

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18114

研究課題名(和文) 地盤環境への長期的影響に配慮した非着底地盤改良技術の開発

研究課題名(英文) Development of floating type ground improvement technique in consideration with long term geoenvironmental aspect

研究代表者

石蔵 良平 (Ishikura, Ryohei)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90510222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、軟弱地盤上に盛土構造物を建設する際に、今後利用拡大が期待される非着底地盤改良技術の確立に向けて、主に以下の点に取り組んだ。1)セメント固化処理による非着底改良体の周面摩擦抵抗が改良地盤の荷重分担特性に及ぼす影響を明らかにした。2)透水性の異なる材料を非着底型改良体に適用し、荷重分担特性および圧密挙動の経時変化の違いを明確にした。3)改良体の剛性や透水性といった材料特性が経時的に変化する地盤材料を用いた非着底改良地盤について、沈下特性や荷重分担特性の把握を試みた。

研究成果の概要(英文)：Floating-type ground improvement using soil cement columns, sand compaction pile, granulated blast furnace slag and so on can be very effective for the treatment of deep soft soil layers. This research project mainly has conducted as below; 1) The interface shear mechanism between soft clay and construction material in the consolidation process has been clarified. 2) Stress distribution and settlement behaviour of floating type improved ground using sand compaction pile and GBFS were investigated. In particular, the influence of changing stiffness and permeability of geo-materials with elapsed time on settlement behaviour were indicated.

研究分野：地盤工学

キーワード：非着底 周面摩擦抵抗 圧密沈下 応力分担機構

### 1. 研究開始当初の背景

我が国及び国外において、地盤改良は軟弱地盤上への構造物建設の観点から、沈下と安定性が重要な課題とされ、これまで数多くの技術が開発されている。近年の土構造物に求められる要求性能は、従来の性能に留まらず、地下水流れなどの地盤環境への配慮や、経済性の追求など、多様化している。今後は、地盤環境に配慮した、長期的ビジョンに立った軟弱地盤改良基礎の開発が重要となる。

このような要求性能の多様化に対応できる併用技術の一つとして、高盛土や高規格道路直下の基礎地盤を対象とした浅層固化処理を併用した非着底型深層混合処理地盤に着目し、沈下特性の把握について研究を進めている。

通常、剛性や強度の大きな改良地盤を支持層まで造成する方法が一般的であるが、本研究では、上部構造物の機能が保たれる範囲内で、はじめから沈下を許容した非着底型改良形式を対象としている。非着底かつ低改良率で地盤改良し、所定の目的を達成することが求められる。非着底改良技術は特に、施工機械の改良深度限界を超えるような軟弱地盤層が非常に厚い地域で、大変有効な手段であり、設計法の確立は重要な技術課題である。しかしながら、軟弱地盤層が厚い地域における非着底改良地盤の挙動に関しては、ほとんど研究が進んでおらず、現場での明確な設計基準も確立されていない。

また、非着底型改良体に、これまで検討を行ってきたセメント固化処理土だけでなく、サンドコンパクションパイルや建設副産物である高炉水砕スラグといった材料特性の異なる材料を適用することを考えている。提案する非着底型改良形式の設計法を確立するためには、改良地盤全体としての沈下や安定性に加え、非着底型改良体の設計基準強度を明確にすることも重要である。時々刻々と変化する非着底型改良体の材料特性を考慮した改良地盤の荷重分担特性を明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、前節の背景を踏まえて、主に以下の課題に取り組んだ。

1) セメント固化処理による非着底改良体の周面摩擦抵抗が改良地盤の荷重分担特性に及ぼす影響を明らかにする。(実際のセメント改良体の表面粗さを模擬した試験体と粘土間の界面強度を明らかにする。)

2) 透水性の異なる材料を非着底改良体に適用し、荷重分担特性および圧密挙動の経時変化の違いを明確にする。(実際の地盤改良体には、セメント固化処理土だけでなく、砂材等の排水性材料の使用も想定している。)

