

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

福元 豊¹・阪口 秀²・村上 章³

¹学生会員 京都大学大学院 農学研究科 修士課程 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: yutaka-f@agriculture.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

²非会員 (独) 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域 プログラムディレクター

(〒236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25)

E-mail: sakaguchih@jamstec.go.jp

³フェロー会員 京都大学大学院教授 農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: akiram@kais.kyoto-u.ac.jp

土木分野で扱う大規模な境界値問題を個別要素法(以下, DEM)で解析することを念頭に, より少ないパラメータで地盤特性を適切に表現できるシンプルなDEMモデルを提案した. 具体的には, 地盤材料の破壊基準である粘着力と内部摩擦角を表現するために, 通常円形粒子のDEMで用いられる粒子接触関係に粒子間ボンドモデルと転がり摩擦モデルにそれぞれ修正を加えたものを導入した. 両モデルを導入する際に必要とする追加パラメータはそれぞれ1つだけである. これらのモデルを反映させたDEMを用いて一面せん断シミュレーションでのパラメトリックスタディを行い, 地盤材料の粘着力と内部摩擦角に対して所望の値を適切に表現するためのモデルとパラメータ決定方法を与えた.

Key Words : discrete element method, failure criteria, direct shear test, rolling friction, contact bond

1. はじめに

コンピュータの性能の向上とともにDEM¹⁾で扱うことのできる粒子数が大幅に増加し, DEMを実務に適用することが可能となった. 例を挙げると斜面の崩壊予測²⁾, 落石挙動予測³⁾, 土圧の安定問題⁴⁾, 杭基礎問題⁵⁾などがある. これはDEMが連続体ベースの解析手法では表現できない破壊後の挙動をシミュレーションできる手法として, その有用性が認められてきたことを意味する.

このような流れの中でDEMシミュレーションに対する信頼性や定量評価についての要求が高まっているが, 解析する際のモデル設定やパラメータの与え方などについて明確な理論付けがなされていない. また, コンピュータの性能が飛躍的に向上したと言っても, いまだ計算能力の壁は存在しており, それぞれの土粒子を詳細にモデル化して大規模なシミュレーションを行うことは不可能である. そこで如何に適切なモデル設定を行い, 限られた計算資源の中で如何に地盤材料の特性を表現できるか, といったことが問われる.

このような背景のもと, 本研究では, 実務問題へDEMを適用することを念頭に置いた2次元条件下での粒

子間接触モデルを提案する. その際, DEMで表現する地盤特性として, 地盤の基本的な強度パラメータである粘着力と内部摩擦角に着目する. その理由は, DEMが得意とする斜面崩壊のような破壊現象を取り扱う場合に, 実材料とDEMモデルを直接比較できる共通のパラメータとなるからである. また, モデルはできるだけシンプルであることを目指した. いたずらに複雑な粒子接触モデルを設定した場合, 計算コストが増大するだけでなく, 地盤特性を表すためのパラメータ数が増加し適切にそれらを決定することが難しくなるからである.

具体的には, 通常DEMで用いられる粒子間の接触関係に, Utili and Novaの提案した粒子間ボンドモデル⁶⁾(以下, U-Nモデル)と, Sakaguchi and Igarashiによる転がり摩擦モデル⁷⁾の定義にそれぞれ修正を加えて導入した. 両モデルを導入する際に要する追加パラメータはそれぞれ1つだけである. そして, これらのモデルを反映させたDEMにより一面せん断シミュレーションでのパラメトリックスタディを行うことで, 入力条件となるDEMパラメータと出力値である粘着力・内部摩擦角との相関関係を得た. その結果から, 特定の地盤強度を適切に表現するためのDEMパラメータを決定できるよう

に、設定したDEMモデルと各パラメータを詳細に検討した。

2. 粒子間接触モデル

本節では、U-Nモデル⁶⁾と転がり摩擦モデル⁷⁾の詳細と、導入する際の両モデルに対する修正点について述べる。

(1) 粒子間ボンドモデル

本研究では、モデル導入による追加パラメータが1つだけでよいU-Nモデル⁶⁾を参考にして、粒子間のボンドをモデル化した。その理由は、本研究の目的にあるようにシンプルなDEMモデルを構築する場合、できる限り少ないパラメータで表現でき、複雑な計算を要しないモデルを用いることが望ましいからである。その他のモデル^{8),9)}では、粘着特性を生み出すために数多くのパラメータが追加されたり、複雑な計算が必要となるものが多い。

U-Nモデルは、粒子間の接触力関係にCoulombの破壊基準を導入したものであり、法線方向力 F^N と接線方向力 F^S の上限値は図-1 (a) のように定められる。粒子間の圧

