

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

粒子ファブリック解析手法の開発と X 線 CT 画像解析による砂のせん断帯の微視構造評価に関する研究

熊本大学大学院自然科学教育部 工学専攻 広域環境保全工学教育プログラム
(主任指導 椋木 俊文 教授)

論文提出者 野原 慎太郎

主論文要旨

ひずみの局所化を伴う地盤のせん断破壊現象は、局所性や不均質性の影響が大きいため、せん断に伴う微視的な構造変化を考慮し、応力とひずみの関係をモデル化し地盤の支持力を正確に評価することが重要である。過去には、個別要素法に代表される数値解析を行って粒子の挙動を再現する試みが行われているが、計算の妥当性を検証できる実データが不足しているのが現状である。また、地盤のせん断破壊は進行性破壊であるため、せん断帯が形成される過程も含めて、粒子構造の変化を 3 次元で定量的に評価することが必要である。これらの課題に対し、砂の内部構造を非破壊で可視化し、高解像度の CT 画像が取得可能なマイクロフォーカス X 線 CT が有効である。また、実験と CT 撮影を連動して行い、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation; DIC) に代表される画像解析を行うことで、载荷に伴う変位やひずみを定量化できるようになっている。しかし、せん断帯内部では、粒子回転が高頻度で起きている可能性が指摘されており、ひずみの局所化に応じた粒子構造の変化を評価かのような画像解析技術を開発しなければならない。

本論文では、まず粒子の形状や方向を 3 次元で評価可能な画像解析手法を開発した。さらに、砂を用いて一面せん断試験とリングせん断実験を行い、せん断帯の形成過程をマイクロフォーカス X 線 CT で可視化し、画像解析を行ってせん断帯の微視構造を定量的に評価した。

第 1 章では、研究の背景と目的を示し、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、X 線発生メカニズムや X 線 CT の撮影原理について述べた。また、本研究で使用するマイクロフォーカス X 線 CT の機器仕様を示した。

第 3 章では、地盤のせん断帯内部の微視構造に着目し行われた先行研究を調査した。

- (1) 供試体内部を非破壊で可視化し、せん断帯が形成される過程を同一の供試体で評価できるのは X 線 CT 以外に無く、当該分野においては X 線 CT が最も有効である。
- (2) 本研究で実施する画像セグメンテーションとして、Marker-Controlled Watershed

法の手順を示した。

(3) 粒子の形状や方向を評価する画像解析技術の先行研究を調査した結果、既往の画像解析技術は、特異な形状の影響を受けやすく、砂のようないびつな形状の粒子に対する適用性には課題があることが分かった。

第4章では、本研究で開発した、粒子の3次元形状や方向を評価可能な画像解析手法（3次元粒子ファブリック解析手法）について詳述した。

(1) 楕円体の断面積に関する理論式を導出し、CT画像から抽出した粒子の断面積を指標として、粒子を楕円体として近似する新たな3次元粒子ファブリック解析手法を構築した。また、構築した手法に基づき、非線形最小二乗法を使って楕円体一般式の未知数を評価可能な解析プログラムを開発することで、多数の粒子の3次元ファブリック性状を体系的に評価することが可能になった。

(2) 本研究で開発した手法の妥当性は、3Dプリンターで作成した楕円体粒子、ガラスビーズ、自然の砂粒子を用いて検証した。本手法で得られた評価結果と、3Dプリンターで作成した楕円体粒子とガラスビーズについては粒子の設計仕様と、自然の砂粒子については画像解析式粒度分布計の計測結果とを比較し、統計量に大きな違いが表れていないことを確認し、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析手法によって精度良く粒子の3次元形状を評価できることを確認した。

(3) 本研究で開発した手法は、粒子の断面積を指標として粒子を楕円体に近似する。そのため、粒子表面の形状変化の影響を受けにくく、いびつな形状の粒子であっても平均的な楕円体として近似することが可能である。また、ボクセル画像をメッシュモデル等の別モデルに変換する必要はなく、粒子の形状によってパラメーターを変える必要がないので、利便性の良い手法であることが分かった。

第5章では、一面せん断過程にある砂供試体の内部構造についてマイクロフォーカスX線CTを使って可視化し、画像解析を行って間隙率、接触面率（代表体積要素に占める粒子間の接触面に相当する画素の割合）を評価した。また、DIC解析を行って、体積ひずみとせん断ひずみを評価した。さらに、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析を適用し、全ての砂粒子の方向を評価した。最後に、各評価結果を相互に比較し、粒子構造の変化がひずみに及ぼす影響を明らかにした。

(1) 間隙率、接触面率、体積ひずみ、せん断ひずみは、せん断面に近い範囲で顕著に変化し、その範囲は使用した砂の中央粒径の7倍程度であることが分かった。

(2) せん断の進行に伴い、間隙率は単調増加する。接触面率は、せん断が始まった直後に急激に減少し、粒子間の噛み合わせが外れた状態になるが、せん断が進行すると変化がほとんど無くなり、局所的な粒子間の噛み合わせや消失が均衡することが分かった。

