

## X線CT画像解析に基づく土のマクロスケール力学特性評価へ向けた基礎研究

新潟大学大学院 学生会員 ○小島 隆平  
 新潟大学 正会員 大竹 雄  
 新潟大学大学院 学生会員 遠藤 尚希  
 京都大学 正会員 肥後 陽介  
 京都大学大学院 学生会員 木戸 隆之祐

## 1. はじめに

従来の土質力学では、ヤング率やポアソン比などのマクロスケールのパラメータを用いることにより土の力学特性を評価してきた。土は本来土粒子実質部分(固相)、間隙空気(気相)、間隙水(液相)からなる三相混合体であり、ミクロスケールのこれらの幾何学的関係が変形・強度特性に大きな影響を与える可能性がある。

既往の研究<sup>1)3)</sup>では、ミクロスケールの土粒子同士の単純な物理モデルにより、マクロスケールの地盤挙動を評価する方法が提案されている。加えて、近年ではX線CT画像を用いて供試体の内部を直接観察することが可能となり、これらの理論を実装するための基礎情報が収集可能な状況になってきた。

以上を踏まえて、著者らは、X線CT画像を用いてミクロスケールの情報を抽出し、ミクロスケールの物理とミクロスケールの空間的な“ゆらぎ”に基づいたマクロスケールの力学特性のモデル化を目指している。本研究では、その基礎的研究と位置づけ、X線CT画像から入手可能なミクロスケールのパラメータのうち、間隙率に注目し、間隙率の確率過程での表現の可能性、供試体鉛直方向、水平方向の異方性、ミクロスケールの間隙率の鉛直方向の“ゆらぎ”の要因について記す。

## 2. 本研究で用いるX線CT画像

本研究では、直径0.2mmのガラスビーズ、直径1mmのガラスビーズ、直径0.2mmと直径1mmのガラスビーズの混合試料、豊浦砂、3号珪砂、豊浦砂と3号珪砂の混合試料の計6種類で作成した円柱供試体の水平断面のX線CT画像を扱う。各供試体は直径35mm、高さ70mmとなるように粒子をモールドへ気中落下させ、密詰めとした。その後、X線CT装置を用いて供試体の下から1/2の鉛直高さにて撮影を実施した。撮影範囲は直径12.61mm、高さ12.18mmである。画像は各供試体につき870枚程度存在し、各画像のサイズは500×500画素である。供試体中の要素は、画像の濃淡により判別でき、灰色が土粒子、黒色が間隙を表す。

