

平成 21年 6月 3日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560482

研究課題名(和文) 粒状体斜面の崩壊流動機構に関する研究

研究課題名(英文) Mechanics of rapid flowing granular materials

研究代表者

岩下 和義 (IWASHITA KAZUYOSHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40203377

研究成果の概要：

粒状体斜面が高速流動に移行する課程を高速せん断実験と数値実験により再現した。その結果、粒子からなる微視的構造が崩壊する際に粒子回転が生じる、微視的構造のサイズは流れが遅いと大きくなるが流れの密度の影響は受けない、粒状体斜面の崩壊解析より粗い床面では粒子流の全層で粒子間の衝突や転がりで運動量が消散されるが滑らかな床面では粒子群のなかのある層のみがせん断帯として変形しその内部で粒子回転が卓越していることが確認された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	390,000	2,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤工学、自然災害、土砂災害、斜面崩壊、粒状体、マイクロメカニクス

1. 研究開始当初の背景

従来、土構造物は壊れてはならないという前提で議論され、その安定問題は土質力学において今なお最大の関心事である。しかし、現実には地盤の破壊は毎年繰り返され、破壊後の流動や大変形による大被害が後を絶たない。また耐震設計思想の変化に伴い、土構造物の地震時変形予測手法の開発が期待されている。このためには、土の降伏後の挙動、すなわちせん断帯に沿い準静的なすべりが生じ、高速な流れへと移行する挙動を粒子レベルで正確に把握することが重要となる。こ

の移行現象は、土砂流の制御や被害の軽減を考える技術者にとりきわめて重要である。これが本研究提案の動機である。

土の破壊現象は、土質力学において今なお研究され続けている。しかし不思議なことに、破壊後に起こる高速流れの問題には、ほとんど関心が払われて来なかった。一方、分子運動論との類似に着目した米国の研究者を中心に高速流れの理論構成が構築されつつある。当研究グループでも、この問題を明らかにするために粒状材料の高速せん断流れ実験装置を開発し、単純な場合での流れの

内部構造や、準静的流れから高速流れへの移行の際に衝突機構がどのように変化するかといった基礎的なデータを測定し、構造を解明し始めた。具体的には、粒状体が準静的流れから高速流れに移行する際の微視的変形機構を解明するために、高速せん断試験装置を開発し、流れで生じる応力の測定を行い、ある程度密な粒子流においては、流れで生じる応力がひずみ速度が遅くなるのに応じて、2乗に比例する関係かられていくという測定結果を得た。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究の目的を、静止した土（粒状体）からなる斜面が破壊（準静的流動）し、高速流動に移行するまでの現象を高速せん断試験と数値実験により粒子レベルで捉え、流れの構造を解明することに置き、以下の3つを主な研究課題とする。

- 1) 2次元高速流れ実験装置を用い粒子運動、特に従来の実験では調べられていない粒子の回転運動を測定する。
- 2) 個別要素法をベースに数値実験手法を適用し、1)の実験を模擬する試験を行い粒子の運動を再現する能力について解析精度を検証する。
- 3) 粒状体からなる斜面問題の数値実験を行い、静止した粒子群が準静的流れを経て高速流れへ移行する際の微視的構造の変化を調べる。斜面の斜度や粗度、粒子の転がり摩擦や反発係数等のパラメータが流れに与える影響、例えば流れ始めた粒子が再び静止する条件を調べる。

3. 研究の方法

1)については、粒子運動を追跡するために、プラスチックの円盤粒子を用いた高速せん断試験を行った。Fig.1 に実験装置の概要を示す。本装置は従来の装置に比べ、粒子運動は間隙に液体の影響が入らない、すべての粒子の運動を観察することができるという利点を持つ。粒子は内壁と外壁との間に充填され、内壁がモータで駆動され固定された外壁との間でせん断流れを生じさ、透明な上蓋を通して粒子運動を測定できる。

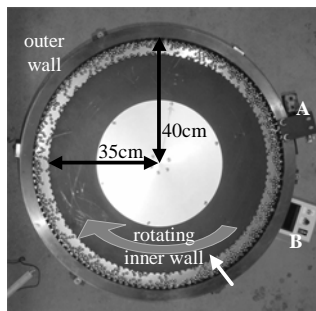


Fig. 1 実験装置（A せん断応力測定装置、

B モータ制御装置）

粒子には2点に●印のマーカを付け、高速ビデオカメラにより動画像を録画した。録画をPTVソフトウェアにかけて、各マーカの時々刻々の2次元的位置を測定し、それより粒子重心の移動と重心周りの回転を求めた。