縮力しか考慮しない通常のDEMと異なる点は、法線方向力に引張強度 t_μ が存在することである。 F^N に引張強度を超過する力が作用した場合、ボンドが破壊し、再度接触した場合は通常接触として扱う。一方、 F^S が上限値を越えた場合はボンドが破壊しないものとする。U-Nモデルでは、この破壊条件をDF条件（接線方向にDuctile、法線方向にFragile）と呼び、この条件が地盤材料の粘着力と内部摩擦角を表現するのに適していると結論づけた。

ここで、U-Nモデルは接線方向力の切片 c_μ を入力パラメータとしているが、 c_μ の単位はニュートン表示であるため、粒子の大きさに応じたボンド力が働かないという問題点がある。また、DF条件に従うと、粒子集合体としての粘着特性へ与える影響は接線方向力側の c_μ よりも法線方向力側の t_μ の方が大きいと考えられるため、 t_μ の値が粒子間摩擦角 ϕ_μ に大きく依存して決定される状況を改善する必要もある。

よって本研究では、図-1 (b) で示す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)を以下のように定義した。

$$t'_\mu = t_\mu / (r_i + r_j) \quad (1)$$

ここで、 r_i , r_j は粒子半径である。修正後は入力値となる t'_μ が直接的に t_μ の大きさを決定するため、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、長さの次元に対応したの入力パラメータを用いることで、粒子サイズに応じたボンド力を働かせることが可能となる。

なお、式(1)における概念的な粒子接触幅 $(r_i + r_j)$ は粒子サイズに対応するための比例定数とも言えるため、今回の検討は2次元であるが、3次元においても同様に式(1)を用いることが可能である。

(2) 転がり摩擦モデル

本研究では、円形粒子を用いたまま工学的に問題となる範囲の内部摩擦角を得るために、粒子接触点での回転抵抗をモデル化したSakaguchi and Igarashiの転がり摩擦モデル⁷⁾を導入した。

円形粒子を用いる理由は、その接触判定法の容易さから計算上最も有利であり多くの粒子を扱うことができるため、本研究の目的に合致するからである。実際の土粒子形状に近づけるために不規則形状の粒子¹⁰⁾や楕円形粒子¹¹⁾を用いる例もあるが、その場合、計算負荷の観点から大規模なシミュレーションに適用するのは難しくなる。

一方、粒子接触点に回転抵抗をモデル化する理由は、円形粒子を用いたままでは、過剰な回転が生じることが原因となって小さなせん断強度しか得られないことが知られている¹²⁾からである。大きな内部摩擦角は粒子回転を完全に拘束することでも得られるが、回転の運動方程式を解かないDEMは一般的な境界値問題に適用すべき

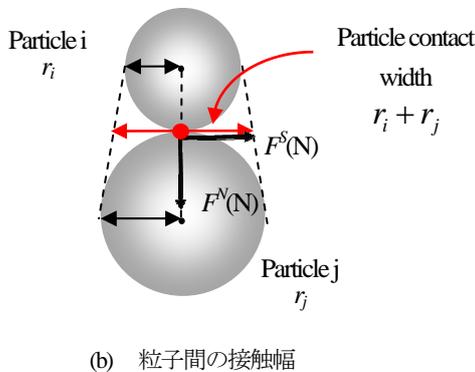
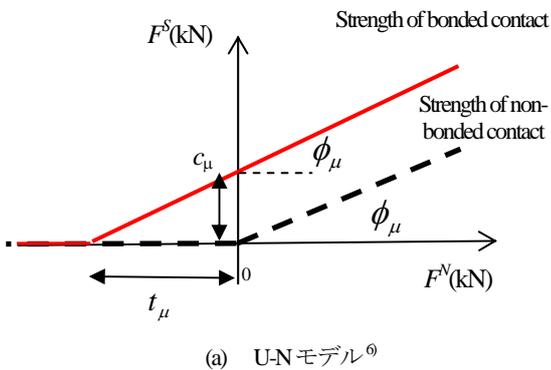


図-1 粒子間ボンドモデル

表-1 シミュレーションに用いたパラメーター一覧

Density (kg/m ³)	2400
Normal contact stiffness (N/m)	4.00 × 10 ⁷
Tangential contact stiffness (N/m)	1.44 × 10 ⁷
Local damping coefficient	0.2
Time step (sec.)	5.0 × 10 ⁻⁶
Contact bond coefficient (kN/m) t_{μ}'	0.00, 0.03, 0.06, 0.12
Interparticle friction angle (deg.) ϕ_{μ}	20, 25, 30
Rolling resistance coefficient b	0.05, 0.10, 0.20, 0.30

