

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420485

研究課題名(和文) 超微粒子球状シリカ系改良材の液状対策への実用化のための基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental research of practical use of Super Fine Silica Powder Slurry Materials for countermeasure against liquefaction

研究代表者

山口 晶 (YAMAGUCHI, Akira)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：30337191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超微粒子球状シリカ系改良材を浸透注入により液状化対策に用いた際の改良地盤の一軸圧縮強さや改良体の半径の推定手法を提案した。まず、一次元浸透実験を実施し、改良材の濃度、供試体の土粒子の粒径、試料の密度、一軸圧縮強さの関係を調べた。次に一次元浸透をモデル化した移流分散方程式を立式し、有効成分が土粒子に吸着された量を計算し、改良材の濃度、試料の密度や粒径、一軸圧縮強さとの相関を調べた。これらの結果を総合し、改良体の半径と一軸圧縮強さを推定する方法を提案した。提案した手法により推定した一軸圧縮強さと改良体半径について、模型実験、原位置試験の結果と比較したところ、概ね一致した結果となった。

研究成果の概要(英文)：The method of estimating the unconfined compression strength of solid ground improved with permeation grouting was discussed in which the adsorption phenomena of powder material among grain particles was considered. A set of one dimensional permeation tests and unconfined compression tests on the hundreds specimens were conducted. The density of powder component of improved material in the ground was evaluated by solving the advection equation. The unconfined compression strength was found to be proportional to the density of powder component contained in the soil. The estimation procedure of the unconfined compression strength was proposed based on the test result. The model test using the drums and in-situ test of the grouting were conducted. The estimated unconfined compression strengths were compared with the results of these tests, and the estimation method was found to be promising.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤改良 浸透注入 一軸圧縮強さ 超微粒子球状シリカ系改良材 極超微粒子性セメント改良材

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、千葉県浦安市などで、細粒分を含む地盤が液状化したことが知られている。従来使われていた恒久的な地盤改良材のセメント系改良材では、このような細粒分を含む地盤の浸透注入による改良は難しい。そこで、細粒分を含む地盤の液状化に対する浸透注入による地盤改良材として、超微粒子球状シリカ系改良材に着目した。

超微粒子球状シリカ系改良材とは、図-1に示すように、粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の球形の二酸化ケイ素（シリカ、 SiO_2 ）を主剤とし、水酸化カルシウムを硬化剤とした地盤改良材である。その特徴は、改良材の粒径が極めて小さいことと、精製した球状シリカを用いていることであり、その結果としてこれまでより小さい粒径の土に浸透することができる。また、精製したシリカと水酸化カルシウムを使用しているため、土と混合してもセメント系改良材で懸念されるような重金属の流出がみられないことがあげられる。

しかし、コスト削減と実用化を考慮すると、改良材の濃度や土質が改良土の強度に与える影響を検討し、合理的な配合等を明らかにする必要がある。

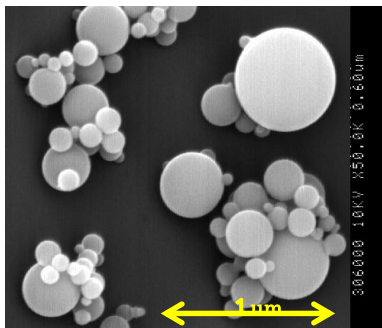


図-1 超微粒子球状シリカ系改良材の SiO_2 の電子顕微鏡写真

2. 研究の目的

本研究の目的は、超微粒子球状シリカ系改良材の浸透注入による地盤改良において、信頼性のある改良効果の推定手法を検討することである。また、この手法に汎用性があり、他の懸濁型改良材にも適用できるかもあわせて検討する。

3. 研究の方法

懸濁型注入材の浸透注入状況を想定し、注入孔からの距離に依存する固形成分密度を移流分散解析で算出し、その固形成分密度から一軸圧縮強さ q_u を推定できるとの仮説を立てた。次に室内1次元浸透実験、ドラム缶を利用した土槽注入実験、現場注入実験を行い、仮説の妥当性を検証した。固形成分密度分布の算出には、注入材中の固結を促す有効成分が土粒子に吸着される現象に特に着目した。

具体的な流れは次のようになる。

まず、超微粒子球状シリカ系改良材による一次元浸透実験を実施し、改良材の濃度、供試体の土粒子の粒径、試料の密度、一軸圧縮強さの関係を調べた。図-2に用いた一次元浸透実験装置を示す。次に一次元浸透をモデル化した移流分散方程式を立式し、有効成分が土粒子に吸着された量を計算し、改良材の濃度、試料の密度や粒径、一軸圧縮強さとの相関を調べた。これらの結果を総合し、改良体の半径と一軸圧縮強さを推定する方法を提案した。提案した手法により推定した一軸圧縮強さと改良体半径について、模型実験、原位置試験の結果と比較した。また、提案した手法について、極超微粒子セメントにも当てはめて、手法の適用性を検討した。