3) 改良体の剛性や透水性といった材料特性が経時的に変化する非着底改良地盤の荷重分担特性の把握を試みる。(高炉水砕スラグ等の自硬性材料を非着底型改良体に適用し

た場合には、改良体の透水性や剛性が時間とともに変化する。改良地盤全体としての圧密沈下特性(ドレーン機能)や荷重分担特性の経時変化を把握する。)

### 3. 研究の方法

前節の研究課題に沿って、1) 改良体の表面粗さに着目した改良体と粘土間の界面強度の定量的評価、2) 透水特性の異なる材料を用いた非着底改良地盤の沈下挙動の把握、3) 材料特性の経時変化を考慮した改良地盤の荷重分担特性や圧密沈下特性の経時変化の把握、に取り組んだ。それぞれの課題に対する研究の方法を以下に簡潔にまとめる。

- 1) 表面粗さの異なる材料と粘土土との間に作用するせん断強度をリングせん断試験装置を用いて把握し、表面粗さと界面強度の関係を明らかにする。
- 2) 平面ひずみ模型載荷装置を作製し、透水特性の異なる材料を改良体として用いた複合地盤に対する模型載荷試験を実施する。模型地盤内の挙動や圧密沈下特性に及ぼす材料特性の違いを明確にする。
- 3) 改良体の材料特性の経時変化を考慮した非着底改良地盤の数値シミュレーションを実施し、セメント固化処理土や砂杭を想定した改良地盤の荷重分担特性、沈下特性等との比較から、材料特性が変化する改良体に求められる性能を確認する。

### 4. 研究成果

ここでは、主に成果が得られた1) および2) の内容について報告する。

(1) 改良体の表面粗さに着目した改良体と粘土間の界面強度の定量的評価

リングせん断試験装置を用いて、異種材料間の摩擦試験を行った。周面摩擦抵抗  $\tau$  は粘土のせん断抵抗角  $\phi'$  と異種材料間の摩擦角  $\delta'$  の比、すなわち  $\tan \delta' / \tan \phi'$  を  $R$  として  $\tau = R(c' + \sigma_n' \tan \phi')$  と表現できる。試料としてカオリン粘土と有明粘土を用いた。カオリン粘土、有明粘土内部のせん断特性と、カオリン粘土および有明粘土と杭周面の表面粗さを模擬したアクリル板を用いた改良体との摩擦特性について検討を行った。改良体の表面粗さを表すパラメータとして最大高さ  $R_y$  を用いた。最大高さとは測定長さを基準長さ(2.5 mm)ごとに分け、全ての基準長さごとの最大山高さから最大谷深さまでの高さを求め、平均化した値を意味する。異種材料間のせん断試験では、せん断箱の下半分に厚さ 20 mm の改良体を設置し、粘土との摩擦特性を調べた。せん断箱内に、含水比  $w$  を 80 % に調整した粘土を脱気させながら投入し、予圧密を行った。所定の垂直応力  $\sigma_n'$  まで、垂直応力を漸増させながら圧密を行い、所定の垂直応力を作用させた状態で所定の排水時間を設けた。

3種類の垂直応力 $\sigma_n'$  (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa)のもとせん断を行い、せん断速度は間隙水圧が発生しない速度(0.02 mm/min)を想定した。

図1に残留時のカオリン粘土の垂直応力-せん断応力関係を示す。これよりピーク時と残留時のそれぞれの粘土のせん断抵抗角 $\phi_p'$ 、 $\phi_r'$ と異種材料間の摩擦角 $\delta_p'$ 、 $\delta_r'$ を得た。またピーク時、残留時ともにカオリン粘土のせん断抵抗角が最も大きな値を示した。また改良体の表面粗さが大きいほど摩擦角は大きくなり、カオリン粘土のせん断抵抗角に近づく。

