

土質試験シミュレーションにおける個別要素法 の特性検討

脊黒, 隆大 / YOSHIDA, Nagayuki / ITADANI, Tomohiro / 板
谷, 知洋 / SEGURO, Takahiro / 吉田, 長行

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

28

(開始ページ / Start Page)

54

(終了ページ / End Page)

61

(発行年 / Year)

2014

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00009851>

土質試験シミュレーションにおける個別要素法の特徴検討

Study on the Characteristics of Distinct Element Method in Soil Test Simulation

脊黒 隆大¹⁾ 板谷 知洋²⁾ 吉田 長行³⁾

Takahiro SEGURO, Tomohiro ITADANI, Nagayuki YOSHIDA

¹⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科建築学専攻

²⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科建築学専攻

³⁾ 法政大学デザイン工学部建築学科

The purpose of this study is to simulate the direct shear test by using Distinct Element Method (DEM), along with to investigate the characteristics of DEM in this simulation. The conventional shear test simulation using a shear box has a problem on interference between the shear box and test piece particles which causes the disorder in the shear force. To prevent this, the periodic boundary condition and the fixed particle boundary condition are introduced so that the shear box may be eliminated.

It is suggested from the results of the analysis, that when simulating direct shear test by DEM, a tangential force interacting between two particles does not have much influence against the peak value of shear stress and the angle of shear resistance. However, the stronger tangential force makes the particle engagement stable and coincidentally the noise in the shear stress curve reduce.

Keywords : DEM, the direct shear test, the boundary condition, tangential force

1. はじめに

個別要素法 (Distinct Element Method: 以降 DEM と略称する) は, Cundall, P.A.^{[1],[2]}が提唱した不連続体解析の1手法で, 砂や礫といった流状体の動的挙動を取り扱うのに適している. この手法を用いれば, 本来大がかりな機材や時間が必要な土質試験を, 計算機を用いて解析的にシミュレートすることが可能である. また, その際に流状体に生じる進行性破壊やダイレイタンス現象, せん断帯形成過程などを詳細に観察することが容易にできる. 本研究では DEM を用いて砂質土を対象とした一面せん断試験を再現し, そこでの DEM の特徴を把握することを目的としている. 従来のせん断箱を用いたシミュレーションではせん断箱と供試体粒子との干渉が, せん断力へ少なからぬ影響を与えてし

まうことが問題となっていた. 特にこれを防ぐためには, せん断箱を大きくし, 粒子との干渉を平滑化するなどの必要があるが, 解析領域の広域化や粒子数の増加は解析時間増大やアンダーフローのリスクを招くものである. そこで, 本論ではせん断箱を廃し, 解析領域の上下左右の境界条件を変更することによりごく限られた領域内での解析によって半無限大の領域を模擬することを目指した.

2. 解析手法

2.1 DEM

DEM の計算方法は伯野の文献^[3]および文献^[4]に詳しい. また, 本論では, 従来の DEM の計算方法を改良した松苗らの提案する直接累積解法^[5]を用

いることにより、より自然な挙動をシミュレーションにより再現する。

2.2 境界条件

2.2.1 周期境界

周期境界条件とは境界条件の一つで、有限系における解析領域の一つの境界を反対側の境界と繋がっているとみなすことにより擬似的に無限に大きな系を扱うことができるようにするものである。

2.2.2 固定粒子境界

これまでの研究において、せん断実験シミュレーションを行う際の底板とせん断板は供試体粒子とは別過程で作成されたほぼ平板に近い形状のものを使用していた。しかし、それでは供試体粒子との間に生じる噛み合わせが不完全であると考えられるため、本研究では底板とせん断板を次のような方法で作成することとした。