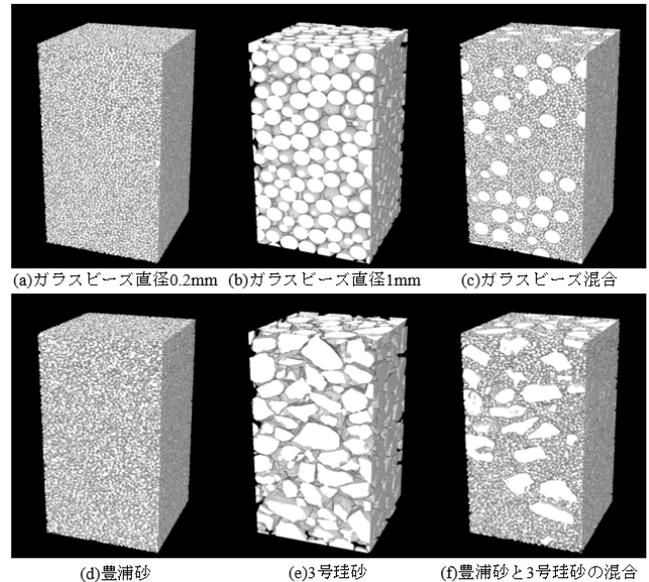


図-1 三次元画像

## 3. 研究方法

供試体の水平断面のX線CT画像に対して、土粒子部分と間隙部分に分割するために二値化を行う。その後、二値化を行ったX線CT画像を鉛直方向に結合し、図-1に示す三次元の供試体画像を形成する。このとき、完成した三次元画像は500×500画素の870枚程度の画像で形成されているため、500×500×870ボクセル程度のサイズとなっている。ここで、ボクセルとは二次元デジタル画像を構成する単位のピクセルに対して、厚み情報を加えた三次元デジタル画像を構成する単位のことである。1ボクセルの大きさはおよそ $0.012 \times 0.012 \times 0.014 \text{mm}^3$ であり、三次元画像の大きさはおよそ $6.00 \times 6.00 \times 12.18 \text{mm}^3$ である。三次元画像から任意の大きさ、位置のパッチを抽出し、各パッチの間隙率を計測する<sup>4)</sup>。その結果から、それぞれのパッチサイズの間隙率の分布形状を推定する。また、分散の低減具合をもとに供試体水平方向と鉛直方向の間隙率の異方性について検証する。間隙率のゆらぎに関しては、自己相関関数を求めることにより各供試体のゆらぎの特徴を比較する。

キーワード X線CT, 画像解析, ミクロスケール, 間隙率

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地 新潟大学大学院

4. 研究結果

図-2は3号珪砂の鉛直方向の間隙率の測定結果である。パッチサイズによらず平均間隙率が一定の値をとっていることがわかる。この傾向は他の粒子の場合でも鉛直方向、水平方向問わずみられた。図-3は(a)パッチサイズが0.60mmの3号珪砂と(b)5.96mmの豊浦砂の間隙率分布を正規分布と比較した結果である。左上のグラフは間隙率のヒストグラムと正規分布、右上のグラフは正規分布の理論値と実測値、左下のグラフは実測値と正規分布の累積分布関数、右下のグラフは正規分布と実測値の累積確率の比較である。それぞれ実線に近いほど正規分布に近い分布形状をとっていることを示している。パッチサイズが粒径よりも小さいとき、パッチ内に粒子部分のみが存在している状態が起きる可能性があるため適切なパッチサイズとは言えない。また、分布も正規分布にはならない。しかし、粒径がパッチサイズよりも大きいとき、粒子の種類、パッチサイズを問わず正規分布となることが確かめられた。平均間隙率が一定であること、間隙率の分布が正規分布となっていることから間隙率を確率過程で表すことができる可能性がある。

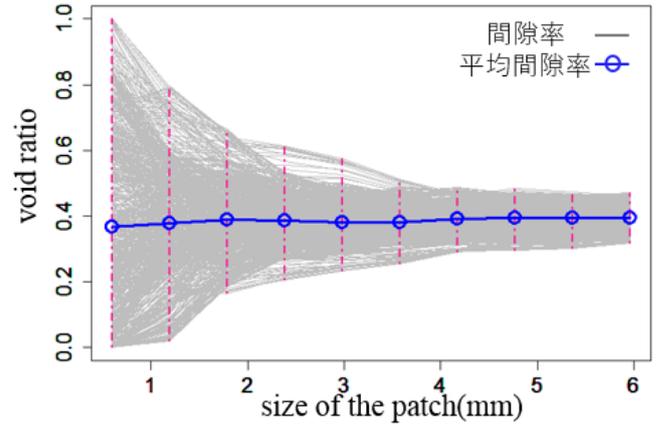


図-2 解析領域ごとの間隙率

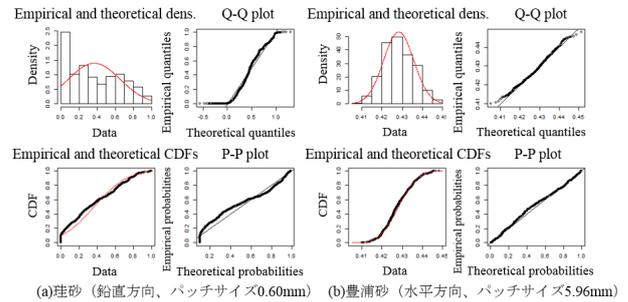


図-3 分布形状の推定

図-4は豊浦砂と3号珪砂の混合試料の鉛直方向、水平方向の間隙率の分散が低減していく様子である。混合した場合、鉛直方向の分散の低減が遅れることから間隙率の空間分布に異方性があると考えることができる。

