

## 個別要素法を用いた砂の定常状態強度予測

岡田康彦・落合博貴（独立行政法人森林総合研究所）

**Abstract :** The changes in pore-pressure, effective mean stress, and deviator stress in the undrained triaxial-compression tests on sands have been numerically analyzed by means of three dimensional Distinct Element Method (DEM). The value of pore-pressure was assigned to the measurement sphere, the centre of which was coincided with one of each ball element and the diameter of which was twice as much as the ball element. The volumetric changes in those measurement spheres due to the deformation of the cylindrical shaped specimen were calculated and the changes in pore-pressure was obtained by the products of volumetric strain and modulus of compressibility of water. The fluid flow was given based on the Darcy's law. The effective mean stress negatively proportional to the initial void ratio after consolidation was obtained, that is the steady state line was observed, and the loose specimens produced quasi-liquefaction behaviour, in which effective mean stress at steady state was reduced to no more than 25% of the initial confining stress. The medium-dense specimens produced the positive pore-pressure at the beginning of the test and then it reduced its values to remain negative, which successively reproduced the phase transformation that was typical characteristics of the granular materials.

**Keywords :** pore-pressure, 3-dimensional distinct element method, undrained triaxial compression tests

**要旨：**砂を対象とした三軸圧縮試験で発現する液状化現象、変相現象、ならびに負の過剰間隙水圧発生の数値的再現を目指し、間隙水圧連成型の個別要素法モデルを構築すると共に、この数値モデルを用いて種々の間隙比に形成した供試体を対象に三軸圧縮試験を実施した。

砂粒子は数値球要素で置き換え、間隙水圧変化は計測球要素を導入して表現した。計測球要素は、球要素に対して中心は同じで半径が2倍の要素で、球要素の周囲を取り囲むように配置されている。供試体の変形を受けて砂粒子の位置が変わることに伴う計測球要素の体積歪み変化を考慮し、また、この変化と水の体積弾性係数の積により発生する間隙水圧を表現した。局的に発生した間隙水圧は、ダルシー則に従って周囲間隙に移動するものとし、圧力差により発生する力を球要素に与えた。

粗に形成した供試体では液状化現象が発生した。中密の供試体では圧縮開始直後の正の間隙水圧、途中からの負の間隙水圧発生が再現され、変相現象も確認できた。中密より間隙比の小さな供試体では、供試体間隙比と発揮された偏差応力の対数には直線の関係が認められた。さらには、液状化が発生するか否かの限界間隙比の存在が示唆された。

**キーワード：**間隙圧、3次元個別要素法、非排水三軸圧縮試験、

### I はじめに

「地すべり」は、落下(fall)、すべり(slide)、トップル(topple)、伸張(spread)、そして流れ(flow)のタイプに分類される(4)が、この内、運動速度が大きく長距離移動するタイプはもたらす被害が甚大なことから最も危険な現象の一つと考えられている。本年においても、「平成18年7月豪雨」による九州各地、長野県および京都府ほかの土砂災害(7月)は記憶に新しく、土砂流動現象の機構解明は極めて重要な課題である。1964年の新潟県地震で液状化により多大な被害が発生してから後、

土の非排水せん断挙動、特に間隙水圧値の変化が研究の焦点となってきた。動的載荷、あるいは静的載荷三軸試験を実施し、供試体中で粗な土粒子骨格構造に変化が生じ、(2)および(3)ほかは、負のダイレイタンシーが発生することにより間隙水圧が上昇していわゆる液状化に進展するという機構を示した。

地すべりの内、ある特定の一部の要素を想定して実施する土質試験、ならびに現象自体の再現を試みる斜面模型を用いた崩壊実験の他に、数値シミュレーション技術を用いた研究も進展してきた。(6)は、岩盤崩落現象を

Yasuhiko OKADA, Hirotaka OCHIAI (Incorporated Administrative Agency Forestry and Forest Products Research Institute., Matsunosato 1 Tsukuba Ibaraki 305-8687) Numerical reproduction of steady state strengths under undrained conditions by distinct element method.