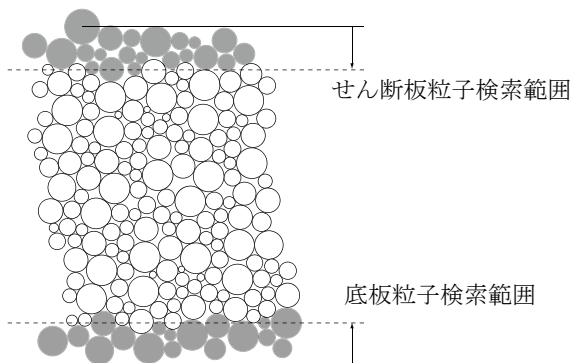


図.1 固定粒子境界

Fig.1 Fixed Particle Boundary

Fig.1 に示すように、充填後の供試体粒子のうち最上部にあるものから下方向へ粒径を考慮した上で十分な範囲を設定し、その範囲内にある粒子をせん断板とし、同様に、解析領域下端から上方向へ範囲を設定し、範囲内にある粒子を底板とした。せん断板を構成する粒子は一体となって動くよう挙動が制御され、回転が完全に拘束されている。本論では、以降、この境界を固定粒子境界と呼称する。

2.3 モデル作成

新たに導入した境界条件を使用したモデルの作成の一例を以下に示す。

初期配置作成のため一時的に設置した箱に自然落下により充填。その様子を Fig.2 に示す。

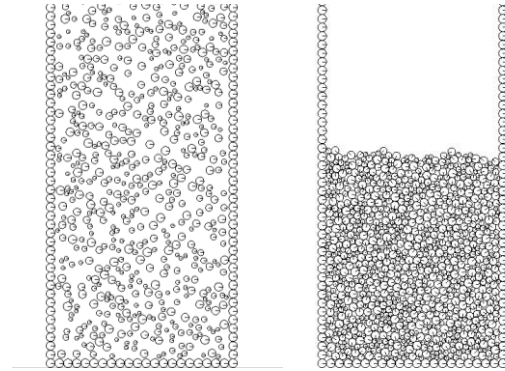


図.2 充填

Fig.2 Packing

充填完了後に周期境界を導入し、左右の壁を取り除いた後、安定状態に移行するまで時間を置き、安定状態移行後、固定粒子境界条件によりせん断板および底板を設定する。その様子を Fig.3 に示す。

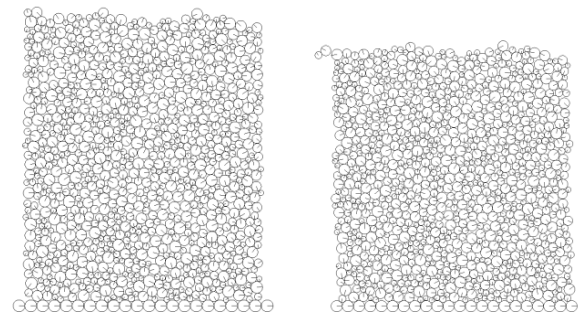


図.3 締固め

Fig.3 Compaction

2.4 解析内容

本論では前節で説明したモデルのせん断板に拘束圧を加えながら一定の速度でひずみ制御によってせん断を実施する。せん断速度は $1[\text{mm}/\text{sec}]$ とし、せん断変位が $20[\text{mm}]$ に達するまで続けるものとした。

シミュレーションにおいては砂質土を想定し、Table 1 に示すパラメータを基準として、粒径を変化させたモデル、粒子間摩擦力を変化させたモデル、バネ剛性を変化させたモデルについての解析を行い、その結果の比較検討を行った。

表 1 基準パラメータ

Table 1 Standard parameters

Normal stiffness of particles	$k_n = 1.0 \times 10^6$ [N/cm]
Shear stiffness of particles	$k_s = 2.5 \times 10^5$ [N/cm]
Inter-particle friction angle	$\phi_\mu = 27$ [deg]
Density of particle	$\rho = 2.65 \times 10^{-3}$ [kg/cm ³]
Damping factor	$h_n = h_s = 0.215$ [-]
Time step	$\Delta t = 1.0 \times 10^{-6}$ [sec]
Number of particles	1000

ここで、せん断応力の評価は底板に作用する水平方向の力の総和を解析領域幅で除したものとし、これにより描いたせん断応力図の結果から、せん断応力 τ の最大値、せん断強度 τ_f を、次式からせん断抵抗角 ϕ を決定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 c は粘着力、 σ は拘束圧である。

3. 解析結果

各種解析について、解析条件の変化による、せん断応力図、ダイレイタンスー曲線およびせん断抵抗角への影響を検証する。結果は解析条件、せん断応力図、ダイレイタンスー曲線の順に示し、せん断抵抗角をまとめたものを節末に載せる。

