

三次元個別要素法による球形粒状体流れの数値実験モデルの構築

豊橋技術科学大学 学生会員 奥河 優斗 正会員 内藤 直人
正会員 三浦 均也 正会員 松田 達也

1. 研究背景と目的

斜面崩壊は、インパクトの大きな自然災害である。これに対し、人命、資産、重要構造物の保護、交通ネットワークの戦略的維持管理が必要である。斜面崩壊による土石の到達範囲を適切に予測できれば、経済的な対策工の提案が可能となる。斜面崩壊土石の到達範囲予測技術を高精度化するためには、粒状体流れの力学的特性を解明する必要がある。しかし、検討スケールや時間、方法等の様々な制約から実験的研究には限界がある。そこで、数値解析を併用して実験の実施や観測が困難な条件の検討を行うことが望ましい。本研究では、三次元個別要素法¹⁾ (Discrete Element Method, 以下 DEM) を用いて、流路条件を変化させた粒状体斜面流動実験²⁾を再現する数値実験モデルを構築すること目的とした。

2. 数値解析概要

三次元 DEM 解析³⁾では、球形粒子を用いて、粒子間の接触モデルに Hertz の接触理論と回転抵抗モデルを採用した。接触パラメータとして、ヤング係数、ポアソン比、摩擦係数、転がり摩擦係数、粘性係数を入力すれば、その他の解析パラメータは弾性論に基づいて機械的に算出される。ヤング係数とポアソン比は粒状体流動挙動に及ぼす影響が小さいことが知られているため、本稿では摩擦係パラメータと粘性係数の設定方法を提案する。

3. 実験概要

3.1 反発試験

粒子と壁要素間の粘性係数を設定するためにアルミナボールと流路を構成する各種素材との反発試験を実施し、鉛直反発高さを計測した。

3.2 ダムブレイク実験

摩擦係パラメータと粒子間粘性係数を設定するためにダムブレイク実験を実施した。図-1に示す奥行90mmの亚克力の箱に、斜面流動実験に使用する直径9mmと6mmのアルミナボールを質量比1:3の割合で混合したものを指定区間に堆積させた後、ゲートを瞬時に開放させることで粒状体挙動を確認した。底面は、粗度が小さい亚克力板の条件 (smooth) と直径3mmのアルミナボールを敷き詰めて固定した粗度の大きい条件 (roughness)

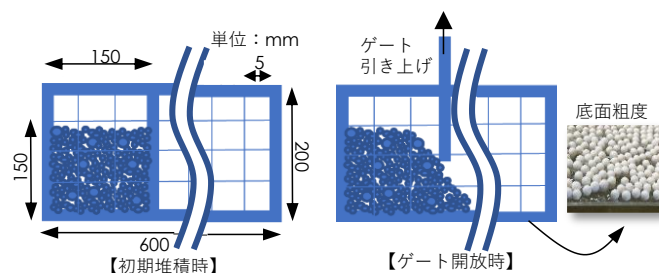


図-1 ダムブレイク実験概要

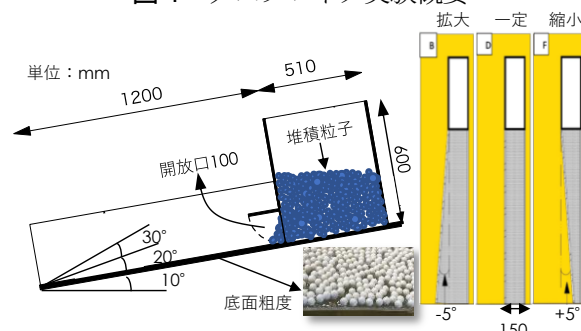


図-2 斜面流動実験概要

の2種類とした。実験動画をPIV解析して速度分布を取得した。

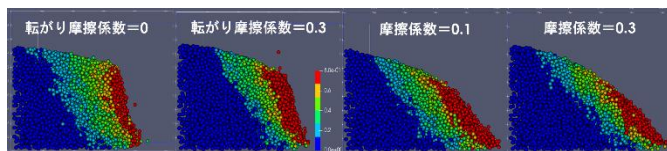
3.3 斜面流動実験²⁾

流路条件を変化させた斜面流動実験との比較により DEM 解析モデルの妥当性を確認する。図-2に示す水路を用いて箱の中に混合したアルミナボールを63kg堆積させ、ヒンジ型の開放ゲートを用いて試料を流動させる。水路の傾斜角度10, 20, 30°での水路幅一定の条件と、傾斜角度30°で水路幅拡大(+5°), 縮小(-5°)の計5ケースの実験を行った。流路底面はダムブレイク実験の粗度の大きい条件 (roughness) と同様である。

4. DEM 解析パラメータ設定

4.1 反発解析

反発試験の結果と同じ反発高さが得られるように解析による粘性係数を決定した。解析に使用した粒子の密度は $3600 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, ポアソン比は 0.24, ヤング率は $3 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$ と設定し、解析を行った。結果はアルミナボールの直径9mmとの粘性係数はそれぞれ、水路壁面 (木材) 0.425, 水路壁面 (亚克力) 0.586, 粗度底面 0.051 となり、直径6mmでは水路壁面 (木材) 0.492, 水路壁面 (亚克力) 0.697, 粗度底面 0.140 となり直径の小さいアルミナボールの方が反発する結果となった。



(a)粒子先端 50mm 到達時 (b)粒子先端 100mm 到達時
図-3 摩擦パラメータによる挙動の変化 (smooth)

