



3次元個別要素法による砂の変形強度：せん断角度関係の検討

後安, 康宏
中瀬, 仁
田中, 泰雄
松田, 尚徳

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 11:77-83

(Issue Date)

2007-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00518513>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00518513>



3次元個別要素法による 砂の変形強度～せん断角度関係の検討

A Study on Yield Stress and Shear Strength in Relation to Shearing Direction based on 3-D DEM Analysis

後安 康宏¹⁾
Yasuhiro Goan
中瀬 仁²⁾
Hitoshi Nakase
田中 泰雄³⁾
Yasuo Tanaka
松田 尚徳⁴⁾
Hisanori Matsuda

概要：これまで実験的研究¹⁾により、砂の変形強度と降伏応力は、せん断応力の作用方向や応力履歴により大きく変化するということが明らかになってきた。このような変化は、砂の堆積時の粒子構造の異方性により発生すると考えられる。本研究では、これら変形・強度異方性のメカニズムを研究するため、中空ねじりせん断試験を御崎公園砂について実施するとともに、3次元個別要素法を用いた数値実験により、最大せん断応力の作用方向を変化させた砂の中空ねじりせん断試験を数値解析した。3次元DEM解析結果から、せん断中の供試体内部の粒子構造の変化や、せん断中の降伏応力や強度に関する結果を分析し、室内実験から得られた降伏応力やせん断強度の変化との比較を行った。

キーワード：個別要素法、異方性、降伏応力

1. はじめに

本研究は、砂の堆積構造の異方性による変形・強度異方性のメカニズムを研究するため、中空ねじりせん断試験を御崎公園砂について実施するとともに、3次元個別要素法で中空ねじりせん断試験を再現した。室内試験及び個別要素法解析では、せん断時に供試体に与える鉛直応力を変えることで、最大せん断応力が水平面に対して作用する角度 θ を種々に変化させ最大せん断応力作用方向 θ の変化による降伏応力及びせん断強度の違いを計測・検討した。

2. 個別要素法について

(1) 個別要素法の概要

個別要素法(Distinct Element Method)は、Cundallによって1971年に発表された論文²⁾に端を発している。個別要素法は、粒状体や粉体のような離散体の力学挙動を解析するための一手法である。この解析方法による場合、集合体を構成する各離散体は、個別要素と呼ばれる多角形や球あるいは円筒形を剛体としてモデル化されている。集合体の挙動を計算する際のアルゴリズムは極めて単純で、要素毎に他の要素と接触判定を行い、粒子間に弾性ばねや粘性ダッシュポッドを仮定することで接触力を求め、その結果から得られた