以下のグラフについて、作用させた拘束圧ごとに色分けがなされており、赤は 100[kPa]、緑は 200[kPa]、紫は 300[kPa]、青は 400[kPa] となっている。

3.1 粒子サイズ比較

周期境界間の単位深さあたりの粒子個数によるせん断応力への影響を検討するために、使用する粒径の違う 3 パターンの供試体モデルを作成しシミュレーションを行った。3 パターンのうち 2 つについては全粒子の粒径が均一な等径モデルで使用した粒子のサイズは 2[mm]と 5[mm]。残りの 1 つは 2~8[mm]の粒径を持つ粒子をランダムに作成したのとなっている。Fig.4~Fig.7 にその結果を示す。また、本解析には基準パラメータを使用している。

3.1.1 せん断応力図・ダイレイタンスー曲線

粒径 2[mm]

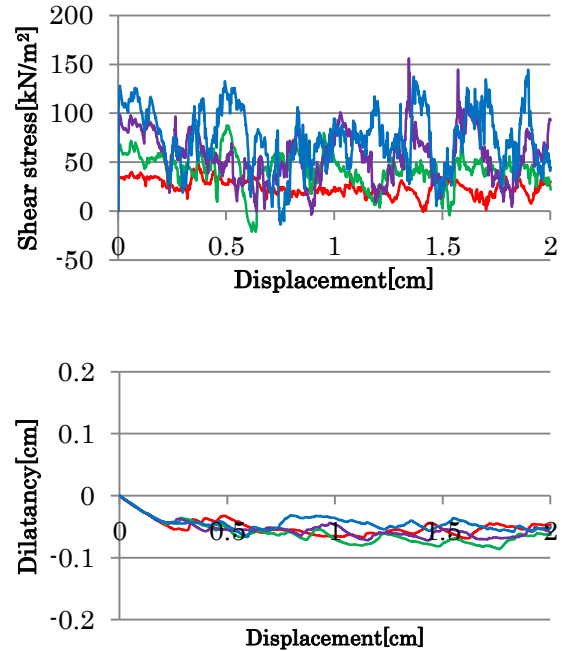


図.4 粒径 2[mm]

Fig.4 Particle size 2[mm]

粒径 5[mm]

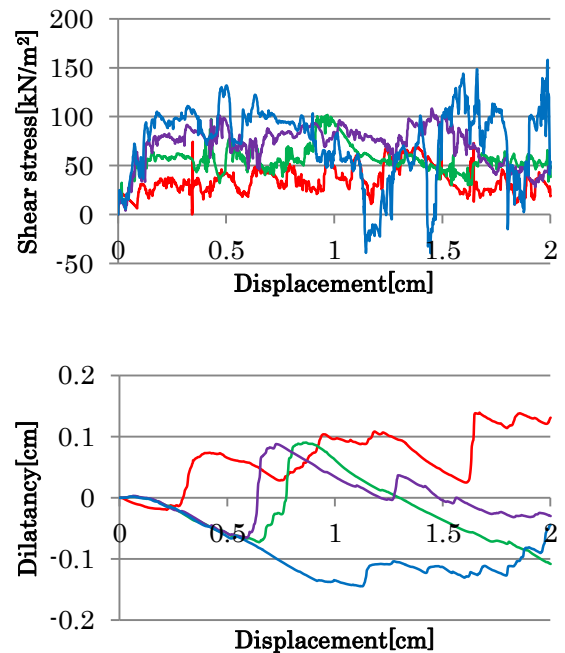


図.5 粒径 5[mm]

Fig.5 Particle size 5[mm]

粒径 2~8[mm]