4. 研究成果

(1) 超微粒子球状シリカ系改良材

懸濁型改良材では、土に含まれる懸濁物質（改良材の有効成分）の質量が一軸圧縮強さを決定すると考え、単位体積当たりの土試料に含まれる改良材の懸濁有効成分を固形成分密度と定義した。そして、固形成分密度と一軸圧縮強さの関係を明らかにした。なお、固形成分密度は実験結果と移流方程式により遅延係数を同定することにより求めた。

図-3に固形成分密度と一軸圧縮強さの関係を示す。図のように直線で近似できる関係となった。直線で近似した近似式の傾きを、平均粒径に対してプロットしたものを図-4に示す。固形成分密度と一軸圧縮強さは比例関係となり、比例の程度は平均粒径や相対密度の影響を受けることがわかった。

次に、固形成分密度の物理的根拠を調べるために、蛍光X線分析で求めた一軸圧縮供試



図-2 一次元浸透実験システム

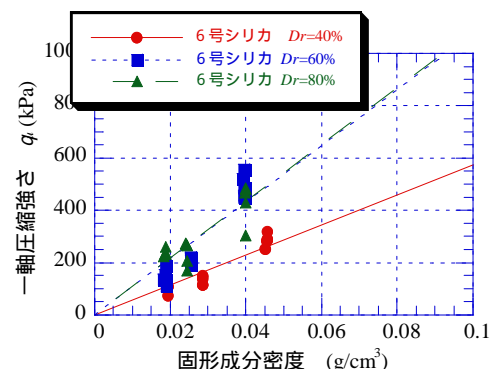


図-3 固形成分密度と一軸圧縮強さの関係

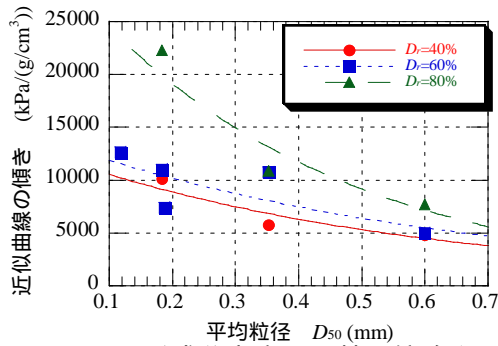


図-4 固形成分密度と一軸圧縮強さの関係の近似曲線の傾きと平均粒径

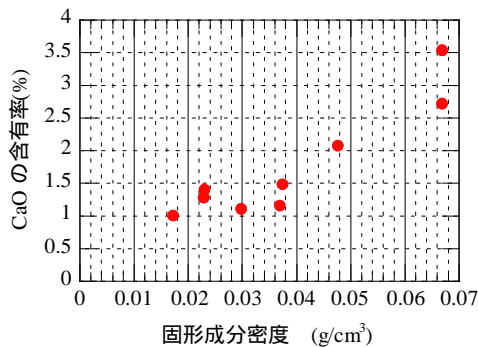


図-5 蛍光X線分析で求めた改良供試体のCaOの含有率と固形成分密度

体に含まれる酸化カルシウム(CaO)の質量含有率と固形成分密度の関係を調べたものを図-5に示す。図に示されているように固形成分密度とCaOの含有率は比例関係となった。超微粒子球状シリカ改良材の固形成分密度はほぼCaOを考えているといつてよいと思われる。

