の内、各粒子の中心を通る河床に平行な線より上側の配位数 $N_{cf(above)}$ と下側の配位数 $N_{cf(below)}$ に分けて検討した。状態Bでは、全粒径に対して配位数は減少しているが、50mmを超える大径粒子では下側からの配位数が顕著に増加し、上側からの配位数は減少している。よって、大径粒子の浮き上がりが生じるには、適切な流速を発生するために河床の傾斜角が安息角付近であること、河床から応力鎖が発達するための河床粗度であることが必要である。河床付近で発達した応力鎖が表層方向に伸び、大径粒子に応力集中することで押し上げ作用が発生する。また、適切な流速が生じることで表層が十分に緩い状態になり大径粒子の浮き上がりを妨げないことが必要である。以上のメカニズムをイラストにまとめたのが図-20である。

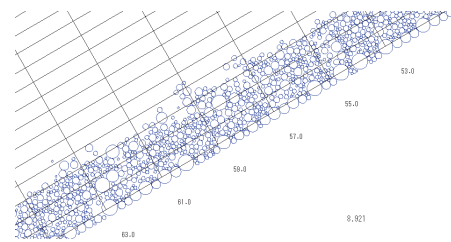


図-15 DEMによる流れと分級の様子 ($R_D=10$, 傾斜角30度>安息角20度, 粗な河床)

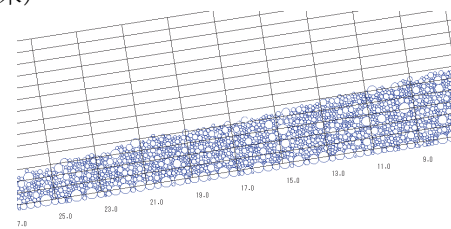


図-16 DEMによる流れと分級の様子 ($R_D=10$, 傾斜角10度<安息角20度, 粗な河床)

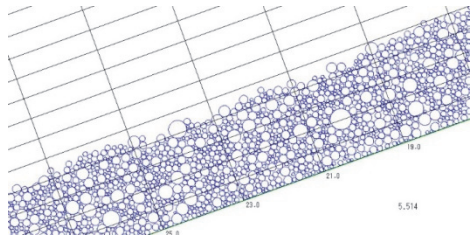


図-17 DEMによる流れと分級の様子 ($R_D=10$, 傾斜角 20 度=安息角 20 度, 滑らかな河床)

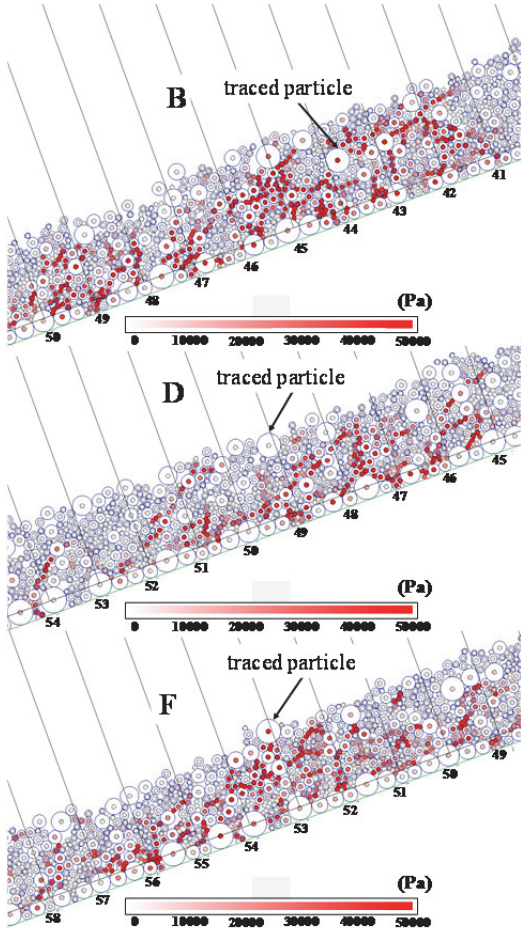


図-18 DEMによる流れ中の応力鎖 ($R_D=10$, 傾斜角 20 度=安息角 20 度, 粗な河床) (図-14 に対応) : 応力鎖 (unit: Pa)

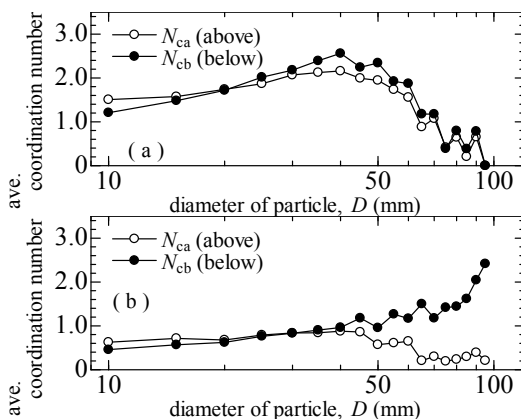


図-19 DEMによる流れ中の粒子上部と下部部の配位数 ($R_D=10$, 傾斜角=安息角 20, 粗な河床) : (a)流動前 ; (b)図-18 の状態 B

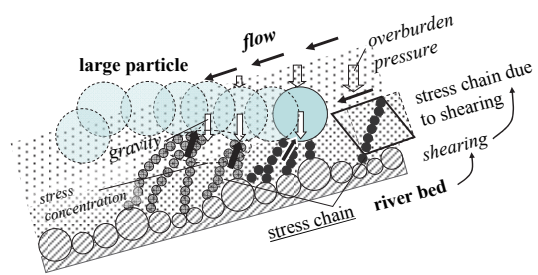


図-20 応力鎖に着目した大きな粒子の浮き上がり機構

5. 主な発表論文等

- 1) Weijie ZHANG and Kenichi MAEDA. Numerical simulations of slope and levee failure under heavy rainfall using the three-phase SPH model. Journal of Japan Society of Civil Engineers, A2, 70(2), 483-494.2014.
- 2) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動に関する DEM 解析, 土木学会論文集 A2, Vol.70, No.2, I_495-I_506, 2014.
- 3) 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2, I_507-517, 2014.
- 4) 前田健一: 総説、粒子を要素とする数値解析手法への期待と課題, 地盤工学会誌, Vol.62, No.11/12, pp.6-pp.9, 2014.
- 5) 前田健一: DEM の基礎・特徴および斜面災害解析の応用例, シリーズ「土砂災害に関する離散体・流体解析手法と応用例」, 砂防学会誌, Vol.67, No.5, pp.64-70, 2015.

[雑誌論文] (計 10 件)

[学会発表] (計 15 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

研究室ホームページ

<http://www.maeda-lab.org/>

平成 27 年 砂防学会論文賞受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 健一 (MAEDA, Kenichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50271648

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

(なし)