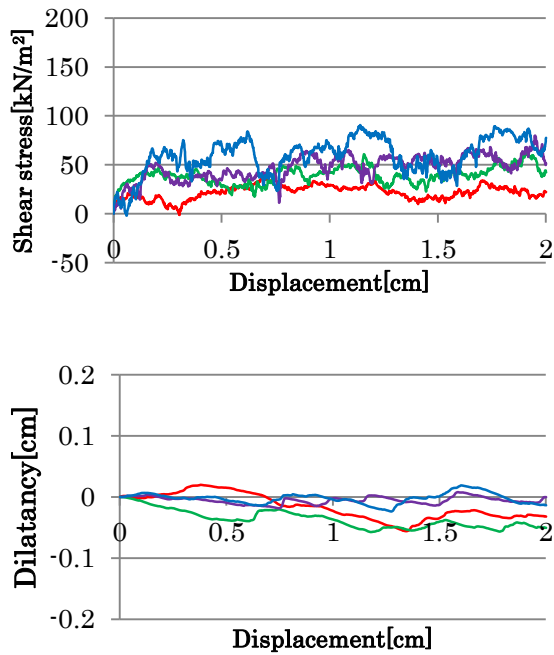


図.6 粒径 2~8[mm]
Fig.6 Particle size 2~8[mm]

3.1.2 せん断抵抗角の比較

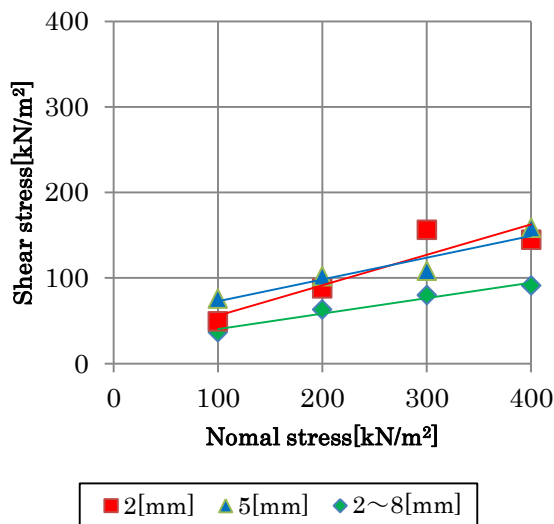


図.7 せん断抵抗角
Fig.7 Angle of shear resistance

3.2 粒子間摩擦係数比較

粒子間摩擦係数のせん断応力およびせん断抵抗角

への影響の検討を行うために、粒径 2~8[mm]のモデルについて、内部摩擦角を $\phi_{\mu}=17[\text{deg}]$ および $\phi_{\mu}=37[\text{deg}]$ にした 2 パターンの解析を行った。Fig.8~Fig.10 にその結果を示す。

3.2.1 せん断応力図・ダイレイタンスー曲線

内部摩擦角 17[deg]・摩擦係数 0.31

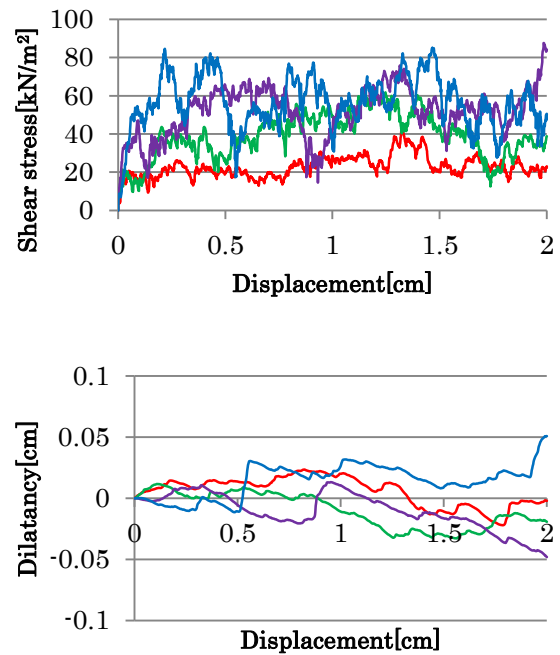
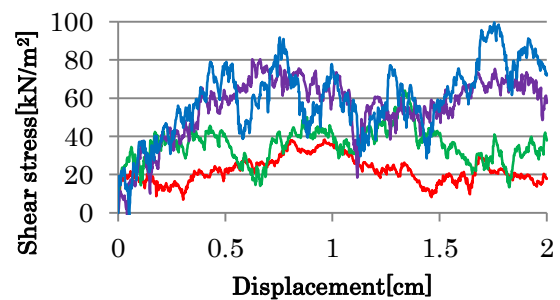