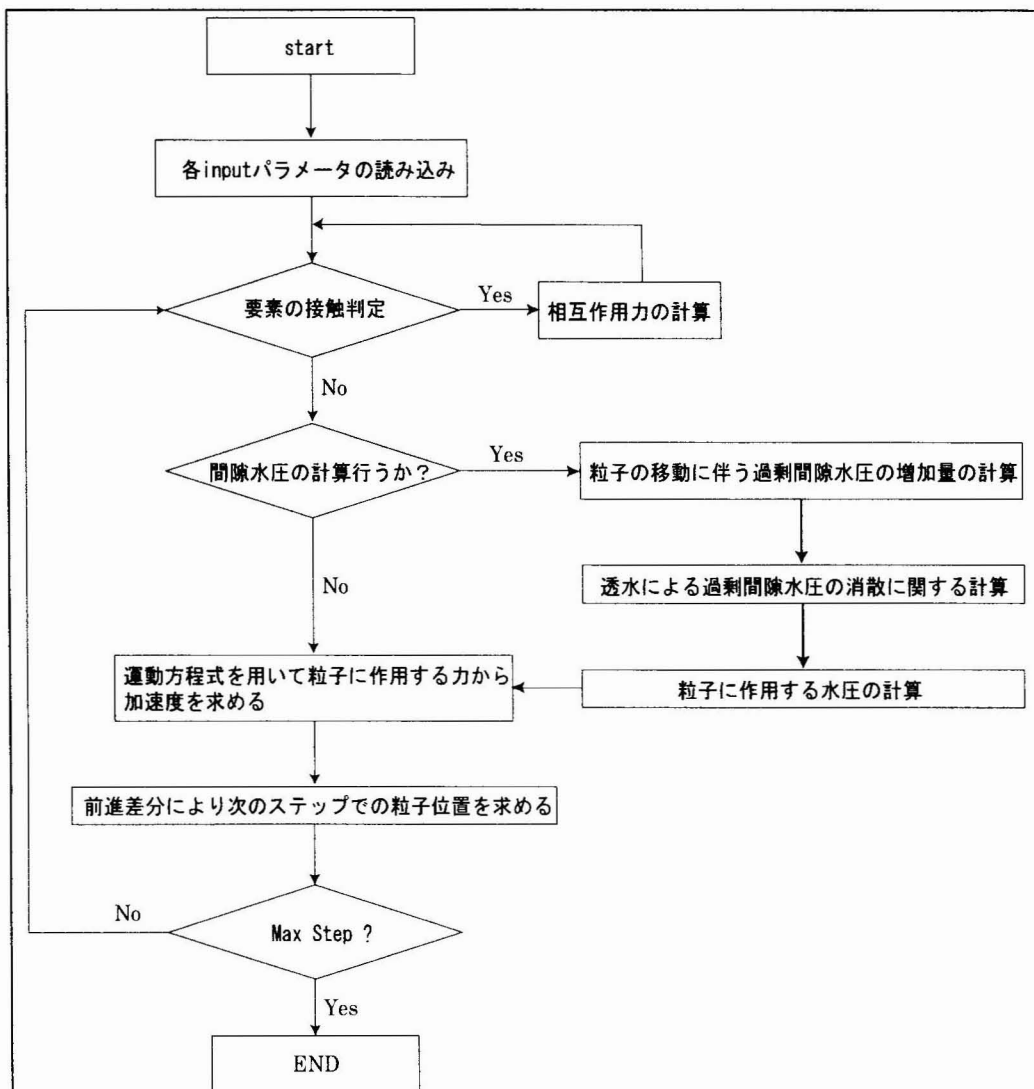


図-1 個別要素法のプログラムの流れ

運動方程式を時間積分で解くというものである。この解析方法は、離散体の解析を対象としたもので、土のように、変形過程でダイラタンシーを伴い、粒状体としての特性が重要となる問題に適用されることが多いが、伯野ら²⁾のようにコンクリートのような構造物に対しても要素間のばねにある程度の引っ張り抵抗を持たせることによって、載荷から破壊後といった、連続体から離散体までの一連の現象のシミュレーションも行われている。図-1に、個別要素法の大まかな流れを示すフローチャートを示す。なお、図中の間隙水圧の計算においては、3次元粒子配置とは別に、XYZ空間上に直方形の格子要素を設定し、それぞれの格子要素内での粒子間隙量の体積変化を基に間隙水圧を算定している。

(2) DEM 解析の過程

a) パッキング

本解析プログラムにおいて、粒子のパッキングは

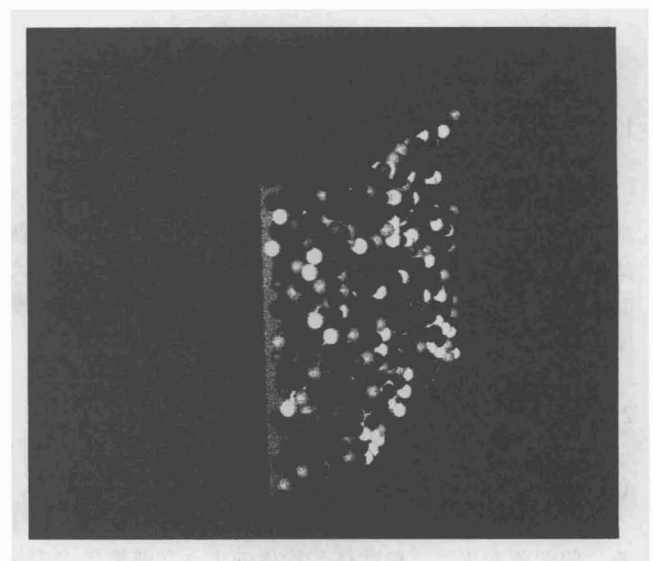


図-2 パッキング時の供試体モデル

ランダム配置の一手法である落下法を用いている。この手法は発生させた粒子に重力を与えて落下させ、供試体モデルのパッキングを行う方法である。この手法を用いた理由は、実際の室内中空ねじり試験の供試体作成方法に最も近いためである。図-2 はパッキングにより作成された供試体モデルである。供試体モデルの左右両端の粒子は右と左でそれぞれ結合されている、いわゆる周期境界でモデル化しており、中空ねじり試験の供試体寸法(周長 52.5cm、高さ 42.75cm、厚さ 10.5cm)を単純せん断できるようにモデル化した。但し、供試体の背面には壁が存在しており、実際の室内試験とはこの背面境界では変形条件が異なっているが、前面では実験と同じ一定拘束圧が作用しており、室内実験を再現している。

