

μ フォーカス X 線 CT を用いた不飽和土の内部構造の可視化

熊本大学大学院 学生会員 ○岡野寛雄
熊本大学大学院 正会員 大谷 順

1. はじめに

盛土の締固めは、耐震性・耐水性等において非常に重要である。しかしながら、従来の締固め管理手法では、規定通りの施工を行っていても土質や含水比のばらつきによって締固め不十分な箇所が生じてしまうことが懸念されている。さらに、近年では、土構造物に対する要求性能が高度化・多様化されつつあり、従来の締固め管理手法の見直しが求められている。また、土それぞれに最適含水比があるように、間隙水が土の締固め特性に大きな影響を及ぼすことから、締固めのメカニズムを解明するためには、不飽和土の特性について考えることが重要であると考え。今日まで、不飽和土を対象とした研究は数多く行われているが、不飽和土の内部構造を可視化した例は少ない。そこで本研究では、μ フォーカス X 線 CT を用いて、ミクロ的な視点から締固めのメカニズムを解明することを目的とし、その第一歩として、不飽和土の内部構造の可視化を試みた。

2. 試験概要

本研究では、熊本大学所有のμ フォーカス X 線 CT スキャナ (TOSCANER-32300FPD, 東芝 IT コントロールシステム (株) 製, 最大管電圧: 230kV, 最大管電流: 603μA) を使用した。本スキャナは、マイクロレベル (5μm) の分解能で対象物の内部構造を非破壊で可視化できる特徴を有しており、近年では地盤分野の研究にも適用されつつある¹⁾。試料としては硅砂 3 号 ($\rho_s=2.640\text{t/m}^3$, $D_{50}=1.791\text{mm}$, $\rho_{dmin}=1.478\text{t/m}^3$, $\rho_{dmax}=1.700\text{t/m}^3$) を用いた。まず、内径 40mm, 高さ 30mm のアクリル製の円筒容器内に試料を緩く詰め、供試体の含水比が 5% になるように、上面から注射器 (針部外径 0.6mm) を用いて水 (2045mm³) をごく少量ずつ注入し、水を供試体全体に浸み込ませるために 1 時間程度放置した後、CT 撮影を行った。また、CT 撮影終了後、突き棒で 30 回突き固め、突き固め後の供試体に対して再度 CT 撮影を行うことで、締固め後の状態についても考察した。表-1 は、締固め前後における供試体の諸量を示している。締固め後の相対密度は、一般的な土工の締固め管理基準である $D_r \geq 90\%$ を満足している。

3. 不飽和土の内部構造の可視化

一般に、CT 値と密度の間には正の相関関係があることが知られている。そこで、CT 断面画像から、空隙、間隙水、土粒子の CT 値と密度との関係を調べた。図-1 は、比較的間隙水の分布がはっきり確認できる供試体下端から 5mm 位置における締固め前の断面 CT 画像を示す。CT 画像では、CT 値が高い (高密度) 領域ほど白く、CT 値が低い領域 (低密度) ほど黒く表示されるため、白い部分が土粒子、黒い部分が空隙、そして灰色の部分が間隙水であると判断できる。画像上から、空隙、間隙水、土粒子と考えられる領域をそれぞれ任意に 5 箇所ずつ抽出し、CT 値を調べた。図-2 は、これらによる空気、水、土粒子の CT 値と密度の関係をプロットしたものである。図より、CT 値と密度は高い相関関係にあり、内部構造を明確に可視化できているといえる。

土の内部構造を定量的に評価するためには、画像上でしきい値を決定し、空隙、間隙水、土粒子を明確に分離することが必要となる。図-3 は、図-1 で示した断面における CT 値ヒストグラムを示す。この場合、CT 値が低い方から順に、空隙、間隙水、土粒子の領域が存在していると考えられ、各々の境界に任意のしきい値を設定しなければならない。この処理を多値化処理 (この場合は 3 値化) と呼ぶが、本研究では、図-3 のヒストグラムから、3 つの突出した部分がそれぞれ正規分布に近似すると仮定し、隣り合う正規分布曲線が重なり合う点

表-1 締固め前後の供試体諸量

		before	after
乾燥密度	$\rho_d (\text{t/m}^3)$	1.486	1.679
間隙比	e	0.777	0.572
飽和度	$S_r (\%)$	17.02	23.12
相対密度	$D_r (\%)$	41.23	91.67

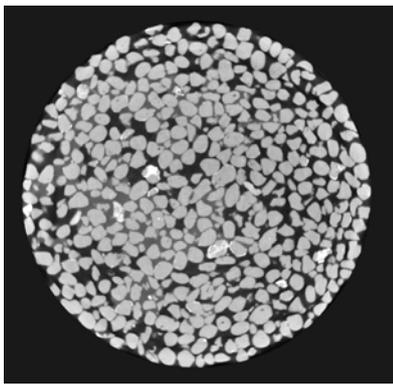


図-1 供試体下端から 5mm 位置における断面 CT 画像 (直径 40mm)

