

X 線 CT による土粒子構造の不均一性の評価指標の検討

長岡技術科学大学 大学院 非会員 ○野田 悠斗
東京都立大学 正会員 志賀 正崇
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明・高田 晋

1. はじめに

砂質土の力学・物理特性の把握においては、従来、乾燥密度や間隙率といった巨視的な指標が用いられてきた。しかし、同等の密度を有する供試体であっても、作製方法や応力履歴によって内部の局所的な粒子の疎密状態や不均一性は異なり、これが巨視的な挙動に影響を与えることが知られている¹⁾。そのため、土粒子骨格の空間的なばらつきや局所的な構造変化といった、微視的な土粒子構造の特徴を定量的に把握・評価する手法の確立が求められている。

近年、X 線 CT をはじめとする非破壊画像観察技術の発展により、試料内部の三次元的な土粒子構造を破壊することなく取得することが可能となった²⁾。しかし、得られた画像データから粒子骨格の空間的なばらつきや不均一性を客観的・定量的に評価・分類する具体的な手法の検討については限定的である。

そこで本研究では、X 線 CT 画像から得られる微視的な空間特徴量として局所間隙率に着目し、その累積分布と多変量解析を用いた土粒子構造の評価手法を提案する。最終的には、作製条件が異なる小供試体に対して本手法を適用し、土粒子構造の不均一性の違いを客観的に評価・分類できるかを検証することを目的とする。

2. 実験手法

本研究では、内径 220mm、高さ 97mm のモールドを用いて、図-1 に示すように 2 種類の大供試体を作製した。試料は、モールドへの堆積後に土粒子構造を固定する目的で、6 号珪砂に早強セメント（質量比 1.5%）と水（質量比 5.0%）を混合したものを用いた³⁾。3 層に分けて作製し、一方の大供試体だけ、各層の片側半分の領域を突き棒で鉛直方向に 9mm 間隔で突き刺して攪乱した。20℃一定の恒温室内で乾燥を防ぎながら 1 週間気中養生をし、9mm 角の小供試体を切り出した。図-2 に、測定用の容器に入れた小供試体を示す。切り出し位置は大供試体の中心を基準とし、通常の大供試体では 0, 40, 60, 80, 100mm、片側を

攪乱した大供試体では各領域の 60mm の箇所とした。切り出し深さは底面から 50mm とした。

3. 測定結果の分析

X 線 CT 測定は、Bruker 社の SkyScan1172 で実施し、1pixel が 3.5 μ m となる 1500 $\times$ 1500pixel の水平方向の断面画像（CT 画像）を、1 つの小供試体につき 1500 枚、16bit tif 形式で得た。この CT 画像に対し、粒子と間隙を分離する目的で二値化と複数のノイズ除去を行った。これらのパラメータは、局所的二値化のウィンドウサイズを 501、モルフォロジー演算の粒子半径を 1、小粒子除去の最小面積を 50 とした。画像処理を行う前後の CT 画像の例を図-3 に示す。

本研究では、分析の指標として、画像処理後の全 CT 画像の全ピクセルに対し、そのピクセルを中心とした正方形の領域における間隙の割合を表す局所間隙率を採用した。これにより、人為的に攪乱した供試体の土粒子構造の変化を評価することを試みた。なお、正方形の一辺の長さを表すウィンドウサイズは、粒子と間隙の両方を必ず領域内に含む 211 とした。また、通常の大供試体から切り出した小供試体については、中心からの距離の順に 1-1 から 1-5 とし、片側を攪乱した大供試体から切り出した小供試体については、攪乱した領域の小供試体を 2-1、不攪乱領域の小供試体を 2-2 とする。図-4 に、各小供試体の全ての局所間隙率を数値別に集計し、作成した累積分布曲線を示す。1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 2-2 については概

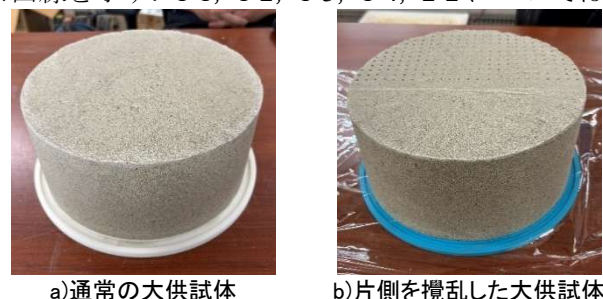


図-1 作製した大供試体



図-2 小供試体(1-1 から 1-5)