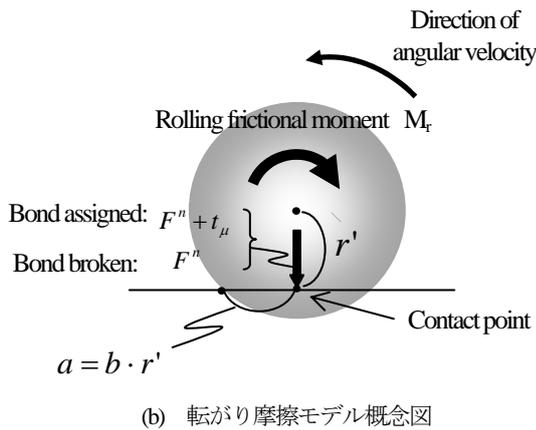
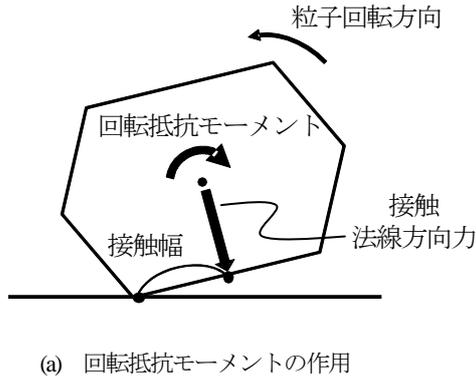


図-2 転がり摩擦モデル⁷⁾

ではないとされる¹³⁾.

図-2 (a) は、回転しようとする粒子に、図中の接触法線方向力と接触幅に起因する回転抵抗モーメントが作用する様子を描いたものである。円形粒子の場合にこれに対応するのが図-2 (b) で示される転がり摩擦モデルの概念図である。

転がり摩擦モーメント M_r は、式(2)のように、粒子間の概念的な接触長さを表す転がり摩擦係数 a に粒子間の法線方向接触力 F^N (圧縮方向に正) を乗じることで算出される。

$$M_r = F^N \cdot a \quad (F^N > 0) \quad (2)$$

$$= F^N \cdot b \cdot r'$$

ここで、 r' は粒子中心から接触点までの距離であり、 b は r' に対する転がり摩擦係数 a の比率である。本モデルの入力パラメータは b であり、 r' は幾何的に計算することができるため、 b の値が入力されることで転がり摩擦係数 a の値が決定する。そして、そこから式(2)を用いて、 M_r の大きさを求める。

M_r を作用させる方向は、転がり摩擦を考慮しない場合に得られる角速度を打ち消す向きとし、これによって粒子の回転を抑制する。その際、転がり摩擦モーメント

M_r による逆回転は生じないものとする。

ここで、Sakaguchi and Igarashi のモデルでは粒子同士が接触していない場合には $F^N = 0$ と考えるため、 F^N が引張方向に作用する場合には転がり摩擦が働かない。しかし、本研究のように転がり摩擦をボンドモデルと併用する場合、法線方向力がボンド強度 t_{μ} の範囲内で引張方向に作用する場合でも粒子間の接触が存在していることを仮定しているため、粒子の回転に対して転がり摩擦を考慮する必要が生じる。よって、粒子間にボンドが作用している場合の M_r の算出手順に関して、 t_{μ} を粒子間の圧縮方向に働く固着力と考えることで、以下のような修正を加えた。

$$M_r = (F^N + t_{\mu}) \cdot a \quad (F^N > -t_{\mu}) \quad (3)$$

$$= (F^N + t_{\mu}) \cdot b \cdot r'$$

通常接触時は従来定義である式(2)を用いて M_r を算出した。

なお、異なる粒形の粒子が接触した場合は、粒形が小さい方の粒子の a を用いて M_r を計算した。以上のモデル修正により、ボンド作用時は $-t_{\mu} < F^N < 0$ の範囲でも $F^N + t_{\mu} > 0$ とできる。

3. パラメトリックスタディ

提案モデルに用いられるパラメータを入力条件として、地盤強度 c 、 ϕ との対応関係を求めるために、定圧条件で2次元一面せん断シミュレーションを行った。ここで、パラメトリックスタディの対象とするのは、粒子間ボンド係数 t_{μ}' 、粒子間摩擦角 ϕ_{μ} 、転がり摩擦に関する係数 b の3つである。表-1にシミュレーションに用いたパラメータを示す。

準静的な状況下においてばね定数が c 、 ϕ に及ぼす影響は小さい¹⁴⁾ことから、法線方向と接線方向のばね定数には円形で同程度の粒子サイズで解析を行った中瀬ら¹⁵⁾の値を固定値として用いた。減衰には非粘性の減衰方法であるlocal damping¹⁶⁾法を用い、解の安定性と計算負荷を