2)については、通常の個別要素法(DEM)と転がり抵抗を扱える修正個別要素法(MDEM)の両方を用いた。2次元プログラムを用い実験に合わせた同心円状の境界条件を与え、実験に用いた粒子と同じ半径の円柱粒子を用い、各粒子の持つ自由度は面内併進運動2成分と面内回転1成分の計3自由度とした。

3)の、斜面流れの数値実験における初期条件の一例を Fig.2 に、数値実験の各種パラメータを Table. 1 に示す。粒子を Fig.2 のように配置した初期状態を用意し、全体をある角度で傾けることで斜面流れをシミュレートした。斜面左側と右側は周期境界となっている。傾けた角度は16~27度とし、実際には全体に働く重力加速度を想定した角度の斜面となるように鉛直成分と水平成分に分解して重力を与える方法で与えた。最下層の粒子は他の粒子と同じ物理特性を持たせた粒子だが、床面粒子として固定されている。床面の粗度の影響を見るために3種類の床を用意した。粒子半径分ずつ粒子を配置した床面、粒子直径分ずつ、粒子の半径+直径分ずつ粒子を配置した床面で、順に滑らかな床面から中程度の粗度、粗い床面となっている。こうすることで継続した斜面流れをシミュレートできる。これらの条件で、床面の粗度、斜面の角度をさまざまに変化させ、さらに粒子間の動摩擦係数、ダッシュポット係数、要素間のモーメント抵抗のパラメータを変化させ数値実験を行った。

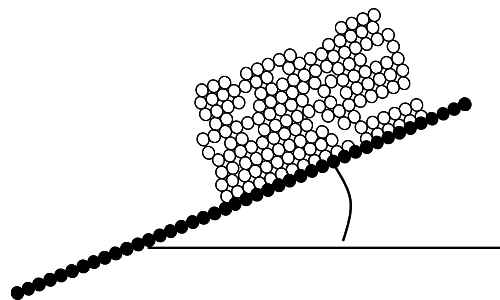


Fig.2 斜面崩壊モデル

Table 1 斜面崩壊モデルパラメータ

要素直径 D	23 (mm)
要素奥行き t_c	6 (mm)
時間増分 Δt	7.0×10^{-7} (sec)
総ステップ数	約 2.0×10^7 回 (= 約 14 秒間)
法線方向バネ定数 k_n	9.85×10^8 (N/m)
接線方向バネ定数 k_s	2.82×10^7 (N/m)
接点の回転バネ定数 k_r	700.0 (Nm/rad)
接点の回転ダッシュポット定数	1.00×10^{-2} (Nm sec/rad)

4. 研究成果

1)の高速せん断装置を用いて密な流れを対象とした実験を行ったところ、せん断ひずみ速度が低いと流れが瞬間的に脈動し、詰まったり流れたりする過渡的な状況を再現することが出来た。動画解析の結果、粒子が示す移動速度と粒子回転を測定した結果を Fig.3 に示す。図よりターゲットとしている粒子が複数の粒子からなる微視的構造(クラスターもしくは柱状構造)に取り込まれると粒子は拘束され速度も回転も止まり、微視的構造がバックリングにより崩壊すると、粒子回転が急に生じていることと、拘束がはずれ自由になった粒子が速度を持つことが読み取れる。これより粒子回転を動画解析で計測できることと、密な粒状体において微視的構造の崩壊時に粒子回転が大きな働きをしていることがわかる。

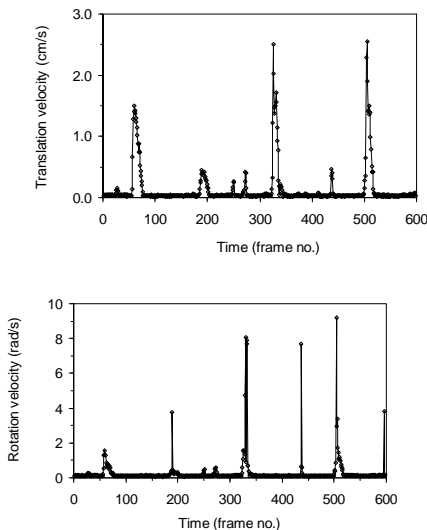


Fig.3 密な粒子流れにおいて粒子が示す移動速度：絶対値(上)と回転量(下)の変化

Fig.4 に追跡した粒子の持つ並進運動エネルギーと回転エネルギーの時間変化を示す。やはり2つのエネルギーとも微視的構造が崩壊したときに同時に大きくなっていることがわかる。なお流れ全体でのエネルギーの釣り合いおよびエネルギーの流れについては、計測できた粒子の個数が十分でなく、並進運動エネルギーと粒子回転エネルギーの割合を追跡する事は出来なかった。

