

個別要素法を用いた非排水／排水数値三軸圧縮試験における有効応力変化 と内部摩擦角の検討

岡田康彦 (森林総研)

要旨：三軸圧縮試験で認められる砂の液状化現象及びダイレイタンスーに伴う負の間隙水圧発生の数値的再現手法の高度化を目指し、2種類の粒度に調整した試料に対し間隙水圧連成型の3次元個別要素法モデルを適用して非排水数値三軸圧縮試験を実施した。また、排水数値試験を行いピーク内部摩擦角について検討した。

粒度によらず間隙比の大きな粗の数値供試体では液状化に準ずる状態が発生すること、間隙比の小さな密の数値供試体ではダイレイタンスーに従って負の間隙水圧が発生することを示した。粒度の良い試料では残留状態時における負の間隙水圧の発生量は粒度の悪い試料よりも小さく、その結果、残留状態時の有効平均応力も小さくなることがわかった。この原因は、粒径の大きな土粒子と粒径の小さな土粒子が混在していると隣接する土粒子がこれを乗り上げる量が全体として相対的に小さくなるのが原因であると推定された。

同試料を対象に排水数値三軸圧縮試験を実施したところ、同間隙比であるならば粒度の良い試料で小さなピーク内部摩擦角が算出された。これは、同じ間隙比であってもピーク内部摩擦角は相対密度に影響を受けるという実際の土に関する知見と調和的であった。

キーワード：間隙圧，3次元個別要素法，数値三軸圧縮試験，有効応力，内部摩擦角

I はじめに

水平砂地盤の液状化現象発生メカニズムの研究は、1964年の新潟地震による地盤災害を契機に急速に進展した。その結果、空隙の多い粗の構造を持つ砂質土から構成される飽和地盤が、地震力などの急激な圧縮／せん断変形を受けると、間隙水圧が過剰に上昇すると共に土粒子同士に発揮されていた摩擦力が弱まり、極端な場合、摩擦力が完全に消失して土粒子が水に浮遊した状態が再現されることがわかった (1)。

一方、落下(fall)、トップリング(toppling)、すべり(slide)、伸張(spread)、そして流れ(flow)の5つに分類 (2) される広義の「地すべり」現象のうち、運動速度が大きく長距離移動して甚大な被害をもたらす流れタイプの地すべり災害が顕著になるにつれて、地すべり研究においても液状化現象で認められる過剰間隙水圧の発生機構の研究が重視されるようになった。斜面土層内部で液状化現象が発生し流れタイプの地すべりとなり高速長距離運動に進展するのか、あるいは、液状化現象が発生しないのかは地すべり災害予測研究において極めて重要なテーマとなり、多くの手法により種々の研究がなされてきたが、三軸圧縮試験を用いた供試体の間隙比と過剰間隙水圧の関係が根幹となる成果の一つと考えられている (6)。ある間隙比を持つ供試体に関して、残留状態時の

有効平均応力が初期拘束圧よりも小さな場合、供試体は粗の構造を持ち、圧縮／せん断に伴って過剰間隙水圧が上昇し液状化する。一方、初期拘束圧が残留状態時の有効平均応力を下回れば、供試体は密の構造であると考えられ、圧縮／せん断に伴って負の間隙水圧が発生する (図-1)。

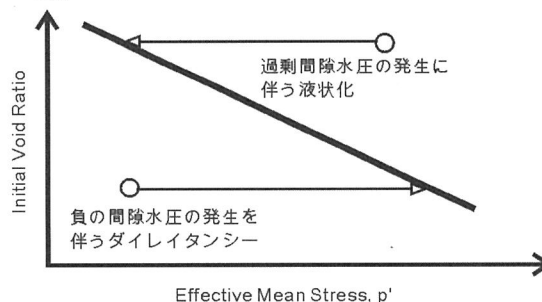


図-1. 残留状態線と間隙水圧変化の関係

このような土質力学試験を用いた研究で得られた成果を数値的に再現し、より複雑な条件における力学的挙動を予測するための研究も進展してきた。(4) は、岩盤崩落現象を対象に (3) 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

Yasuhiko OKADA(For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki, 305-8687)

Effective stress changes and internal friction angle in numerical triaxial compression tests by undrained/drained DEM