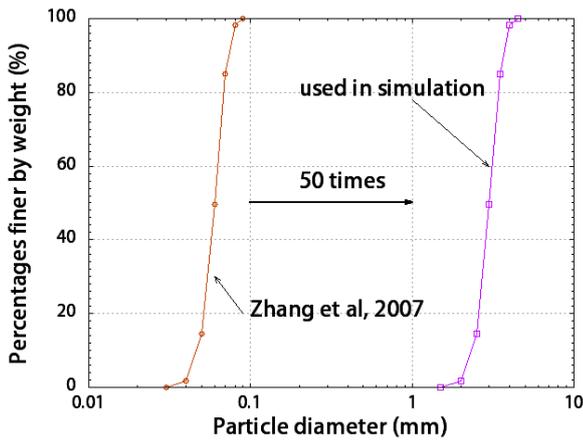


図-3 シミュレーションに用いた粒度分布

考慮してその値を0.2とした。ただし、重力加速度項には減衰力を作用させないものとした。

パラメトリックスタディに用いる粒子間ボンド係数 t_u' の値は、Utili and Nova⁹⁾が入力値として用いた c_u の値に相当する範囲で決定した。粒子間摩擦角の値に関しては、自然の砂の粒子間摩擦角 ϕ_u が23~27 (deg.)程度と報告されている¹⁷⁾ことから、20~30(deg.)の範囲で入力した。

転がり摩擦係数 b の値の範囲は、事前の検討により $b = 0.50$ ほどで粒子の回転が停止することを確認したので、0.05~0.30とした。

シミュレーションに用いた粒度分布はZhang & Thornton¹⁸⁾と同じものを、図-3のようにUtili and Nova⁹⁾の検討⁹⁾と同じ粒径幅になるよう50倍した粒径に設定した。最大粒径は4.5mm、最小粒径は1.5mmである。せん断箱の大きさは地盤工学会基準 (JGS0560-2000)¹⁹⁾に準じて、幅は最大粒径の70倍の315mm、高さは圧縮量も考慮し、その半分程度の140mmとした。この領域に設定した粒度分布を作成する条件で、Bottom-to-top reconstruction アルゴリズム²⁰⁾を用いて幾何的な粒子配置を行った (図-4 (a))。配置された粒子数は4541個である。この状態で、全ての粒子に所定のパラメータを与えると同時に所定の垂直応力を剛な板を介して作用させ、粒子全体が安定するまで待った。圧縮過程とせん断過程で別のパラメータを与える例¹⁵⁾もあるが、圧縮終了時における粒子の安定構造は与えたパラメータに特徴づけられるので、せん断過程と同じパラメータとした。ただし、圧縮過程で粒子間ボンドを与えた場合、圧縮完了時における空隙比に大きなばらつきが生じ、粒子間のパラメータがせん断強度に与える影響を正しく評価することができなくなるため、 t_u' を除いたパラメータを粒子に与えた。

その後、せん断箱の上板と下板の周辺にある粒子の変位と回転を拘束することでそれぞれの板に固定し、さら

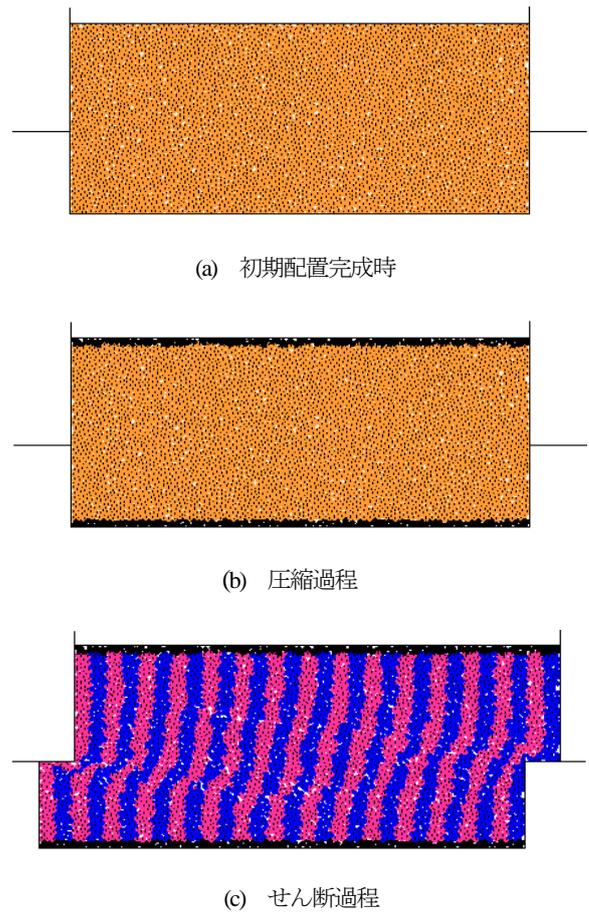
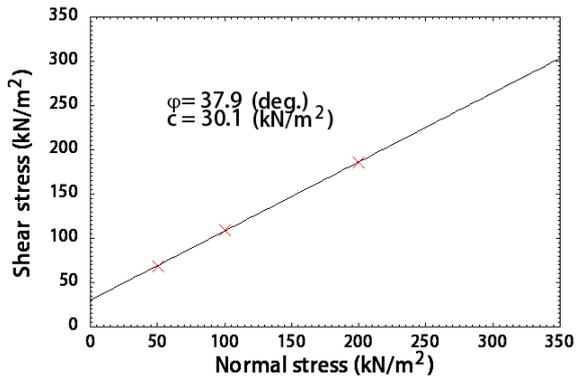


