

実物大スケールで応用するための3次元個別要素モデルによる地盤材料の強度定数の表現

大成建設(株) 正会員 ○瓜谷 匠
長岡技術科学大学工学研究科 正会員 福元 豊
正会員 大塚 悟

1. はじめに

個別要素法(以下, DEM)では, 粒子一つ一つがそれ自身は変形しない剛体の要素としてモデル化され, 地盤材料が有する複雑な力学挙動のあらゆる因子を自然に含んでいる強力なツールとして, 近年注目されている. 本研究では, 明確なモデル設定やパラメータについての理論がない3次元DEMの有効性を実証し, 球形粒子を用いたまま地盤の破壊基準を適切に表現できる可能性について考察した.

本研究ではDEMで表現された3次元粒状体モデルを地盤材料へ適用するために2つのモデルを導入している. 通常の粒子接触関係に粒子間ボンド, および転がり摩擦モデルをそれぞれ導入しており, 2次元での検討²⁾ではそれぞれのパラメータと強度に関する相関関係が得られている. 本稿では3次元での適用性を検証するために, 180ケースの一面せん断シミュレーションを行い, その結果から強度特性である粘着力・内部摩擦角と入力パラメータの関係の検討について報告する. また, 本研究では実物大スケールで応用することでモデルの適用性を検証した.

2. 粒子間接触モデル

DEMは連続体力学に基づく有限要素法や粒子法とは異なり, 離散体解析手法に基づいている. 計算に用いる要素は変形しない剛体として表現され, その力に基づいて各要素の運動を解くことで不連続体の挙動を表現することが出来る. これらの通常のDEMの原理³⁾に, 実際の土粒子の接触関係を再現するために不規則な形状の粒子を選定してシミュレーションを行う例もあるが, 本研究では計算コストが有利かつ多くの要素を取り扱うことができる球形の粒子を用いた. しかし, 球形の粒子を扱う際は, 滑りよりも転がりが卓越することから, 非現実的なパラメータを用いることでしか, ある値以上の内部摩擦角が得られない⁴⁾とされていた. 本研究では通常の接触関係に加えて, 粒子の固着をモデル化したUtili and Novaらの粒子間ボンドモデル⁵⁾(図-1)と, Sakaguchi and Igarashiによる転がり摩擦モデル⁶⁾(図-2)を修正し適用した. 粒子間ボンドモデルは概念的な粒子接触幅を考慮し, 長さの次元に対応した新たな入力パラメータ t_μ' (kN/m)を考慮することで, 従来よりも物理的見通しが立てやすいと考えられる. また, 転がり摩擦モデルは, 実際の粒子の不規則な形状に相当するような抵抗力を与えるために, 粒子の回転と逆方向に転がり摩擦モーメントを作用させるパラメータを与えている. 本研究では, 粒子間ボンドモデルと併用するため, ボンド力が働いた場合に, t_μ (kN)を粒子間の圧縮方向に働く固着力と考えることとしている. これらのモデルの適用性を検証するために一面せん断シミュレーションにてパラメータと出力値の関係を考察した.

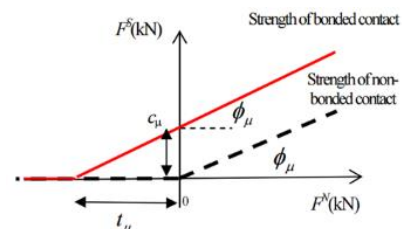


図-1 粒子間ボンドモデル

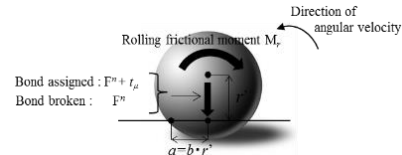


図-2 転がり摩擦モデル

3. 一面せん断シミュレーション

シミュレーションモデルは密詰め状態の試料を想定しており, 表-1に示すようなパラメータを用いた. 供試体を表す球形粒子は3種類 (5.5 mm, 6.0 mm, 6.5 mm) の粒径を代表粒径とした. 圧縮過程では任意の上載圧を, 時間を経過させて変位が十分小さくなることを確認することで供試体とした. せん断過程では, 実際の一面せん断試験⁷⁾と同様に, 作製した供試体には所定の上載圧を与えたまま, せん断箱を水平速度 1 %/sec でピークせん断強度が十分確認できるまでせん断を行った.

表-1 入力パラメータ

Density (kg/m ³)	2650
Normal contact springs (N/m)	4.00 × 10 ⁶
Tangential contact springs (N/m)	1.00 × 10 ⁶
Local damping coefficient	0.2
Time step (sec)	2.00 × 10 ⁻⁶
Coefficient of friction between particles μ	0.40, 0.50, 0.60
Contact bond coefficient (kN/m) t_μ'	0, 100, 1000, 10000
Rolling resistance coefficient b	0.00, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20

キーワード 個別要素法, 一面せん断試験

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学環境社会基盤工学専攻環境防災研究室 TEL 0258-47-1611

3.1 シミュレーション結果

一面せん断シミュレーションは異なる DEM パラメータ (粒子間摩擦係数を 3 ケース, 粒子間ボンド係数を 4 ケース, 転がり摩擦係数を 5 ケース) と異なる垂直応力 (50, 100, 150 (kPa)) のもとで, 計 180 ケース行った。

シミュレーションの結果, 図-4 のようなせん断応力～垂直応力関係から粘着力 c と内部摩擦角 ϕ が 60 ケース得られた。図-5 は, 粒子間摩擦係数が 0.50, 粒子間ボンド係数が 1000(kN/m²), 転がり摩擦係数が 0.05 の場合のせん断応力～せん断変位関係, 体積ひずみ～せん断変位関係を示している。せん断応力のピークを確認でき, また, 応力ひずみの関係より, せん断初期の負の体積ひずみの直後の正のダイレイタンスを確認できる。その他の全てのケースでも同様のせん断挙動が見られたため, 密詰め砂質土のせん断挙動がシミュレーションによって良好に再現されていると言える。

