

一面せん断強度に対する個別要素法パラメータの同定

Numerical study on the shear strength by direct shear test in Distinct Element Method

村上貴志*・村上 章**・阪口 秀***

Takashi MURAKAMI, Akira MURAKAMI and Hide SAKAGUCHI

*正会員 修(環境理工) 財団法人 地域地盤環境研究所 研究員 (〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀 4-3-2)

** 農博 岡山大学大学院教授 環境学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

*** 博(農学) 独立行政法人 海洋研究開発機構 グループリーダー (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

In this paper, the expression of mechanical behavior of geomaterials in Distinct Element Method (DEM) is examined. Inter-particle contact bond model and rolling resistance models has been implemented in DEM to reproduce the ground property like cohesion and internal friction angle. Through parametric simulations based on several direct shear tests, relation between ground property and DEM parameters were examined. According to simulation results, multiple linear regression analysis has been conducted and relational expression between soil strength parameter (c , ϕ) and parameters of inter-particle contact has been obtained. Direct shear simulation has been conducted to validate the relational expression and possibility of application of real soil modeling in DEM was described.

Key Words: Distinct Element Method, direct shear test, Coulomb failure criterion

キーワード: 個別要素法, 一面せん断試験, クーロンの破壊基準

1. はじめに

近年多発する地盤災害による被害を軽減するためには、地盤が破壊し、流動するような複雑な過程を事前に予測しておくことが重要となる。地盤が崩壊した後の挙動の予測シミュレーションに個別要素法¹⁾の適用を筆者らは試みている²⁾。このようなシミュレーションにおいて、特定の地域における実際の現象を予測しようとする場合、地盤の物性を個別要素法において如何に反映するかが重要となる。しかしながら、地盤の物性値を反映した個別要素法パラメータ設定手法は未だ確立されているとは言えない。そこで本論文では、地盤物性値を反映するための個別要素法における力学モデルを設定し、一面せん断シミュレーションによりそのパラメータ設定について検討した。

個別要素法におけるパラメータの設定手法としては弾性理論に基づく手法³⁾や、地盤の弾性波速度から推定する手法⁴⁾などが挙げられる。しかし、これらの手法で用いている地盤情報は、工学の検討で一般的に用いられるものではなく何らかの換算を伴う必要がある。個別要素法を斜面崩壊などの破壊問題に適用することを目的とすれば、地盤の基本的な物性値として、まずは粘着力および内部摩擦角を適切に反映することが必要であると考えられる。

粘着力・内部摩擦角のような地盤物性は、土試料としての粒子集合体に対する試験から得られるマクロなパラメータであり、他方、個別要素法パラメータは個々の粒子間における接触関係に関して定義されるミクロなパラメータである。よって、この両者を理論的に関係づけることは極めて難しいと言える。本論文では、様々な個別要素法パラメータを用いてシミュレーションを実施した場合に、粒子集合体としてどのような挙動をするのかを事前に精査する。これにより、個別要素法パラメータと粒子集合体としての粘着力・内部摩擦角の対応関係を得ておき、逆に、地盤の粘着力・内部摩擦角が与えられた場合に個別要素法におけるパラメータ設定ができる手法を検討する。しかし、一般的に個別要素法で用いられる力学モデルのパラメータを調整しただけでは、工学的に対象となる範囲の挙動が得られないことも知られており⁵⁾、これに対応するモデルの導入が必要となる。以下に、その具体を示す。

粘着力については、粒子間に固着(ボンド)の存在をモデル化することで、粒子集合体としての粘着力が発現されることが考えられる。粒子間ボンドのモデルとしては、粒子間バネを圧縮方向だけでなく引張方向にも作用させるモデルが数々提案されている^{6,7)}。しかし、これらのモデルでは粒子同士の固着をモデル化することができない一方、複数

のパラメータが追加されたり、複雑な計算を必要としたりする。本論文の目的である地盤物性と個別要素法パラメータの関係を見いだそうとする場合には、より少ないパラメータで表現できるモデルを用いることが望ましい。そのため、粒子間にモール・クーロン則を考慮して通常の個別要素法でも用いられる粒子間摩擦係数との組み合わせによって定義される Nova ら⁸⁾⁹⁾によるボンドモデルを導入し、地盤材料の粘性特性をモデル化することとした。

内部摩擦角については、円形要素を用いた場合には粒子間の摩擦係数を大きくしても得られる粒子集合体としてのせん断強度が小さく⁹⁾、工学問題の対象となる内部摩擦角を網羅できないことが知られている。この問題に対処する方法として、楕円形状の要素の利用¹⁰⁾や、複数粒子で粒子形状を詳細にモデル化する¹¹⁾などの方法がある。前者の場合は粒子間力や接触判定が複雑であり、後者の場合は工学上問題となるスケールのシミュレーションを実行する際、膨大な粒子数を用いたシミュレーションが必要となる。そこで、本論文では計算負荷と物理モデルとしての妥当性の両者を両立した阪口ら^{12),13)}による転がり抵抗を用いることとした。