図2に改良体の表面粗さ $R_y$ をカオリン粘土の粒径加積曲線より通過百分率が90%のときの粒径 $D_{90}$ で除した相対粗さと、粘土内部のせん断抵抗と異種材料間の相対的な摩擦抵抗の比を表す $R=\tan\delta'/\tan\phi'$ の関係を示す。 $\delta'$ は異種材料間の摩擦角を示し、 $\phi'$ はカオリン粘土のせん断抵抗角を示す。 $R$ は粘土内部のせん断抵抗と異種材料間の摩擦抵抗の比を意味する。粘土内部の表面粗さは、カオリン粘土の通過百分率が90%のときの粒径 $D_{90}$ を表面粗さ $R_y$ と定義した。図よりカオリン粘土の粒径 $D_{90}$ よりも小さな表面粗さの改良体の場合、すなわち相対粗さが小さい場合、 $R$ が小さくなる傾向を示した。このことよりカオリン粘土と表面が滑らかな改良体を用いた条件では、カオリン粘土内部ではなく、カオリン粘土と改良体の間で滑りが発生しているものと考えられる。表面粗さが大きくなり、相対粗さが1以上のとき、摩擦角はカオリン粘土のせん断抵抗角に近づき、摩擦抵抗の比 $R$ も1に近づく。このことより、改良体の表面粗さ $R_y$ が大きいと、摩擦角がカオリン粘土のせん断抵抗角の値に近づくので、カオリン粘土内部での滑りが支配的になっていると考えられる。同様に有明粘土を用いてリングせん断試験を行った。カオリン粘土の場合と同様に、粘土内部のせん断抵抗角が最も大きくなることを確認された。

現地粘土とセメントを混合した実改良杭の表面粗さと現地粘土の粒度分布の関係进行调查した。表面粗さの計測結果を図3に示す。表面粗さの最大高さ $R_y$ と現地の粘土粒径 $D_{90}$ が近い値となっている。また、室内においても実際の施工を模擬したセメント改良体を模型攪拌装置を用いて作製し、表面粗さを測定した。母材には、カオリン粘土、有明粘土の2種類を用いた。セメント添加量が $150 \text{ kg/m}^3$ になるようにセメントスラリーの供給量を調整した。また回転翼の直径は50 mm、回転数は15回転/分、貫入、引抜速度は10cm/分、改良深さは15 cm、養生期間は7日とした。

作製したセメント改良体と現地で採取した2種類の実改良杭の表面粗さ $R_y$ と粘土の粒径 $D_{90}$ の関係を図4に示す。すべての改良体で母材粘土の粒径 $D_{90}$ より表面粗さ $R_y$ が大きくなった。以上のことから、深層改良体と粘

