

インターロッキング効果を考慮した DEM モデルの提案

立命館大学理工学研究科 学生員 ○台蔵 憲
 立命館大学 COE 推進機構 正会員 Ha H. BUI
 立命館大学理工学部 フェロー 深川 良一

1. はじめに

月面模擬土は、月面土（レゴリス）を模して造られた人工的な砂試料である。その表面形状は複雑であり、豊浦砂のような標準的な砂とは異なった力学特性を持つ。一面せん断試験結果（図-1）から、供試体の初期相対密度が高いほど、大きな見掛けの粘着力が生じた。さらに、簡易な崩壊実験結果から、進行性破壊が見られ、不均一な斜面が形成された。これらの特性は、月面模擬土を持つインターロッキング効果によるものと考えられる。そこで、本研究では、インターロッキング効果を考慮した DEM シミュレーション手法を開発し、崩壊シミュレーションと一面せん断試験シミュレーションにより、モデルの妥当性を検証した。

2. インターロッキングモデルの開発

DEM は Cundall & Strack¹⁾によって提案された、離散要素を用いた解析手法である。接触している 2 つの要素間の法線および接線方向の接触力を、それぞれバネとダッシュポットを用いてモデル化する。本研究では、BUI ら²⁾によって開発された DEM モデルを用い、法線方向バネ定数は Hertz の接触理論より、接線方向バネ定数は Mindlin & Deresiewicz の理論^{3,4)}により決定した。インターロッキング効果により、粒子間には法線方向と接線方向に力がかかると考えられる。これら 2 つの力を従来の DEM における接触力の計算に加える（図-2）ことで、インターロッキング効果による影響を考慮する。インターロッキング効果により生じる法線方向の力 \vec{f}_c を用いて、法線方向、接線方向の接触力 \vec{f}_n 、 \vec{f}_s を次式で計算する。

$$\vec{f}_n' = (-k_n \delta_n^{3/2} - \eta_n \vec{v}_n \vec{n}) \vec{n} + \vec{f}_c \quad (1)$$

$$\vec{f}_s' = -k_s \delta_s - \eta_s \vec{v}_s \quad (2)$$

ここで、 \vec{n} は法線方向の単位ベクトル、 \vec{v} は相対速度、 δ は重複距離、 k はバネ定数、 η は粘性定数である。クーロンの摩擦則より、接線方向の力は次のような最大値をとる。

$$|\vec{f}_s'| \leq |\vec{f}_n'| \tan \phi + |\vec{f}_c'| \tan \phi \quad (3)$$

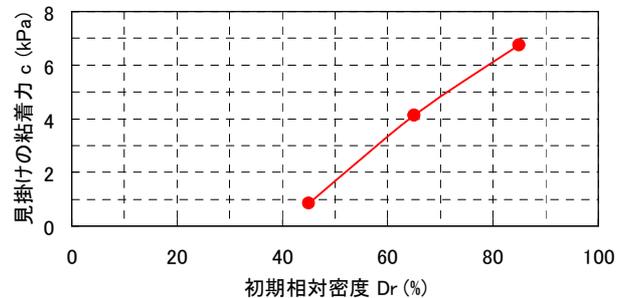


図-1 $Dr \sim c$ 関係（一面せん断試験）

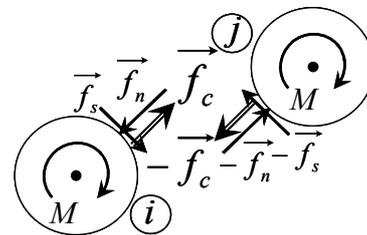


図-2 要素に働く力と方向

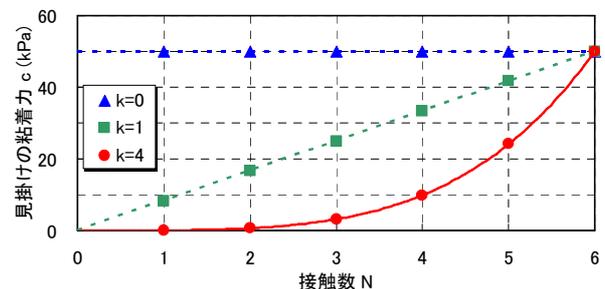


図-3 接触数 $N \sim$ 見掛けの粘着力 c 関係

一方、破壊時に生じるせん断応力 $\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi$ より、破壊面に作用するせん断力は、次式で表される。

$$|\vec{f}_s'| = cA + |\vec{f}_n'| \tan \phi \quad (4)$$

ここで、 c は見掛けの粘着力、 A は粒子間の接触面積である。式(3)、(4)より、インターロッキング効果により生じる法線方向の力 \vec{f}_c は次のように決定される。

$$\vec{f}_c = (cA \cot \phi) \vec{n} \quad (5)$$

ここで、図-1 のように密度の違いによる粘着力の変化を考慮する。要素が剛体であると仮定すると、密な状態とは、要素同士がお互いに多くの接触を持っている状態とも言える。そこで、要素ごとに接触数 N を使って、見掛けの粘着力 c を次式で決定する。

キーワード DEM, 月面模擬土, インターロッキング効果, 一面せん断試験

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学 環境都市系 TEL : 077-561-1111(6874)

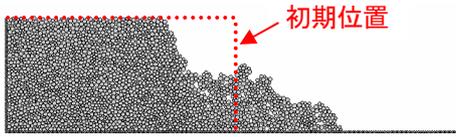


図-4 崩壊形状
(インターロッキングモデル)

