

平成 30 年 10 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06222

研究課題名(和文) 内部構造診断と数値破壊解析による改良土の原位置強度ばらつき評価と性能設計への反映

研究課題名(英文) Evaluation of in-situ strength variation of stabilized soil by evaluation of internal structure and numerical fracture analysis

研究代表者

高野 大樹 (Takano, Daiki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官

研究者番号：80626218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、改良地盤の内部構造を考慮した数値破壊実験による、地盤強度の性能評価を目的とする。具体的には、原位置で行われる地盤改良工法を遠心模型実験等を用いた室内模型実験や要素実験で再現し、内部構造の変化を定量的に評価した。内部構造の可視化には、X線CTおよび新たに提案した透明土を使用した可視化手法を用いた。次に、室内実験で得られた内部構造の変化を数値破壊解析により再現することを試みた。数値破壊実験により種々の条件にて改良された軟弱地盤の性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to evaluate the performance of the strength of improved soft soil by numerical failure experiment considering the internal structure of improved ground. Firstly, we reproduced the soil improvement procedure performed for practice by model experiments and element experiments using centrifugal model test and quantitatively evaluated the change of internal structure. For the visualization of the internal structure, X-ray CT and a visualization method using newly proposed transparent soil were used. Secondly, we attempted to reproduce the change of internal structure obtained by model scale experiment by numerical fracture analysis. Performance evaluation of improved soft ground by numerical failure experiment under various conditions was carried out.

研究分野：地盤工学

キーワード：可視化 数値破壊実験 内部構造 X線CT

1. 研究開始当初の背景

臨海地帯に産業が集中する我が国において、護岸などの港湾構造物の研究は、社会基盤整備政策の中でも中心的な位置に存在してきた。これらの構造物は、臨海地域に特有の軟弱粘土や、砂がゆるく堆積する環境に建設されるため、高度な地盤改良技術が必要とされる。近年、世界的に設計哲学は仕様設計から性能設計に移行しつつある。これは構造物・地盤系が、外力によりどのようなメカニズムでどれだけ被害を受けるかを正確に予測し、正確に設計・施工するという、さらに高度な技術水準の必要性を意味している。本研究は、改良土の内部構造の不均質性を考慮した仮想的な実験、つまり、数値破壊実験を基に改良土の強度のばらつき評価を行い、性能設計の精度の向上に資することを目的とする。

2. 研究の目的

セメント等の安定材により固化改良を受けた土や、密実化処理を施された土は一般に強度を増し、構造物の安定性は改善される。一方で、強度が一度ピークまで発揮されるとその後の強度は劇的に減少する、脆性を有するのも改良土の特徴である。脆性的な地盤の破壊現象のメカニズムは、進行性、すなわち破壊が局所的に生じ、それが発達して最終的な破壊メカニズムを有するものである。この過程は極めて複雑であり、古典的な解析手法では考慮することは困難である。また、改良土は固化材の混合の不均一性および対象地盤の不均質性に起因して実質的な強度のばらつきを有する地盤である。原位置における強度のばらつきを評価する場合、多くの室内試験を行いその結果を統計処理することが一般的であるが、コストと手間が大きいこと、物理的にサンプルが得られない場合があるなど、課題も多いのが現状である。

3. 研究の方法

本研究では、既設構造物近傍の液状化対策に用いられる静的圧入締固め工法 (CPG) や、軟弱地盤にセメントなどの安定材を混合することで強度を増加させる改良土に着目し、その改良効果を室内模型実験および要素試験で可視化し、定量評価することを試みた。次に粒状離散化有限要素法を用いて、改良土の破壊シミュレーション手法の開発を行い、実験結果との比較を行った。

4. 研究成果

4.1 地盤改良効果の定量可視化実験

静的圧入締固め工法 (CPG) の液状化対策効果は広く知られているが、そのメカニズムは十分に解明されていない。本研究では、透明土を用いた模型実験の有効性に着目し1)、遠心模型実験を実施した。本文はグラウト注入過程における地盤挙動に関する検討結果を