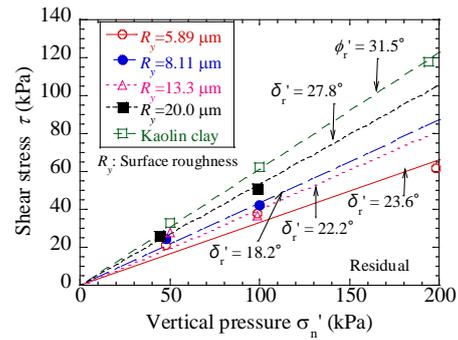


図1 垂直応力とせん断応力の関係

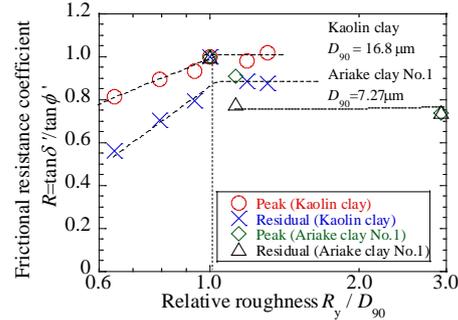


図2 相対粗さと摩擦抵抗の比との関係

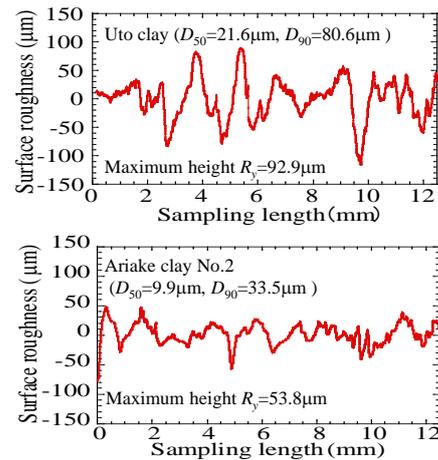


図3 実改良体の表面粗さ

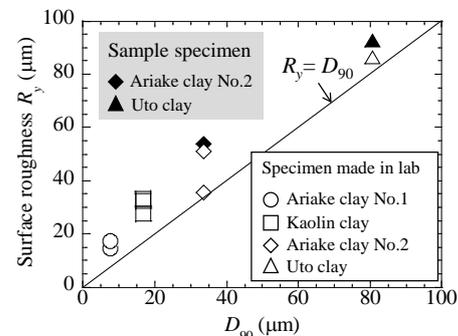


図4 セメント固化処理土の表面粗さと母材粘土のD90との関係

性土の界面強度は、粘性土のせん断強度を用いることが適切であると考えられる。

(2) 透水特性の異なる材料を用いた非着底模型改良地盤の沈下挙動の把握

平面ひずみ载荷模型実験装置の概略図を図5に示す。本実験では、模型地盤に改良体を挿入した状態で载荷を行うことで、各改良体の材料特性が圧密沈下挙動に及ぼす影響を観察した。改良体パターンとしては、無改良 (Case0)、セメント固化処理土 (Case1)、豊浦砂 (Case2)、アルミ (Case3)、水砕スラグ (Case4) とした。セメント固化処理土はカオリン粘土と高炉セメントB種を用いて作製した。砂杭、水砕スラグは、それぞれを相対密度  $Dr = 80\%$  で締め固めて作製した。模型地盤には含水比  $w = 80\%$  のカオリン粘土を使用し、アクリル容器内面にはテフロンシートおよびシリコングリスを塗布した上にメンブレンを貼り付けることで容器と粘土との摩擦を低減した。载荷圧  $\sigma = 20\text{kPa}$  で予圧密を行い、予圧密終了時に模型地盤高さ  $H$  が  $27\text{cm}$  程度となるようにカオリン粘土を充填した。予圧密終了後、改良体を模型地盤に挿入し、 $\sigma = 20\text{kPa}$  で再度予圧密を行った後、段階的に  $\sigma = 40\text{kPa}$ 、 $80\text{kPa}$  に各载荷段階で48時間の载荷を行った。砂杭と水砕スラグを用いた改良体は相対密度  $Dr = 80\%$  で締め固めた改良体を冷凍し、自立を保った状態で粘土に挿入した。実験中の応力分担比を測定するため、载荷板直下の杭上および粘土上に土圧計を設置した。また、アクリル容器の前面に格子状のメッシュを描いたメンブレンを貼り付けることで、粘土内の挙動の把握を試みた。

図6に  $\Delta\sigma = 40\text{kPa}$  における圧密沈下量の経時変化を示す。Case3(アルミ)と比較して表面粗さの大きな改良体を用いたCase1(セメント固化処理土)の方が、沈下量が抑えられた。改良体と粘土地盤の応力分担比  $n$  を、载荷板直下に作用する改良体に作用する鉛直応力と粘土地盤に作用する鉛直応力の比として定義した。

図7に応力分担比  $n$  の経時変化を示す。剛性の大きなセメント固化処理土やアルミ杭においては、各载荷段階において、载荷直後に応力分担比が変化し、時間経過とともに一定値に収束する傾向を示した。剛性が大きな改良体を用いた場合に応力分担比も大きくなる傾向が示された。