図.8 摩擦係数 0.31
Fig.8 Friction factor 0.31

内部摩擦角 37[deg]・摩擦係数 0.75



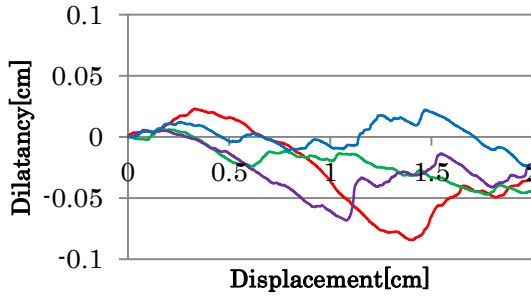


図.9 摩擦係数 0.75
Fig.9 Friction factor 0.75

3.2.2 せん断抵抗角の比較

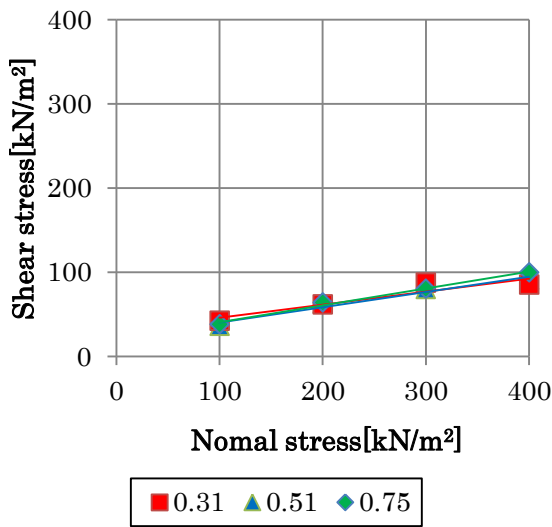


図.10 せん断抵抗角
Fig.10 Angle of shear resistance

3.3 バネ剛性比較

粒子間に挿入されているバネの剛性の変化によるせん断応力およびせん断抵抗角への影響の検討を行うために、粒径 2~8[mm]の供試体モデルについて、法線方向および接線方向両方のバネ剛性を基準パラメータの 10 倍にしたものおよび 1/10 倍にした 2 パターン、接線方向のバネ剛性のみを 10 倍にしたもの、100 倍にしたものおよび 1/10 倍にしたもの、法線方向のバネ剛性のみを 10 倍にしたものの計 6 パターンについて解析を行った。Fig.11~Fig.17 にその結果を示す。

3.3.1 せん断応力図・ダイレイタンスー曲線

法線・接線ばね剛性 10 倍

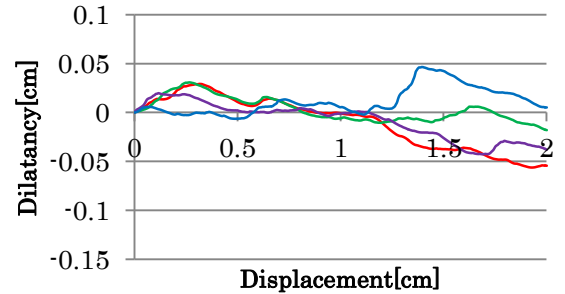
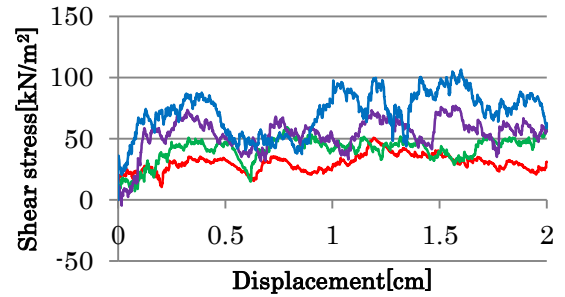
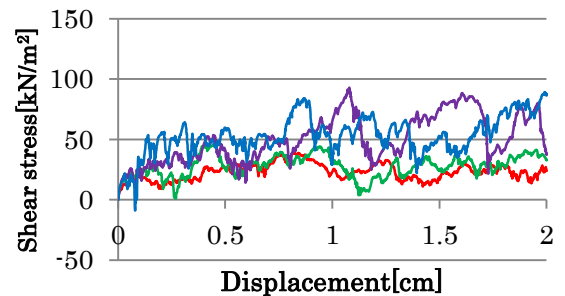