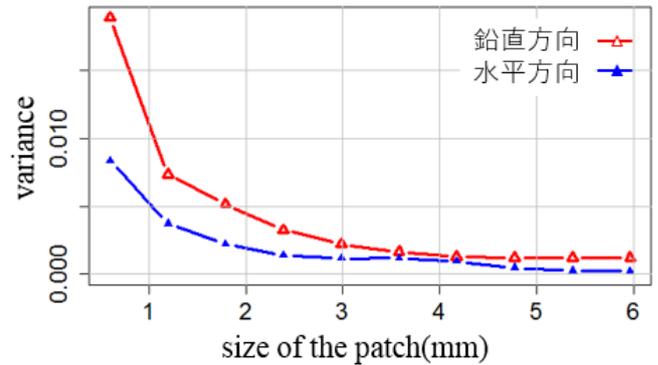


図-4 間隙率の分散の低減

図-5は豊浦砂と珪砂の混合試料とガラスビーズの混合試料の間隙率のゆらぎに関する結果である。自己相関関数から豊浦砂と珪砂の混合試料は長周期のトレンドを持っていることが分かる。その他の粒子では図-5ほどのトレンドが確認されなかったため、ミクロスケールの間隙率のゆらぎは材料の形状と組み合わせにより発生するという可能性が考えられる。

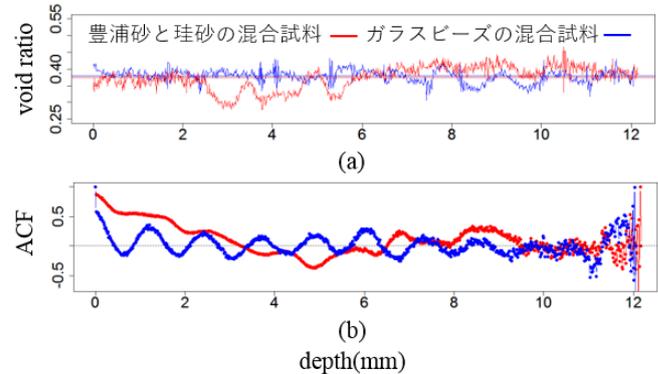


図-5 (a)間隙率の鉛直方向のゆらぎ (b)自己相関関数

5. 今後の展望

今後は、間隙率の確率過程でのモデル化を行う。また、ミクロスケールのパラメータとして粒子の接触点数やその位置、一粒子当たりの接触点数である配位数などがある。それらのパラメータについても空間的な不均一性のモデル化を行い、ミクロスケールの物理に基づいたマクロスケールの力学特性の評価方法を検討していく。

6. 参考文献

<sup>1)</sup>北村良介, 酒匂一成, 荒木功平, 宮本裕二: 確率・統計を援用した不飽和土質力学の体系化, 土木学会論文集C, Vol.66, No.3, 498-515, 2010.8.  
<sup>2)</sup>Chao-Fa Zhan, Zhen-Yu Yin, Anil Misra, Pierre-Yves Hicher: Thermomechanical formulation for Micromechanical elasto-plasticity in granular materials,

International Journal of Solids and Structures, Vol.138, P64-75, 2018.  
<sup>3)</sup>T.Matsushima, C.-S.chang:An elasto-plastic constitutive Model of granular materials based on contact force distribution, Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media, ISBN 0-415-41097-5  
<sup>4)</sup>Higo, Y., Kido, R., Takamura, F. and Fukushima, Y. (2018), Pore-scale investigations of partially water-saturated granular soil, *Mechanics Research Communications*, Vol.94, pp.1-7, 2018.