対象に(5)が提案した個別要素法を用いて、岩質粒状体の重力流動の数値シミュレーションを実施した。微小歪み領域における数値解析が主体となる有限要素法や有限差分法に対し、個別要素法では土粒子の長距離運動が再現され得ることが示されその後急速に発展していくこととなった。しかしながら間隙水の効果の扱いについては発展途上であり、改良点が多くあった。

そこで著者らは、降雨による土砂流動現象の発生・運動機構解明、流下土砂の到達範囲予測を最終目標に、三次元個別要素法を用いて土質試験で一般的に使用される要素試験（三軸圧縮試験）における非排水せん断挙動の数値的再現を試みた。三軸圧縮試験供試体として円柱状に形成されたモデル要素で発揮される非排水せん断挙動を表現するため、計測球というモデル要素を用いて間隙水圧を導入した。計測球は、土粒子を表現する球要素とその中心が同じで半径を2倍にとることにより、球要素の周囲を囲むように配置されている。圧縮を受けて土粒子の位置が変わることに伴う計測球の体積歪み変化を考慮し、また、この変化と水の体積弾性係数の積により発生する間隙水圧を表現した。局所的に発生した過剰間隙水圧は、ダルシー則に従って周囲間隙に移動するものとし、圧力差により発生する力を球要素に与えて計算を実行した。本報では、このモデルを用いて数値シミュレーションを実施した結果を示す。

## II 数値モデル

非排水三軸圧縮試験で発生する過剰間隙水圧を表現するため、3次元個別要素法に間隙水圧値の表現を組み込んだ。物理モデルと計算手法の詳細は(7)に詳しく、ここでは概略のみ記載する。供試体は、直径10cm、高さ20cmの円柱状で、土粒子数個から数十個程度の塊を模した球要素は、直径1.5cmであった。間隙水圧は、図-1に示す計測球要素を用いてその変化の追跡を行ったが、この際、水の体積弾性係数は、計算時間と安定性を考慮し、 $2.1 \times \exp(-6.7)$ に設定した。粘弹性モデルで表現するものとし、粘性ダッシュボットを球要素間に挿入（垂直/せん断両方向）した。数値モデル供試体を図-2に、計算に与えた諸パラメータを表-1に、試験番号・条件を表-2に示す。

## III シミュレーション結果と考察

### 1. 有効応力経路 粗、中密、密に形成した供試体に対し、非排水三軸圧縮試験シミュレーションを実施した。

図-3に試験番号4の試験結果を示す。圧縮開始直後は、有効応力経路はほぼ45度線上を右上に移動したが、有効平均応力が約23kPaからは45度線よりも左側に移動した。有効平均応力が約27kPaで偏差応力は極大値を示し、有効平均応力が約16kPaまで左下方向へ移動した。

そして再び有効応力経路は進路方向を変え、今度は右上方向へ直線に沿って大きく移動した(a)。偏差応力は軸歪みが約0.8%で極大値を、軸歪みが約2.8%で極小値を示した。その後は単調増加し軸歪みが約9%からはほぼ一定の値（約32.5kPa）に到達した。間隙水圧は圧縮開始から増加したが、軸歪みが約2.8%で極大値を示した。軸歪みが約4.8%からは負の値を示し、最終的には-44.8kPaでほぼ一定の値を示した(b)。これらの結果は、圧縮開始後すぐの体積収縮傾向に伴う正の間隙水圧発生、そしてその後のダイレイタンシーに伴う間隙水圧の減少と、土に特有の変相（Phase Transformation, (1)）が再現されたことを示しており、特筆すべきであると考えられる

図-4に試験番号1および7の有効応力経路を示す。粗供試体については、圧縮歪みの進行とともに、過剰間隙圧は増加し、またこの際、極めて小さな偏差応力のみの発揮が認められ、有効平均応力は最終的に初期値の25%以下まで低下し、いわゆる液状化現象が再現された。一方、密供試体については、圧縮開始直後から、有効応力経路は右上方向へと移動していき、最終的には、極めて大きな偏差応力の発揮が認められた

2. 定常状態線 砂を対象にした非排水三軸圧縮試験では、供試体の間隙比と定常状態時の偏差応力に強い相関があることが認められている(8)。ここでは、数値モデルを用いた非排水三軸圧縮シミュレーションの結果について、この関係を検証する。図-5は、圧密終了時の供試体間隙比と、定常状態時の偏差応力の関係を示している。この試験結果は、間隙比が0.851以上の供試体では液状化挙動が認められ、間隙比が0.850以下の供試体では、間隙比の低下とともに定常状態時の偏差応力の増加が認められた。つまり、間隙比が0.850～0.851の間に、液状化挙動を示すか否かの臨界間隙比が存在することが示唆された。なお、間隙比が0.850以下の試験については、間隙比と定常状態時の偏差応力には直線の関係が認められ、当該数値モデルを用いた非排水三軸圧縮試験シミュレーションにおいても、定常状態線の存在が確認できた。

