

個別要素法による土砂流動シミュレーションの V&V に関する基礎的研究

○東北大学工学部建築・社会環境工学科	学生会員	渡邊 大規
東北大学大学院工学研究科	学生会員	奥山 大輝
東北大学大学院工学研究科	学生会員	鬼頭 昂平
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田 賢二郎

1. 研究背景と目的

個別要素法 (DEM: Discrete Element Method) は, Cundall & Strack¹⁾ によって提案された, 個々の要素の運動を評価し粒状体内部の力学を可視化する解析手法である²⁾. 個別要素法は斜面崩壊後の土砂流動の予測に対して有効であると考えられているが, 計算結果の妥当性を担保するためのベンチマーク問題や計算条件の基準に関する情報が十分でない.

本研究では上記の問題を解消するために, 粒状材料の安息角を対象としたベンチマーク問題を提案する.

2. 個別要素法

本研究の個別要素法では, 法線方向の接触力計算に線形バネ・ダッシュポットモデル, 接線方向の接触力計算に線形バネ摩擦モデルを用いている. 図-1 にそれらのモデルを示す.

2.1 法線方向の接触力

法線方向の接触力 F_n は線形反発力と粘性力を次式のように組み合わせることで表現される.

$$F_n = K_n s_n + C_n \dot{s}_n \quad (1)$$

ここで, K_n は法線方向の接触剛性, C_n は法線方向の粘性定数, s_n は法線方向の接触貫入量, \dot{s}_n は法線方向接触貫入量の時間微分である.

このモデルにおけるエネルギー減衰は, 式 (1) に示す粘性力に影響される. 粘性定数は次式によって求められる.

$$C_n = 2\eta \sqrt{m^* K_n} \quad (2)$$

ここで, η は減衰比, m^* は 2 要素間の換算質量である. 減衰比は反発係数 e との関係式によって求められる³⁾.

2.2 接線方向の接触力

先述のように, 接線方向の接触力 F_s は, 弾性要素と摩擦要素を併せ持つモデルで表現される. 接線方向の接触力が完全弾性であると仮定すると, 時刻 t における接線方向接触力は次式によって求められる.

$$F_{s,e}^t = F_s^{t-\Delta t} - K_s \Delta s_s \quad (3)$$

ここで, $F_s^{t-\Delta t}$ は 1 ステップ前の接線方向接触力, Δs_s はタイムステップ間の接線方向微小変位, K_s は接線方向の接触

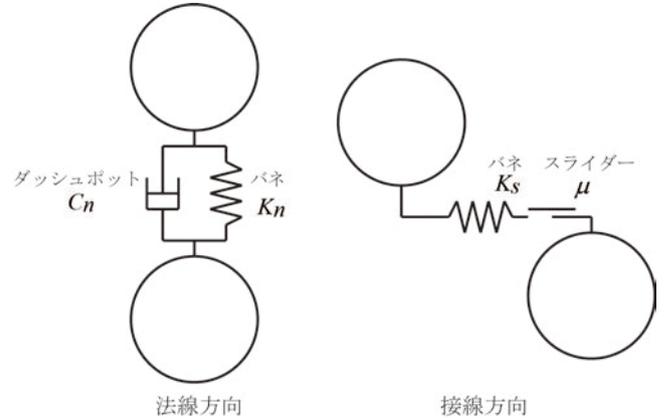


図-1 個別要素法のモデル

剛性であり, 以下のように求められる.

$$K_s = r_K K_n \quad (4)$$

ここで, r_K は接線剛性比 (入力パラメータ) である.

接線方向の接触力は Coulomb 摩擦則に従うと仮定し, 次式に示す接触力として表現する.

$$F_s^t = \min \left(|F_{s,e}^t|, \mu F_n^t \right) \frac{F_{s,e}^t}{|F_{s,e}^t|} \quad (5)$$

ここで, F_n^t は時刻 t における法線方向の接触力, μ は摩擦係数である.

3. ベンチマーク問題の作成

本研究では, ベンチマーク問題作成のために, 粒状材料の安息角を対象として粒径と形状が均一な人工粒子を用いた実験を行った. その再現解析を通じて, 粒子の初期配置や入力パラメータが解析結果のバラツキに与える影響を評価する.

実験では, 図-2 に示すアクリル製の装置および密度が 1111 kg/m^3 の粒子を用いて 500 ケースの安息角を計測し, 別途, 入力パラメータを得るための先行実験を実施した. 先行実験では, 反発係数は落下実験で, 摩擦角は粒子と同材料の試験体を斜面を滑らせることで, それぞれ計測した. 結果を表 1 に示す. シミュレーションでは粒子の初期配置を変化させた解析を 50 ケース, 実験から得られる入力パラメータの平均値から正規分布 $\pm 3\sigma$ の範囲 (σ は標準偏差) でパラメータを変化させた解析を 50 ケースそれぞれ行った.

