

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

サンドコンパクションパイル工法による締固め改良地盤の微視構造に関する研究

熊本大学大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻 広域環境保全工学講座

( 主任指導 大谷 順 教授 )

論文提出者 江副 哲

主論文要旨

我が国における代表的な軟弱地盤対策工法であるサンドコンパクションパイル（以下、SCP）工法の改良効果については、過去の地震による実証事例等でもその有効性が数多く確認されている。SCP 工法は、よく締まった砂杭を地中に造成することにより軟弱地盤を改良する工法であり、一般に砂質土に適用する場合には、砂杭の圧入により周辺地盤の密度を増加させて液状化に対する抵抗性を高める。現状では、この密度増加を改良効果として捉え、この効果のみが評価され設計に取り入れられている。しかしながら、1995 年兵庫県南部地震では、神戸沖の人工島での SCP 工法を含む締固め改良地盤において、設計で考慮していた震度よりも大きな震度であったにもかかわらず、優位な沈下が生じていないことが報告され、その後の研究により、液状化強度の増加には、密度増加だけでなく、圧入による側方拘束を高める効果や施工時の圧縮空気による不飽和化などの効果も含まれていることがわかってきた。最近では、砂杭を造成する施工の貫入と造成時に受ける繰返し載荷履歴により周辺地盤の微視構造が強化されることが室内実験で確認されている。しかしながら、このような研究においても直接的に SCP 施工による微視構造の変化を捉えているわけではなく、砂杭間の土要素が受ける応力経路を模擬することにより再現した荷重を付加したものである。

本研究では、このようないくつかの SCP 工法の改良効果のうち、定量的な評価がなされていない微視構造について取り上げる。まず、SCP 工法による砂杭造成機構を模擬し、砂質土の締固めに伴った砂杭周辺地盤の挙動をミクロスケールで観察するため X 線 CT 専用の模型実験装置の開発を行った。次に、砂杭周辺の改良地盤の微視的構造について、土粒子の接触点数と変形挙動の変化に着目して、X 線 CT と画像解析技術を用いることで可視化かつ改良効果の定量化を行った。最後に、実施工における SCP 改良地盤の微視構造の評価への展開と今後の課題について考察した。

第 1 章では、研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、研究対象である SCP 工法の改良原理と設計、施工、材料の変遷について述

べるとともに、砂質土の締固めとしての SCP 工法の現状と設計方法について整理した。さらに、SCP 工法による改良地盤の評価にあたっての留意点と改良効果に関する既往の研究について概観した。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) SCP 工法は砂質土を対象とした場合の液状化対策として国内では最も実績が多く、その改良効果も認められており、時代のニーズに対応して進化してきたが、さらなる高度化や海外においても幅広い活用が期待される。
- ii) 地盤工学的課題が粘性土の安定や沈下から砂質土の液状化へ移行していることに対応して、SCP 工法における研究対象も砂質土に関するものが主流となってきているが、改良地盤の微視構造については定量化されていない。
- iii) SCP 工法の締固めによる改良効果は、地盤の状態変化として捉えると、密度増加、水平応力の増加、不飽和化、微視構造の強化が挙げられる。微視構造の強化以外は地盤調査や試験により確認できるが、微視構造の強化は現地で直接的に確認することは困難であるため、X 線 CT を用いた定量的な評価が期待される。

第 3 章では、本研究の中心的な役割を果たす X 線 CT の基本および画像解析手法について述べるとともに、X 線 CT を用いた砂質土の締固めに関する既往の研究について概観した。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) X 線 CT では三次元の画像データが得られ、 $\mu$  フォーカス X 線 CT スキャナ(以下、 $\mu$ XCT)を用いた空間分解能の高い拡大撮影を行うことで、地盤材料の微視的な形状や移動状況も観察できる。
- ii) X 線 CT により得られた CT データから砂質土の微視構造についての定量化を行うための 2 種類の画像解析手法について取りまとめた。
- iii) 砂質土の締固めに関して X 線 CT を適用した事例では、砂粒子の配列や間隙構造、荷重下における変位やひずみ等の可視化に関する研究が行われており、これらの実験手法や研究成果を整理することで本研究に反映させた。