表-1 に本研究で用いた粒子のパラメータを示す。なお、この解析においては排水条件でせん断したため、モデル内部に間隙水は入れておらず、間隙水圧の影響はない。また、転がり摩擦係数については後でも説明するが、値をいくつか変化させて構造異方性の傾向が現れると思われるものとした。

表-1 設定パラメータ

平均 粒径	粒子 密度	法線方向		法線方向		粘着力		摩擦角		転がり摩 擦係数
		弾性	粘性	弾性	粘性	要素	境界	要素	境界	
2.6 g/cm ³	2.625 cm	1.00E+07	1.65E+02	2.50E+05	6.30E-04	0	0	30°	0°	0.15

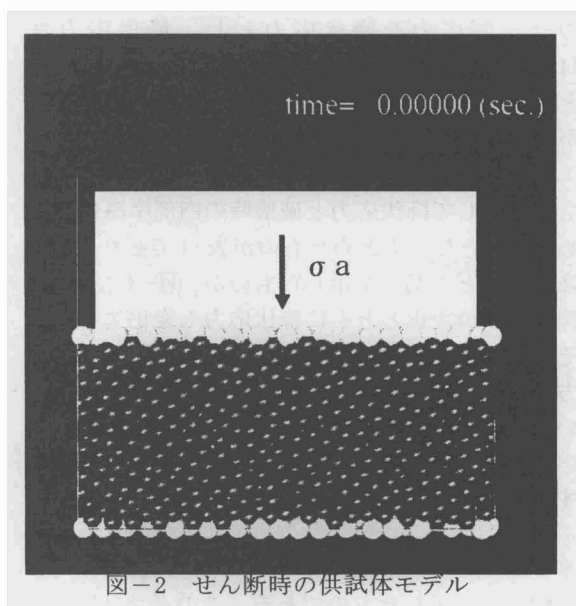
b) 圧密、除荷

パッキング終了後、100kPa で等方圧密した後に 50kPa の状態で等方除荷を行い、しばらくそのままの状態 で放置した。なお先述した通り、このモデルでは背面が剛体であるため、背面境界での摩擦応力が作用する ため、圧密・除荷中にダイラタンスーにより所定の拘束圧力とずれが生じてしまう。そこで、本解析プログ ラムではその圧力のずれに対応するように前面の微妙な位置調整を行うことで、所定の圧力を保っている。

c) せん断

上端から加える軸応力と、下端を強制変位させて発生 するせん断応力を組合わせて、両応力の比を変化させ、 表-2 に示すように最大せん断応力の作用方向角 θ を、 30°、15°、0°、-15°、-30° の 5 種類に変化させて、 せん断試験を行った。図-2 にせん断時の供試体モデル を示す。また、ここで定義する最大せん断応力作用角 θ と は、最大せん断応力の作用方向と水平面との角度であり、 図-3 のモールの応力円 で表される。なお、この θ と一般 に主応力方向角と定義される β との関係は、 $\beta = 45^\circ - \theta$ で表わされる。

圧密・除荷過程と同様に、背面境界での摩擦応力の影 響除去のため、せん断過程においても前面の微妙な位置 調整を行うことで所定の拘束圧力を保っている。



c) 解析とその結果

圧密・除荷の後、軸応力とせん断応力を同時に変化させながら種々のせん断試験を行い、得られた応力～ ひずみ関係等から降伏応力及び破壊強度を計測した。

表-2 解析条件の一覧

解析番号	$\theta (^{\circ})$	$\beta (^{\circ})$	試験種類
①	30	15	ねじりせん断+圧縮
②	15	30	ねじりせん断+圧縮
③	0	45	単純せん断
④	-15	60	ねじりせん断+引張
⑤	-30	75	ねじりせん断+引張