これらのモデルを個別要素法に導入し、一面せん断試験シミュレーションを様々なパラメータの条件下で実施することにより、個別要素法パラメータと粒状体としての粘着力・内部摩擦角の関係を見いだすことを試みた。本論文の構成は以下のである。まず、上記の個別要素法における力学モデルの詳細について示した後、一面せん断試験シミュレーションの手順について説明する。次に、様々な個別要素法パラメータを用いた一面せん断試験シミュレーションの結果を示し、個別要素法パラメータが粘着力・内部摩擦角それぞれに与える影響を考察し、逆に、地盤の粘着力・内部摩擦角から個別要素法パラメータを設定する手法について検討する。最後に、地盤の粘着力・内部摩擦角が与えられた場合の個別要素法パラメータを推定し、一面せん断試験シミュレーションによって得られる結果との比較をおこなった。

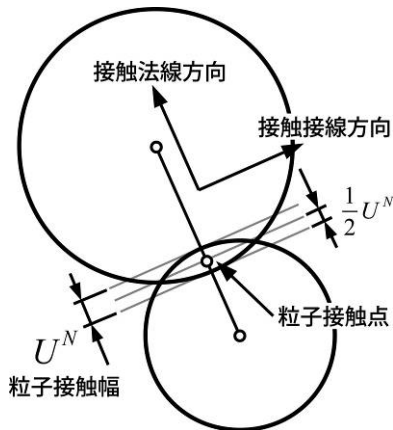


図-1 個別要素法における粒子間接点の概要

2. 個別要素法における地盤物性のモデル化

地盤材料の物性値として代表的な粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を個別要素法において表現するために粒子間ボンドモデルおよび転がり摩擦を導入した。図-1には以下の説明で用いる、粒子間接点の位置関係を示す。

2.1 粒子間粘着力

個別要素法において地盤材料の粘着力 c を表現するために、Nova らによる粒子間ボンドモデル⁸⁾⁹⁾を導入した。これは、粒子間力にクーロンの破壊規準を導入したものであり、接触法線方向および接線方向の粒子間力 F^N および F^T は図-2で定義されている。通常の個別要素法における粒子接触の場合は、粒子同士が接している状態でのみ粒子間バネによる斥力が作用する。一方、Nova らのボンドモデルでは粒子同士が接触していなくとも、ボンド作用している時には粒子バネが引張方向に作用する。Nova らのモデルの特徴は接触法線方向、接線方向それぞれに対するボンド強度が粘着力に関するパラメータ c_μ （以下、粒子間粘着力と呼ぶ）を追加するだけで定義されることが挙げられる。粒子接触法線方向および接線方向の強度は次式により得られる。

$$t_\mu = c_\mu / \tan \phi_\mu \quad (1)$$

$$F_{\max}^T = c_\mu + F^N \tan \phi_\mu \quad (2)$$

ここで、 t_μ は引張方向のバネ強度でありこの強度を超過するとボンドが破壊し、再度接触した場合は通常の粒子接触として扱われる。式(2)については通常の接触接線方向の摩擦による滑りの条件に粒子間粘着力が加算された形式となっており、粒子間力が $F_{\max}^T$ を超過した場合は粒子相互の滑りが生じるのみで接線方向のボンドは破壊しないこととした。この破壊条件をNova らはDFモデルと呼ぶ。

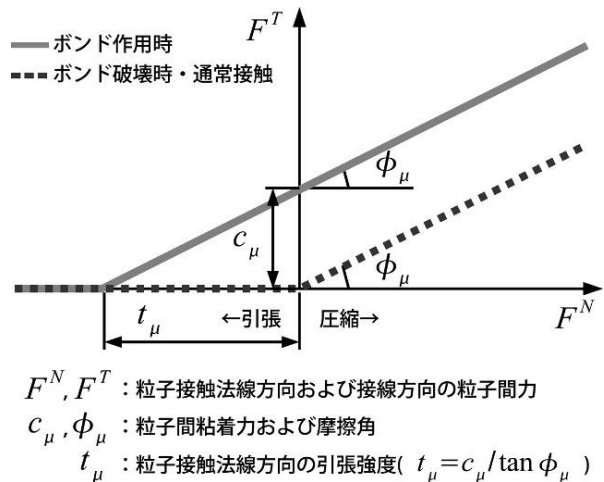


図-2 粒子間粘着力モデルの概要

であり、2軸圧縮シミュレーションの結果から地盤材料の c 、 ϕ を再現するのに適しているとしていることから、本研究でも同じ破壊条件を設定した。

Novaらは上記モデルを用い、粒子間粘着力 c_μ ・粒子間摩擦角 ϕ_μ と粒子集合体の粘着力 c ・内部摩擦角 ϕ の関係を検討しているが、円形要素を用いて大きな内部摩擦角を得るために粒子の回転を拘束している。すなわち、粒子挙動は並進運動のみで表現されている。これは、粒子集合体としての挙動を簡潔なモデルで記述するために設定されたものであるが、一方で、回転を拘束したシミュレーションは一般的な境界値問題に適用すべきでないとの指摘もある¹⁴⁾。特に、著者らが目的としている斜面崩壊のような粒状体が流動するような現象に対しては、不具合が生じる可能性がある。そのため次節に示すように、粒子の回転を抑制する手法として物理的考察に基づいた転がり摩擦を導入した。