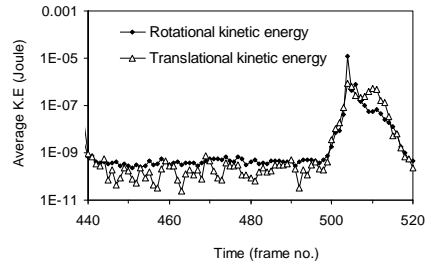


Fig.4 1粒子での運動エネルギー配分

Fig.5 に動画解析より得られる粒子接触時間を元に、瞬間的に形成される粒子クラスターや粒子の柱状構造に含まれる粒子の平均数とせん断ひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) と流れの密度 (ν^*) との関係を示す。この図より流れが遅くなるのに従い、瞬間的に形成される微視構造を形成する粒子数が増えていくことが読み取れる。それに比べて流れの密度は形成される微視的構造の大きさにはあまり影響を与えていないように見える。微視的構造が形成されると流れを止める効果があるため、例えば粒子斜面が流れ始めるか静止したままでいるか、及び粒子流が流れたままでいるか止まるか、という土砂等の移動量機構と関係していると思われる。

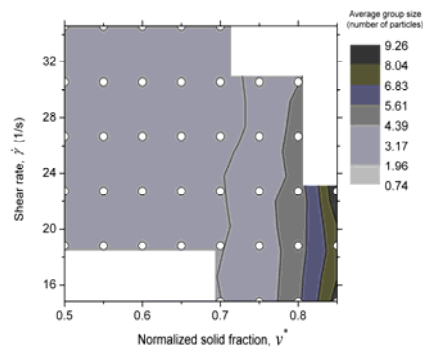


Fig.5 形成される微視的構造の大きさ

2) については、個別要素法解析の結果、粒子の流れはほぼ再現できることを確認した。計算した流れで発生する応力は、どのひずみ速度領域でもひずみ速度の2乗に比例するという関係であったが、高速せん断実験で求められた結果は、ある程度密な粒子流で

は流れで生じる応力がひずみ速度が遅くなるのに応じて2乗に比例する関係かられていく、という関係であった。今後数値解析に不足している機構を明らかにする必要がある。

3)については、床面が粗いほど流れ続ける境界となる最小の斜面角度は大きく、滑らかなほど小さいという結果が得られた。床面が粗い場合と滑らかな場合とでの流れ内での Granular temperature、粒子速度分布、粒子回転速度分布を Fig.6 と 7 に示す。横軸が時間、縦軸が床面からの位置を示している。赤いほど大きな値を示し、青いに近づくほど小さな値を示す。Fig.6 では、粗い床面の流れの場合、Granular Temperature は上層から下層へ減少していくのがみられ、今回行ったせん断流れの結果と似かよっている。同様に粒子速度分布、回転速度分布も上層から下層へ大きな値から小さな値へ変化している。粒子流の全層で粒子間の衝突や転がりによって与えられる運動量が消散されていることが確認できる。一方 Fig.7 の滑らかな床面の流れの場合、Granular Temperature はあまり大きな値とならず、粒子速度分布をみると高さ方向に一定の値となっている。回転速度分布を見ると、最下層に回転速度のピークが集中しているのがわかる。以上から、床面が滑らかな場合、粒子群のなかのある層のみが回転し、その上層の粒子は一塊となってブロック状に移動する流れがあらわれることが確認できる。この場合、運動量の消散は回転を受け持っている層の周辺のみでおこなわれることになる。以上から、床面が粗いか滑らかかで粒子流れの形態に大きな差があることが予測される。とくに滑らかな場合、緩やかな角度で流れ続け、しかもエネルギーの消散があまり期待できないということを注視しておきたい。斜面崩壊や土石流、岩屑流による大きな被害の原因がここにあるのかもしれない。

粒子間の摩擦、反発係数、転がり摩擦を左右するパラメータ、動摩擦係数、ダッシュポット係数、要素間モーメントのパラメータが、流れをどのように変えるのか調べたところ、斜面の角度が増すと流れやすくなり、ストップしていた動摩擦係数でも流れ続けるように、さらに粒子が加速して流れていくと変化し、粒子間の動摩擦係数は斜面の粗度には関係なく、摩擦が高ければ流れにくく、低ければ流れやすいという傾向が現れた。床面の粗い場合には、ダッシュポット係数を大きな値にすると流れが止まる傾向が見られるが中間の粗度、滑らかな床面の結果ではダッシュポット係数による傾向ははっきりせず、斜面の角度増加の影響が大きい。ダッシュポット係数は粒子間衝突の反発係数と関係がある。そのことから床面が粗い場合には、