図.11 法線・接線バネ剛性 10 倍
Fig.11 Tenfold normal and tangential spring stiffness

法線・接線ばね剛性 1/10 倍



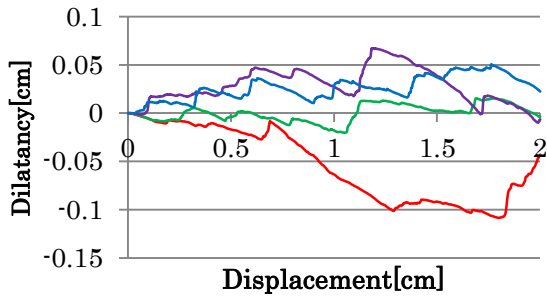


図.12 法線・接線バネ剛性 1/10 倍
Fig.12 Tenth normal and tangential spring stiffness

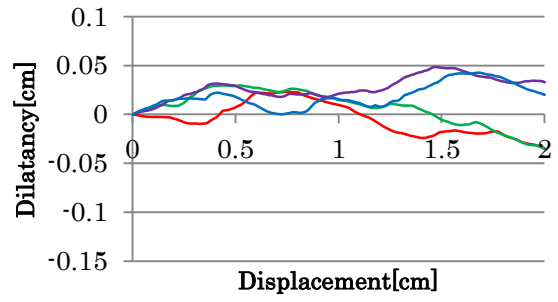


図.14 接線バネ 100 倍
Fig.14 Hundredfold tangential spring stiffness

接線ばね剛性 10 倍

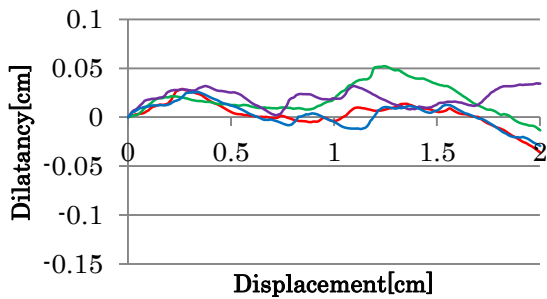
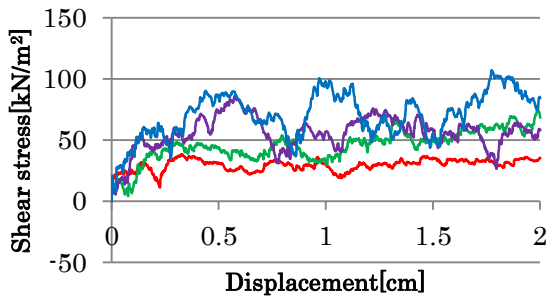


図.13 接線バネ 10 倍
Fig.13 Tenfold tangential spring stiffness

接線ばね 1/10 倍

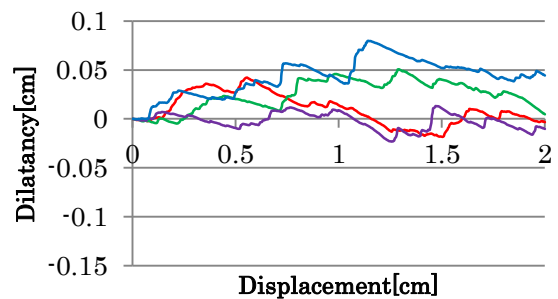
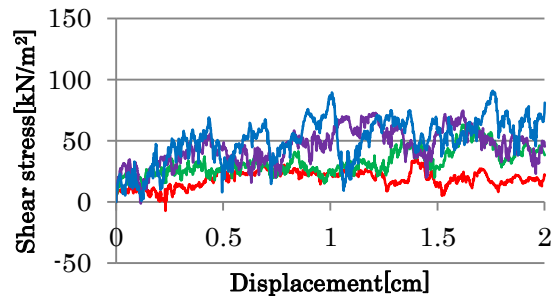
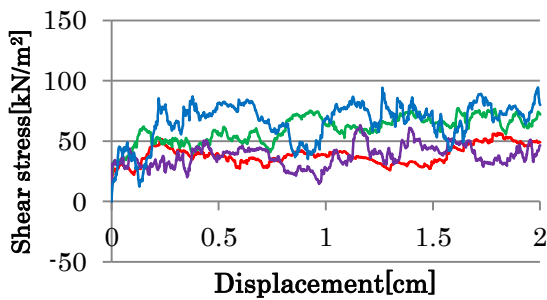
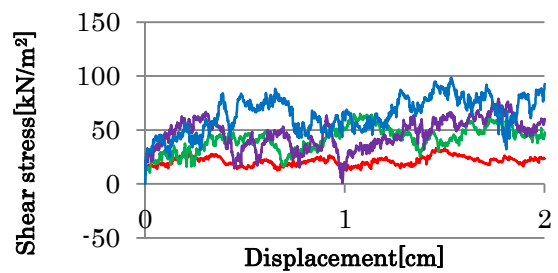


