

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○野畑 舞愛郎
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子

1. 研究の背景と目的

個別要素法 (DEM) は P. A.Cundal によって提唱された粒状体の解析手法であり, 主に円形要素を用いて挙動のシミュレーションを行うが, 古川らによって提案された改良版個別要素法 (Refined-DEM) ¹⁾ など多面体要素を用いたものもある. 円形要素を用いた DEM では実挙動に比べて回転が過剰となるため, 回転抑制のために転がり摩擦が提案された. 一方, 多面体要素を用いた DEM では要素同士のかみ合いによって回転が抑制されるため転がり摩擦を考慮した研究はほとんど見られないが要素形状が実際の粒子形状と対応していない場合には解析と実験の結果に差異が生じると考えられる. そこで, 転がり摩擦を Refined-DEM に導入することによって要素形状の違いによる影響を埋めることを本研究の目的とする.

2. 改良版個別要素法への転がり摩擦の導入

本研究では, 現在様々な DEM の研究で用いられている Y.C.Zhou²⁾らのモデルを採用した. このモデルは, 法線方向の接触力に比例した抵抗モーメントを相対角速度ベクトルと逆方向に作用させるモデルを一般化したものであり, 式(1)で表される. ここで \vec{T}_r : 転がり抵抗モーメント (ベクトル), μ_r : 転がり摩擦係数, R_r : 有効転がり半径 (要素の半径が r_i と r_j のとき $R_r = r_i r_j / (r_i + r_j)$), F_n : 法線方向の接触力, $\vec{\omega}_{rel}$: 接触している 2 要素の相対角速度ベクトルである.

$$\vec{T}_r = -\mu_r R_r |F_n| \frac{\vec{\omega}_{rel}}{|\vec{\omega}_{rel}|} \quad (1)$$

式(1)を 3 次元多面体で用いる場合要素間の相対角速度ベクトルを求めるのは非常に複雑な式が必要となる.

そのため, 相対角速度ベクトルを用いる代わりに, 相対速度ベクトルの回転成分 \vec{u}_θ を求めて, 要素重心から接触点に向かうベクトル \vec{r}_t と, 相対速度ベクトルの回転成分方向の単位ベクトルの外積で求まるベクトルの逆方向に転がり抵抗モーメントを与えることとした.

図 1 は, 時間 t における要素 ie と要素 je の位置関係

と, 時間 $t-\Delta t$ において要素 je から見た要素 ie の位置関係を示す. 時間 $t-\Delta t$ において要素 ie の重心 G からセグメントの代表点 (接触点) に向かうベクトルを $\vec{r}_{t-\Delta t}$, 時間 t において要素 ie の重心 G からセグメントの代表点に向かうベクトルを \vec{r}_t とする. このとき, 相対速度ベクトルの回転成分を $\vec{u}_\theta = (\vec{r}_t - \vec{r}_{t-\Delta t}) / \Delta t$ で表すこととする. そして, \vec{r}_t と相対速度ベクトルの回転成分方向の単位ベクトル $\vec{u}_\theta / |\vec{u}_\theta|$ との外積によって求まる方向と逆方向に転がり抵抗モーメントを与えた.

具体的には, 式(2)に示す転がり抵抗モーメントを要素間に導入することによって, 要素 ie が受ける転がり摩擦による抵抗力を表現することとした. 要素 je が受ける転がり抵抗モーメントは, 式(2)の \vec{r}_t を要素 je の重心から接触点に向かうベクトルに変更することによって求めることとした.

$$\vec{T}_r = -\mu_r |F_n| \vec{r}_t \times \frac{\vec{u}_\theta}{|\vec{u}_\theta|} \quad (2)$$

3. 転がり摩擦が安息角に与える影響の解析

転がり摩擦の影響を調べるために八面体要素と十面体要素を用いて安息角の測定を行った. 要素モデルの 1 辺は 1m とし, 要素の個数は 490 個とした. 直方体の容器に要素を落下させて充填し, 平らな板の上に配置し自重を作用させ安定した後, 安息角を測定した.

本解析では, 滑り摩擦係数 μ_s は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.8 の 5 パターン, 転がり摩擦係数 μ_r は 0.0, 0.2, 0.3,

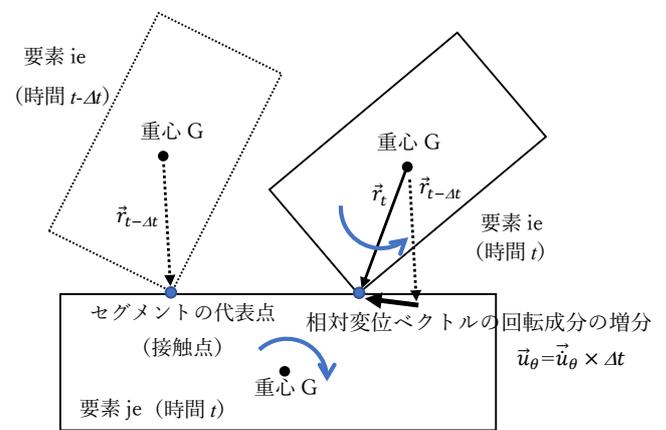


図 1 相対速度ベクトルの回転成分 \vec{u}_θ

0.5, 0.8 の5パターンを用いた。岩塊要素の密度は $3.2t/m^3$ 、ヤング率は $2.0 \times 10^8 N/m^2$ 、ポアソン比は0.18とした。なお、滑り摩擦係数 μ_s は岩塊-岩塊間と岩塊-地盤間で同じものを利用している。解析結果の一例を図2に示す。安息角は目視で読み取った。