2.2 転がり抵抗

円形粒子を用いつつ工学的に有用な範囲でのせん断強度を個別要素法で得るために、粒子形状のインターロッキング効果をモデル化した転がり抵抗^{12),13)}を導入する。転がり抵抗の概要を図-3に示す。転がり抵抗モーメント M_r の大きさは粒子形状による転がりにくさのパラメータである転がり摩擦係数 a に法線方向接触力 F^N を掛けることで算出され、転がろうとする方向の反対向きに作用する。転がり抵抗モーメントのみによる逆回転や自発的な回転は生じない。

転がり摩擦係数は中瀬ら¹⁵⁾のように転がり抵抗角と転がり摩擦の係数によって表現されることもあるが、本研究では阪口による定義¹³⁾に従い、転がり摩擦係数を粒子中心から粒子接触点までの距離に係数を掛けた長さ a で定義する。また、前節で述べた粒子間ボンドについては、転がり抵抗が粒子形状に起因する転がりにくさを表現していることを考慮し、粒子同士が接触する場合にのみ作用する

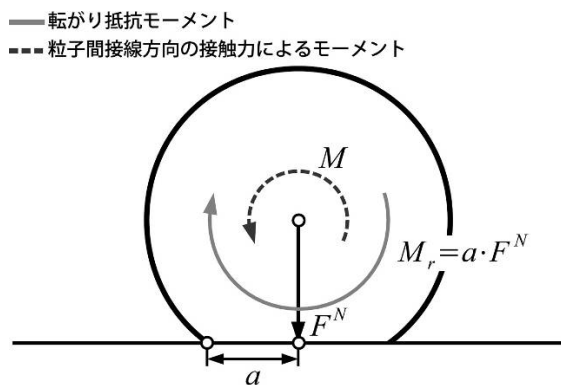


図-3 転がり抵抗の概要

こととした。本研究では、転がり抵抗は以下の手順により算出した。

- ① 接触法線方向の粒子間力 F^N を求める
- ② $F^N < 0$ の場合（ボンドが引張方向に作用）の場合は転がり抵抗を考慮しない。
- ③ 粒子中心から粒子接触点までの距離 r' に応じて転がり摩擦係数 $a = b \cdot r'$ を算出する。ここで、 b は粒子半径に対する接触面長さの係数であり、入力条件となる。粒径の異なる粒子同士が接触する場合には a が小さい方の値をその接触点において採用する。
- ④ $M_r = a \cdot F^N$ より転がり抵抗モーメントを算出し、接触している粒子同士の相対角速度を考慮し、転がろうとする方向の逆向きに作用させる。
- ⑤ 全ての接触点における転がり抵抗モーメントの総和 ΣM_r を求める。
- ⑥ 粒子間接線方向力による回転モーメント ΣM によって生じる角速度 ω および、 $\Sigma M + \Sigma M_r$ によって生じる角速度 ω_r を求める（時間積分を2度実行する）。
- ⑦ ω と ω_r の向きが逆の場合、転がり抵抗によって逆回転が生じないように角速度を強制的に0とし、同じであれば転がり抵抗を考慮した角速度 ω_r を用いる。

以下、本論文では転がり摩擦に関するパラメータとして、手順③に示した粒子半径に対する接触面の長さの係数 b の値で示す。

3. 一面せん断試験シミュレーション

3.1 初期配置の作成

一面せん断シミュレーションは2次元における定圧一面せん断をおこなった。粒度分布はZhangら¹⁶⁾と同等の粒度分布を用い、計算効率を考え最小最大粒径をNovaらの検討⁹⁾と同じ1.5~4.5mmへスケールアップして用いた（図-4）。この粒度分布を用い、幅315mm、高さ150mmの領域における粒子配置を作成する条件で、bottom-to-top reconstruction アルゴリズム¹⁷⁾により幾何学的に初期状態を作成した。シミュレーションに用いた粒子数は4824個であり、初期間隙比は0.3457であった。一面せん断試験では初期間隙比がせん断強度に大きく影響することから¹⁸⁾、パラメータ・スタディの際にはせん断開始時の間隙比を調整する必要がある。そこで、粒子間粘着力、粒子間摩擦角、転がり摩擦が0の状態、一面せん断試験で設定するのと同じ垂直力を作用させて安定するまで待ち、その後、粒子間の接触力情報を引き継ぎつつ、全ての粒子間にボンドを作用させると共に、所定の粒子間粘着力、粒子間摩擦角、転がり摩擦係数のパラメータを作用させた後、再び安定した状態を作成した。この状態が一面せん断試験における圧密完了時に相当する。