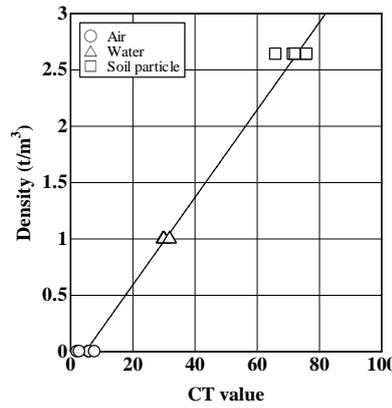


図-2 図-1 に示す断面における CT 値と密度との関係

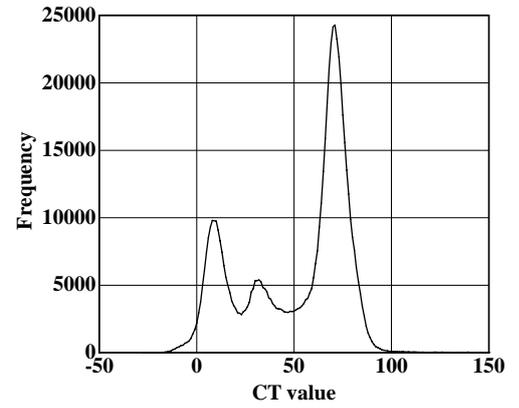


図-3 図-1 に示す断面における CT 値ヒストグラム

をしきい値とした。図-4 は、3 値化処理を行った供試体の 3 次元画像である。3 次元画像の作製および画像解析に当たっては、3 次元可視化ソフト VGStudioMAX2.0 (Volume Graphics GmbH 製) を使用した。なお、

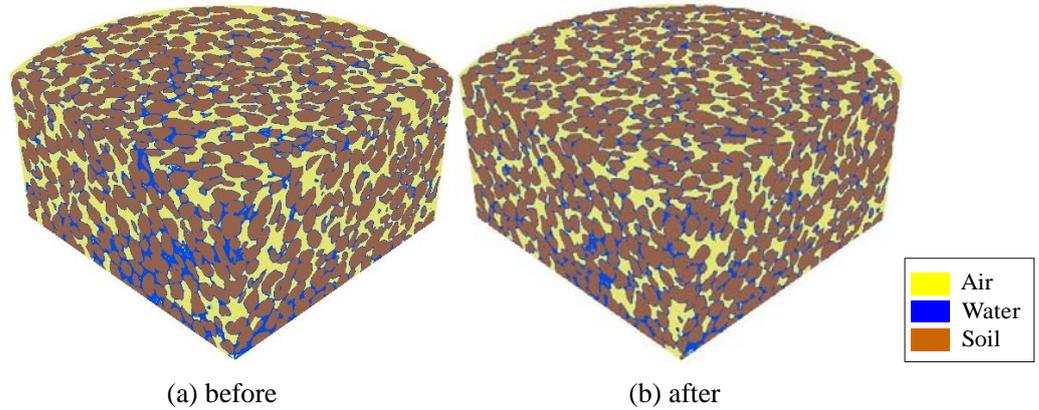


図-4 締め前後の供試体における 3 値化画像の比較 (供試体下端 5mm~20mm の範囲)

ここでは内部状況をより

りわかりやすく表示するため、任意の鉛直断面も示している。図より、締め後の供試体は、締め前よりも間隙水が広範囲に分布していることが確認できる。さらに、締めによる間隙構造変化を定量的に評価するために、画像解析によって 3 相領域をそれぞれ抽出し、その量を集計して得られた体積量を表-2 に示す。なお、締めの前後では供試体全体の体積が異なるため、解析の対象は供試体下端 5mm から

表-2 体積量の比較 (単位: mm³)

	before	after
空隙	5049	4499
間隙水	2552	2589
土粒子	10458	10971
全体積量	18059	18059

20mm の範囲とした。表より、締め前後で空隙の体積量は減少し、

土粒子の体積量は増加していることが確認できる。これは、締めによって土粒子が密に配列していることを示しているといえる。また、間隙水の体積量は締め前後でほぼ変化しないことが示されている。

一方、供試体作製時に注入した水分量と、供試体全体の画像解析から得られた水分量とを比較すると、実際に注入した水分量は 2045mm³ であったのに対し、画像から得られた水分量は 3770mm³ となり、過大な評価をしていることがわかった。このことから、しきい値の決定法にはまだ検討の余地があると言え、より精度の高い定量的評価を行うためには、しきい値の決定法についてさらに改良する必要があると考える。

4. まとめ

砂砂 3 号を用いて不飽和土供試体を作製し、μ フォーカス X 線 CT 撮影を行った。その結果、CT 値と密度は高い相関関係を示しており、不飽和土の内部構造の可視化に成功したといえる。さらに、CT 画像解析の結果、締め後の供試体は、締め前よりも空隙量が減少し、土粒子の体積が増加することが定量的に示された。

参考文献

1) 肥後陽介, 佐名川太亮, 松島祥樹, 木元小百合, 岡二三生: 第 44 回地盤工学研究発表会, pp.303-304, 横浜, 2010.