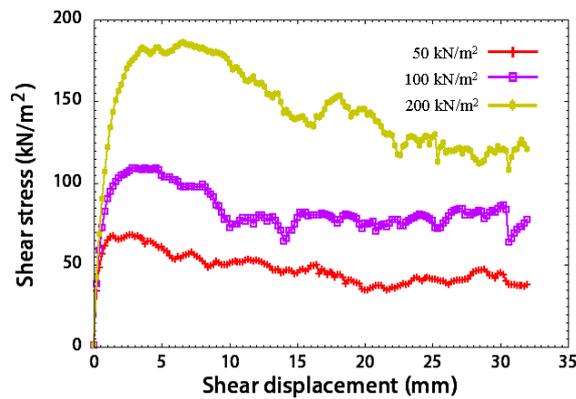
図-4 一面せん断シミュレーション

に安定状態を待った (図-4 (b), 黒色粒子が固定粒子)。粒子を固定する理由は、せん断中に、上下板とその周辺粒子との間の非現実な滑りが発生するのを防ぐためである。また、安定状態は、解析時間を経過させて、上板の変位の振動が十分小さくなることを確認することで決定した。ここを圧縮過程の終了時とする。

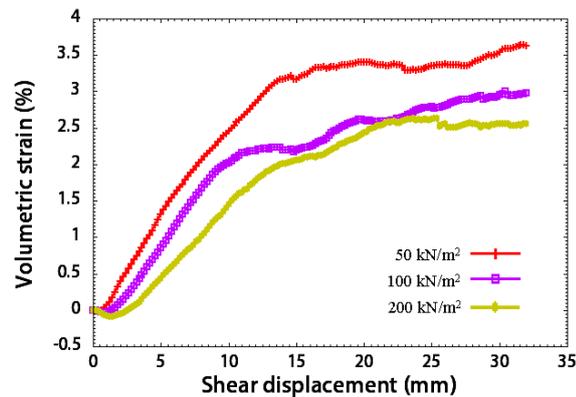
最後に、すべての粒子接触点にボンドを発生させ、上板と下板に粒子を貼り付けたまま、せん断変位速度 1.25%/sec (0.004m/sec) でせん断過程を開始した (図-4 (c))。せん断は、せん断箱の上半分を変位させて行った。せん断距離は地盤工学会基準 (JGS0560-2000)¹⁹⁾を参考に、せん断箱幅の約10%である32mmとした。せん断箱を構成する壁要素と粒子間の接触で用いるバネ定数は、粒子同士の接触時に与えた値と同じものを用いた。また、理想的なシミュレーション条件を作るため、鉛直方向の壁要素と粒子の間に摩擦は働かないものとした。異なるDEMパラメータ (粒子間ボンド係数 t_u' を4ケース、粒子間摩擦 ϕ_u を3ケース、転がり摩擦に関する係数 b を4ケース) と異なる垂直応力 (3ケース) のもとで、計144ケースの一面せん断シミュレーションを行った。



(a) せん断応力～垂直応力関係



(b) せん断応力～せん断変位関係



(c) 体積ひずみ～せん断変位関係

図-5 一面せん断シミュレーションの結果の一例

4. DEMパラメータと地盤強度 c, ϕ の対応関係

一面せん断シミュレーションの結果、図-5(a)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48ケース得られた。図-5は、粒子間ボンド係数が30 (kN/m^2)、粒子間摩擦角が30 (deg.)、転がり摩擦に関する係数が0.20の場合である。図-5 (b)にはせん断応力～せん断変位関係、図-5 (c)には体積ひずみ～せん断変位関係の一例を示す。図-5 (b)ではせん断応力のピークを確認で

き、図-5 (c)では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ので、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。なお、せん断応力と垂直応力はZhang & Thorntonと同じ方法¹⁸⁾で、せん断箱を構成する壁要素への作用力から算出した。せん断変位と垂直変位についても、せん断箱を構成する壁要素の変位により評価した。また、定圧条件での一面せん断試験で得られる強度定数は、排水試験であることから通常 c, ϕ と表記されるが、今回のシミュレーションでは間隙水圧や間隙空気圧を考慮していないことから、便宜的に c, ϕ として記述した。

図-6は、出力値である粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ と、入力した粒子間ボンド係数 t_u' 、粒子間摩擦角 ϕ_u 、転がり摩擦に関する係数 b の散布図行列である。

