

第Ⅲ部門

X線マイクロCTを用いた超緩詰め飽和砂の非排水せん断時の変形特性に関する研究

京都大学大学院 学生会員 ○大谷 悠哉
 京都大学大学院 正会員 木戸隆之祐
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

Desrues and Georgopoulos (2006)¹⁾は緩詰め飽和砂に対して行った静的な非排水三軸圧縮試験により、diffuse failure modesを確認した。この破壊モードは、初期の均質な状態からひずみが局所化し不均質な状態でせん断破壊に至る localized failure modes とは異なり、広範囲にひずみが分布し比較的均質な状態のまま破壊に至る現象とされている。緩詰め飽和砂の非排水せん断特性については実験的、解析的或いは理論的な様々な研究がなされているが、供試体内部の変形特性を実際に観察し、力学挙動と関連付けた議論により破壊メカニズムを検討した事例はない。

本研究では、相対密度 0%以下の超緩詰め砂を対象に非排水三軸圧縮試験を実施した。さらに、X線CT撮影及び画像相関法(DIC)²⁾による供試体内部の可視化、ひずみ場の定量化を行い、緩詰め飽和砂の変形特性を調査した。

2. 実験概要

試料は珪砂5号を用い、湿潤突き固め法によって供試体を作製した。供試体の相対密度-80%、供試体高さ75mmに対応する質量の気乾砂を含水比5%程度に調整し、5層に分けて試料を投入した。キャップの装着時等に供試体が圧縮し、最終的には直径35mm、高さ70mm~72mm、相対密度-50%前後の供試体となった。その後、供試体を二重負圧法によって飽和させた。B値はいずれも0.95以上であり、概ね上手く飽和化できたといえる。

実験条件を表1に示す。有効拘束圧400kPa、600kPaのそれぞれについて、CT撮影を行うケースと行わないケースの計4ケースについて試験を行った。CT撮影を行うケースでは、軸ひずみ0%、2%、4%、6%、8%、11%、14%、17%、20%の計9回撮影を行っている。

3. 実験結果

3.1 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験により得られた軸差応力—軸ひずみ関係と有効応力経路をそれぞれ、図1、図2に示す。

表1 三軸圧縮試験条件

Cases	1	2	3	4
セル圧 [kPa]	500	650	450	650
背圧 [kPa]	100	50	50	50
有効拘束圧 [kPa]	400	600	400	600
相対密度 [%]			-54.9	-34.7
(CT撮影後 voxel数から算出した相対密度)	-36.1	-47.3	(0.9)	(22.7)
ひずみ速度	1.0			

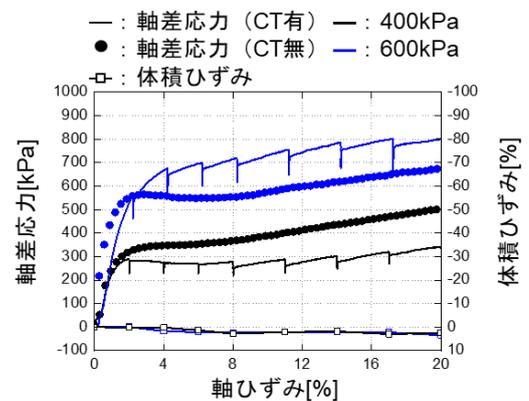


図1 軸差応力—軸ひずみ関係

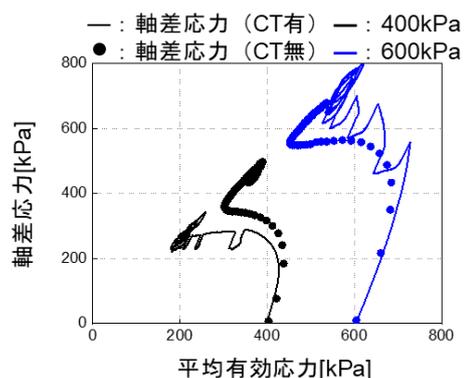


図2 有効応力経路

図1に示すように、軸差応力は1) 明瞭なピークを示して再度増加する、2) 明瞭なピークを示さず単調増加する、の2種類の挙動が見られた。CT撮影を行わないケースでは有効拘束圧600kPaで1)の挙動が見られたのに対し、CT撮影を行ったケースでは有効拘束圧400kPaで1)の挙動が見られる。したがって、

拘束圧が高いほど明瞭なピーク応力が得られる，という力学挙動に対する拘束圧依存性はない．一方，相対密度が低いケースで軸差応力が明瞭なピークを示す傾向が見られるため，拘束圧よりも相対密度が力学挙動に与える影響が大きいと考えられる．図2に示すように，平均有効応力は全てのケースで減少した後に増加しているが，軸差応力がピークを示すケースでは平均有効応力の減少量が大きい傾向が見られる．