(3) せん断応力がピークを越えるまでは、体積膨張が優勢である。しかし、この時点では粒子方向に大きな変化が無かったことから、体積膨張を引き起こすような回転を生じる粒子はごくわずかであったと考えられる。更にせん断が進行しひずみ軟化に移行すると、せん断帯内部で体積膨張と体積収縮の釣り合いが取れ、体積変化が生じなくなり、せん断ひずみが単調増加する。粒子の方向は、ひずみ軟化に移行した頃より変化が急になるが、

変化が生じた範囲は、間隙率等が変化した範囲よりも狭い範囲であった。

第6章では、X線CT用のリングせん断実験装置を開発した。残留強度が必要となる土木構造物の安全評価や、地すべりもしくは断層のような自然環境におけるせん断の評価を行う場合、大変形を想定した実験を行うことが必要である。しかし、多くの実験装置は室内で与えることができるせん断変位量に限界がある。そこで、円周方向に回転することで長いせん断変位を与えることができるリングせん断実験に着目し、マイクロフォーカスX線CTを使って内部を可視化可能なリングせん断実験装置を開発した。

(1) 実験装置は、試料の乱れや位置ずれを最小限に抑えるべく、X線CTのターンテーブル上で全ての実験を行うことができるよう、コンパクトな設計とした。本研究で製作したリングせん断容器は、外径が40mm、内径が20mmと一般的な容器径よりも小さくすることで、珪砂5号程度の砂であればマイクロフォーカスX線CTを使って砂粒子の形状を識別できることが確認された。

(2) リングせん断実験は、せん断が進行すると、上下リング間の隙間から試料が漏出する可能性があった。そこで、摩擦の少ないテフロンリングを挟みこめるようリングせん断容器の改良を行うことで、装置を大型化することなく、正確なせん断応力を計測しながら砂漏出を抑制できることを確認した。また、容器の外形状を工夫することで、偽像の影響が少ない鮮明なCT画像を取得できることを確認した。

第7章では、第6章で開発したX線CT用リングせん断実験装置を使って実験を行い、大変形を与えた場合におけるせん断帯の微視構造の変化について、画像解析を行うことで定量的に評価した。

(1) せん断変形が始まると、せん断面付近における間隙率が局所的に高くなり、せん断応力がピークを越える辺りで、急激に間隙率が増加し、間隙率のバラつきが大きくなる。残留状態に移行するに従って、高間隙率を示す範囲がせん断の方向に連続するようになるが、間隙率の平均値は高止まりし、間隙率のバラつきも変化がほとんど無くなる。

(2) せん断変形が始まると、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みによって粒子の方向に変化が生じる。水平面においては、まずせん断の方向に直交するような長軸成分がわずかに増加するが、せん断応力がピークを迎える前に傾向が変わり、せん断の方向を向く長軸成分が増加に転じる。鉛直面においては、せん断の進行に伴って水平方向を向く長軸成分が増加する。残留状態に移行するに従って、せん断面付近において局所的な粒子の擾乱が起こる頻度は少なくなり、粒子の配向性が高まっていく。また、せん断に伴う粒子の方向変化は、水平面においては長軸が、鉛直面においては長軸と短軸が影響を受けやすいことが明らかになった。

(3) 粒度はほとんど同じであるが、形状が異なる砂（球形度の中央値が0.72）とガラスビーズ（球形度の中央値が0.94）を用いて実験を行った。その結果、ガラスビーズの方が、せん断応力のピーク値が小さく、せん断応力が早くピークに到達した。また、せん断帯では間隙率が増加する傾向にあることが確認されたが、ガラスビーズよりも砂の方が顕著に変化し、バラつきが大きくなる傾向にあることが分かった。以上の結果より、粒子の形状がせん断帯の微視構造に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。

(4) 異なる粒径が混合した供試体で実験を行った結果、せん断応力の経時変化や間隙率の変化は、単一粒径の供試体と概ね同じであった。但し、大径粒子周辺の間隙率に局所性が確認され、大径粒子の球近似半径の 2 倍程度まで影響が及んでいる可能性が確認された。また、大径粒子のみを抽出して粒子長軸の方向を整理した結果、単一粒径の供試体と似たような変化が生じることが確認された。この結果は、地すべりのすべり面や断層ガウジ (断層運動によって岩石が破碎されて粘土のように細かくなった領域) の評価において、母岩が破碎し細粒な粘土に混入した、マイクロフォーカス X 線 CT で識別可能な数 mm 程度の岩片粒子をキーマーカーとし、せん断の評価を行う可能性を見出すものであると考えられる。

第 8 章では、各章で得られた成果をまとめて本論文の結論を述べ、今後の展望を示した。