以上の結果から、次のような推定手順を提案する。

一次元浸透実験を実施し、改良材の濃度、排出液濃度と時間の関係、試料の平均粒径および相対密度と一軸圧縮強さの関係を明らかにする。

一次元浸透をモデル化した移流方程式と実験結果から、遅延係数を同定する。求めた遅延係数を移流方程式に当てはめ、浸透終了時の固形成分密度の分布を調べる。

固形成分密度と一軸圧縮強さの関係を求める。

現場施工をモデル化した球対称の移流方程式を解き、固形成分密度の分布を求める。求めた固形成分密度と、求めた関係を用いて、一軸圧縮強さと改良体の半径を推定する。

次に、ドラム缶を用いたモデル実験、試験施工に対して、上記の推定手法を用いて一軸圧縮強さを推定し、実験結果と比較した。

図-6にドラム缶を用いたモデル実験における一軸圧縮強さの推定値と実験値の関係を示す。この図をみると、実験値と推定値は、0.5-2.5倍の範囲に収まった。

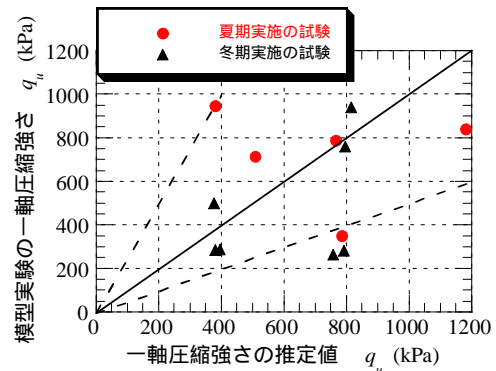


図-6 モデル実験における推定値と実験値の一軸圧縮強さの比較

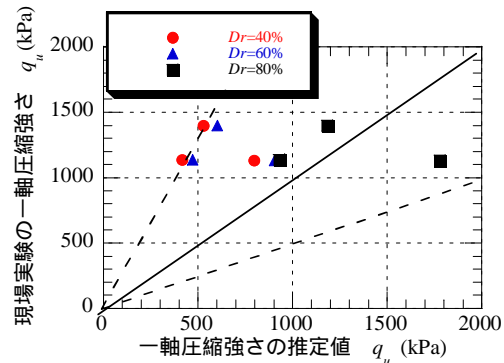


図-7 現場施工実験における推定値と実験値の比較

図-7に現場施工実験における一軸圧縮強さの推定値と実験値の関係を示す。この図も同様に、実験値と推定値は、0.5-2.5倍の範囲に収まった。

以上の実験結果から、提案した手法による推定値と実験値の差はある程度のばらつきの範囲に収まる結果となった。この手法の精度をさらに高めることは意義のあることと思われる。

(2) 極超微粒子セメント改良材

ここで提案した浸透注入における一軸圧縮強さの推定手法は、超微粒子球状シリカ系改良材に限定するような考え方を含まないため、他の懸濁型改良材の浸透注入においてもあてはめることができる可能性がある。そこで、次に極超微粒子セメントについても同様の実験を行い、一軸圧縮強さの推定を試みた。推定手法は、(1)で述べた方法をそのまま用いた。ただし、極超微粒子セメント改良材を用いた一次元浸透実験を別に行い、この実験に基づいたパラメータの設定を行っている。

まず、極超微粒子セメントの浸透注入において、固形成分密度の物理的な意味を考えるために、計算で求めた固形成分密度と、一軸圧縮供試体の蛍光X線分析から求めたCaOとAl₂O₃の質量密度を比較した。図-8に固形成分密度と、CaOとAl₂O₃のそれぞれ単体の密度およびこの二つを足した和の関係を示す。図をみると、CaOとAl₂O₃の密度の和と固形成分密度は図中に示した1対1の直線上

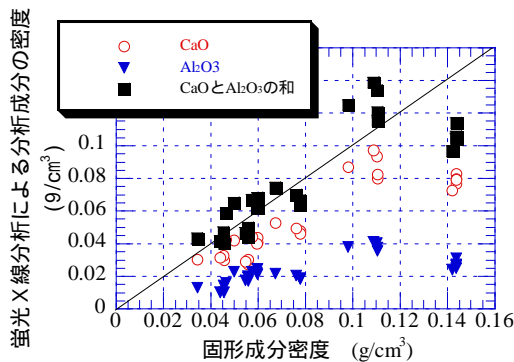


図-8 現場施工実験における推定値と実験値の比較

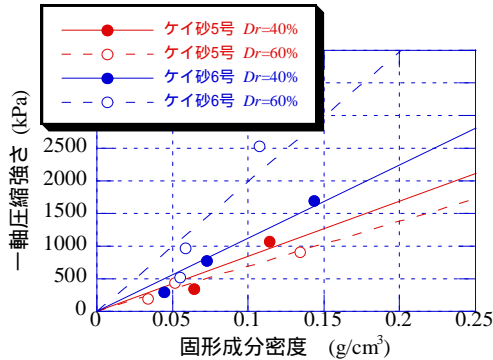


図-9 固形成分密度と一軸圧縮強さの関係

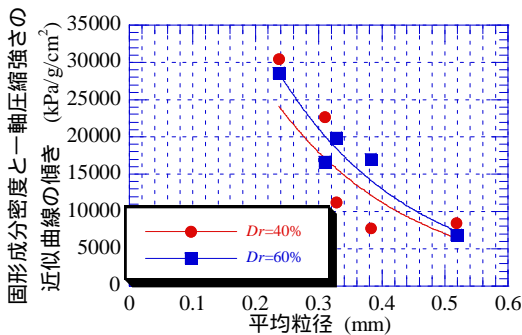


図-10 固形成分密度と一軸圧縮強さの関係の近似曲線の傾きと平均粒径

にプロットされている。極超微粒セメントを用いた時の固形成分密度は、CaO と Al_2O_3 の密度の和に等しいことがわかる。

図-9 に固形成分密度と一軸圧縮強さの関係を示す。図より、固形成分密度と一軸圧縮強さは比例関係にあり、相対密度と粒径の影響を受けることがわかる。

固形成分密度と一軸圧縮強さの直線の近似式を考え、その近似式の傾きを平均粒径に対してプロットしたものを図-10 に示す。図のように、固形成分密度と一軸圧縮強さの近似式の傾きは平均粒径の影響をうけることがわかる。

