

個別要素法を用いた土砂流動解析における 要素の大きさや形状の影響

○東北大学工学部	学生員	蛭間 雄大
東北大学大学院工学研究科	学生員	橘 一光
東北大学災害科学国際研究所	正 員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正 員	高瀬 慎介
東北大学災害科学国際研究所	正 員	寺田 賢二郎
東北大学大学院環境科学研究科	非会員	村松 真由

1. 序論

個別要素法（DEM:Discrete Element Method）¹⁾は、離散体モデルに基づく手法であり、大変形問題や流動問題に適応可能であることから、土砂流動シミュレーションに適用するケースが増えてきている。しかしながら、実現象に対する表現精度の観点から、どの程度の要素サイズや形状の再現精度が必要であるか明確な基準が存在しない。そこで本研究では、過去に実施された砂の流動実験の再現解析を行うことにより、要素サイズと形状が解析結果に与える影響を調べた。

2. 模型実験の概要

本研究で再現解析の対象とした模型実験は、Denlinger と Iverson²⁾によって実施されたものである。図-1に示すように模型斜面の傾きは31.4°であり、斜面と水平面は半径10cmの円弧で接続されている。体積290cm³、乾燥密度1.6g/cm³、土粒子密度2.65g/cm³の砂を流動させ、時間ごとの砂の距離と厚さを測定し、図-2のような結果が得られている。なお、実験で用いられた砂の粒径は、0.5mm以下に揃えられていたことが報告されている。

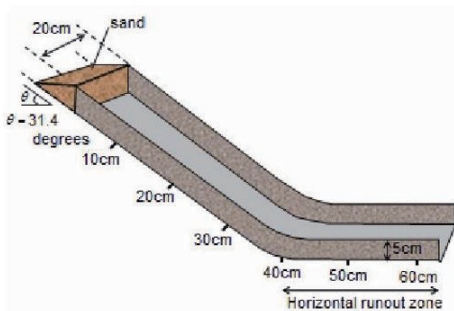


図-1 模型実験のイメージ

3. 再現解析

本研究では、球要素を基本とする個別要素法を用いて模型実験を再現した。再現解析に用いる粒子数は、実験の条件より得られる全粒子の体積が等しくなるように定めた。

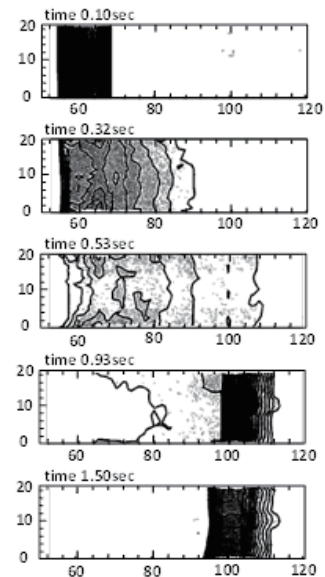


図-2 斜面上部から観察された実験結果

バネ定数 $k(N/m)$	時間刻み幅 $\Delta t(sec)$
1.0×10^5	1.0×10^{-6}

表-1 解析パラメータ

(1) パラメータの検討

粒径、形状による影響を検討するに先立ち、解析パラメータの検討を行った。反発係数は0.1と固定し、粒径2mmの条件でバネ定数 k と時間刻み幅 Δt の検討を行った。個別要素法では、一般的に大きなバネ定数を用いる場合は、解の安定性を確保するために時間刻み幅 Δt を小さくする必要があり、計算コストが高くなることが知られている。時間刻み幅は、安定性条件（CFL:Courant-Friedrich-Lewy条件）³⁾ $\Delta t = 2\sqrt{\frac{m}{k}}$ で与えられるが、実際の解析では、これより小さい値を用いなければ安定しないことが多い。

安定した解析結果が得られたものを○、安定しなかったものを×とし、解析を安定させるために最低限必要な Δt とCFL条件で与えられる Δt を図-3に示した。この結果に基づいて、本研究の解析では時間刻み幅とバネ定数をそれぞれ表-1のように設定した。

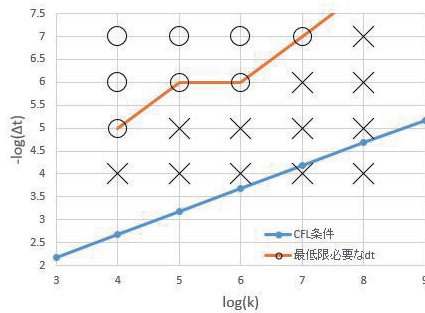


図-3 パラメータ検証

(2) 粒径の検討

粒径を 4mm,6mm,8mm,10mm の 4 種類として再現解析を行い、再現精度の比較を行った。図-4 が解析結果である。この図では、10mm と 4mm の結果を示しており、図中の d 赤で示した実線は先端、破線は全粒子の重心位置を示している。粒径が小さいほど、模型実験と近い結果が得られている。

