

京都大学
京都大学大学院

学生会員 〇木戸 隆之祐
正会員 肥後 陽介

京都大学大学院
京都大学

学生会員 森下 諒一
学生会員 合谷 龍馬

1. 研究の背景及び目的

不飽和土は土・水・空気の混合体であり、要素試験の供試体内部でも微視的には不均質である。特に、間隙水は供試体作成方法や重力の影響を受け分布していると考えられ、これはサクションが不均質であることと等価である。このような分布はひずみ局所化発生メカニズムと関連して興味深い。そこで本研究では、不飽和豊浦砂の密詰め三軸供試体を作成し、試験前の試体鉛直方向の飽和度・間隙比分布を μ X 線 CT とその画像の三値化によって定量的に評価した。さらに試験後の分布も評価し、分布変化を議論した。

2. 供試体概要及び X 線 CT 装置

高さ 70mm、直径 35mm とし、水中落下法によって初期間隙比 0.650(相対密度 90.0%)のほぼ飽和した豊浦砂密詰め供試体を作成した。次に、水頭型吸引法によりサクションを与えることで不飽和状態にし、本研究では 3 つの異なる初期飽和度を設定した(表 1)。

X 線 CT 装置は KYOTO-GEO μ XCT(TOSCANER-32250 μ HDK)であり、検出器には新たに導入した FPD(Flat Panel Detector)¹⁾を用いた。これにより X 線を直接電荷信号に変換するため信号劣化が少なく、従来よりも高解像度の CT 画像が取得可能となった。撮影は供試体中央において上下数 mm を除いた部分が撮影できるよう、鉛直方向に 5 回撮影を行った。

表 1 供試体 3 ケースの飽和度・含水比

供試体ケース	ケース1	ケース2	ケース3
初期飽和度(%)	70.2	60.2	43.9
初期含水比(%)	17.3	14.8	10.8

3. 三相割合の定量化手法

CT 画像上で土粒子・水・空気に分離するために Region Growing 法²⁾を適用した。本手法の許容値として、どの相にも分類できない mixel の存在を考慮し、サンプリングして求めた平均値・分散から、最尤推定法によって混合分布を推定し適切な値を決定した³⁾。本研究では各ケースで平均値、許容値を固定し、各撮

影箇所に対し同じ値を適用することで、相対的に分布を評価した。なお、撮影した箇所を半割し、合計 10 箇所において定量化を行った。

4. 初期飽和度・間隙比分布

ケースごとに定量化結果を示す。供試体全体画像に対し、色付けした部分の三相割合を行った。白抜きされた部分は画像解析不可能だったため省略する。なお全体値とは、定量化した部分の各相の総 voxel 数から計算したものである。

4.1 ケース 1(初期飽和度 70.2%)

図 1(a)より、ほとんどの箇所において、間隙比が大きいところでは飽和度は低く、間隙比が小さいところでは飽和度は高いという負の相関を示した。これは一般に「間隙比が大きい箇所ほど水は抜けやすい」という傾向に一致しており、供試体中央が他の箇所に比べ間隙比が大きく飽和度も低くなっていることから、供試体中央から排水が進んだことが推測される。飽和度分布より、供試体下部ほど飽和度は高い傾向にあることが確認できる。これは全水頭一定下で、サクションは供試体上部ほど大きいことが影響していると考えられる。さらに全体値をもとに分散を求めると、間隙比の分散は小さい値を示し、飽和度の分散は比較的大きい値を示した。よって、比較的均質な密詰め状態であるが、水の分布は大きく異なると思われる。

4.2 ケース 2(初期飽和度 60.2%)

図 1(b)より、ケース 1 と同様負の相関を示したが、間隙比が小さく、飽和度も低いという正の相関も示した。これはケース 1 よりも初期飽和度が低く、小さい間隙からも排水したためと考えられる。ケース 1 と同様、供試体下部ほど飽和度は比較的高くなっていることが確認できる。分散についても、間隙比の分散は小さい値を示し、飽和度の分散は大きい値を示した。

4.3 ケース 3(初期飽和度 43.9%)

図 1(c)のグラフより、ほとんどの箇所で正の相関を

示した。これは初期飽和度が他のケースよりも低く、大きい間隙からの排水がほぼ収束し、小さい間隙からの排水が主體的になったためと考えられる。また、供試体下部ほど飽和度が高い傾向にあること、分散の値などは他のケースと同様の傾向を示した。

5. 局所変形による飽和度・間隙比分布の変化

ケース 3 において排気-非排水三軸圧縮試験を実施し、軸ひずみ 21%での分布を同様の手法で明らかにした。図 1(c)及び(d)を比較すると、局所変形箇所において間隙比は非常に大きくなり、飽和度は低下していることが確認できる。供試体上部の間隙比は、若干大きくなっているものの分布形状に変化は見られない。