## IV 終わりに

非排水三軸圧縮試験の数値的再現を目指して、3次元個別要素法に間隙水圧の効果を組み込んで、数値シミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- 1) 粗に形成した供試体では、圧縮開始と共に正の間隙水圧上昇が認められ、液状化挙動を示した。また、液状化する否かの臨界間隙比の存在が示唆された。
- 2) 間隙比が小さい供試体では、発揮される偏差応力が大きい結果となった。このことは、密供試体では、土粒子の強い噛み合いによりせん断強度が増すという実際の

砂を用いた試験結果と調和的である。

3) 中密の供試体については、土に特有の変相現象が再現された。

## 引用文献

- (1) ALARCON\_GOZUMAN, A., LEONARDS G. A. and CHAMEAU J. L. (1988) Undrained monotonic and cyclic strength of sands. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. 114 (10) : 1089-1109.
- (2) CASAGRANDE A. (1971) On liquefactionphenomenon. Geotechnique. 35(2) : 197-202.
- (3) CASTRO, G. and POULOS, S. J. (1977) Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. 103(GT6) : 1089-1109.
- (4) CRUDEN, D. M. (1991) A simple definition of a land-slide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 43 : 27-29.
- (5) CUNDALL, P.A. and STRACK, O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique. 35(2) : 197-202.
- (6) 木山英郎・藤村尚 (1983) カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析. 土木学会論文集. 333 : 137-146.
- (7) OKADA, Y. (2006) Simulating undrained triaxial-compression behaviour by fluid-coupled distinct elementmethod. Proceedings of the INTERPRAEVENT 2006, 25-29 September, 2006, Niigata, Japan. 2 : 447-453.
- (8) POULOS, S. J. (1981) The steady state deformation. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. 107 (GT5) : 553-562.

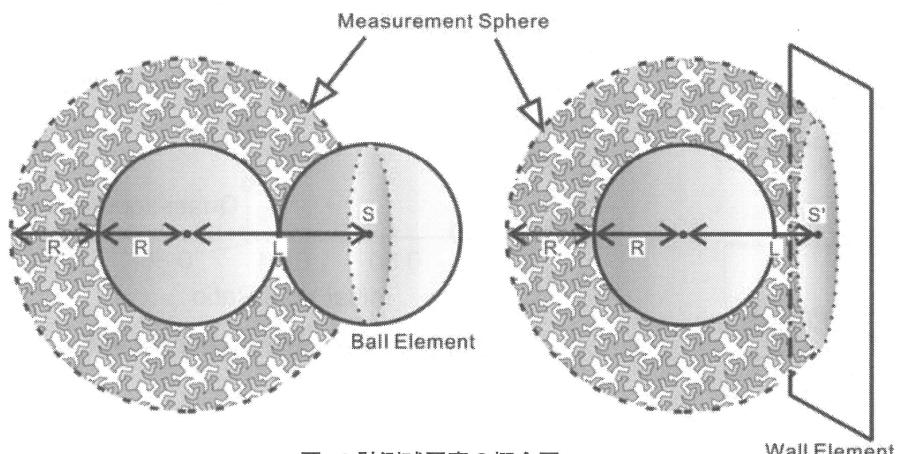


図-1 計測球要素の概念図

表-1 計算に用いた諸パラメータ

Parameter	Value
Normal elastic spring stiffness, $K^a$	$5.00 \times 10^{6.7}$ N/m
Tangential elastic spring stiffness, $k^s$	$1.25 \times 10^{6.7}$ N/m
Friction coefficient of particle, $\tan \phi_\mu$	0.60
Confining pressure, $\sigma_3$	$2.0 \times 10^4$ Pa
Modulus of compressibility of water	$2.1 \times 10^{6.7}$ Pa
Axial loading speed	0.01 m/s
Bulk permeability	$1.0 \times 10^{-3}$ m/s