報告する。

実験の概要

模型実験の概要を図4.1に示す。幅700mm、高さ400mm、奥行き100mmの平面土槽内に、透明土を用いて模型地盤を構築した。実験には二種類の溶解石英ガラス粒子を用いた。図4.2に示すとおり模型地盤は三層構成とし、中央の液状化層は石英A ($\rho_s=2.214\text{g/cm}^3$, $D_{50}=1.0\text{mm}$, $e_{\text{max}}=1.018$, $e_{\text{min}}=0.707$, 屈折率1.4585)を用いて相対密度50%, それを挟む上下の非液状化層は石英Aより粒径が大きい石英B ($\rho_s=2.214\text{g/cm}^3$, $D_{50}=2.5\text{mm}$, $e_{\text{max}}=1.022$, $e_{\text{min}}=0.734$, 屈折率1.4585)を用いて相対密度100%になるように空中落下法で構築した。地盤内の粒子の動きを可視化するために石英Bを着色しトレーサー粒子として用いた。一連の実験では30Gの重力場で屈折率を整合させたスクロース水溶液を土槽下部からゆっくり浸透させた後、グラウトを打設し、正弦波で加振した。図2は地盤を飽和させ透明化した後の状態である。模型地盤中央断面に配置したトレーサーを確認できる。グラウト杭の打設は、注入ポンプ、水-グラウト置換装置、引抜き装置から構成される静的圧入締固め装置2)を用いて2本同時に行った。実験ケースとして、グラウト杭の間隔Wが60mmおよび100mmの2ケースを実施した。

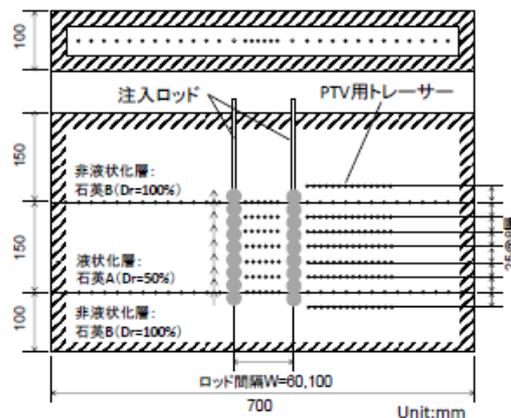


図4.1 実験断面の概略図

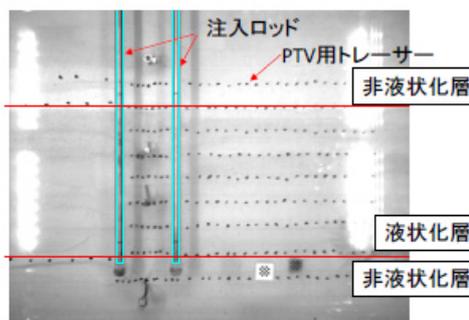


図4.2 透明化状況 (実験ケース: W60)

実験結果と考察

グラウト杭の間隔の異なる2ケースについて、取得した画像から打設過程におけるトレーサー粒子の動きをPTV画像解析により求めた。両ケースの打設前後の変位ベクトルを図4.3, 図4.4に示す。なお、変位量を10倍にして表示している。液状化層の浅層部では鉛直上向きの変位が卓越し、深層部では水平方向の変位が卓越している。

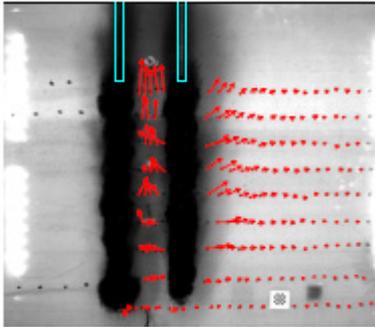


図4.3 打設前後の変位ベクトル (杭間隔 W=60mm)

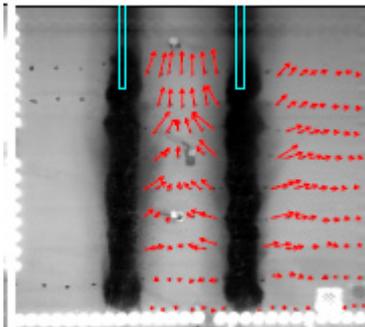


図4.4 打設前後の変位ベクトル (杭間隔 W=100mm)