粒子は長い時間をかけた接触や粒子表面をなめるような転がりではなく、本研究の実験のような衝突を伴って粒子が斜面を流れていると考えられる。また要素間モーメントのパラメータの増加によって粒子が流れにくくなる傾向がみられる。要素間モーメントのパラメータは粒子間の転がり抵抗と関係があり、値が大きいほど粒子表面を転がりにくくなる。滑らかな床面の場合、最下層の粒子が回転することで上部層の粒子群をブロック状に運動させている。粒子間の転がりが抑制されると回転が抑制され、流れにくくなる。床面が滑らかな場合には粒子間で転がりやすいかどうか斜面流れに影響を与えることが確認できた。

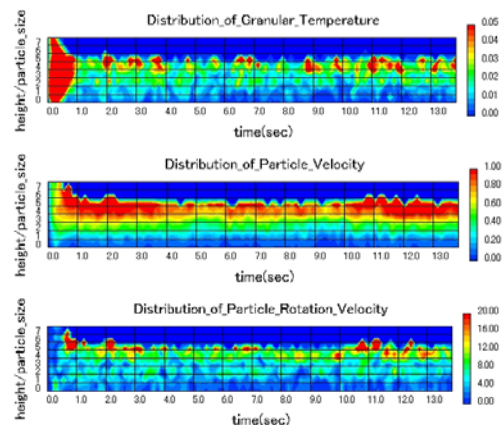


Fig.6 流れ内での Granular temperature、粒子速度分布、粒子回転速度分布（粗い床面で 27° の場合）

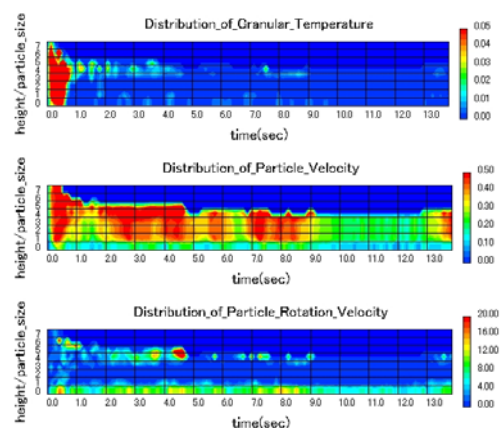


Fig.7 流れ内での Granular temperature、粒子速度分布、粒子回転速度分布（滑らかな床面で 18° の場合）

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Suzuki, J.P., Bardet, M. Oda, K. Iwashita, Y. Tsuji, T. Tanaka and T. Kawaguchi, Simulation of upward seepage flow behavior using one-column model by DEM taking an interaction with fluid into account, J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Volume 133, Issue 1, pp. 104-109, 2007, 査読有
- ② 一場勝幸, 岩下和義, 小田匡寛, 高速せん断を受ける円盤粒子流に生じるせん断応力の特性, 土木学会論文集, 土木学会論文集 C, Vol. 63 No. 3, pp. 763-771, 2007, 査読有
- ③ S. Dhakal, K. Iwashita and M. Oda: Detecting collisions and finding contact durations in experimental granular flow, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Volume 11, pp. 477-486, 2008, , 査読有
- ④ Minh, N.H., Oda, M., Suzuki, K. and Kurukulasuriya, L.C.: Modeling of microstructural evolution to simulate undrained shear strength variation of Kaolin clay, *Journal of Applied Mechanics, JSCE*, Vol. 11, pp. 389-398, 2008, 査読有.
- ⑤ Suzuki, K., Yanagisawa, E. and Odajima, M.: A constitutive model of sand with inherent transverse isotropy, considering effects of b values, *Australian Geomechanics*, Vol. 43, No. 4, pp. 89-98, 2008, 査読有.
- ⑥ Mahmood, S. Dhakal & K. Iwashita, Measurement of particle dynamics in rapid granular shear flows, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Volume 135(4), pp. 285-294, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 2 件)

- ① Alim, M. A., Suzuki, K. and Iwashita, K., Effects of confining pressure on the strength behaviour of granular material simulated by the discrete element method, Proceedings of the Tenth International Association for Engineering Geology and the Environment Congress, 1-4(CDROM), 2007.9.10, 埼玉大学.
- ② Jha, S. K., Suzuki, K. and Oda, M.: Reliability based design safety factor for soil liquefaction, Proceedings of the Tenth International Summer

Symposium, pp.93-96, 2008.9, 埼玉大学.

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩下 和義 (IWASHITA KAZUYOSHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 40203377

(2) 研究分担者

鈴木輝一 (SUZUKI KIICHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70282423

(3) 連携研究者