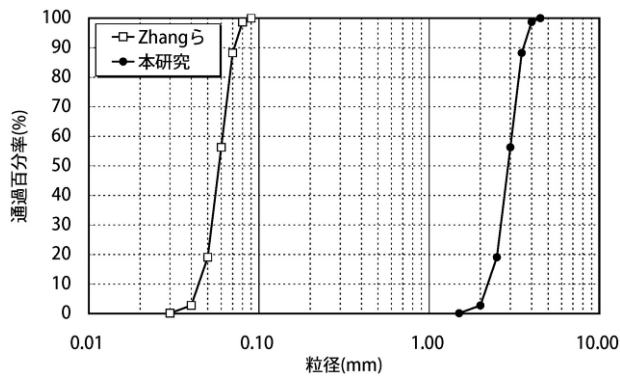


図-4 シミュレーションに用いた粒度分布

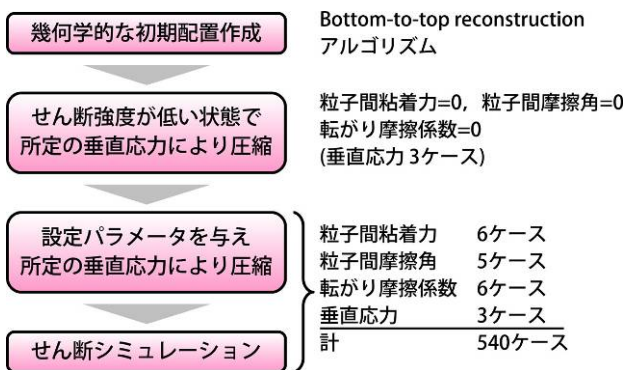


図-5 一面せん断試験シミュレーションにおける粒子初期配置作成フロー

厳密には同じ垂直力でも、個別要素法パラメータを変化させた後に僅かながら粒子が動くため、せん断開始時の初期間隙比は異なっているが、垂直応力が 50, 100, 150 kN/m² の場合の間隙比 (および標準偏差) は、それぞれ 0.2006 (0.0187), 0.1950 (0.0182), 0.1897 (0.0173) でありほぼ同程度の初期間隙比が作成できていると考えられる。以上の手順の後、せん断箱にせん断変位を与えることでせん断を開始する。粒子初期配置の作成フローを図-5に示す。

図-6にはせん断試験シミュレーションの概要を示す。せん断箱の寸法は地盤工学会基準 (JGS0560-2000)¹⁹⁾に準じ、幅を最大粒径 4.5mm の 70 倍とし、高さは試料の圧縮も考慮してやや大きめに設定した。せん断箱を構成する壁要素と粒子間には摩擦が生じないものとし、加圧板および圧力板はせん断力を伝えるために粒子と同じ物性値を設定した。ただし、壁要素と粒子間にボンドは作用しないこととした。シミュレーションにおいては地盤工学会基準を参考に、せん断箱幅の約 10% (32mm) までせん断をおこなった。

3.2 シミュレーション条件

一面せん断シミュレーションで用いたパラメータ一覧を表-1に示す。静的な条件下では粒子の弾性は全体の挙動に対して支配的なパラメータでは無い²⁰⁾ことから、粒子間バネ係数は中瀬ら¹⁵⁾と同じ値を用いた。減衰は local damping²¹⁾によりおこない、係数は計算効率と計算結果に

表-1 シミュレーションに用いたパラメータ一覧

パラメータ	設定値
粒子密度 (kg/m ³)	2400
法線方向バネ係数 (kN/m)	4.00×10^4
接線方向バネ係数 (kN/m)	1.44×10^4
local damping 係数	0.2
せん断変位速度 (%)	2.5
時間増分 (sec)	5.0×10^{-6}
粒子間粘着力 (N)	0.0, 5.0, 25.0, 50.0, 75.0, 100.0
粒子間摩擦角 (°)	5.0, 15.0, 30.0, 45.0, 60.0
粒子半径に対する接触面長さの係数	0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6
垂直応力 (kN/m ²)	50, 100, 150

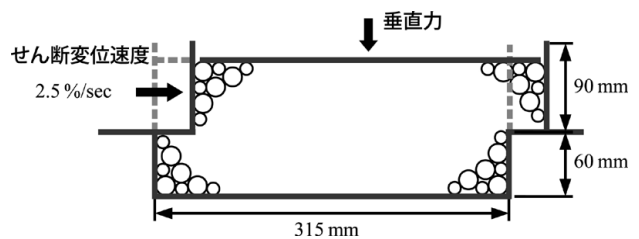


図-6 一面せん断試験シミュレーションの概要

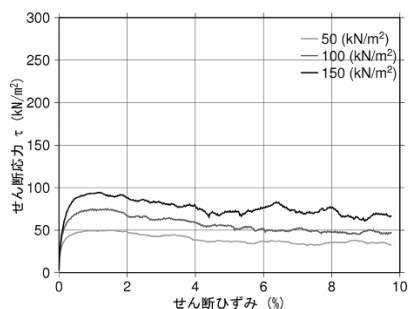
与える影響を少なくすることを考え、事前の試験検討より 0.2 とした。なお、local damping は物体力には作用させず、重力加速度には減衰が作用しないようにしている。

パラメータ・スタディのために粒子間粘着力 6 ケース、粒子間摩擦角 5 ケース、転がり摩擦係数 6 ケース、垂直応力 3 ケースの計 540 ケースの一面せん断試験シミュレーションを実施した。

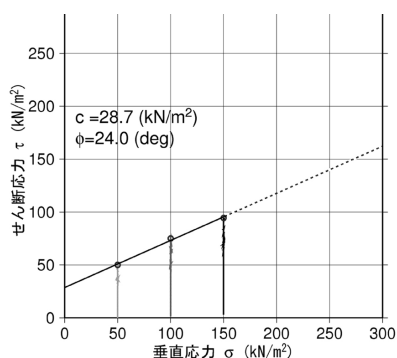
4. 地盤物性値と DEM パラメータの検討

4.1 シミュレーション結果

一面せん断試験より得られた結果の一例を図-7に示す。シミュレーション結果は、各設定パラメータに対して図-7(b)のようにせん断応力～垂直応力関係をプロットし、最大のせん断応力が得られた場所を各垂直応力に対して求めた。本研究で用いた拘束圧に対する粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求めるため、クーロンの破壊基準を考慮して最小二乗法による線形回帰をおこなった。得られた回帰直線より粒子集合体としての粘着力 c および内部摩擦角 ϕ が 180 ケース得られた。決定係数は最も小さいもので 0.9201 と回帰直線は良くあてはまっていると言える。ただし、検討した拘束圧の範囲以外でも成り立つことを保証するものではなく、図中では 150kN/m² 以上における回帰直線は破線で示した。なお、定圧一面せん断試験により得られる各定数は、排水試験であることから通常 c_d , ϕ_d と表