図-4 はせん断条件 $\theta = 0^\circ$ の解析結果より得られた応力～ひずみ関係（最大せん断応力 τ_{max} ～最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ の関係）を表わしたものである。グラフの赤い点で示したところでせん断応力が最大値となっており、この点で供試体モデルが破壊したとみなした。破壊時の内部摩擦角 ϕ の値は 36° であった。破壊しているにも関わらず、その後のグラフに変化があまり見られないのは要素の粒径が大きいためであると考ええる。中瀬ら⁴⁾は、75000 要素と 3000 要素で作ったほぼ同密度の供試体に対して、周期境界条件を持つ中空供試体について単純せん断試験の DEM 解析を行い、粒径の違いによる破壊挙動の比較を行っている。その結果、粒径の違いは破壊後の挙動に変化をもたらし、粒径が大きい方が破壊後のせん断ひずみが小さく出る傾向があると結論している。

図-5 はせん断条件 $\theta = 0^\circ$ の応力～ひずみ関係（最大せん断応力～最大せん断ひずみの関係）に、せん断中に粒子同士が滑った回数をカウントした滑り点総数を合わせてグラフにしたものである。図に示すように、せん断初期の直線部分と、応力～ひずみ関係の後半部での直線部を求めて、その 2 つの直線の交点を降伏点とした。この降伏点でのせん断応力を降伏応力とし、降伏応力点 (19.1kPa) 近くで滑り点総数のグラフと比較すると、滑り点総数の増加傾向にも変化が有ることが分かる。

他の θ を変化させたせん断試験の解析についても同様にして降伏応力と破壊時の内部摩擦角を求め、数値としてまとめたものが表-3 であり、 θ と降伏応力との関係を示したものが、図-6 である。図より θ の変化とともに降伏応力も変化するが、その値は $\theta = -15^\circ \sim -30^\circ$ で最小値を取り、 θ が正方向に増加するにつれて降伏応力が大きくなっていくことがわかる。これらの θ による降伏応力の変化は、後述する破壊強度の変化とも連動する傾向を示していることがわかる。

図-7 は図-5 で示した方法で、 θ の異なる解析事例について破壊強度を求め、 θ と内部摩擦角 ϕ の関係を図示したものである。このグラフについては、 $\theta = -15^\circ$ で ϕ は最小値をとり、 θ が -15° から遠ざかるほど大きな値を取っていることがわかる。なお、このような θ による変形・強度の値が大きく変化するの、堆積構造の異方性の影響であると考えられるが、このような結果を DEM 解析で表現するには、転がり摩擦係数の値を適切に選択することが今回の検討で明らかとなった。本報告では、紙面の関係で詳細な比較検討は行わないが、転がり摩擦係数の値を小さくすると、今回のような構造異方性の影響は大きくならないことが分かった。

なお、今回用いた転がり摩擦係数の値から得られる砂の強度は θ がせいどの領域で約 45° と実際の砂に比べると比較的大きな値となっている。今後の DEM 解析の検討においては、砂の変形・強度特性の両方を満足するように、DEM 解析用パラメータの選択について検討が必要である。