以上の実験結果を用いて、超微粒粒子球状シリカ系改良材と同様の手順により、極超微粒粒子セメントについても、一次元浸透実験の一軸圧縮強さと推定結果を比較したものが図-11 である。

この図をみると、近似を重ねた推定手法に関わらず、その元となる実験結果を 0.5 から

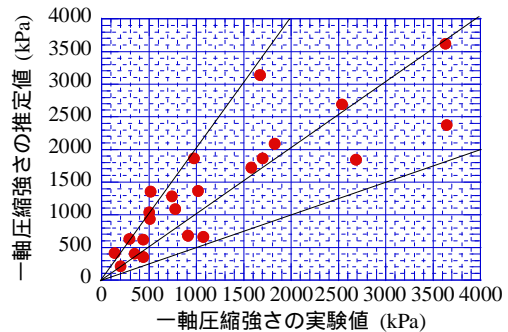


図-11 一軸圧縮強さの推定値と実験値

2.0 倍の範囲で推定できることが分かった。

(3) まとめ

以上の結果より、推定した手法は、超微粒粒子球状シリカ系改良材のみならず、極超微粒粒子セメントにも適用できることが確認できた。この結果より、提案した手法は、他の懸濁型改良材にも適用できる可能性があるといえる。今後は、他の懸濁型改良材についてもあてはまることを確認し、懸濁型改良材に適用できるような設計手法を確立させることを考えていきたい。

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 1 件)

山口晶, 岡田和成, 飛田善雄, 超微粒粒子球形シリカ系改良材の一次元浸透実験と一軸圧縮強さ, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集 査読あり 2016 年 10 月 28 日 pp.207-214, 京都。

〔学会発表〕(計 8 件)

村林豊, 佐藤裕哉, 山口晶, 青由起雄, 岡田和成, 極超微粒粒子セメントで浸透注入された地盤の平均粒径が一軸圧縮強さに与える影響, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2017 年 3 月 4 日, III-7 (CD-ROM), 東北学院大学。

庄子佑太, 松田恭輝, 山口晶, 岡田和成, 宇川岳史, ウルトラファインバブルを含む極超微粒粒子セメント改良材で改良した土の一軸圧縮強さ, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会 2017 年 3 月 4 日, III-7 (CD-ROM), 東北学院大学。

新田駿, 五十嵐幸範, 山口晶, 岡田和成, 金高鉄次, カオリンの混合が水ガラス系改良材の改良強度に与える影響, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会 2017 年 3 月 4 日, III-8 (CD-ROM), 東北学院大学。

小林秀斗, 今江健太, 高坂祐介, 山口晶,

岡田和成，金高鉄次，カオリンを混合した水ガラス系改良材の地盤改良効果と土の粒径の関係，平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会 2016 年 3 月 5 日，III-12 (CD-ROM)東北学院大学．

大内猛幹，成田佳樹，高坂祐介，山口晶，岡田和成，青由紀雄，極超微粒子セメントを浸透注入させた改良体の一軸圧縮強さと試料の粒径の関係，平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会 2016 年 3 月 5 日，III-13 (CD-ROM)，東北学院大学．

高坂祐介，山口晶，岡田和成，飛田善雄，超微粒子球状シリカ系改良材を浸透注入した地盤の一軸圧縮強さの推定，第 50 回地盤工学研究発表会，2015 年 9 月 1 日、pp.593-594, 北海道科学大学．

久光浩基，赤木亮介，齋藤孝一，山口晶，高坂祐介，岡田和成，超微粒子球状シリカ系改良材の地盤による吸着現象を考慮した一軸圧縮強さの推定，平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会，2015 年 3 月 7 日，III-9 (CD-ROM)，東北学院大学．

高坂祐介，飛田善雄，山口晶，岡田和成，移流分散方程式の解析解を用いた改良材の一次元浸透注入時の遅延係数と分散係数の同定，平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会，2015 年 3 月 7 日，III-11 (CD-ROM)，東北学院大学．

6．研究組織

(1)研究代表者

山口 晶 (YAMAGUCHI Akira)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：30337191