(a) せん断応力～せん断ひずみ関係



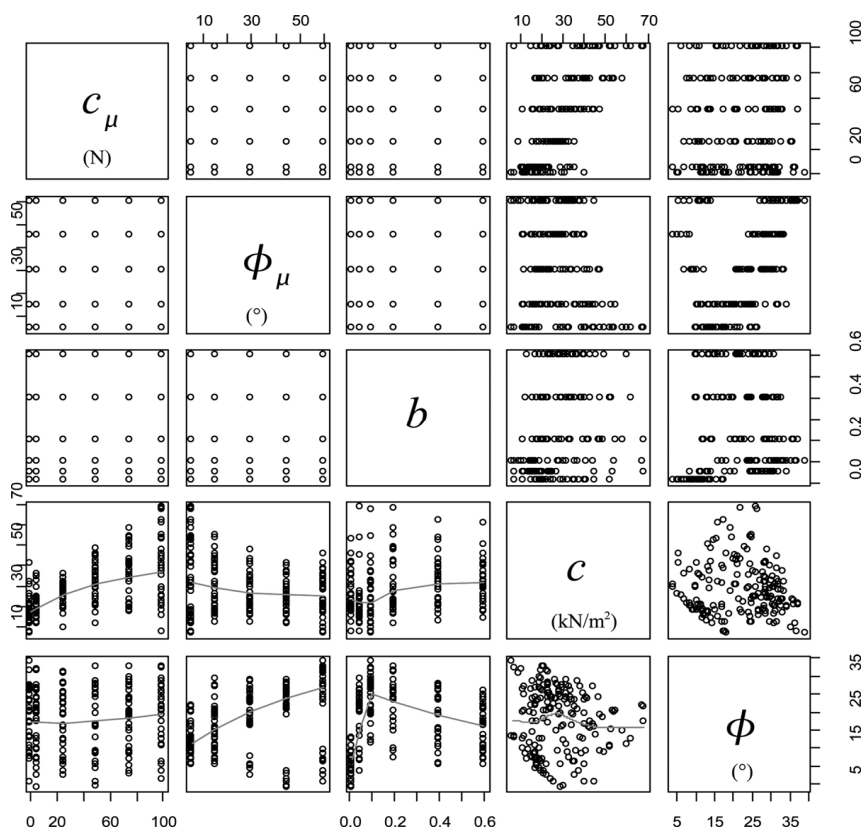
(b) 最大せん断応力～垂直応力関係

図－7 $c_{\mu}=25 \text{ N}$, $\phi_{\mu}=15^{\circ}$, $b=0.1$ の場合の
一面せん断試験シミュレーション結果

記されるが、今回の個別要素法シミュレーションにおいては間隙水圧や空気圧はそもそも考慮していないことから、混乱を避けるため便宜的に c 、 ϕ として記述した。

図－8にはシミュレーションのパラメータである粒子間粘着力 c_{μ} 、粒子間摩擦角 ϕ_{μ} 、係数 b とシミュレーション結果として得られた粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の散布図行列を示す。本研究で対象とする個別要素法パラメータと粒状体物性値の相関は、シミュレーション条件を横軸とする左下部のグラフに示される。 c に着目すると、 $c_{\mu} \sim c$ の間に相関が認められる。また $\phi_{\mu} \sim c$ 、 $b \sim c$ 間には $c_{\mu} \sim c$ ほどの明瞭な相関は認められない。このことは、今回導入した Nova らによる粒子間ボンドを用いることで、地盤材料の粘着力 c が表現・設定できる可能性を示唆している。

一方 ϕ に着目すると、 $c_{\mu} \sim \phi$ の間に相関は認められない。また、 $\phi_{\mu} \sim \phi$ は基本的には相関が見られるが、一部のデータは ϕ_{μ} の増加に対して ϕ が若干低下する傾向にある。これらは、係数 $b=0.01$ とした場合であることから、円形要素を用いた場合、転がり抵抗が微小な値では大きなせん断強度を表現できないと考えられる。 $b \sim \phi$ との関係については、 $b=0.05 \sim 0.10$ 付近をピークとして、 b が増加するに従い ϕ が減少する傾向が見られる。これは本研究と同等なモデルによって転がり摩擦をモデル化している中瀬ら¹⁵⁾や山本²²⁾の報告における、転がり摩擦の増加に伴い大きなせん断強度が得られる結果と異なる傾向である。またこの傾向は、粒状体のインターロッキング効果の増加に従い、せん断強度が低下していることに相当し、実際の現象に反するとも考えられる。