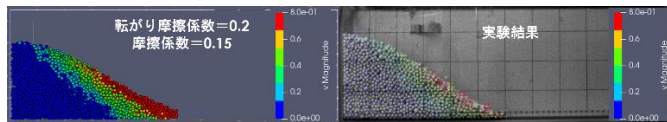


図-4 ダムブレイク実験と再現解析の比較 (smooth)

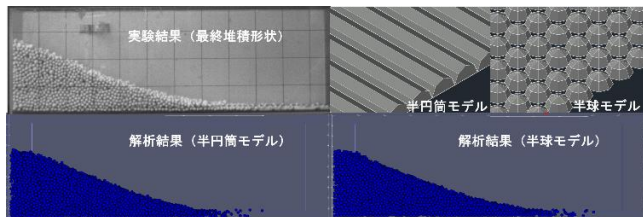


図-5 底面粗度が堆積形状に及ぼす影響 (roughness)

4.2 ダムブレイク解析

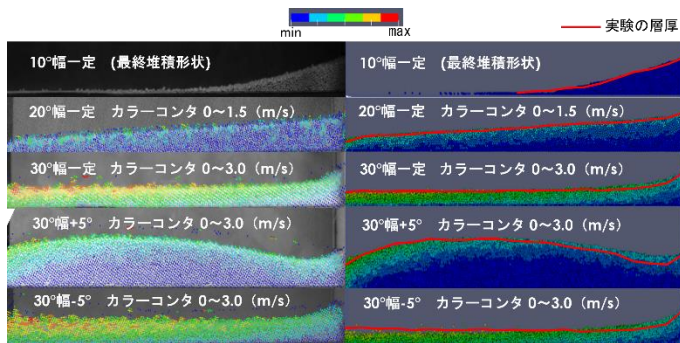
ダムブレイク実験の再現解析により、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数、粒子と壁要素間の摩擦係数、転がり摩擦係数を設定する。各パラメータの感度解析は底面粗度の小さい smooth 条件を対象とした (図-3)。

解析によって粒子間粘性係数と壁面摩擦はダムブレイク挙動に与える影響が少ないことが分かった。そのため粘性係数は反発試験結果の範囲から 0.35、壁面摩擦は 0.3 とした。図-3 から、摩擦系パラメータを大きくすることで流動中の粒状体内部の速度が抑えられ、堆積形状が急勾配になることが分かり、転がり摩擦はよりその傾向を顕著にした。パラメータ設定にはこの二つのパラメータのバランスが非常に重要であり、転がり摩擦を大きくしすぎると堆積形状が急になりすぎるため、粒子間摩擦でバランスをとる必要がある。以上より、図-4 に示す転がり摩擦係数を 0.2、粒子間摩擦係数を 0.15 とした解析が最も精度良く実験結果を再現することが分かった。

次に、smooth 条件で決めたパラメータを用いて、roughness 条件で解析を行った。底面には実験の底面を再現した半球モデルと半球モデルの形状を奥行き方向に延長した半円筒モデルの二種類を使用した。図-5 に示すように両モデルとも実験を再現するものの、半円筒モデルの解析所要時間は半球モデルの 1/6 であるため、底面粗度モデルには半円筒モデルを採用することとした。

5. 流路条件を変化させた斜面流動実験の再現解析

反発試験とダムブレイク実験を基に設定したパラメータを用いて、斜面流動実験の解析再現を行った。図-6



(a) 実験結果 (b) 解析結果
図-6 斜面流動実験と再現解析の比較

は各ケースの定常状態を示しており、傾斜角 10° 以外のケースでは速度分布も示している。図の左列が実験結果、右列が解析結果である。傾斜角 10° では粒子が水路終端まで流れずに安息角を形成して堆積し、解析も同様の結果が得られた。傾斜角 $20^\circ, 30^\circ$ のケースに共通して、PIV 画像は飛散した粒子の周辺の部分にも速度を表示してしまうことを加味すれば、粒状体流れの速度分布を精度良く再現できている。さらに、カメラの撮影角度を考慮し、また表層部分に点在する飛散粒子を除いた層厚分布を図-6 の右列に赤色実線で示している。これより、本解析モデルは流路形状を変化させた粒状体斜面流動実験の層厚分布及び速度分布を精度良く再現可能と言える。

6. 結論

本研究では、斜面上の粒状体流れの力学的特性を解明するための第一段階として、三次元 DEM を用いた粒状体流れの数値実験モデルの構築を目的に、解析パラメータ設定方法を示し、その妥当性について検討した。

その結果、粒状体の流動挙動には転がり摩擦係数と粒子間摩擦係数が大きく影響し、この二つのパラメータのバランスが重要であることを示した。また、ダムブレイクのような単純化された実験を基に設定された解析パラメータは、斜面流動実験のような実際の斜面崩壊に近い条件の実験の再現にも有効であることが分かった。

本研究で構築した粒状体流れの数値実験モデルを用いることで、実験では実施困難な多様な条件の検討や流れの内部構造の観察が可能となり、粒状体流れの流動堆積メカニズムの解明に貢献できる。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and O. D. L. Stack.: Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 2) YANG SOMBATH: 豊橋技術科学大学卒業論文, 2022.
- 3) Kloss, C., and Goniva, C. 2010. Proc. of the 5th Int. Conf. on Discrete Element Methods. pp. 25-26.