図3と図4に十面体と八面体を用いたときの安息角の平均値を示す。5パターンの滑り摩擦係数すべてにおいて、十面体でも八面体でも転がり摩擦係数の増加により安息角が増加しており、転がり抵抗が増加していることを確認することができた。

4. 斜面崩落解析

より実践的な問題として本研究では、斜面における岩塊の転がりについての解析を行った。3章と同じ物性値を用い、岩塊の個数は180個で解析を行った。本研究では表1に示す10ケースで解析を行った。斜面の角度を 30° ($\tan 30^\circ = 0.577$)としているため、滑り摩擦係数が0.577より大きいケース1~6では転がり卓越、滑り摩擦係数が0.577より小さいケース7~10では滑りが卓越することを想定したケースとしている。

図5から安息角が等しくなるように転がり摩擦係数を調整した形状の異なるケース3とケース6の解析結果

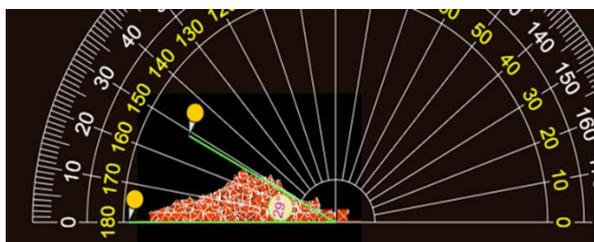


図2 安息角の測定の様子

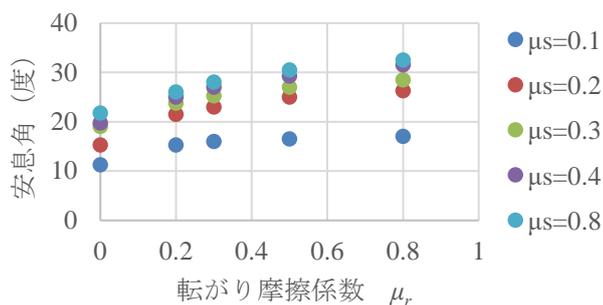


図3 十面体を用いた際の安息角の平均値

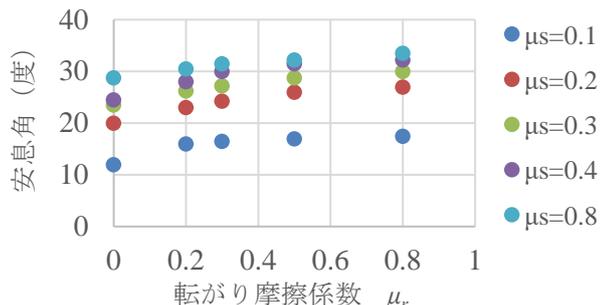


図4 八面体を用いた際の安息角の平均値

果は良く似たものとなっていた(図5)。転がりが卓越するケース1~6では転がり摩擦の影響が確認できたが、滑りが卓越するケース7~10では安息角に関係なく似た結果を示し、あまり転がり摩擦の影響を確認できなかった(表2)。

5. 結論

Refined-DEMにおいて転がり摩擦により形状の異なる要素の挙動をある程度近づけることができたと考えられる。実際の斜面崩壊の再現解析を行い実挙動と比較し転がり摩擦の有意性を検討することが必要である。

参考文献

- 1) Aiko Furukawa, Junji Kiyono and Kenzo Toki : Proposal of a numerical simulation method for elastic, failure and collapse behaviors of structures and its application to seismic response analysis of masonry walls, Journal of Disaster Research, Vol.6, No.1, 2011.
- 2) Y. C. Zhou, B. D. Wright, R. Y. Yang, B. H. Xu, A. B. Yu : Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation, Physica A, Vol.269, pp.536-553, 1999.

表1 解析ケース

実験ケース	形状	滑り摩擦係数	転がり摩擦係数	安息角の平均(°)	安息角の最大・最小値(°)
ケース1	八面体	0.8	0	28.75	27~31
ケース2	十面体	0.8	0	21.75	21~22
ケース3	八面体	0.8	0.2	30.5	28~33
ケース4	八面体	0.8	0.5	32.25	31~33
ケース5	十面体	0.8	0.2	26	25~28
ケース6	十面体	0.8	0.5	30.5	29~33
ケース7	八面体	0.4	0.5	31.5	30~33
ケース8	十面体	0.4	0.8	31.5	30~34
ケース9	八面体	0.4	0	24.5	23~25
ケース10	十面体	0.4	0.2	25	22~27

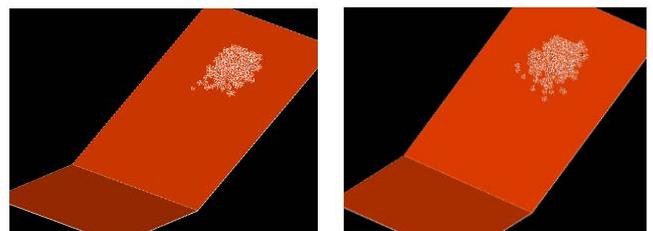


図5 安息角が等しく形状の異なるケース3と6の比較

表2 斜面崩壊解析の結果のまとめ

ケース	要素の最大移動距離 (m)	法尻への到着時間(sec)
ケース1	16.18	到達しない
ケース2	38.15	9.5
ケース3	7.38	到達しない
ケース4	9.29	到達しない
ケース5	35.71	13
ケース6	9.77	到達しない
ケース7	37.17	15
ケース8	38.37	14.6
ケース9	36.8	15.2
ケース10	37.82	14.2