第 4 章では、本研究に用いるために開発した  $\mu$ XCT 専用の模型実験装置と実験手順および SCP 工法を模擬した砂杭の造成方法について詳細に述べるとともに、CT 撮影による実験装置の検証を行った。検証実験結果から本装置および手法により、連続的な砂杭の造成状況が可視化でき、SCP 工法を模擬することが可能であることを確認した。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) SCP 工法を模擬した砂杭造成と砂杭造成過程の CT 撮影を  $\mu$ XCT 室内で実現可能とする模型実験装置を開発した。
- ii) 模型実験では、ケーシングパイプ貫入時に地盤を押し力(以下、押し力)を荷重計にて測定し、ケーシングパイプの貫入から引抜きによる砂の排出、打戻しによる拡張までの一連の砂杭造成サイクルについて、実施工における SCP 工法施工サイクルのモードと概ね一致することを検証した。
- iii) 打戻しによる砂杭造成(拡張)時の押し力ピーク値が、造成前の同深度における初期貫入時の押し力より増加し、造成サイクルが増えるにつれてその値が増加することがわか

った。これは、砂杭造成に伴った周辺地盤の締固め効果と、先行造成された砂杭のさらなる密実化によるものと想定できる。

- iv) CT 画像からケーシングパイプ先端周辺に投入した砂による拡張された砂杭が連続的に造成されていることを確認した。

第 5 章では、砂質土の密な状態における基本的な微視構造を捉える実験として、熊本砂を実験材料として異なる締固め方法で作製した供試体を対象に  $\mu$ XCT 撮影を行い、画像解析により相対密度と土粒子同士の接触の観点で定量的な評価を試みた。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) 第 3 章で示した三次元空間解析ソフトを用いることで、撮影した CT 画像から熊本砂における相対密度と土粒子同士の接触点数を算出できた。
- ii) 同じ相対密度  $D_r=85\%$  を目標に、空中落下法（以下、空中法）と打撃による締固め法（以下、打撃法）の 2 ケースにより作製した供試体の接触点数は、空中法よりも打撃法の方が多いたことが分かった。
- iii) 砂質土は、同じ相対密度であっても締固め方法が異なると接触点数に差が生じ、その微視構造には違いがあることが示されたことで、砂質土の微視構造に関して、この接触点数を指標とした定量化が可能であることを提案した。

第 6 章では、第 4 章で開発した模型実験装置や実験手法、第 5 章で提案した接触点数による評価等を応用することで、SCP 工法による砂杭周辺地盤の微視構造に関して、接触点数の変化と変形現象の可視化による定量的な評価を試みた。さらに、貫入・造成（引抜き・打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルが特徴の一つである SCP 工法に対して、貫入のみの施工である締固め杭工法との比較も行った。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) 砂杭造成に伴って砂杭周辺地盤の相対密度は増加し、接触点数も増加することがわかった。
- ii) 第 3 章で示したデジタル画像相関法を用いることで、体積ひずみと最大せん断ひずみの増分を算出し、砂杭造成に伴った砂杭周辺地盤の変形現象を詳細に可視化できた。
- iii) 砂杭造成に伴って発生するせん断ひずみは拡張された砂杭周辺に集中しており、先行して造成された砂杭周囲の体積ひずみが圧縮傾向にあることがわかった。
- iv) 1 本の SCP 工法と締固め杭工法により締固め改良された周辺地盤の接触点数は、締固め杭工法より SCP 工法の方が多いたことが分かった。

第 7 章では、これまで得られた成果を基に、実施工における SCP 改良地盤の微視構造の評価への展開を試みた。より実施工を想定するため模型地盤内に 4 本の砂杭造成した杭間地盤を対象に、産業用 X 線 CT スキャナ（以下、IXCT）による撮影を行い、体積ひずみと相対密度の関係について CT 撮影から得られた模型実験データと SCP 施工現場で計測された実測データの比較を行った。さらに、SCP 改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性について考察し、SCP 工法の施工法、設計法のさらなる高度化を目指した SCP

改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及した。以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) 砂杭を複数打設した模型実験における杭間地盤でも、実施工の SCP 工法と同様に密度増加効果を IXCT により確認した。
- ii) 密な状態における熊本硅砂の繰返し三軸試験結果から、同じ相対密度であっても、空中法より打撃法で作製した供試体の方が液状化強度は高いことが分かった。第 5 章の結果を踏まえると、同じ相対密度の状態であっても接触点数が多いほど高い液状化強度を有していると考察できる。
- iii) 6 章の結果から SCP 改良地盤と原地盤では、同じ相対密度であっても接触点数は SCP 工法の方が多いことから、繰返しせん断履歴を与えるサイクル数が多い SCP 工法による改良地盤の液状化強度は、同じ相対密度の繰返しせん断履歴のない原地盤が有する液状化強度より大きいと推察される。
- iv) 実務設計における SCP 改良地盤の評価について、X 線 CT を用いた接触点数を指標とすることで、改良地盤の微視構造強化としての割増係数として定量化できる可能性を示した。

第 8 章では、各章において得られた成果を総括した。

以上