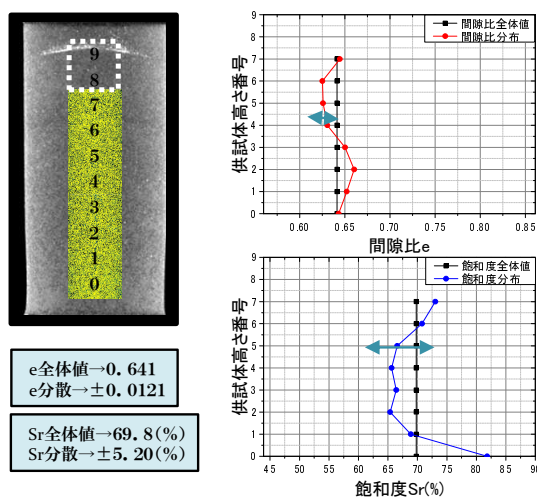
6. 結論

初期飽和度が高い場合、飽和度・間隙比分布は「負の相関」を示す傾向があり、初期飽和度が低くなるにつれ「正の相関」の傾向が強くなる。これは飽和度が低くなると小さい間隙からも排水するためと考えられる。また、飽和度・間隙比ともに供試体内部ではある

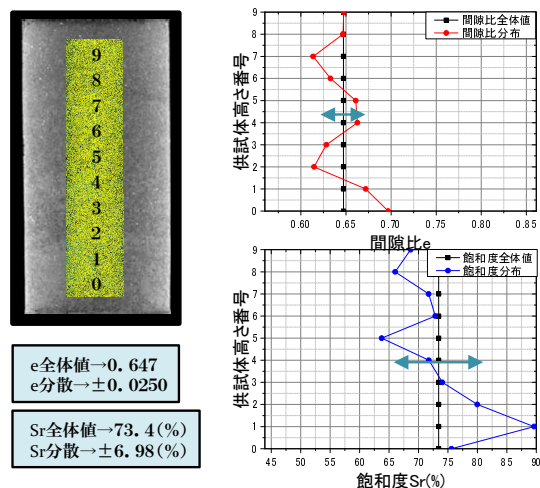
幅をもって分布し、間隙比は分散が小さく比較的均質な状態であるが、飽和度は分散が大きいため供試体高さによって分布は異なる。さらに、局所変形内部で飽和度・間隙比分布は大きく変化するが、外部では間隙比の分布にあまり変化はない。また、供試体上部の飽和度分布の変化から、せん断に伴う供試体内部での水の移動の様子を確認した。

参考文献

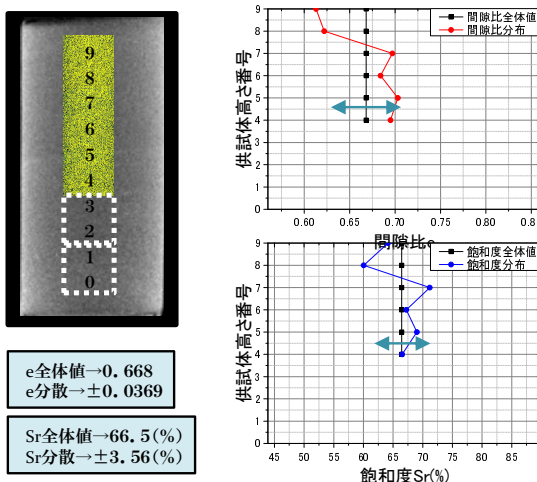
- 1) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sanagawa, T. and Matsushima, Y., Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT, *Soils and Foundations*, 51 (1), pp.95-111, 2011.
- 2) 高木幹雄, 下田陽久: 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.1651, pp.1957, 2004.
- 3) 北本朝展, 高木幹雄: ミクセルが存在する場合の混合密度推定, 電子情報通信学会技術報告, PRU95-202, pp.33-40, 1996.



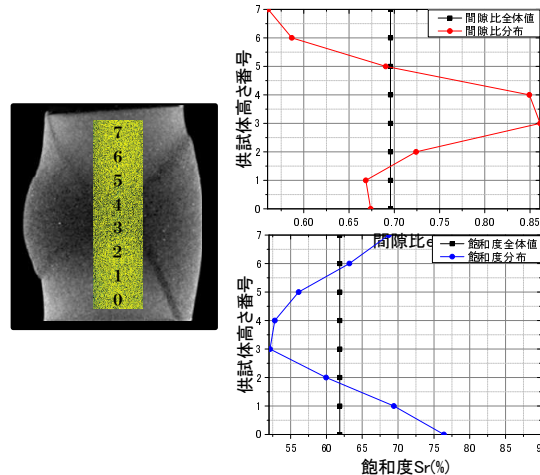
(a) ケース1 初期分布



(b) ケース2 初期分布



(c) ケース3 初期分布



(d) ケース3 軸ひずみ21%分布

図1 間隙比・飽和度分布