動が再現され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、液状化現象研究の根幹となる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、三次元個別要素法を用いて三軸圧縮試験で発揮される力学現象、特に間隙水圧の変動を詳細に追跡する数値的再現試験を試みてきた(5)。ここでは、非排水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せん断挙動を表現するため、計測球というモデル要素を導入し、間隙水圧の変動を追跡した。計測球は、土粒子を表現する球要素に対し、その中心が同じで半径を、球要素の半径に0.075mを加えた値に設定し、球要素の周囲を囲むように配置されている(図-2)。圧縮を受けて土粒子の位置が変わることに伴う計測球周囲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。本報は、均一粒径の試料のみならず、粒度を2種類に与えた試料に対して非排水/排水数値試験を行い、その際得られた有効応力変化ならびに内部摩擦角に関して検討した結果を示す。

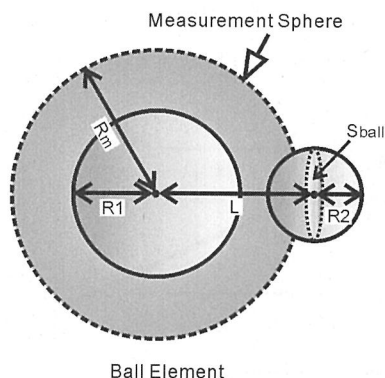


図-2. 数値球要素と計測球要素

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次元個別要素法に計測球を導入して間隙水圧変化を表現した。物理モデルと計算手法の詳細は(5)に詳しく、ここでは概略のみ記載する。供試体は、直径0.1m、高さ0.2mの円柱状で、実際の土粒子数個から数十個程度の塊を模した数値球要素は、直径が0.011mから0.019mになるように調整した(図-3)。間隙水圧は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膨大な計算時間の回避ならびに計算の安定性を考慮し、 $2.1 \times \exp(6.0) \text{ Pa}$ に設定した。球要素間の運動

は粘弾性モデルで表現するものとし、粘性ダッシュポットを球要素間に挿入(垂直/せん断両方向)した。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。

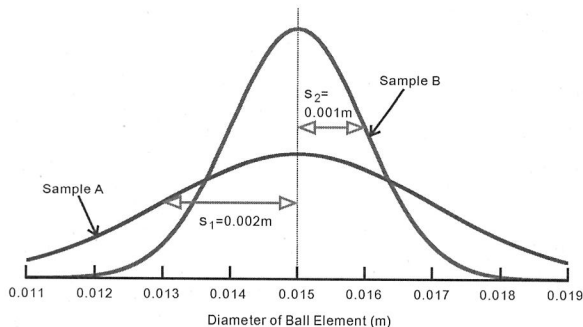


図-3. サンプル A および B の粒径分布 (正規分布)

表-1. 計算に用いた諸パラメータ

Parameter	Value
Normal elastic spring stiffness, K^n	$5.00 \times 10^{60} \text{ N/m}$
Tangential elastic spring stiffness, k^t	$1.25 \times 10^{60} \text{ N/m}$
Friction coefficient of particle, $\tan \phi_\mu$	0.60
Confining pressure, σ_3	$2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$
Modulus of compressibility of water	$2.1 \times 10^{60} \text{ Pa}$
Axial loading speed	0.01 m/s
Bulk permeability	$1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

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	Sample type
A1	1.00	0.877	A
A2	0.950	0.853	A
A3	0.900	0.836	A
A4	0.850	0.787	A
A5	0.800	0.759	A
A6	0.750	0.758	A
B1	1.00	0.894	B
B2	0.950	0.898	B
B3	0.900	0.866	B
B4	0.850	0.821	B
B5	0.800	0.778	B
B6	0.750	0.760	B

III シミュレーション結果と考察

1. 有効応力経路 粗および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-4に粗の供試体の試験結果を示す。サンプルAを用いた粗試料の有効応力経路（図-4a）およびサンプルBを用いた粗試料の有効応力経路（図-4b）とも、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するものの、その後は45度線よりも大きく左側に移動した。最終的な残留状態時の有効平均応力についても、両者とも約5kPaと同様の値を示し液状化に準ずる程度まで有効平均応力が低下した。つまりサンプルAとサンプルBでは、試料の粒度分布が異なるものの、非排水試験で発生する過剰間隙水圧はほぼ同様となった。