各注入段階における改良体の中心位置と同じ深さにおける周辺地盤の水平・鉛直変位と注入ロッドの中心軸からの距離で整理した結果を図4.6~4.9に示す。座標軸の取り方は図4.5を示すとおりで、地盤変位

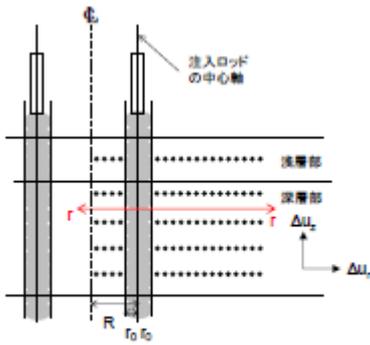


図4.5 説明図
r: ロッドの中心軸から各トレーサーまでの距離
 r_g : グラウト杭の半径
R: $1/2 \times$ グラウト杭間隔W

図4.5 説明図

はトレーサー粒子の可視化結果より内挿して求めた。水平方向の地盤変位は、深層部と浅層部の違いよりも、Wの影響が大きくなる。W=60mmのときはグラウト杭の外側の変位が卓越し、W=100mmのときは--外側と内側の違いは小さくなる。鉛直方向の地盤の変位は、深層部と浅層部の影響が無視できなくなる。W=100mmの浅層部で上向き変位が大きくなり、逆にW=60mmの深層部で小さくなる。これらのことはグラウト打設による地盤状態の変化が拘束圧の大きさとグラウト杭の打設間隔に大きく影響することを示している。

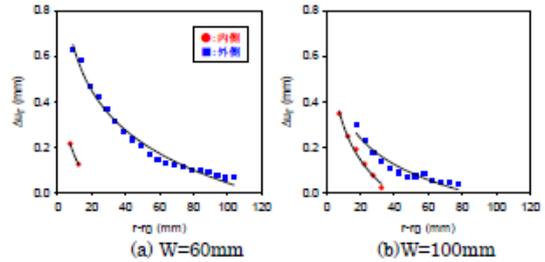


図4.6 深層部における変位増分の平均値

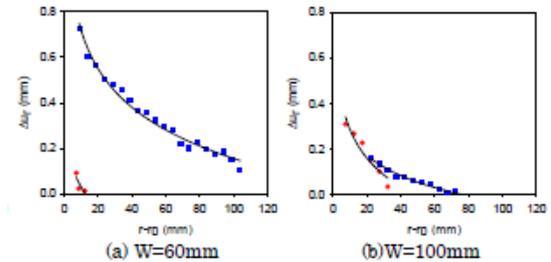


図4.7 浅層部における変位増分の平均値

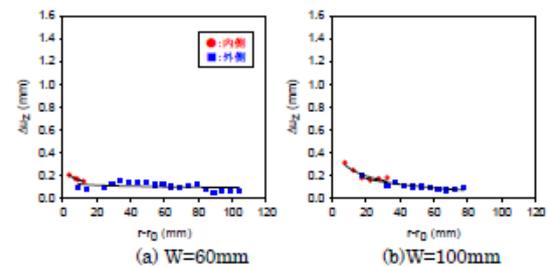


図4.8 深層部における変位増分の平均値

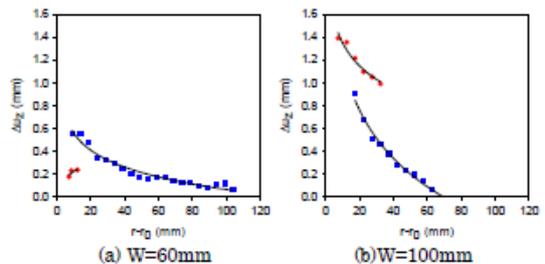


図4.9 線部における変位増分の平均値

まとめ

透明土を用いて、静的圧入締固め工法の圧入過程を可視化し、グラウト杭の影響範囲について検討した。要求性能と改良領域の拘束圧の大きさに応じて、 W を合理的に決定する必要性が明らかになった。