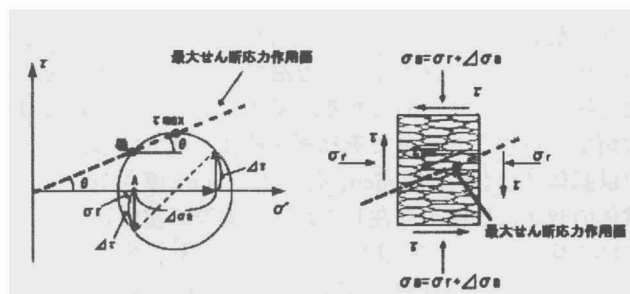


図-3 モールの応力円

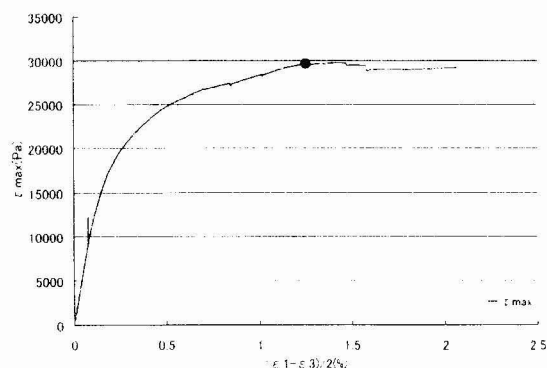


図-4 せん断条件 $\theta = 0^\circ$ の応力～ひずみ関係

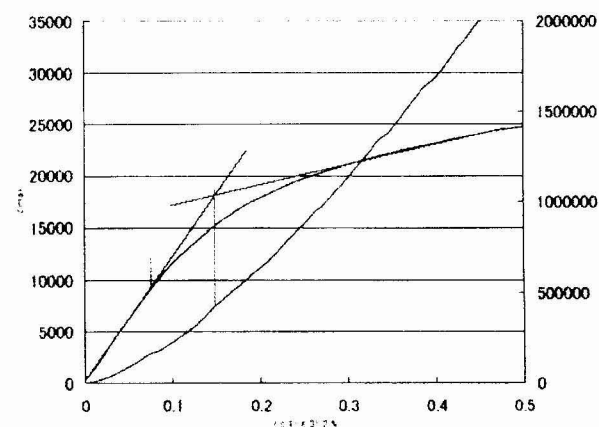


図-5 解析結果からの降伏応力の決定

表-3 各解析の降伏応力と破壊時の ϕ

試験番号	θ°	τ_{max}/p'	ϕ°
①	30	0.590	46
②	15	0.459	45
③	0	0.390	36
④	-15	0.348	31
⑤	-30	0.349	37

3. 室内実験について

(1) 試験概要

DEM との比較のため、実際の砂である神戸市内の御崎公園砂を用いて室内中空ねじり試験を行った結果について記述する。

室内試験では外径 100mm、内径 60mm、高さ 200mm の中空円筒供試体による中空ねじり試験装置を実施した。本試験装置では軸荷重はペロフラムシリンダーにより与え、トルク荷重はメガトルクモーターを用いて与えることが出来る。また、せん断中の AE を計測するために、供試体下部ペデスタル内に加速度計を設置した。実験試料としては御崎公園砂を用いた。その物理的特性は $G_s=2.63$ 、 $D_{50}=0.95$ 、 $U_c=1.097$ である。供試体作成時に堆積面がほぼ水平となるように、本研究室で試作した供試体作成（砂試料落下）装置⁵⁾を用いて、初期相対密度=50%、初期乾燥密度=1.400g/cm³の条件で、中空円筒供試体を作製した。なお、相対密度は約 60% の値となっている。供試体作製後、炭酸ガス流入、脱気水通水、背圧付加により試料を飽和させ、図-8 に示す有効応力経路をたどるように初期有効拘束圧の 20kPa から最大圧密応力の 400kPa まで段階的に等方圧密載荷を行った(A→B)。最大圧密応力下で体積変化、AE の発生がないことを確認し、有効拘束圧 200kPa まで等方排水除荷を行った(B→C)後、軸応力とせん断応力を同時に変化させながら表-4 に示すように軸応力とせん断応力を同時に変化させながら 7 種類の排水せん断試験を行い降伏応力及び破壊強度を計測した。

(2) 試験結果と考察

上記のように、室内実験では、 θ を $-45^\circ \sim +45^\circ$ まで変化させた中空ねじり試験を実施し、それらの結果から降伏応力と破壊強度を求め、 θ の変化による降伏応力及び破壊強度の変化を検討した。まず AE 計測による降伏応力の決定方法を述べる。

図-9 は試験番号③の試験結果より得られた最大せん断応力比 $\tau_{max}/p' \sim AE$ 係数率 $n_e \sim$ 最大せん断ひずみ $(\epsilon_1 - \epsilon_3)/2(\%)$ 関係を図示したものである。 $(\epsilon_1 - \epsilon_3)/2 = 0.14(\%)$ 付近で n_e が急増しているのを確認することができる。既存の研究より AE は弾性領域では発生しないことが明らかにされていることから、この n_e の急増点を本試験の降伏点と定め、 $\tau_{max}/p' = 0.17$ を降伏応力とし計測した。また他の θ を変化させた中空ねじり試験においても同様に降伏点を決定し、それに対応する τ_{max}/p' を計測した。

表-5 は本研究の試験結果より得られた降伏応力と破壊時の内部摩擦角 ϕ をまとめたものである。なお、⑤の供試体密度は他に比べて約 10% 高くなってしまったため、得られた降伏応力と ϕ の値も過大となっていると考えられる。