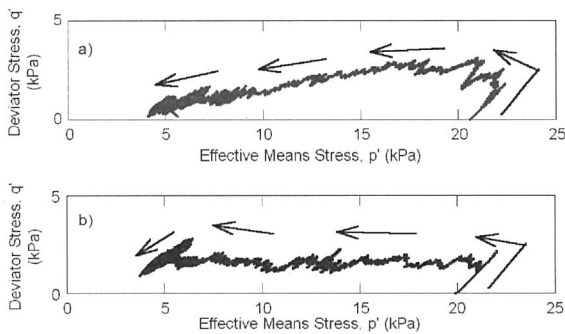


図-4. 粗供試体で得られた有効応力経路 4a:サンプルA (試験番号A1) 4b:サンプルB (試験番号B1)

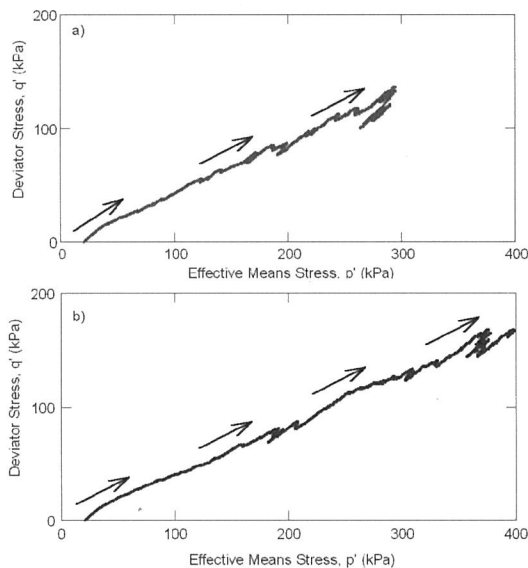


図-5. 密供試体で得られた有効応力経路 5a:サンプルA (試験番号A6) 5b:サンプルB (試験番号B6)

一方、図-5に密の供試体の有効応力経路を示す。サンプルAおよびBとも有効応力経路は、圧縮開始から右上

方向へと移動し、つまり負の間隙水圧が同様に発生した。しかし、サンプルAの残留状態時の有効平均応力は約290kPa、サンプルBのそれは395kPa程度と異なり、粒度の悪い試料ほどより大きな負の間隙水圧発生が認められた。この密の供試体における負の間隙水圧発生は、土のダイレイタンスーに起因したせん断時の体積膨張傾向に付随するものであり、3次元個別要素法に計測球を用いた本モデルでは、その再現に成功したことを示している。

2. 残留状態時の有効平均応力と間隙比の関係 前述の通り、砂を対象にした非排水三軸圧縮試験では、残留状態時の有効平均応力と供試体の間隙比の関係が重要である(6)。そこで、今回実施した3次元個別要素法における非排水三軸圧縮シミュレーションで得られた両者の結果を図-6に示す。この図から、間隙比が0.85よりも大きな値になると、試料の粒度分布によらず残留時の平均有効応力はほぼゼロになることがわかる。(7)は、非排水三軸圧縮試験の結果を基に、細かい土粒子を含む供試体では、せん断時に細粒分が粗粒土粒子の隙間に移動することによる体積収縮傾向のため、過剰間隙水圧が上昇しやすいとしているが、ここではこの説明と非調和の結果となった。このことは、本試験で用いた試料の粒度の分布が(7)で考えられているものよりも悪いためと推定された。

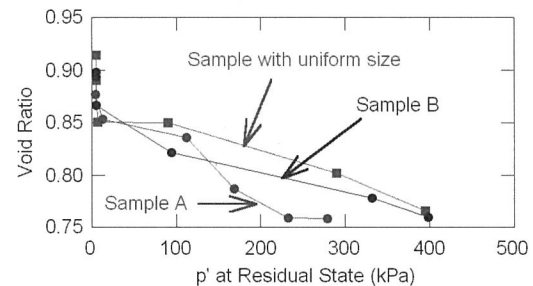


図-6. 残留状態時の有効平均応力と間隙比の関係

間隙比が0.85以下については、サンプルBおよび球要素の直径が0.015mと均一の試料の残留状態時の有効平均応力は間隙比の減少に比例して概ね直線的に増大した。サンプルAについては直線性は認められなかったものの、間隙比が小さくなるにつれて残留状態時の有効平均応力は大きくなった。この結果は、供試体の間隙比が小さくなるに従い土粒子間の噛み混み（インターロッキング）が大きくなるためより大きな負の間隙水圧が発生するという実際の土を対象にしたせん断結果と調和的なものとなった。なお、密の供試体ではサンプルAで負の間隙水圧の発生が小さくなり、つまり残留状態時の有効平均応