4.2 粒子分散化有限要素法を用いた改良土および地盤の変形・破壊解析

現場条件に応じて適切な固化材や改良範囲を設定するための設計の合理化が求められている。本研究では、応用力学分野で確立された粒子分散化有限要素法(PDS-FEM)を用いて改良土のモデル化と改良地盤の解析法について検討した。

数値解析の概要

PDS-FEM では、図4.10に示すように、変位場を不連続かつ重なり合わない形状関数を用いて分散化する。さらに、応力場・ひずみ場をボロノイ分割に双対なドロネイ分割領域で分散化する。このPDS-FEMでは、破壊現象を表現するために、ボロノイブロック境界に対して計算された要素間の相対変位や境界応力を用いて破壊規準を定義する。そして、ボロノイブロック境界で算定されるトラクションの絶対値が一定のしきい値を超えた場合に破壊と判定する。

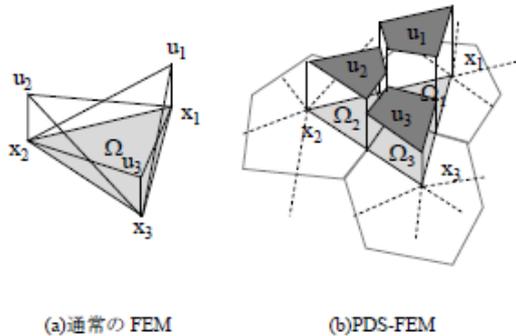


図 4.10 従来のFEMとPDS-FEMの違い

改良土のモデル化

改良土は一般的な土とは異なり、脆性的または延性的な変形挙動を示すことが知られている。そこで、PDS-FEMを用いて、セメント改良土および繊維混合セメント改良土の一軸圧縮試験の結果を再現できるか検討した。解析は構成則として弾塑性モデルを用いて、軸対称条件下で実施した。解析パラメータは、ヤング率、ポアソン比、粘着力と内部摩擦角、不連続面の発生を規定するパラメータの5つである。計算で得られた鉛直応力-軸ひずみ関係を既往の研究の実験結果と合わせて図4.11に示す。少ない解析パラメータで、ピーク強度までの線形的な挙動だけでなく、それ以降の脆性的および延性的な変形

挙動まで再現可能であることがわかった。

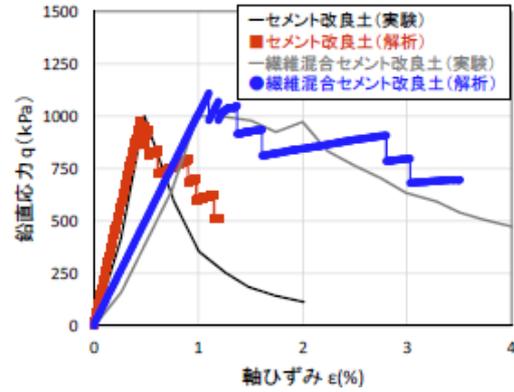


図 4.11 鉛直応力-軸ひずみ関係

浅層および深層改良を想定した模型実験の再現解析

セメント改良地盤および繊維混合セメント改良地盤の支持力模型実験の再現解析を平面ひずみ条件下で実施した。解析モデルと境界条件を図4.12、図4.13に示す。

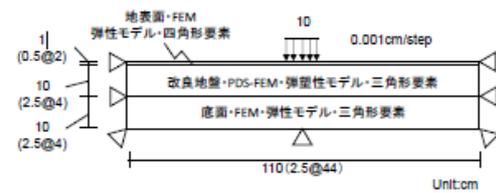


図 4.12 浅層改良地盤の解析モデル

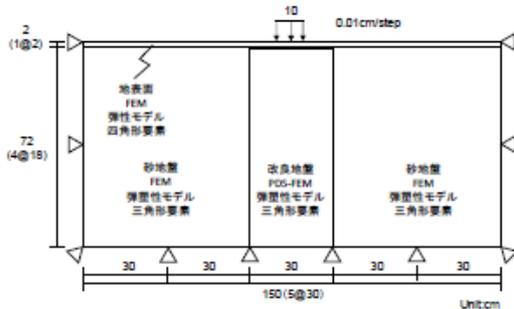


図 4.13 深層改良地盤の解析モデル

計算で得られた鉛直応力と沈下量の関係を実験結果と合わせて図4.14、図4.15にそれぞれ示す。解析パラメータを適切に設定することで改良地盤の支持力特性を再現できることが確認された。