図.15 接線ばね 1/10 倍
Fig.15 Tenth tangential spring stiffness

接線バネ剛性 100 倍



法線ばね剛性 10 倍



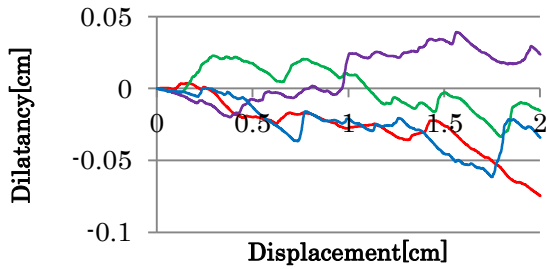


図.16 法線バネ 10 倍

Fig.16 Tenfold normal spring stiffness

3.3.2 せん断抵抗角比較

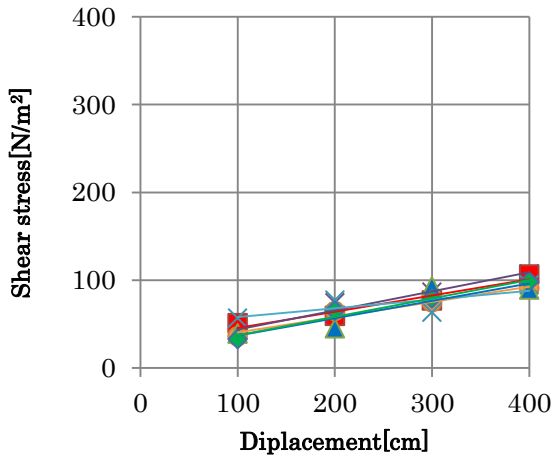


図.17 せん断抵抗角

Fig.17 Angle of shear resistance

3.4 シミュレーションにおけるせん断力

ここで、次のような実験を行った。Fig.18 に示すように、片方の粒子を固定し、もう片方の粒子に重力を掛けつつ水平方向に等速で移動させることによって、こすり合わせた際に片方の粒子に働く水平方向の力を測定した。このような実験を、粒子間摩擦係数を変化させて行った。その結果を Fig.19 に示す。

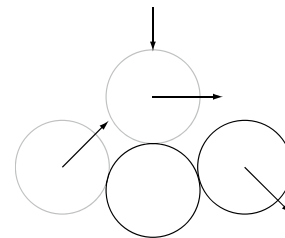


図.18 水平方向力検討

Fig.18 Investigation

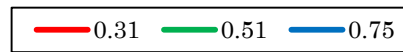
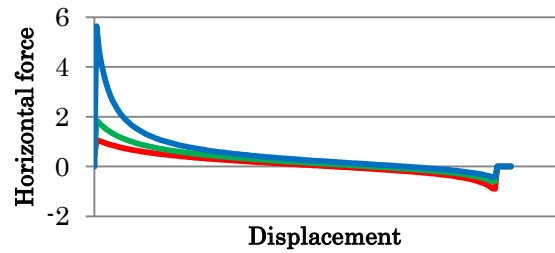


図.19 水平方向反力

Fig.19 Horizontal counterforce

粒子同士が押し付けあう力は運動開始に最も大きく、粒子が乗り上げるにつれて水平方向力が小さくなっていくことがわかる。粒子が直上に到達した時点で、グラフの曲率の正負が入れ替わる。これは、以降、移動している粒子が進行方向へ反力を受けているということになり、せん断応力が負となる原因だと考えられる。