まず、粒子間ボンド係数 t_u' が c と ϕ に与える影響について考察すると、 $t_u' \sim c$ 間に非常に明瞭な相関関係を確認することができる。つまり、 t_u' の増加とともに c も増加している。一方、 $t_u' \sim \phi$ 間では、 t_u' がほとんど ϕ に影響を及ぼしていないことがわかる。この粒子間ボンドの係数と c, ϕ の関係性はUtili and Nova⁹⁾が二軸圧縮シミュレーションによる検討で得た結果と一致しており、新たに定義したパラメータ t_u' を用いても同様に、粒子集合体としての粘着特性を再現可能であることを示唆している。

次に、粒子間摩擦角 ϕ_u の影響に関して検討する。 $\phi_u \sim c$ 間を見ると、 ϕ_u の c への影響が小さいことを確認できる。Utili and Nova⁹⁾が定義した入力パラメータを用いると粒子間摩擦角 ϕ_u が粘着力 c に及ぼす影響がかなり大きかったが、本検討ではこの点が改善されており、ここにボンドモデルの修正を行った効果が表れていると考えられる。 $\phi_u \sim \phi$ 間では基本的に ϕ_u の増加とともに ϕ も増加するという相関が報告されている^{15), 21)}が、本検討では入力した ϕ_u の値の範囲が狭いため、図-6の散布図からはその相関をはっきりと読みとることはできない。一方、一部のデータは ϕ_u の増加に対して ϕ の値が増加していない。これは $b=0.05$ の場合であり、その値は転がり摩擦に関する係数として小さいと考えられる。また、通常丸形粒子を用いた場合にいくら粒子間摩擦角を増加させても、小さなせん断強度しか得られない¹²⁾とする事実を示しているとも考えられる。

最後に、転がり摩擦に関する係数 b と地盤物性値の相関関係を考察すると、 $b \sim \phi$ 間には強い相関が見られる。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山本²¹⁾や中瀬¹⁵⁾の報告にあるように、転がり摩擦に関する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。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

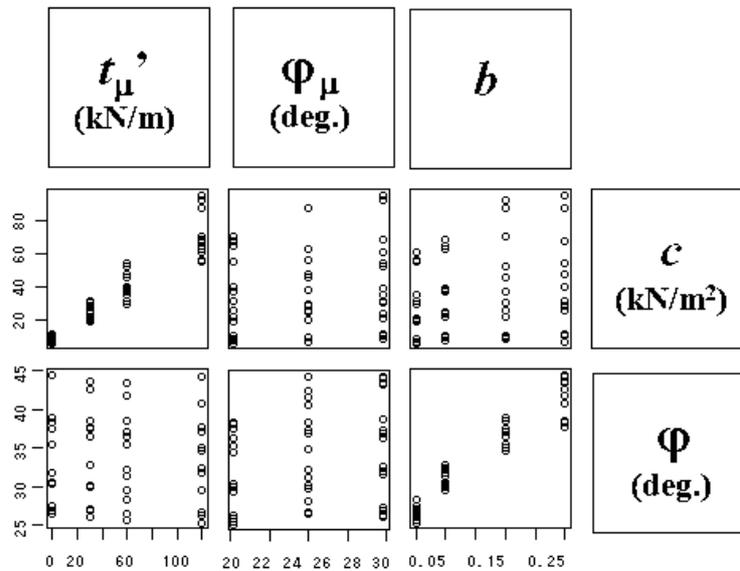


図-6 DEMパラメータ (t_{μ}' , ϕ_{μ} , b) と地盤物性値 (c , ϕ) の散布図行列

せた場合でも、転がり摩擦に関する係数 b によって粒状体のインターロッキング効果を表現できたと考えられる。また $b \sim c$ 間では、 b の増加とともに c も増加する弱い相関が見られる。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。

これらの各DEMパラメータと粘着力・内部摩擦角との相関関係は、粒子間摩擦角 ϕ_{μ} を20 (deg.)と30 (deg.)に固定した場合に各 t_{μ}' と b の値によって得られる c と ϕ の値をまとめた表-2(a), (b)において、具体的な数値で確認することができる。ここでは、 ϕ_{μ} の地盤強度定数への影響も確認するために、 ϕ_{μ} が20 (deg.)の場合と30 (deg.)の場合の2つを例に挙げた。

表-2(a), (b)を $\phi_{\mu} \sim \phi$ 間に注目して比較すると、先ほどの図-6の散布図行列では確認できなかった ϕ_{μ} の増加とともに ϕ も増加するという相関をはっきりと見ることができる。また、 $b \sim \phi$ 間に注目して表-2(a), (b)を比較すると、同じ値だけ b を増加させた時に ϕ_{μ} の値が大きい場合のほうが ϕ の値の増加の仕方も大きいことがわかる。つまり、粒子間摩擦が大きいほど粒子回転抵抗の効果が大きく働き、粒子集合体としてのせん断強度も増加したと考えられる。