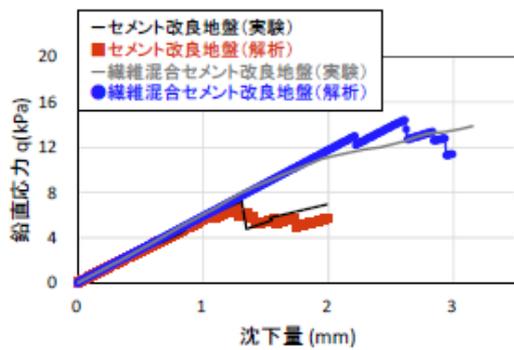


図 4.14 浅層改良地盤の支持力試験の再現解析

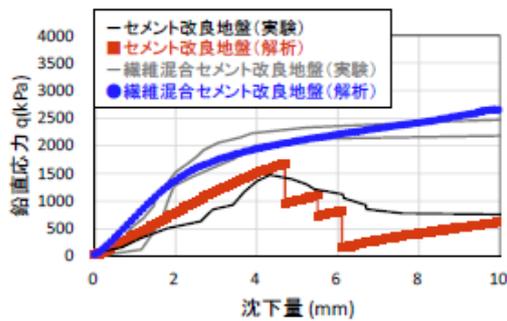


図 4.15 深層改良地盤の支持力試験の再現解析

まとめ

粒子分散化有限要素法の枠組みで、改良土のモデル化と改良地盤の解析法について検討した。弾性状態から弾塑性状態に移行して、不連続面が発生するモデルを用いることで、改良土の脆性的・延性的な力学挙動や浅層・深層改良地盤の支持力特性を再現できることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 件)

Takano, D., Miyata, Y., EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FAILURE OF CEMENT TREATED SOIL USING X-RAY TOMOGRAPHY, Proceedings of 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures, CD-ROM, 2017.

・D. Takano, Y. Miyata, H. Nonoyama, R. J Bathurst, Physical modeling of compaction grouting injection using a transparent soil, Proceedings of Physical modelling in Geotechnics, 2018 (印刷中) 主筆

・D. Takano, Y. Miyata, H. Nonoyama, R. J Bathurst, Particle based visualization of ground behavior caused by grout injection by means of a transparent soil,

Geomechanics from micro to macro, 2018 (印刷中)

[学会発表] (計 件)

・野々山, 宮田, 高野, 透明土を用いた逆 T 型基礎の引揚抵抗メカニズムの可視化解析, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.

・高野, 森川, 野々山, 宮田, 山本, 透明土を用いた CPG 打設過程可視化と動的加振実験への適用, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.

・高野, 高橋, 森川, 竹花, 透明土を用いた薬液浸透過程の可視化と評価に関する研究, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.

・高野, 森川, 宮田, 野々山, 山本, グラウト注入および加振時における地盤内変位の空間分布解析, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017.

・野々山, 宮田, 高野, 粒子分散化有限要素法を用いた改良土および地盤の変形・破壊解析, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017.

・高野, 宮田, 野々山, 粒状分散化有限要素法を用いた砂の三軸圧縮シミュレーション, 第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 337-338, 2016,

・山本, 宮田, 野々山, 高野, 森川: 屈折率整合・X 線 CT の併用による粒状体の変形挙動の可視化実験, 第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 339-340, 2016

・高野, 小林, 宮田, 森川, 粒状体の屈折率マッチング可視化技術を用いた薬液注入過程の再現実験, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1703-1704, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 大樹 (Daiki Takano)

所属：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

部局：港湾空港技術研究所

職名：主任研究官

研究者番号：80626218

(2) 研究分担者

宮田 喜壽 (Yoshihisa Miyata)

所属：防衛大学校

部局：システム工学群

職名：教授

研究者番号：20532790