図-10 は本年度の試験結果による降伏応力と、過去に御崎公園砂について同一のせん断条件で実施した、中空ねじり試験結果の分布である。 θ の変化に伴い、降伏応力及び ϕ はそれぞれ異なった値を示していることがわかる。特に

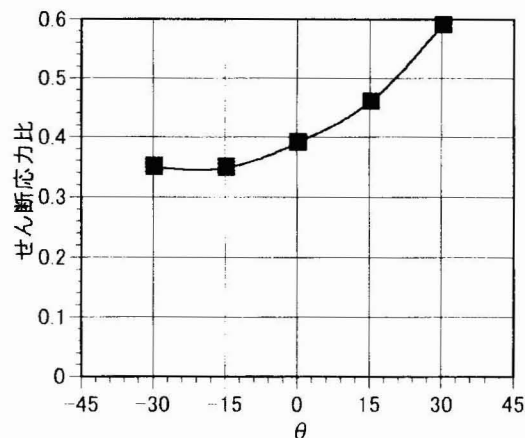


図-6 θ と降伏応力(せん断応力比)の関係

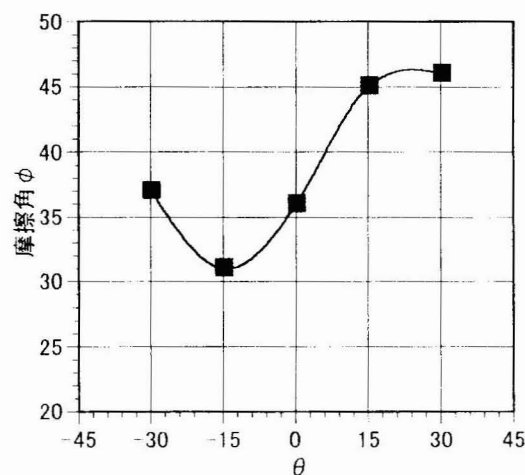


図-7 $\theta \sim \phi$ の関係

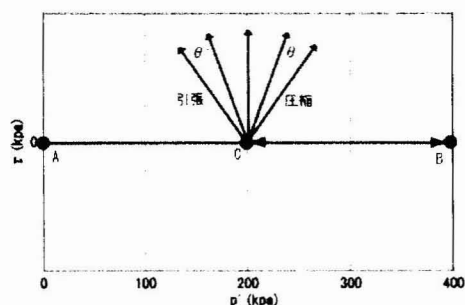


図-8 圧密・せん断過程の応力経路

表-4 室内中空ねじり試験の実験一覧

試験番号	試験の種類	θ°
①	三軸圧縮試験	45
②	ねじりせん断+圧縮試験	30
③	ねじりせん断+圧縮試験	15
④	ねじりせん断試験	0
⑤	ねじりせん断+引張試験	-15
⑥	ねじりせん断+引張試験	-30
⑦	三軸引張試験	-45

$\theta = -15^\circ$ で最小値を取り、 $\pm 45^\circ$ に近づくにしたがって大きくなっており、両室内実験は同様の傾向を示した。また、図-6 に示した DEM 解析と比較しても、降伏応力が -15° 付近で最小となる傾向が類似していることが分かる。

図-11 は本年度の試験結果による破壊時の内部摩擦角 ϕ と過去の試験結果による破壊時の内部摩擦角 ϕ の分布である。これを見ると、それぞれの θ に対する ϕ は $\theta = -15^\circ$ の時に最も小さい値をとり、 $\theta = 45^\circ$ 、 -45° に変化していくにつれて大きくなっていく。今年度の ϕ が大きく出たのは、供試体密度が高いためと考えられる。

これらの結果より、今回の DEM 解析において、転がり摩擦係数を大きくすることにより、最大せん断応力の作用方向角 θ の変化により降伏応力および ϕ が変化するという構造異方性の影響がある程度表わされたとと言える。

4. 結論

今回、DEM を用いた数値解析により土粒子堆積面に対する最大せん断応力作用方向 θ を変化させたせん断試験を行い、 θ と降伏応力・ ϕ を求めると同時に、室内試験により θ と降伏応力・ ϕ の関係を検討した。その結果、室内試験結果と数値解析結果は θ と降伏応力・ ϕ の関係について類似した傾向が得られることが分かり、 $\theta = -15^\circ$ で最小値を取り、 $\pm 45^\circ$ に近づくにしたがって大きくなる傾向を示した。