図－8 一面せん断試験シミュレーションにおける各パラメータの散布図行列

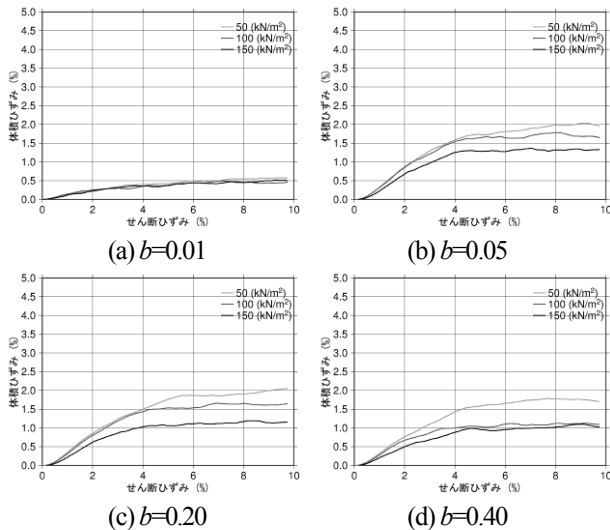


図-9 体積ひずみ～せん断ひずみ関係
 $c_\mu = 25 \text{ N}$, $\phi_\mu = 15^\circ$ の場合

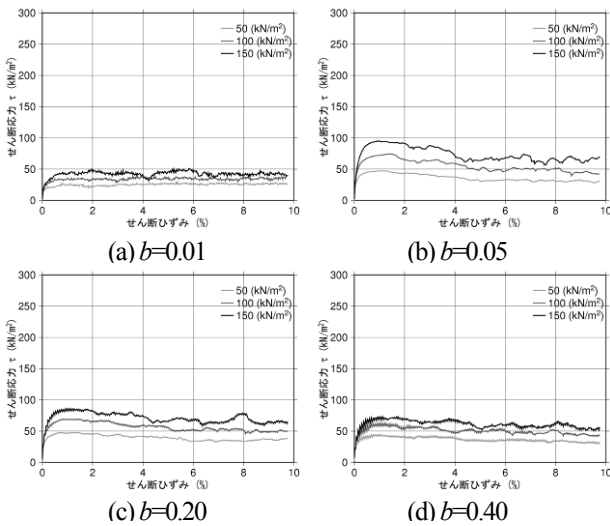


図-10 応力比～せん断ひずみ関係
 $c_\mu = 25 \text{ N}$, $\phi_\mu = 15^\circ$ の場合

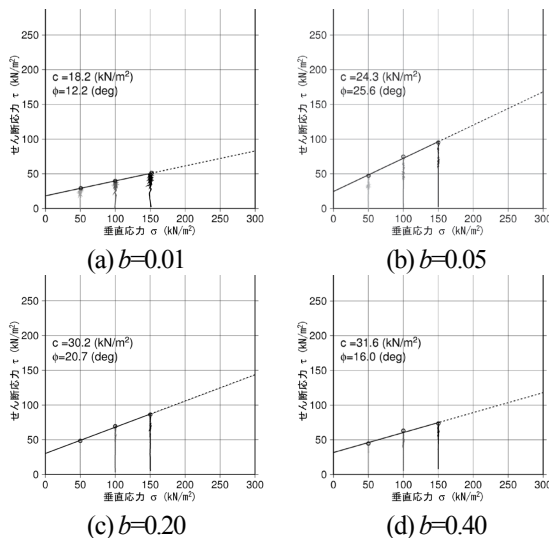


図-11 最大せん断応力～垂直応力関係
 $c_\mu = 25 \text{ N}$, $\phi_\mu = 15^\circ$ の場合

このような結果の原因として、2次元個別要素法で一面せん断試験をおこなう際の低い粒子自由度が考えられる。中瀬ら¹⁵⁾は周期境界を用いたねじりせん断試験を、山本²²⁾は二軸圧縮試験により転がり抵抗と内部摩擦角の関係を検討している。これらの条件は、剛なせん断箱に強制変位を与える一面せん断試験よりも定圧境界に接する範囲が広く、結果として粒子配置の自由度が高いと考えられる。

図-9にはせん断中の体積ひずみ～せん断ひずみ関係の一例を示す。 $b=0.01$ と転がり摩擦が非常に小さい条件では体積ひずみは0.5%程度に止まっているが、 b が大きくなると加圧板が押し上げられ比較的大きな体積ひずみが生じている。これは、 $b=0.01$ のケースでは転がり摩擦による回転抑制効果が小さく、粒子の回転を伴った粒子の再配置が発生することで、ダイレイタンシーが小さくなっていると考えられる。一方で、比較的大きな b の場合、粒子の回転が抑制されることによりインターロッキング効果が発現したことが、1.0～2.0%程度の体積ひずみが生じた原因として挙げられる。ただし、 b の増加に伴い体積ひずみは若干減少する傾向にあるが、これは粒子回転が強く抑制された結果として、接触接線方向力が大きくなり、滑りによる粒子再配置が増加するためと考えられる。

転がり摩擦の増加に伴って内部摩擦角が減少する直接の要因として、図-10に示すせん断応力～せん断ひずみ関係において、 b の増加に伴って垂直応力によるせん断応力の差が小さくなっていることが挙げられる。この差に関する傾向も、上述の粒子再配置のしやすさから同様に説明できると考えられる。すなわち、最も再配置が起きやすい $b=0.01$ においてせん断応力の差が小さく、 $b=0.05$ では回転が抑制されることによって粒子の移動が制限され大きなせん断応力を発生させる。そして、さらに b が増加する場合には粒子間の滑りが発生するようになり、せん断応力は粒子の移動によって緩和される。

