

粒状体の準静的流れから高速流れへの移行に関する数値解析的研究

Numerical simulation on rapid flow of granular materials

岩下和義*, 小田匡寛*, 鈴木輝一*

Kazuyoshi IWASHITA, Masanobu ODA and Kichi SUZUKI

To study the micro-mechanics of rapid flow of granular material, apparatus was newly designed to generate two-dimensional flow in a laboratory. At same time, numerical simulation based on Distinct Element Method (DEM) was also performed to get the detailed data those are difficult to measure in the laboratory test. By comparison with previous results and experimental results, accuracy of the numerical simulation is investigated.

Keywords: DEM, granular flow, shear stress, micro mechanics, rapid flow, quasi-static flow

構造物は、壊れてはならないとの前提で設計される。しかし現実には、土構造物の基礎地盤の破壊は毎年繰り返され、流れる土砂は土木構造物に大きな被害を及ぼし続けている。この事実は、破壊後の土の挙動がいかに重要であるかを示している。土の破壊は、せん断帯に沿う準静的な滑りから始まり、条件によっては高速な流れへと移行する。この移行現象は、土石流の制御や被害の軽減を考えなければならない技術者にとって、きわめて緊急かつ重要な課題であると言わざるを得ない。また粒状物質の流れの問題は、粒状物質を扱う他の分野において研究されている¹⁾⁻³⁾。例えば、粉体輸送における流れの制御、流れに伴う分級・混合作用等、二相混合流体の研究がそれである。本研究の目標は、土などの粒子材料の流動則すなわち応力 - ひずみ速度の関係を、変形速度が準静的から高速までの全領域において粒子レベルでの視点を踏まえて解明することである。

1. 解析モデル

粒子流のシミュレーションを行うために、スチールボールを用いた高速せん断試験を行った。⁴⁾ Fig.1 に実験装置の概要を示す。同時に2次元個別要素法 (DEM) をベースとしボール要素を用いた解析モデルによる解析⁵⁾を行った。Fig.2 に解析用モデルを示す。本実験装置は従来粒状体の高速流れの研究に用いられている装置¹⁾⁻²⁾に比べて以下の特徴を持つ。1)粒子は平面上を運動するため、重力が流れの応力にカウントされない。2)間隙に液体を用いないので、液体の運動の影響が入らない。3)流れの中で発生する垂直応力と水平応力の双方 σ 片方を測定することができる、4)すべての粒子の運動を観察することができる。

2. 測定結果

Fig.3 に両方の実験で測定された垂直及びせん断応力の値を示す。Fig.3 より実験と数値解析とで応力 - ひずみ速度関係が以下のように定性的に一致していることが確認される。すなわち、粒子流れが疎な場合 (低フラクション領域) では発生する応力は変形速度すなわち

*埼玉大学 工学部 建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering,
Faculty of Engineering, Saitama University, 255
Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570,
Japan

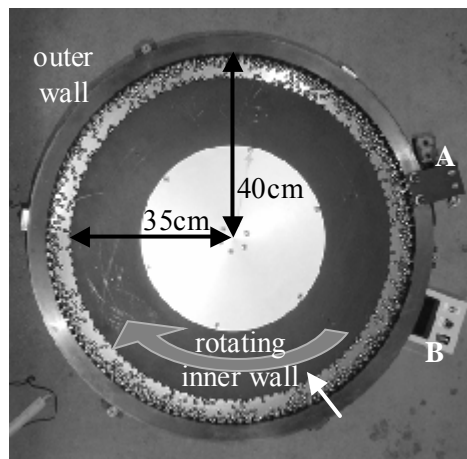


Fig. 1 Experimental apparatus.
A = shear stress measurement equipment, B = rotating velocity meter.

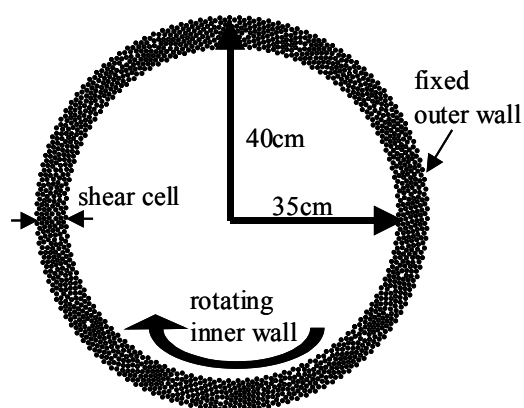


Fig. 2 Schematic view of the simulation.

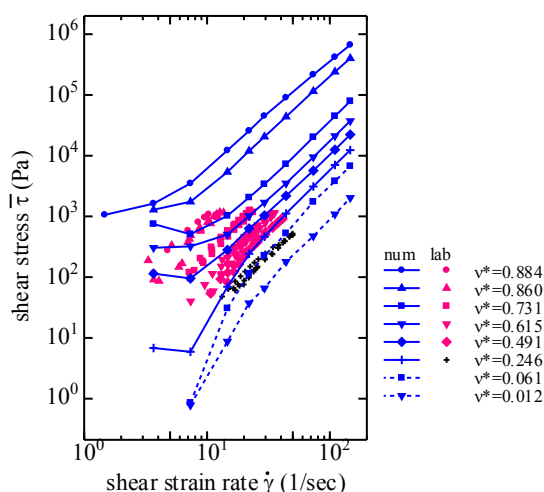


Fig. 3 Measured stress vs. shear strain rate.

せん断ひずみ速度の2乗に比例する関係を示すが、常時粒子が接触しているような密な流れ（高フラクシオン領域）においては、発生する応力はせん断ひずみ速度にはほとんど依存しないという結果である。この中間の密度領域での応力 - ひずみ速度関係は2乗からゼロ乗の間に

推移する過渡領域となっていることが確認された。またせん断応力と垂直応力の比である摩擦角がせん断ひずみ速度に依存していないことを示す結果が得られた。

3. 考察

実験においても個別要素法による数値解析においても粒子のせん断流れにおいて、フラクシオン（空間充填率）が低い場合には、流れで生じる応力はせん断ひずみ速度の2乗に比例する傾向が確認された。しかし、数値解析によるとフラクシオンが高くなるのにしたがい発生する応力はせん断ひずみ速度の2乗に比例する傾向からずれていき1乗に比例する傾向となり、さらにフラクシオンをあげると応力はひずみ速度に依存しない傾向を示すようになる。今後なぜこのような現象が生じるのか、粒状体の温度（granular temperature）^{3),4)}密度分布、速度分布、速度勾配を測定し、粒子の運動を高速ビデオカメラ及び数値解析で追跡することによって、準静的流れから高速流れへの移行を粒子レベルの微視的構造変化の観点で究明を図る予定である。

実際の粒子流れでは間隙の気体・流体の挙動及びそれらの相互作用が重要になると思われるので、間隙の気体もしくは液体の運動と固体との相互作用を考慮した二層系個別要素法の開発を進めている

参考文献

- 1) Bagnold, R.A. 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Royal Soc. Ser. A. 225: 49-63.
- 2) Hanes, D.M. & Inman, D.L. 1985. Observations of rapidly flowing granular-fluid materials. J. Fluid Mech. 50: 357-380.
- 3) Savage, S.B. & Sayed, M. 1984. Stresses developed by dry cohesionless granular materials in an annular shear cell. J. Fluid Mech. 142: 391-430.
- 4) 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/III-67、pp. 147-156., 2004.
- 5) Iwashita K., Ichiba K. and Oda M., Comparison between numerical and laboratory tests of rapidly sheared granular materials, Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods 2004, Shimizu, Hart & Cundall (eds.), pp. 429-434, 2004.