今後の DEM 解析における課題を挙げるとすれば、解析モデルにおける間隙水を考慮することと、モデル背面の剛体壁の境界条件を無くすること等が考えられる。実際の室内力学試験に近付けることで、DEM 解析の可能性を検討することが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 田中泰雄, 中西徹, 竹本正和, 松本理恵: 御崎公園砂の強度・降伏応力に及ぼすせん断応力の作用方向の影響, 第 39 回地盤工学会発表会, pp. 409-410, 2004.
- 2) Cundall, P. A: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Blocky Rock System, Symposium, ISRM, Nancy France, Proc, Vol2, pp. 129-136, 1971.
- 3) 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所集報, Vol. 63 No4, pp. 409-468, 1988.
- 4) 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.
- 5) 田中泰雄, 向井淳, 西牧祥一: AE 計測を併用する中空ねじり試験と供試体準方法, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp. 841-842, 2000.

著者: 1) 後安 康宏、自然科学研究科、学生; 2) 中瀬 仁、東電設計(株); 3) 田中 泰雄、都市安全研究センター、教授 4) 松田 尚徳、工学部建設学科、学生

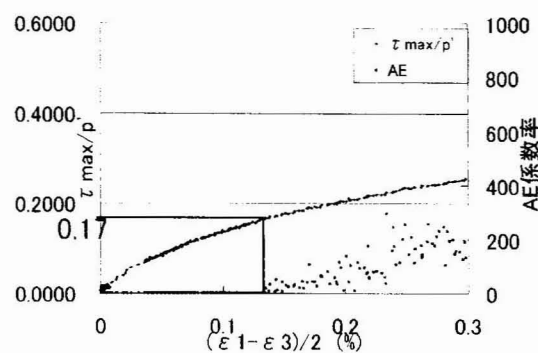


図-9 AE 計測と降伏応力の決定例 $\theta = -15^\circ$

表-5 各試験の降伏応力と破壊時の ϕ

試験番号	θ°	降伏応力	ϕ°
①	45	0.21	32.5
②	30	0.15	34.2
③	15	0.20	34.5
④	0	0.17	33.3
⑤	-15	0.075	32.0
⑥	-30	0.12	41.3
⑦	-45	0.15	40.4

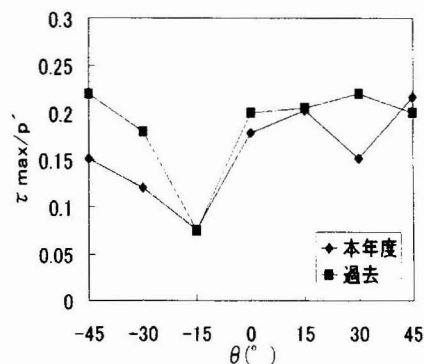


図-10 $\theta \sim$ 降伏応力の関係

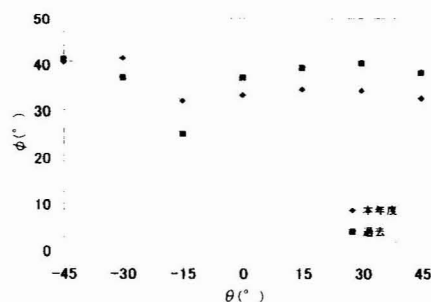


図-11 $\theta \sim \phi$ の関係

A Study on Yield Stress and Shear Strength in Relation to Shearing Direction based on 3-D DEM Analysis

Yasuhiro Goan
Hitoshi Nakase
Yasuo Tanaka
Hisanori Matsuda

Abstract

The past studies on the anisotropic behavior of sand have shown that the yield stress and the friction angle depend on both the direction of the shearing and also on the stress history. To study such anisotropic behavior, it would be very important to examine the anisotropic fabric of sand that is created during the deposition of sand.

In this study, experiments were performed both in the laboratory and the numerical simulation. In the laboratory testing, a hollow cylinder testing was performed by using Misaki Sand and the direction of shearing direction was changed by controlling both the vertical and shearing stresses simultaneously. Also the same stress control was applied in 3-D DEM numerical simulation by using a rectangular specimen of which lateral ends had continuous boundary condition.

From these both experimental and numerical studies, it was found that the change in the direction of shearing would induce changes in both yield stress and failure strength (i.e., friction angle) and the experimental and numerical studies indicated nearly the same trend. The results obtained from 3-D DEM analysis is encouraging in further studying the anisotropic behavior of sand.