3.2 CT 撮影及び画像解析結果

Case-3, Case-4 で得られた CT 画像及び DIC の結果をそれぞれ図3, 図4に示す．ここでせん断ひずみは偏差ひずみテンソルの第二不変量であり，体積ひずみは圧縮を正としている．せん断ひずみの分布図において黒い格子になっている部分は，相関係数が低かったため，結果を非表示としている．

軸ひずみが増加しても CT 画像から明確な密度変化が見られないため，供試体は密度が比較的均質な状態でも樽形に変形しているといえる．せん断ひずみはいずれのケースでも，軸ひずみ 2%~4%の段階で供試体の中心部に発生している．その後，荷重に伴ってせん断ひずみが大きくなるとともに，供試体の広範囲に比較的大きなせん断ひずみが分布する様子が見られる．

これらの結果から，本研究の条件では，超緩詰め飽和砂の非排水三軸圧縮試験を行うと拘束圧によらず diffuse failure が生じていると考えられる．また，体積ひずみ分布から 1) 軸ひずみ 8%程度までは徐々に体積圧縮しその後体積膨張に転じる，2) 初期に顕著な圧縮挙動を示し，その後体積膨張が顕著となる，の2種類のダイレイタンスー特性が確認できた．これらは軸差応力が明瞭なピークを示すケースと単調増加するケースにそれぞれ対応しており，同じ超緩詰め砂であっても異なる変形モードと力学特性を示すことが分かった．

4. 結論

高拘束圧，非排水条件の緩詰め飽和砂では，せん断ひずみはまず供試体の中央付近に発生し，供試体の広範囲にせん断ひずみが分布する変形モードを示す．この傾向は拘束圧によらず同様であり，本研究で扱った供試体は diffuse failure modes に至っていると考えられる．Diffuse failure modes に至っているケース間でも，緩詰め飽和砂の非排水せん断条件での力学挙動や変形特性には2種類の挙動が確認でき，

拘束圧だけでなく供試体の初期相対密度など他の要因も大きく影響すると考えられる．一方，本研究では相対密度 0%以下の超緩詰め砂に対して非排水三軸圧縮試験を実施したが，得られた力学挙動は中密度の砂に見られるものであった．より緩詰めの供試体を作製する手法や，飽和度を高める方法の検討が解決策と考えており，今後の課題である．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K14825 の助成を受けたものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

- Desrues, J. and Georgopoulous, D.I.: An investigation of diffuse failure modes in undrained triaxial tests on loose sand, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.585-594, 2006
- Kido, R.: Microscopic Characteristics of Partially Saturated Soil and their Link to Macroscopic Responses, *Doctoral Dissertation of Kyoto University*, 2019

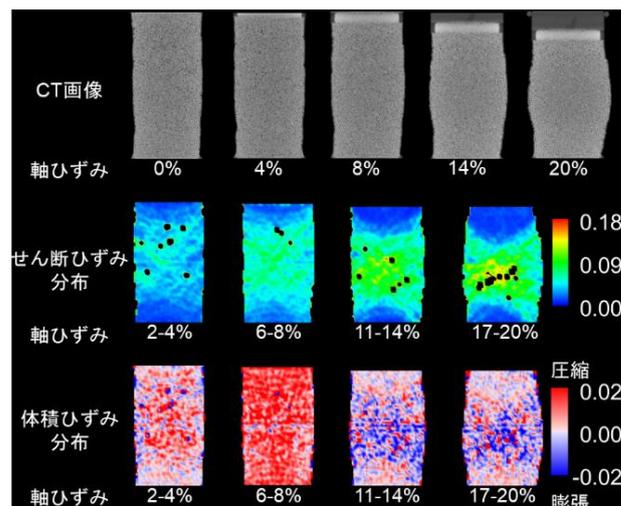


図3 CT 画像及び画像解析結果 (400kPa)

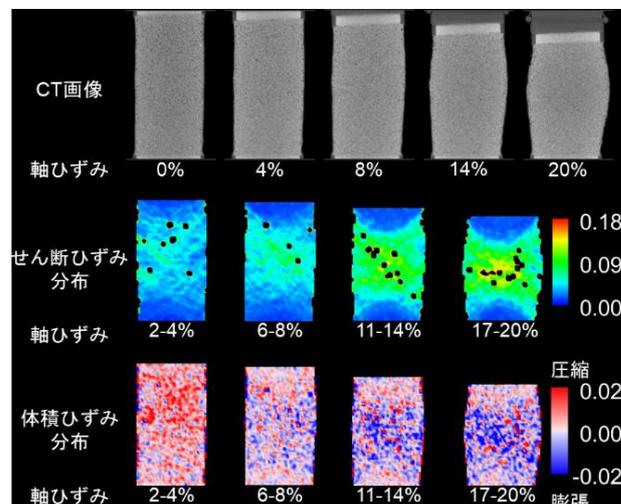


図4 CT 画像及び画像解析結果 (600kPa)