力もサンプルBおよび均一粒径試料に比べ小さな値になったが、それは図-7に示すように、ある土粒子が隣接する土粒子を乗り越えて運動するとき、粒径の小さな土粒子が混在していると乗り上げ量が、全体として相対的に小さくなることの主たる原因であると推定された。

3. 内部摩擦角 土質試験では、せん断時に発揮される内部摩擦角は重要なパラメータの一つである。図-8は、サンプルAおよびBを対象に排水数値三軸試験で得られた内部摩擦角と間隙比の関係を示したものである。サンプルAとサンプルBの排水試験結果を比較すると、同じ間隙比ならばサンプルBが大きな内部摩擦角を示した。粒度が良いサンプルAは圧密終了時において、サンプルBよりも相対的に間隙比が小さくなる。このことは、もしサンプルAとサンプルBで同じ間隙比となる供試体を考えると、サンプルAの供試体は相対密度が小さく、逆にサンプルBでは相対密度が大きいことを示す。つまり、今回の排水試験で得られた結果から、間隙比が同じであっても内部摩擦角は相対密度に強く依存することが数値計算においても示された。

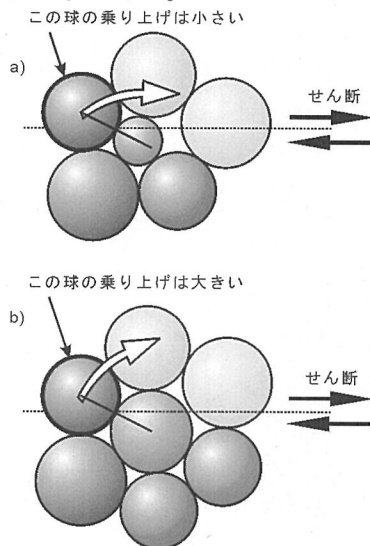


図-7. せん断変形時の球要素の乗り上げに関する模式図

IV 終わりに

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モデルを導入し数値シミュレーションを行うと共に、排水試験も実施して以下の結果を得た。

- 1) 粒度の異なる2試料においても、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、準液状化状態が再現された。
- 2) 間隙比が小さい密の供試体では、負の間隙水圧が発生し、間隙比が小さくなるについて残留状態時の有効平均

応力が大きくなる結果となった。粒度の良い試料では負の間隙水圧の発生量が小さな結果となったが、これは、せん断面付近に粒径の小さな土粒子があると、全体として相対的に土粒子の乗り上げ量が小さくなることの主たる原因であると推定された。

3) 排水数値試験で得られた内部摩擦角については、同じ間隙比であれば粒度の良い試料で小さな値が得られた。これは、同じ間隙比であっても相対密度に影響をうけるという実際の土の内部摩擦角に関する知見と調和的な結果となった。

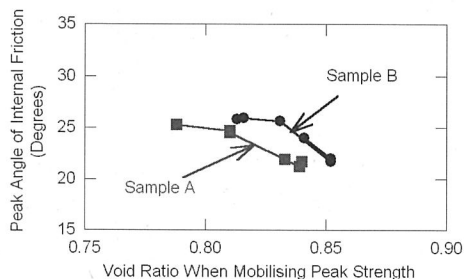


図-8. 排水条件下での三軸圧縮試験で認められたピーク内部摩擦角と間隙比の関係

引用文献

- (1) CASTRO, G. and POULOS, S.J. (1977) Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. **103**(GT6):1089-1109.
- (2) CRUDEN, D.M., and VARNES, D.J. (1996) Landslide types and processes. In: TURNER, A.K., SCHUSTER, R.L. (Eds.), Landslides, investigation and mitigation: Special report 247, Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., pp. 36-75.
- (3) CUNDALL, P.A. and STRACK, O.D.L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique. **29**(1):47-65.
- (4) 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 **33**:137-146.
- (5) 岡田康彦・落合博貴 (2007) 非排水三軸圧縮試験で発生する間隙水圧変化の数値実験. 日本地すべり学会誌 **44**(1):15-24.
- (6) POULOS, S.J. (1981) The steady state deformation. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. **107**(GT5):553-562.
- (7) YAMAMURO, J.A. and LADE, P.V. (1997) Static liquefaction of very loose sands. Canadian Geotechnical Journal. **34**:905-917.