さらに、本研究での検討は2次元なので室内試験で得られる値と単純に比較することはできないが、表-2に示される c と ϕ の値は地盤工学で扱う範囲の大きさを満たしている。ただし、一面せん断とは異なる境界条件でのパラメトリックスタディを行った場合、得られる粘着力と内部摩擦角の値の大きさも境界条件によって違ったもの

になることが予想される。しかし、例えば転がり摩擦モデルはこれまでに二軸圧縮試験²¹⁾やねじりせん断試験¹⁵⁾に基づいて検討されており、いずれの検討方法でも同じような解析結果が得られていることから、境界条件を変えてもDEMパラメータと地盤物性値の相関関係は大きく変化しないと考えられる。また、異なる粒度分布を用いて検討した場合も得られる c と ϕ の値は違ったものとなるが、本研究で用いた粒度幅は他の研究例^{22, 23)}に比べて十分広いので、同一粒径を用いた場合のような特殊な条件下での相関関係ではないと考えられる。

以上より、各DEMパラメータと地盤強度 c , ϕ の相関関係が非常に簡潔なので、表-2も参考にして、対象とする地盤の特性を反映したDEMパラメータを容易に決定することができる。特に、粒子間摩擦角 ϕ_{μ} の値が同じ場合、粘着力 c が粒子間ボンド係数 t_{μ}' に大きく影響を受け、内部摩擦角 ϕ が転がり摩擦に関する係数 b の値に主に依存して決まることから、 t_{μ}' と b を c と ϕ のそれぞれの値を決める、わかりやすいパラメータとして用いることができる。これにより、例えば、異なる c , ϕ を持つ数種類の地層で構成される地盤を簡単にモデル化することが可能である。ただし、非現実的なDEMパラメータを入力値としないよう注意が必要である。転がり摩擦に関する係数 b の値は0.50ほどで粒子回転をほぼ停止させてしまうので、本研究で用いた範囲の値(0.05~0.30)を選択すべきである。また、非現実的な粒子間摩擦角の値(45(deg.)以上)を入力すると、エネルギー収支の誤差が増大する¹³⁾ため、ここにも注意が必要である。

表-2 各 t_u' と b の値によって得られる c と φ の値 (φ_u の値を固定した場合)

(a) $\varphi_u=20$ (deg.) に固定した場合					(b) $\varphi_u=30$ (deg.) に固定した場合				
t_u'	$b=0.05$	$b=0.10$	$b=0.20$	$b=0.30$	t_u'	$b=0.05$	$b=0.10$	$b=0.20$	$b=0.30$
0	$c=5.7$	$c=7.19$	$c=8.7$	$c=10.6$	0	$c=7.9$	$c=10.3$	$c=10.2$	$c=11.5$
	$\varphi=26.8$	$\varphi=31.0$	$\varphi=35.9$	$\varphi=38.8$		$\varphi=27.8$	$\varphi=32.2$	$\varphi=39.4$	$\varphi=44.8$
30	$c=18.6$	$c=21.5$	$c=21.6$	$c=25.2$	30	$c=21.1$	$c=23.7$	$c=30.2$	$c=31.1$
	$\varphi=26.5$	$\varphi=30.6$	$\varphi=37.0$	$\varphi=38.1$		$\varphi=27.5$	$\varphi=33.2$	$\varphi=38.0$	$\varphi=44.1$
60	$c=30.9$	$c=37.3$	$c=37.0$	$c=39.5$	60	$c=35.5$	$c=39.3$	$c=52.1$	$c=54.6$
	$\varphi=26.0$	$\varphi=30.0$	$\varphi=35.9$	$\varphi=38.9$		$\varphi=26.8$	$\varphi=32.6$	$\varphi=37.0$	$\varphi=43.9$
120	$c=55.7$	$c=65.4$	$c=70.4$	$c=67.5$	120	$c=61.1$	$c=68.6$	$c=92.6$	$c=96.1$
	$\varphi=25.7$	$\varphi=30.0$	$\varphi=35.1$	$\varphi=38.2$		$\varphi=26.6$	$\varphi=32.2$	$\varphi=37.5$	$\varphi=44.7$

5. おわりに

DEMを地盤工学で扱う境界値問題へ適用することを念頭に、パラメータ数の少ないシンプルなDEMモデルを提案した。その結果、通常の円形粒子を用いたDEMに、新たに導入したモデルに対応するパラメータを2つ加えるだけで、工学的に有用な範囲の粘着力と内部摩擦角を得ることができた。また、パラメトリックスタディによって得られたDEMパラメータと地盤強度 c , φ の相関関係は非常に簡潔なので、シミュレーション対象とする地盤の粘着力と内部摩擦角が既知の場合に、適切なDEMパラメータを容易に決定することができる。