3.2 パラメトリックスタディ

出力値である粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ と, 入力値である粒子間ボンド係数 t_μ' , 転がり摩擦係数 b の関係を考察する。

最初に, 粒子間ボンド係数 t_μ' が c に与える影響について考察すると (図-6), 非常に明瞭な相関関係を確認することができる。これより, t_μ' の増加とともに c も増加していることがわかった。また, 転がり摩擦係数 b について, $b \sim \phi$ 間 (図-7) においても強い相関が見られた。この相関は本研究と同等のモデルによって転がり摩擦をモデル化している報告⁴⁾にあるように, 転がり摩擦係数の増加に伴い大きなせん断強度が得られる結果と同じ傾向である。これらの係数を導入することによって, 地盤材料として適用する際に工学的に要求される内部摩擦角である $\phi = 30 \sim 40(\text{deg.})$ を得られることが確認できた。よって, 本研究のように転がり摩擦モデルに粒子間ボンドモデルを組み合わせた場合でも, 転がり摩擦係数 b によって粒子のかみ合いを表現できたと考えられる。また, $b=0.10$ 以上の数値では ϕ の上昇の停滞が見られた。これは転がり摩擦係数が過剰な値となり粒子の回転が停止し, せん断強度の増加がなくなったためである。また, b の増加とともに c も増加することが見られる。これは粒子形状による転がりにくさが, 内部摩擦角にだけではなく粒子集合体としての粘着力にも影響を与えていることが示唆される。

4. 実物大スケールでの応用

本研究で用いた転がり摩擦モデルと粒子間ボンドモデルを適用することで, 球形粒子を用いたまま工学的に有用な強度が得られた。これより, 3次元 DEM を用いて地盤材料の強度定数を表現できた。紙面の都合上掲載できなかったが, 本稿にて検討した粒状体モデルと張石を用いた貯水池堤体モデルでは強震時における実際の被災事例と同様の変状を確認することができた。

参考文献

- 1)小長井一男, et al. "LAT による粒状体構造変化の可視化." 土木学会論文集 455 (1992): 25-33.
- 2) 福元豊; 阪口秀; 村上章. 地盤材料の破壊基準を表現するためのシンプルな個別要素モデル. 土木学会論文集 A2 (応用力学), 2011, 67.1: 105-112.
- 3) CUNDALL, Peter A.; STRACK, Otto DL. A discrete numerical model for granular assemblies. geotechnique, 1979, 29.1: 47-65..
- 4)中瀬仁, 安中 正, 片平冬樹, 興野俊也: 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集, No.454/III-20, pp.56-64, 1992.
- 5) Utili, S. and Nova, R. : DEM analysis of bonded granular geomaterials, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol.32, pp.1997-2031.
- 6) Sakaguchi, H. and Igarashi, T.: Plugging of the flow of granular materials during the Discharge from a silo, International Journal of Modern Physics, B7, pp.1949-1963.ar test, Géotechnique, 57(4), pp.343-354, 2007.
- 7)地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 丸善, 2000.

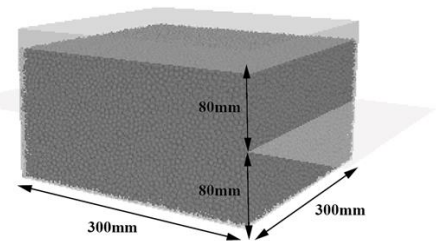


図-3 シミュレーションモデルの概図

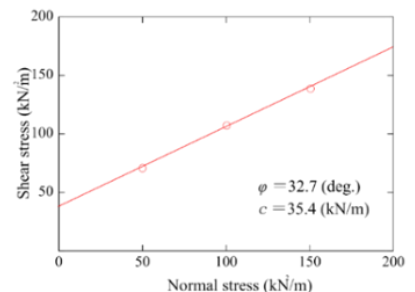


図-4 せん断応力～垂直応力関係

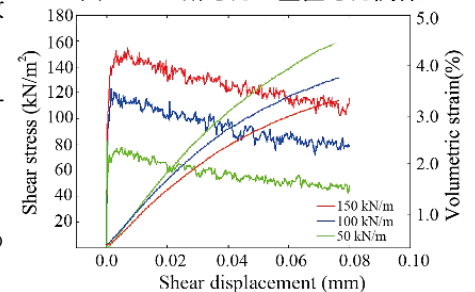


図-5 応力比とダイレイタンス

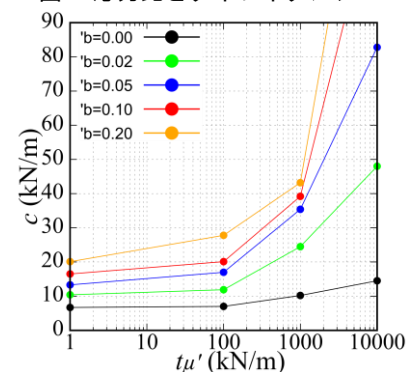


図-6 t_μ' と c の関係

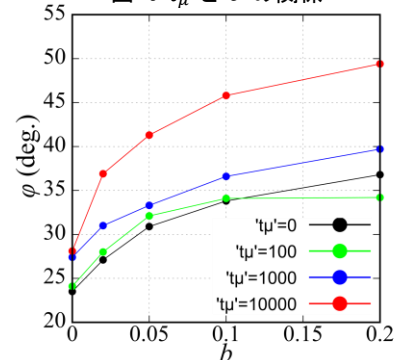


図-7 b と ϕ の関係