図-11に示す最大せん断応力～垂直応力関係からは、 b の増加に伴って内部摩擦角が減少する代わりに、粘着力が増加する結果となっている。図-8においても $b \sim c$ 間に弱い相関が確認でき、転がり摩擦は粘着力・内部摩擦角を含めた粒状体の挙動全体に影響を与えていると考えられる。また図-11からは、定圧せん断強さを用いて得られる c , ϕ 関係はばらつきが少なく、設定した個別要素法パラメータのそれぞれの条件下で、 c , ϕ で代表される地盤特性が適切に再現されていると考えられる。

以上から、個別要素法におけるせん断強度は粒子配置にも大きく影響を受けており、転がり摩擦や粒子間の滑りによって粒子の再配置を抑制していると考えられる。そのため、今回のシミュレーション条件における結果は2次元特有で、3次元での一面せん断シミュレーションを実施した場合には異なる傾向となる可能性がある。

4.2 地盤物性値による個別要素法パラメータの推定

一面せん断試験シミュレーションの結果を用いて、 c および ϕ から c_μ 、 ϕ_μ 、 b を推定するために c_μ 、 ϕ_μ 、 b を目的変数とした重回帰分析をおこなった。ただし、図-8 にも示すように b は 0.0~0.1 程度の小さな値の場合と、それ以上の値を取る場合では異なる影響を粒状体に与えていることから、 $b=0.1$ 、0.2、0.4、0.6 の場合の結果のみを用いて回帰解析をおこなった。重回帰分析においては目的変数以外の 4 つのパラメータを説明変数とし、線形重回帰をおこなった後に、統計ソフト R により AIC 統計量による変数選択をおこなった。 c_μ 、 ϕ_μ 、 b を目的変数とした回帰分析結果を以下に示す。

$$c_\mu = 2.1703 \cdot c + 1.4389 \cdot \phi - 59.2895 \quad (3)$$

$$\phi_\mu = -0.2590 \cdot c + 2.6754 \cdot \phi + 48.5991 \cdot b + 0.8957 \quad (4)$$

$$b = 0.003770 \cdot c - 0.03895 \cdot \phi + 0.01308 \cdot \phi_\mu + 0.7887 \quad (5)$$

各回帰分析における自由度調整済決定係数 R_{adj}^2 は c_μ 、 ϕ_μ 、 b の回帰結果それぞれに対して 0.5796、0.8957、0.7000 であった。 c 、 ϕ から c_μ 、 ϕ_μ 、 b を推定しようとする場合、既知数 2 に対して未知数 3 であることから、 R_{adj}^2 のより大きい式(4)を用いて ϕ_μ を推定することとし、 b は別途任意に設定することとした。なお上記の式を用いてパラメータ設定をおこなう場合、 c 、 ϕ の値によっては c_μ 、 ϕ_μ が負値となる場合があるが、そのような場合は表-1 のパラメータ・スタディで用いた値の範囲で設定するように適宜調整をおこなった。例えば、 c に小さな値を代入すると c_μ が負値となるが、このような場合は ϕ 材料をモデル化していると考えられることから、 $c_\mu=0$ を設定すれば良い。

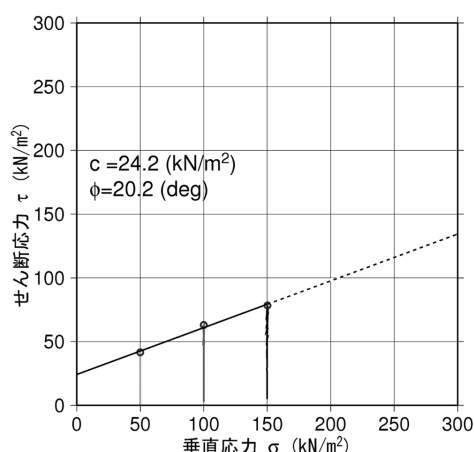


図-12 推定した個別要素法パラメータを用いた一面せん断シミュレーション結果
(式(3)、(4)で $c=20 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=20^\circ$ 、 $b=0.2$ とした)

同様に、 b を設定する際も重回帰分析に用いた範囲 ($0.1 \leq b \leq 0.6$) 程度で設定すべきである。

以上の式(3)、(4)に対して $c=20 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=20^\circ$ 、 $b=0.2$ を代入して算出される $c_\mu=12.89 \text{ N}$ 、 $\phi_\mu=13.56^\circ$ を用いてパラメータ・スタディで実施した時と同様な一面せん断試験シミュレーションをおこなった。結果のせん断応力～垂直応力関係を図-12 に示す。シミュレーション結果として、 $c=24.2 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=20.2^\circ$ と目的の c 、 ϕ に近い値が得られており、提案したパラメータの推定手順によって、地盤パラメータを反映した個別要素法シミュレーションが実行できる可能性がある。