Key Words: 土砂流動, 個別要素法, 安息角, V&V

〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

表-1 先行実験の結果

		反発係数	静摩擦角 [deg]	動摩擦角 [deg]
粒子間	平均値	0.809	35.5	29.6
	標準偏差	0.0115	3.82	2.42
粒子-装置間	平均値	0.790	27.2	16.5
	標準偏差	0.0280	4.26	7.35

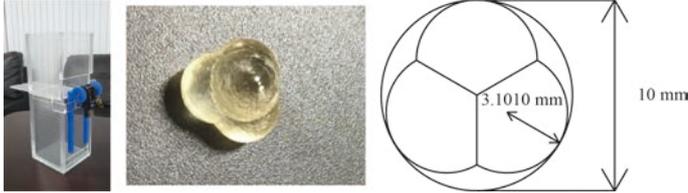


図-2 実験装置と粒子

3.1 再現解析

再現解析では実験と同様の装置モデルおよび粒子モデルを作成し、粒子の初期配置を変えた解析と入力パラメータを変化させる解析を行う。変化させたパラメータは、粒子間と粒子-実験装置間のそれぞれ反発係数・静摩擦係数・動摩擦係数である。

安息角解析を行うにあたり、安息角の大きさは Young 率の影響を受けない⁴⁾との報告があるため、解析時間を低減することを目的に、実験に用いた粒子の情報として与えられた Young 率の 1/10 の値を用いて解析を行う。

3.2 結果

実験および解析の結果と安息角の測定方法を図-3 に示す。安息角は最も高い位置に残った粒子の重心と斜面の最前面を結ぶことで計測した。

実験と再現解析で得られた安息角の大きさを表 2 に示す。実験を行う中で、実験の後半は安息角が大きくなることが確認された。実験の各試行について前後 20 回の平均をまとめたものを図-4 に示す。このような結果が得られた原因として、実験を繰り返す間に粒子の表面が削られて摩擦が変化したことが考えられる。実際、実験中に粒子表面から発生したと考えられる微細粉末が実験装置に付着することが確認できた。

解析の結果から、実験よりも解析の方がばらつきが小さくなるのが分かる。

4. 結論

本研究では、個別要素法に関するベンチマーク問題を提案するために、安息角を対象として実験とその再現解析を実施した。本研究で行ったように、安息角の平均値だけでなく、ばらつきの程度にも着目して結果を比較することにより、より効果的なベンチマーク問題となると考えられる。ただし、実験中の材料特性の変化などは課題として残って

おり、今後検討が必要である。

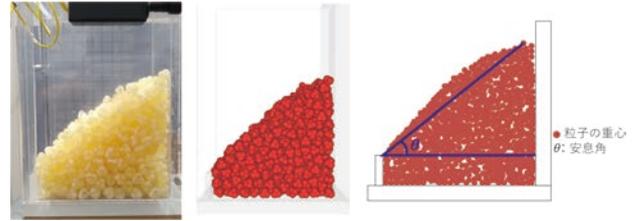


図-3 実験および解析の結果と安息角の測定方法

表-2 安息角実験と解析結果の比較

	安息角実験	初期配置	パラメータ
データ数	500	50	50
最小値	35.6	36.6	36.3
最大値	46.3	43.0	43.9
平均値	40.9	39.3	39.2
標準偏差	1.65	1.21	1.39

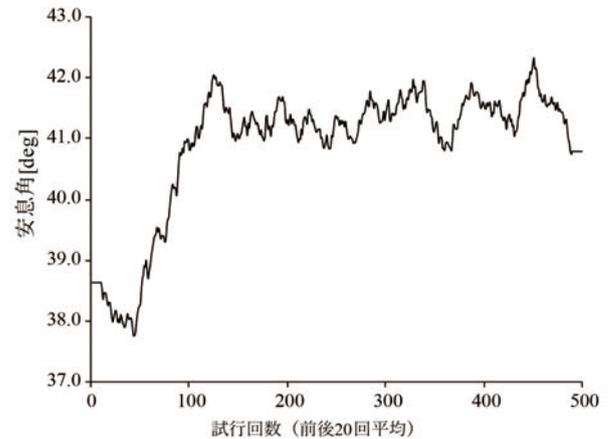


図-4 安息角実験結果の推移

参考文献

- 1) Cundall, P. and Strack, O.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, 3 1979.
- 2) 中田幸男, 前田健一, 松島亘志, 森口周二, 小山倫史: 初級講座 地盤工学のための個別要素法 (2) 個別要素法でできること, *地盤工学会誌: 土と基礎*, Vol. 63, No. 4, pp. 49–56, apr 2015.
- 3) Schwager, T. and Pöschel, T.: Coefficient of restitution and linear-dashpot model revisited, *Granular Matter*, Vol. 9, No. 6, pp. 465–469, Nov 2007.
- 4) Zhou, Y., Xu, B., Yu, A. and Zulli, P.: An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres, *Powder Technology*, Vol. 125, No. 1, pp. 45 – 54, 2002.