Fig.8~Fig.10 に示したように、粒子間摩擦係数を変化させた解析において、摩擦係数を 0.31, 0.51, 0.75 と大きくするにつれて、せん断応力 - せん断変位関係にノイズが少なくなり安定した結果が得られていることがわかる。しかし、その一方、本来であれば粒子間に働く摩擦力が大きくなれば、せん断応力は大きくなると考えられるにもかかわらず、明らかな増減は見られず、せん断抵抗角にも大きな変化はないと言える。Fig.19 をみると、摩擦係数によって運動開始時のせん断力に大きな違いがあることがわかる。しかし、変位が進むにつれて急激にせん断力は低下していき、すぐにどれも同程度の力しか作用しないようになる。これは粒子間摩擦係数を大きくすると、粒子同士の噛み合わせは外れにくくなるが、いったん外れてしまうとあまり大きなせん断力が得られていないということである。この結果を踏まえてせん断応力 - せん断変位関係を見ると、粒子同士の噛み合わせが外れにくい、摩擦係数の大きいモデルほど、ノイズが少ない安定したグラフを

描いているということが推測できる。しかし、せん断自体はもともと噛み合わせの弱い部分に生じるため、せん断応力、せん断抵抗角の増加には繋がっていないと考えられる。

4. 考察

DEM を用いて一面せん断試験シミュレーションを試みた結果、以下の知見が得られた。

- ① 一面せん断シミュレーションにおけるせん断応力の最大値が生じる変位量は、使用した供試体粒子のうち最大粒子の粒径と密接な関係がある。
- ② せん断応力図の大幅な増減の要因である骨格構造崩壊および再構築の頻度は周期境界間単位深さあたりの粒子数に比例する。
- ③ 粒子間摩擦係数を増加させると、せん断応力図に生じるノイズが減るが、その最大値は変化しない。
- ④ 本解析において、せん断応力は粒子同士の摩擦抵抗ではなく、主に粒子同士が相互にかみ合わせり押しのけあうことによって生じている。その際に摩擦力はせん断応力の安定性に影響している。

5. 結論

周期境界および固定粒子境界の導入によりせん断箱を用いずに一面せん断試験を行えるようになり、これまでの課題であったせん断箱と粒子の干渉をなくし、純粋なせん断力のみを測定することが可能になった。

DEM を用いて一面せん断試験をシミュレーションで再現するにあたり、粒子間に働く接線方向の接触力の変化はせん断応力のピーク値に対してほとんど影響を与えず、せん断抵抗角を変化させない。しかし、主にせん断応力の主因となっている粒子同士の噛み合わせに粘りをもたせ、せん断応力 - せん断変位関係のノイズ、せん断応力の頻繁な増減に影響を与えていると考えられる。

6. 研究成果

本論の成果として、以下の2つがあげられる。

- ① 周期境界および固定粒子境界の導入による解析の効率化。
- ② DEM を用いた一面せん断試験シミュレーションにおけるせん断力発生機構の把握。

7. 今後の展望

今後の展望として、以下の内容が考えられる。

- ① DEM におけるパラメータの決定法の検討
- ② 粒子間に接触力以外の力の導入
- ③ 粘着力 c の評価方法の検討
- ④ 3次元解析への展開

参考文献

- [1] Cundall, P.A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system. ISRM, Nancy, France. Proc. , 2, 129-136, 1971
- [2] Cundall, P.A., STRACK, O.D.L. : A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29, 1, 47-65, 1979
- [3] 伯野元彦 : 「破壊のシミュレーション」— 拡張個別要素法で破壊を負う—, 森北出版, 1997
- [4] 粉体工学会編 : 粉体シミュレーション入門— コンピュータで粉体技術を創造する, 産業図書, 1998
- [5] 松苗尚人, 脊黒隆大, 吉田長行 : 個別要素法による離散流状体モデルの動的追跡法 - 一面せん断試験シミュレーションによる検討 -, 法政大学情報メディア教育センター研究報告, Vol.26, 2012