上記の手法によって個別要素法パラメータを設定する場合、 b については解析者が任意に設定する必要がある。しかしながら、シミュレーション結果が示すように、 b もまた粒子集合体の挙動に影響を与えており、適切な設定手順を検討する必要がある。本研究で実施した一面せん断試験では $b \geq 0.1$ 程度の範囲では c 、 ϕ に与える影響は少ないと結果となったが、図-13 に示すように b は粒状体の安息角と関係があるなど無視できないパラメータであり、斜面崩壊などの現象をシミュレーションする場合には更なる検討が必要である。

一面せん断試験シミュレーションの結果が示すように、本研究における結果では特に転がり抵抗と内部摩擦角との関係において既往の研究と異なる結果が得られている。新たに地盤の粘着力を表現するためにボンドモデルを導入しており、必ずしも単純な比較はできないが 2 次元の定圧一面せん断試験以外のせん断試験によってさらに検討する事で、個別要素法パラメータと粒状体物性値の関係がより明らかになると考えられる。また、同じ一面せん断試験であっても 3 次元で計算した場合は粒子の自由度が高まることから、異なる傾向を示す可能性がある。そのため、

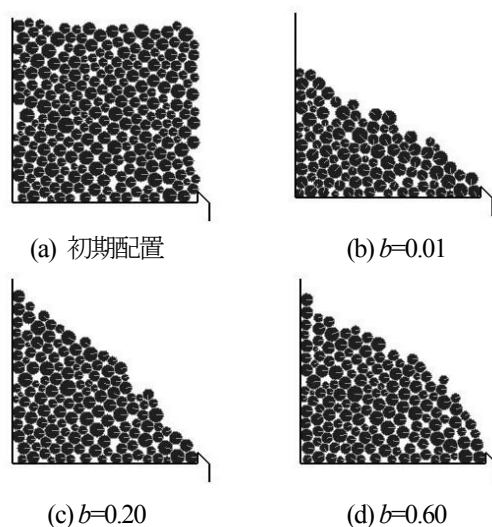


図-13 転がり摩擦係数による安息角の違い
 $c_\mu=25 \text{ N}$ 、 $\phi_\mu=15^\circ$ の場合

における 2 次元シミュレーションでは粒子自由度の低さが

地盤特性をより詳細に個別要素法において再現するためには 3 次元での計算を実施することが望ましいと考えられる。

5. まとめ

地盤の粘着力および内部摩擦角を個別要素法において再現するために、定圧一面せん断試験シミュレーションによって個別要素法パラメータと粒状体物性値の比較をおこなった。工学的検討の対象となる粘着力・内部摩擦角を得るために、粒子間ボンドおよび転がり抵抗モデルを導入した。個別要素法パラメータを変化させて一面せん断試験を実施するパラメータ・スタディをおこない、重回帰分析によりパラメータの推定式を求めた。

推定式によって設定したパラメータを用いてシミュレーションを実施すると、目的の地盤物性値に近い値が得られた。本論文で実施した手法により、個別要素法パラメータの設定手法が構築できる可能性が示唆されるが、一方で 2 次元の一面せん断試験が特殊な境界条件であり、他の問題にそのまま適用することは適切ではない可能性がある。異なるせん断試験や 3 次元でのシミュレーションを実施することで、より統一的な個別要素法パラメータの設定を目指したい。

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) 粉体工学会 編: 粉体シミュレーション入門, 産業図書, 1998.
- 4) 伯野元彦 : 破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997.
- 5) 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.
- 6) ITASCA : PFC2D Theory and background, Itasca Consulting Group, Inc., 2004.
- 7) Jiang, M.J., Yu, H.S. and Harris, D. : Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granular by DEM analyses, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30, pp.723-761, 2006.
- 8) Utili, S. and Nova, R. : Calibration of micromechanical parameters to reproduce a frictional cohesive continuum by the Distinct Element Method, *Proc. 12th International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp.163-170, 2008.
- 9) Utili, S. and Nova, R. : DEM analysis of bonded granular geomaterials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1997-2031, 2008.
- 10) 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.
- 11) Matsushima, T. : 3-D Image-based Discrete Element Modeling for Irregularly-Shaped Grains, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods -2004-*, pp.421-427, Shimizu, Hart & Cundall, Taylor & Francis Group, London, 2004.
- 12) 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.
- 13) 阪口 秀 : "4.2.1 粒子形状と転がり抵抗の影響", 土の構造とメカニクス—ミクロからマクロへ—, 土と基礎, Vol.50, No.11, pp.53-54, 2002.
- 14) 土木学会 応用力学委員会 離散体の力学小委員会 : 個別要素法(DEM)セミナー テキスト, 2007.
- 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) Zhang, L. and Thornton, C. : A numerical examination of the direct shear test, *Géotechnique*, 57(4), pp.343-354, 2007.
- 17) Pöschel, T. and Schwager, T. : "7 Bottom-to-Top Reconstruction", *Computational Granular Dynamics*, pp.271-291, 2005.
- 18) Liu, S.H., Sun De'an and Matsuoka, H. : On the interface friction in direct shear test, *Computers and Geotechnics*, Vol.32, pp.317-325, 2005.
- 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) Kadau, D., Schwesig, D. and Theuerkauf, J., Wolf, D. E. : Influence of particle elasticity in shear testers, *Granular Matter*, Vol.8, pp.35-40, 2006.
- 21) 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 & Unwin, 1987.
- 22) 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.

(2009 年 4 月 9 日 受付)