ただし、本研究での議論は、密詰め砂の強度特性に焦点が絞られているため、現段階での提案モデルの適用範囲は限られたものとなっている。よって今後、DEMの実務利用を見据えるのなら、緩い砂の挙動やせん断に伴うダイレイタンス特性についての議論も必要である。

さらに、本研究では2次元DEMを用いて新しい考え方を紹介したが、円盤要素の2次元DEMが現実の3次元の材料にそのまま適応できるとは考えていない。3次元性が重要な問題にここで提案するモデルを導入するためには3次元のDEMが必要となることは言うまでもなく、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 2) 村上貴志, 村上 章: DEMによる地質構造の斜面崩壊形態への影響検討, 第41回地盤工学研究発表会, pp.2105-2106, 2006.
- 3) 刈田圭一, 前田健一, 羽柴寛文, 牛渡裕二, 山口悟: 個別要素法を用いた水平体積層における落石に

よる衝撃力の伝播挙動解析, 第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, 2010.

- 4) 吉田 順: 粒状体の内部摩擦角と土圧係数の関係に関するDEMを用いた検討, 土木学会第60回年次学術講演概要集, pp.455-456, 2005.
- 5) 原 嘉教, 前田健一, 大野了悟, Azam Syariff Zahar: DEM解析による周辺摩擦の異なる杭の鉛直支持力に及ぼす密度・土被り圧の影響, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.255-262, 2002.
- 6) Utili, S. and Nova, R.: DEM analysis of bonded granular geomaterials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.32, pp.1997-2031, 2008.
- 7) 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, 1993.
- 8) ITASCA: PFC2D Theory and background, Itasca Consulting Group, Inc., 2004.
- 9) Jiang, M.J., Yu, H.S. and Harris, D.: Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granular by DEM analyses, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 30, pp.723-761, 2006.
- 10) Matsushima, T., Katagiri, J., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., Nakano, T.: 3-D Shape Characterization and Image-based DEM simulation of the Lunar soil stimulant, FJS-1, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol.21, No.1, pp.15-23, 2009.
- 11) 澤田純男, プラダンテージ B.S., 岩崎好規: 個別要素法による粒状体の単純せん断挙動, 第27回土質工学研究発表会, pp.573-576, 1992.
- 12) 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.
- 13) 土木学会 離散体の小委員会: 地盤に関する解析技術(個別要素法)講習会テキスト, 2010.
- 14) Kadau, D., Schwesing, D., Theuerkauf, J. and Wolf, D. E.: Influence of particle elasticity in shear testers, *Granular Matter*, Vol.8, pp.35-40, 2006.
- 15) 中瀬 仁, 本田 中, 西野隆之: 個別要素法摩擦パ

- ラメータを設定するためのねじりせん断シミュレーション, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.503-504, 2001.
- 16) Cundall, P. A.: 4 Distinct Element Methods of rock and soil structures, *Analytical and Computational methods in Engineering Rock Mechanics*, pp.129-163, E. T. Brown, Ed. London: Allen&Uwin, 1987.
- 17) 最上武雄: 土質力学, 技報堂出版, 1969.
- 18) Zhang, L. and Thornton, C.: A numerical examination of the direct shear test, *Géotechnique*, Vol.57, No.4, pp.343-354, 2007.
- 19) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), 丸善, 2000.
- 20) Poschel, T. and Schwager, T.: 7 Bottom-to-Top Reconstruction, *Computational Granular Dynamics*, pp.271-291, 2005.
- 21) 山本修一: 個別要素法による粒子間の転がり抵抗が粒状体の内部摩擦角におよぼす影響の検討, 第 32 回地盤工学研究発表会, pp.497-498, 1997.
- 22) Jiang, M.J., Konrad, J.M. and Leroueil, S.: An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies, *Computers and Geotechnics*, Vol.30, pp.579-597, 2003.
- 23) Cambou, B., Chaze, M. and Dedecker, F.: Change of scale in granular materials, *European Journal of Mechanics A-Solids*, Vol.19, pp.999-1014, 2000.

(2011.1.14 受付)

FAILURE CRITERIA FOR GEOMATERIALS IN SIMPLE DISCRETE ELEMENT MODELING

Yutaka FUKUMOTO, Hide SAKAGUCHI and Akira MURAKAMI

A simple model for the Discrete Element Method (DEM) with fewer parameters is proposed so that boundary value problems in geotechnical engineering can be studied. The interparticle contact bond model, which reproduces the behavior of cohesive geomaterials, and the rolling friction model, which expresses the interlocking effect of grain shapes with circular particles, are introduced into the conventional contact model for the two-dimensional DEM. Both of these models require only one parameter. Parametric analyses, based on several direct shear tests, are performed to validate the proposed model and to obtain relationships between the DEM parameters and the failure criteria for geomaterials by means of c and φ .