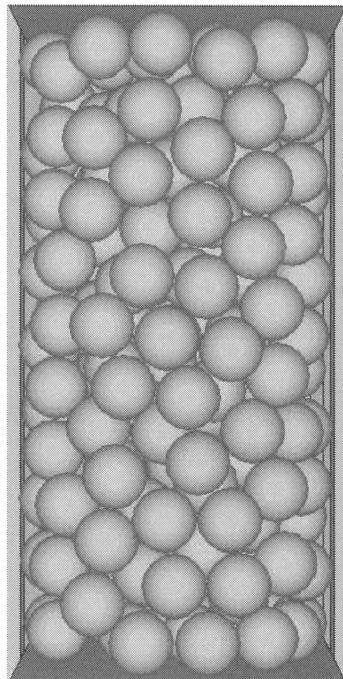


図-2 3次元個別要素法を用いた数値計算における三軸圧縮試験用供試体

表-2 三軸圧縮試験シミュレーション番号と条件

Test number	Void ratio when packed	Initial void ratio after consolidation	Ball number
1	1.00	0.914	444
2	0.900	0.890	467
3	0.860	0.851	477
4	0.850	0.850	480
5	0.840	0.838	483
6	0.800	0.802	493
7	0.750	0.766	507

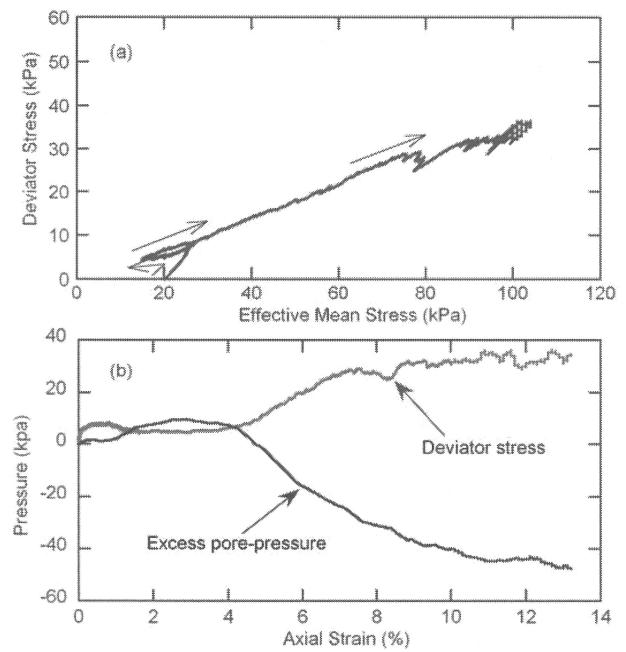


図-3 中密（試験番号4）供試体の試験結果。(a)有効応力経路,(b)偏差応力および間隙圧と軸歪みの関係

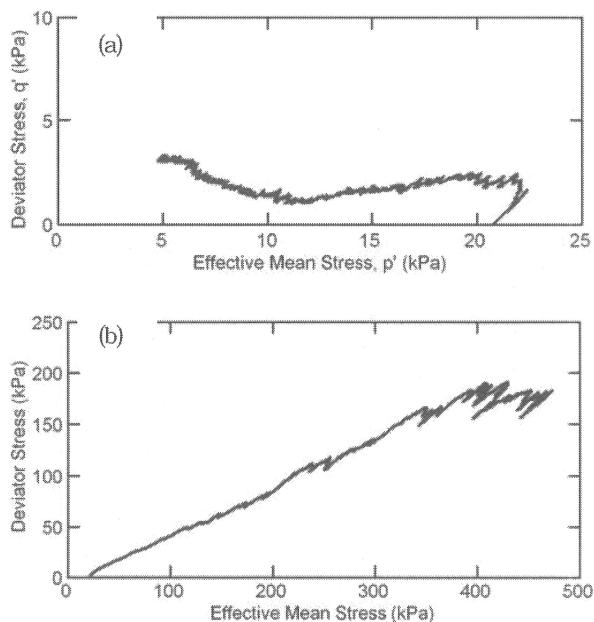


図-4 有効応力経路。(a)粗供試体（試験番号1）,(b)密供試体（試験番号7）。

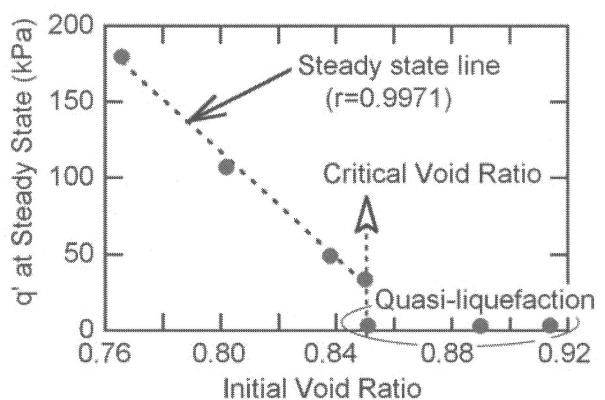


図-5 間隙比と定常状態時の偏差応力の関係