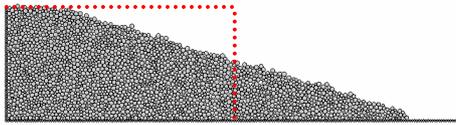


図-5 崩壊形状
(従来 DEM)

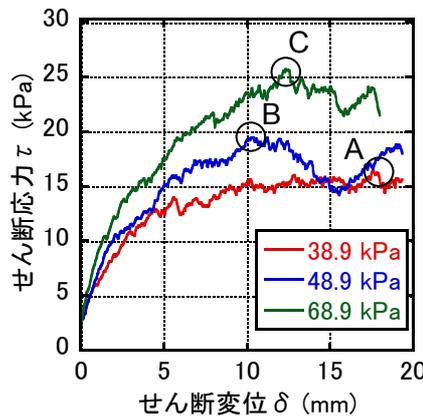


図-6 応力～ひずみ関係

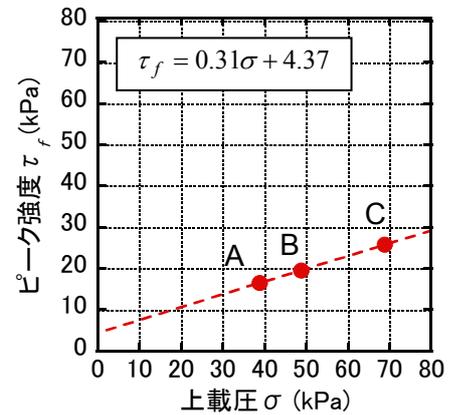


図-7 $\sigma \sim \tau$ 関係

$$c = (N / N_{\max})^k c_{\max} \quad (6)$$

本研究では、 $c_{\max}=50$ kPa, $N_{\max}=6$, $k=4$ (図-3) を使う。以上の計算で、式(5)の \vec{f}_c を従来の DEM に作用させたものをインターロッキングモデルとする。なお、本研究では、円柱形要素を想定した 2 次元 DEM を使っており、接触面積を次式で求めている。

$$A = 2r_0L \quad (7)$$

ここで、 L は要素の長さ、 r_0 は接触面の半径である。 r_0 は次式で得られる。

$$r_0 = \sqrt{r_i^2 - \left[\frac{\{(r_i + r_j) - \delta_n\}^2 - (r_i^2 - r_j^2)}{2\{(r_i + r_j) - \delta_n\}} \right]^2} \quad (8)$$

3. DEMシミュレーション

(1) 崩壊シミュレーション

提案するインターロッキングモデルが見掛けの粘着力を表現できているか確認するために、崩壊シミュレーションを実施した。供試体の寸法は幅 2000 mm, 高さ 1000 mm, 奥行き 500 mm である。粒子数は約 2500 個で、粒径は 20 mm から 40 mm の間で乱数を用いて作製した。その他の材料定数については、粒子間の摩擦係数 μ を 0.6, ヤング係数 E を 5×10^4 kPa, ポアソン比 ν を 0.3, 土粒子密度 ρ_s を 2.76 g/cm³ と設定した。シミュレーション結果を図-4 に示す。従来の DEM では、図-5 のように一様な傾斜を持つ斜面を形成する。しかし図-4 のインターロッキングモデルを用いた場合には、崩壊後の斜面は一様な傾斜ではなく、上部は急に、下部は緩やかとなる。この複雑な斜面形状は、インターロッキング力を考慮したことにより生じたものであると考えられる。

(2) 一面せん断試験シミュレーション

一面せん断試験シミュレーションの供試体寸法は、幅 3000 mm, 高さ 1500 mm, 奥行き 50mm である。粒子数は

約 5000 個で、主な材料定数は崩壊シミュレーションと同様の値を用いた。せん断速度は 30 mm/sec とした。計算結果の応力-ひずみ関係を図-6 に示し、これらのピーク強度 τ_f とせん断面上に作用する上載圧 σ の関係を図-7 に整理した。図-7 より、ピーク強度は上載圧に対して、良好な線形的増加をしていることがわかる。さらに、破壊基準の切片が正であることから、見掛けの粘着力が生じているといえる。

4. おわりに

本研究では、月面模擬土が持つインターロッキング力を考慮した DEM モデルを提案した。そして、このモデルの妥当性について検証するために、崩壊シミュレーションと一面せん断シミュレーションを実施した。その結果、崩壊シミュレーションでは崩壊形状に明確な違いが生じ、さらに一面せん断シミュレーションでは、見掛けの粘着力が生じていることを確認できた。以上より、今回提案したインターロッキングモデルについて、ある程度の妥当性を確認できた。今後、従来の DEM や、実験との定量的な比較をしていくことで、さらにモデルの完成度を上げていきたい。

<参考文献>

- 1) Cundall P.A. and Strack O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 2) Ha H. BUI et al.: Proceeding's 10th European Conference of ISTVS, CD-ROM, Budapest, Hungary, Oct.3-6, 2006.
- 3) Mindlin R.D. et al.: Elastic spheres in contact under varying oblique forces, *J. App. Mech. Trans ASME* 20, pp.327-344, 1953.
- 4) Mindlin R.D.: Compliance of Elastic Bodies in contact, *Appl. Mech. Trans. ASME*, 16, pp.259-267, 1949.