

京都大学工学部地球工学科 学生員 田中 龍太郎
 京都大学大学院工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

既往の SPH 法型弾塑性モデルに基づく土砂変形モデルを用いた洗掘解析では、その多くが二次元で行われており、三次元計算への適用性は十分に検討されていない。そこで本研究では、今後実施予定の三次元洗掘解析のために、既往の研究で開発された二次元の粒子法型弾塑性モデルを三次元化し、砂柱崩壊の実験¹⁾を対象に三次元数値シミュレーションを行いモデルの適用性を検討した。

2. 数値解析手法

本研究では SPH 法に基づく弾塑性モデルを用いて計算を行った。弾塑性体の支配方程式として連続式と運動方程式、応力-ひずみ関係式を用いた。弾塑性モデルの計算では、全ひずみは弾性ひずみと塑性ひずみの和で表され、降伏条件として Drucker-Prager 条件を用いる。高精度化手法として、GC 法、DS 法、MLS 密度平均³⁾を導入した。時間発展法は Euler 陽解法を用いた。

3. 数値シミュレーション

3.1. 砂柱崩壊解析

(1)円柱型砂柱崩壊解析の概要

Warnett et al.¹⁾の実験を対象に数値シミュレーションを実施した。初期条件を図1に示す。計算の初期状態での砂柱半径は $r_0=0.04\text{m}$ で、粒子径は $d=0.002\text{m}$ とした。

(2)数値シミュレーション結果

図2に、 $r_0=0.04\text{m}$ の条件でのアスペクト比ごとの堆積形状について、 r_0 で除して無次元化した堆積形状を実験値と比較して示す。堆積域の外縁の位置に関しては、計算値は実験値と良好な一致を見せているものの、中央部分の高さについては計算値が実験値よりも大きくなっており、また、中央部分から外縁に至るまでの斜面勾配についても計算値が実験値と比較して急変していることがわかる。

図3は $a=0.47$ 、 $r_0=0.08\text{m}$ における計算結果の中央断面における鉛直応力分布である。応力は、最高値を

600N/m^2 、最低値を 0N/m^2 として出力した。十分に時間が経過した後の鉛直応力分布であるので、最も堆積高が高い中央の最下部で応力が最大となることが期待されるが、図3ではそのようになっておらず、中央から少し外側の下部で鉛直応力が最大となっており、応力評価が正しくなされていないと考えられた。

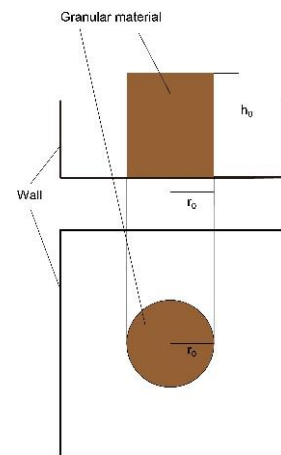


図1 計算の初期条件

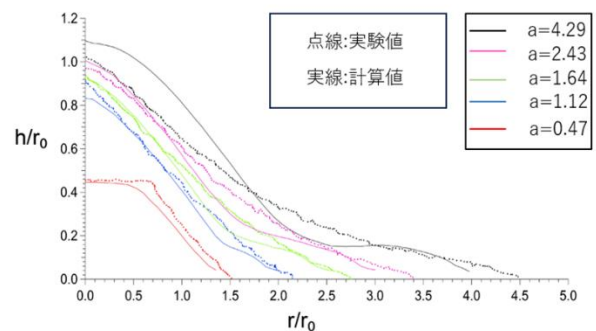


図2 $r_0=0.04\text{m}$ における異なるアスペクト比での最終堆積形状の比較

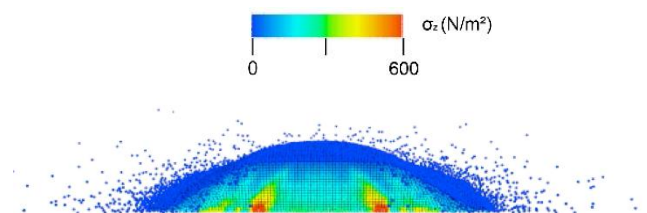


図3 $r_0=0.08\text{m}$ 、 $a=0.47$ での鉛直応力分布

3.2. モデルの修正を加えた砂柱崩壊計算

(1) 数値シミュレーション概要

前節の結果を受け、モデルの修正として高次の時間発展法である Leap-frog 法の導入を行った。修正プログラムを用いて、図 3 と同様の $a=0.47$, $r_0=0.08\text{m}$ の条件で計算を実施した。さらに修正モデルの検証として、Hung²⁾ の崩壊実験結果と数値シミュレーション結果の比較を行った。本実験では、図 4 に示すように、幅 0.35m、長さ 0.4m、高さ 0.2m の直方体の砂柱を、ゲートを引き上げることで崩壊させた。計算粒子径は $d=0.002\text{m}$ とした。