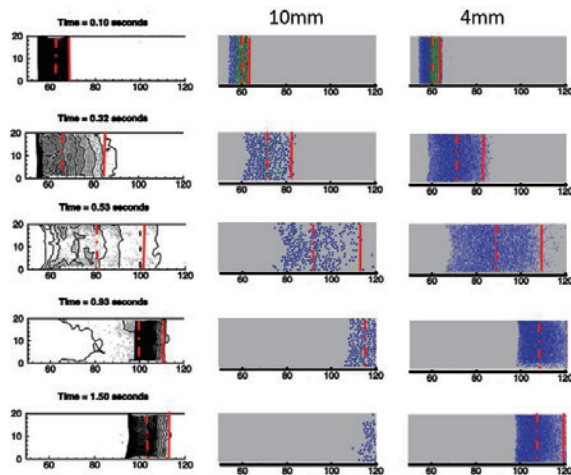


図-4 粒径の解析結果比較

(3) 形状の検討

粒径 4mm,6mm,8mm,10mm の球形をもとに、図-5 のように、元の粒径の 60%,80%,90% の球形要素からなるテトラ型の粒子を作成し、同様の再現解析を行った。この結果を図-6 に示す。粒径が小さいほど実験結果を精度良く再現しており、球形要素の結果よりも精度が良いことが確認できる。

4. 形状特性再現精度と解析誤差の関係

実験結果と解析結果の差を定量化するために、砂の先端と重心の位置に関して、次式で誤差を評価した。

$$e_d = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{aft} - x_{eft})^2} + \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{act} - x_{ect})^2}}{2n} \quad (1)$$

n はサンプル数 (0.10sec, 0.32sec, 0.53sec, 0.93sec, 1.50sec の 5 つ) であり、 x_{af} , x_{ac} , x_{ef} , x_{ec} はそれぞれ解析結果の



図-5 非球形モデル

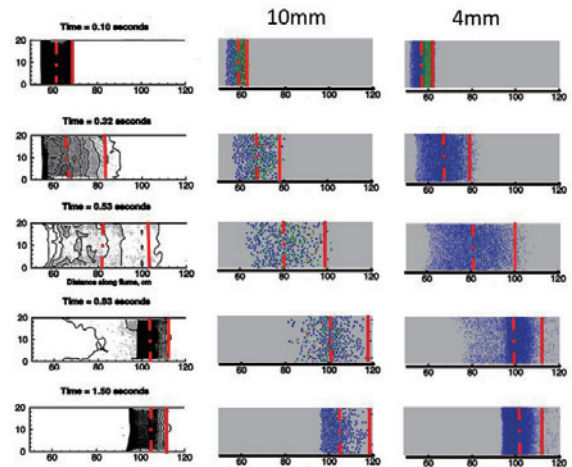


図-6 非球形の解析結果比較

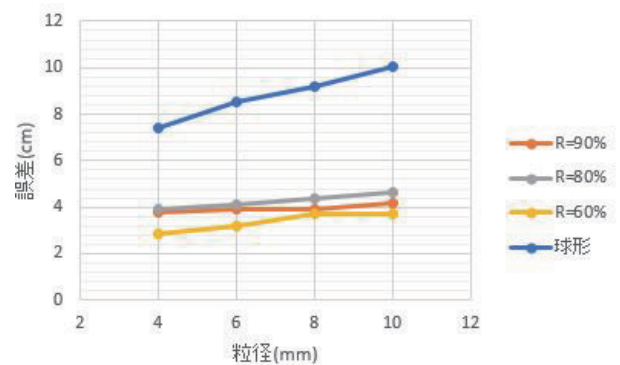


図-7 粒子特性表現精度と解析誤差の関係

先端と重心、実験結果の先端と重心の x 座標の位置である。つまり、解析結果が実験結果に比べて、先端位置や重心位置がどの程度ずれているかを示す指標である。なお、 e_d の単位は cm である。図-6 は粒径と誤差 e_d の関係を示したグラフである。球形・非球形ともに、粒径が小さいほど解析誤差は小さくなるのがわかる。また、球形と非球形では、非球形の方が誤差は少なく、粒径よりも形状の方が支配的であることがわかる。

5. 結論

本研究では、砂の流動模型実験を通じて粒子のサイズや形状が流動挙動に与える影響を調べた。その結果、粒子サイズよりも粒子形状の方が支配的であることを確認した。

参考文献

- 1) Cundall P. A. and Strack O. D. L.: A discrete numerical model for granular material, Geotechnique, 29, pp.47-65, 1979.
- 2) Denlinger, R. P. and Iverson, R. M.: Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, Journal of Geophysical Research, 106.B1, pp.553-566, 2001.
- 3) 地盤工学会: 地盤に関する解析技術 (個別要素法) 講習会, 配布資料, 2010.