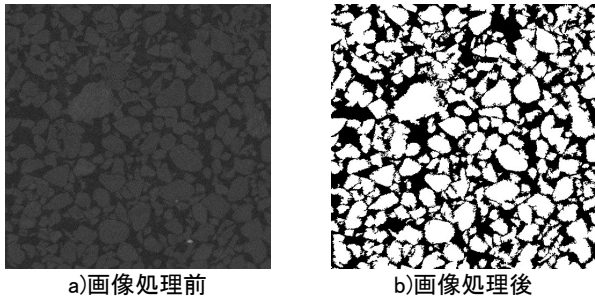


図-3 CT 画像の例

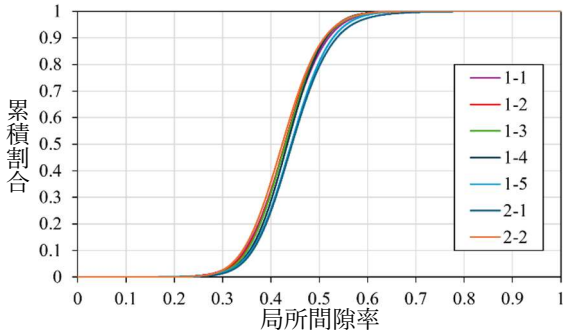


図-4 局所間隙率の累積分布曲線

ね一致している一方、1-5、2-1 は局所間隙率がやや大きい結果となった。この要因として、1-5 はモールド壁面との摩擦による締固め不足が考えられ、2-1 は攪乱による密度の変化が考えられる。

この差について定量的に評価するために、二乗平均平方根誤差(RMSE)を用いたウォード法による統合を行い、累積分布曲線を 2 群に分類し、その分類が適切かシルエット係数による評価を行った。RMSE は式(1)で求められ、2 つの曲線間で平均してどの程度の累積割合の差が存在するかを表す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{A,i} - y_{B,i})^2} \cdots \cdots (1)$$

ウォード法は、群内分散の増加を最小化することで同質性の高い群を抽出する階層的な手法である。シルエット係数は、群間の乖離度に基づき分類の妥当性を評価する指標であり、全体の平均が 0.51 以上であれば同一群内での同質性および他群との明確な異質性が十分に担保されていると評価できる⁴⁾。シルエット係数の算出には、自群内平均距離と他群平均距離を用いた。自群内平均距離は、その試料と同一群の他試料からなる全ペアの RMSE を平均したものであり、他群平均距離はその試料と異なる群の試料からなる全ペアの RMSE を平均したものである。シルエット係数は、他群平均距離から自群内平均距離を引いた値を、他群平均距離と自群内平均距離のうち大きい方の値で除すことで求めた。

表-1 局所間隙率の累積分布曲線の RMSE

	群 A					群 B	
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-2	1-5	2-1
1-1		0.0064	0.0062	0.0122	0.0137	0.0244	0.0302
1-2	0.0064		0.0030	0.0114	0.0111	0.0276	0.0337
1-3	0.0062	0.0030		0.0087	0.0139	0.0249	0.0310
1-4	0.0122	0.0114	0.0087		0.0224	0.0185	0.0251
2-2	0.0137	0.0111	0.0139	0.0224		0.0379	0.0436
1-5	0.0244	0.0276	0.0249	0.0185	0.0379		0.0073
2-1	0.0302	0.0337	0.0310	0.0251	0.0436	0.0073	

表-2 自群内平均距離(a)、他群平均距離(b)、シルエット係数(c)

	1-1	1-2	1-3	1-4	2-2	1-5	2-1
(a)	0.0096	0.0079	0.0079	0.0137	0.0153	0.0073	0.0073
(b)	0.0273	0.0306	0.0280	0.0218	0.0407	0.0267	0.0327
(c)	0.6478	0.7405	0.7165	0.3724	0.6249	0.7246	0.7754

各小供試体の局所間隙率の累積分布曲線を用いて RMSE を求めた結果を表-1 に示す。これらの値を用いてウォード法による統合を行ったところ、1-1、1-2、1-3、1-4、2-2 からなる群 (群 A) と、1-5、2-1 からなる群 (群 B) に分類された。この分類をもとに、自群内平均距離、他群平均距離、シルエット係数を求めた結果を表-2 に示す。各小供試体のシルエット係数の平均は約 0.657 であり、0.51 を超えていることから、この分類は適切であり、違いが生じているといえる。このことから、局所間隙率の累積分布を用いることで、土粒子構造の均一性を客観的に評価できることが明らかとなった。

4. 結論

本稿では、X 線 CT で得た三次元土粒子構造を局所間隙率で評価する手法を示した。局所間隙率の累積分布曲線をウォード法で分類した結果、壁面近傍の小供試体および攪乱した領域の小供試体と、それ以外的小供試体の 2 群に分かれ、シルエット係数の平均は基準を満たした。局所間隙率の累積分布を用いることで、土粒子構造の不均一性の違いを評価することが部分的に可能である。今後は、力学特性との関係を検討する。

参考文献

- 1) Masanobu Oda : Initial Fabrics and their Relations to Mechanical Properties of Granular Material, Soils and Foundations, Vol12, No.1, pp.93-104, 1972.
- 2) 大谷順ら : 地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用, 土と基礎, Vol48, No.2, pp.17-20, 2000.
- 3) Laoue Chexiong ら, セメント混合砂の引張強度の測定方法の検討, 第 43 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, 2025.
- 4) Kaufman・Rousseeuw : Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis, John Wiley & Sons, Inc., p.88, 1990.