(2) 数値シミュレーション結果

図 5 に修正後のプログラムを用いた円柱型砂柱崩壊の計算結果を示す。斜面部の底部近傍で応力がわずかに高くなる箇所は見られるが、砂柱中央最下部において最も応力が高くなるような分布となっており、図 3 に比べてより物理的に妥当な結果が得られたと言える。

図 6 に角柱型砂柱崩壊計算の最終堆積形状の計算結果を実験結果と併せて示す。図 6 からわかる通り、斜面崩壊法先的位置が実験値と比べると解析結果では若干図面左側に存在するものの、堆積形状の概形は良好に一致しており、斜面崩壊法肩の位置もおおむね一致していることがわかる。

図 7 に最終堆積形状における鉛直応力分布のスナップショットを示す。本実験においても、壁面近傍にてわずかにノイズが生じているものの、修正プログラムでは滑らかかつ物理的に妥当な応力分布が得られていることがわかる。

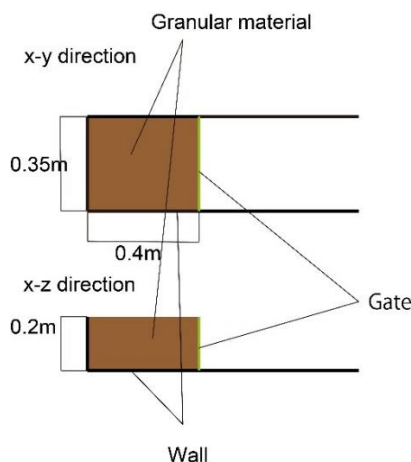


図 4 Hung²⁾の実験の初期条件

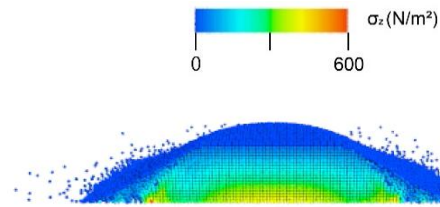


図 5 $r_0=0.08\text{m}$, $a=0.47$ での鉛直応力分布(修正プログラム適用)

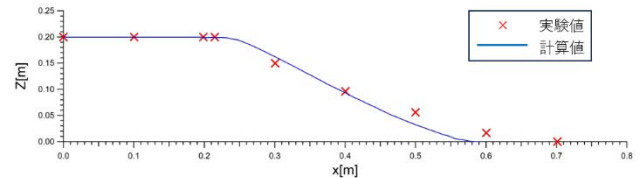


図 6 角柱型砂柱崩壊実験および解析における最終堆積形状の比較

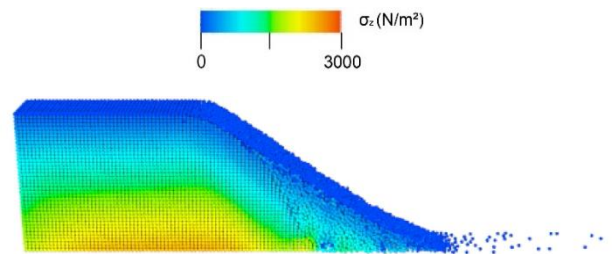


図 7 角柱型砂柱崩壊解析の計算結果

4. おわりに

本研究では、SPH 法型弾塑性モデルを用いて、三次元空間で砂柱崩壊の数値シミュレーションを行った。円柱型および角柱型の二種類の砂柱崩壊過程を数値モデルで計算し、既往の実験結果との堆積形状の比較や、応力空間分布を調査することによってモデルの妥当性を検証した。Leapfrog 法を導入した修正モデルでは、より適切で滑らかな応力分布が得られるようになった。しかし、応力ノイズの発生や、堆積形状における実験結果との一部不一致の課題が残っているため、今後はモデルの更なる改善を目指すとともに、種々のシミュレーションから、モデルの適用性についてさらに検討を深めていきたい。

参考文献

- 1) J.M. Warnett, P. Denissenko, P.J. Thomas, E. Kiraci, M.A. Williams. Scalings of axisymmetric granular column collapse, *Granular Matter*, Vol.16, pp.115–124, 2014.
- 2) O. Hung. Simplified models of spreading flow of dry granular material, *Can. Geotech. J.* Vol.45, pp.1156–1168, 2008.
- 3) 後藤仁志: 流れの方程式, 森北出版, p.551, 2022.