平面ひずみ装置の土槽前面に格子状のメッシュを描いたメンブレンを貼り、圧密沈下に伴う格子点の座標の移動からひずみを計算する画像解析を行った。画像解析によって得られた改良地盤の鉛直ひずみ分布を図8に示す。Case1(セメント固化処理土)、およびCase3(アルミ杭)の改良地盤において、鉛直ひずみは荷重が集中する改良体直下で大きく生じた。改良体下部における鉛直ひずみは、Case3(アルミ)と比較して改良体の表面が粗いCase1(セメント固化処理土)の方が大きくなる傾向が示された。一方、Case2(砂杭)、Case4(水砕スラグ)においては、鉛直ひずみが地盤内にほぼ均等に分布する傾向を示し

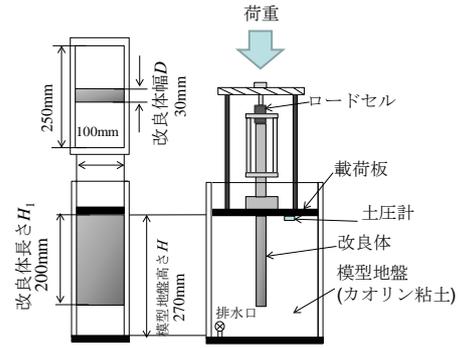


図5 平面ひずみ模型载荷試験装置

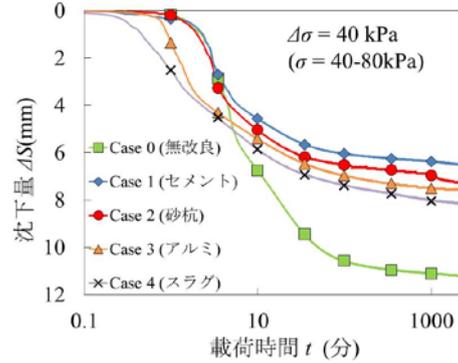


図6 各改良ケースの沈下量の経時変化

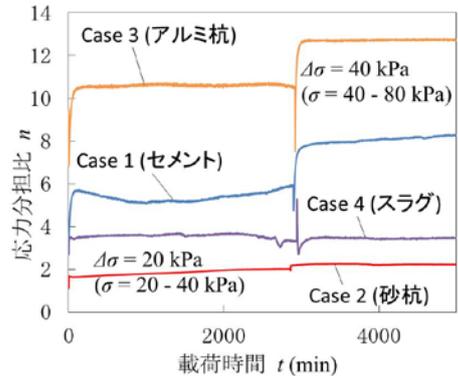


図7 応力分担比の経時変化

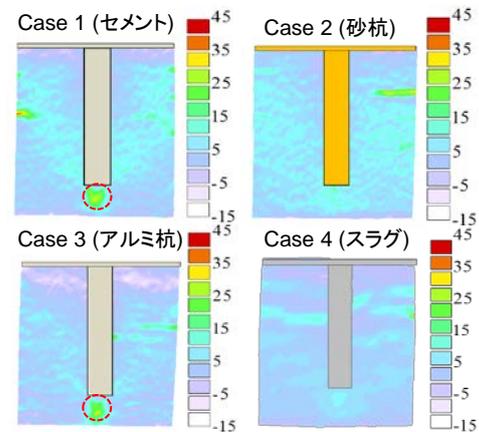


図8 鉛直ひずみ分布 ( $\sigma = 0-80\text{kPa}$ )

た。これは、砂杭、水砕スラグの剛性がセメント固化処理土、アルミ杭と比較して小さく、

改良体が周辺の粘土地盤と一体となって沈下したことが原因として考えられる。また、Case 1(セメント)、Case 3(アルミ)において、載荷板に接する改良体上部と比較して改良体側面の下部に鉛直ひずみが集中している。改良体上部では粘土と改良体が一体となって沈下するのに対し、改良体下部は、直下の大きな圧密沈下により粘土との相対変位が大きくなるため、周面摩擦力が大きく働いたことが原因の一つとして考えられる。

改良地盤内の圧密沈下の傾向を観察するため、80kPa 載荷終了後に模型地盤のサンプリングを行い、含水比の測定を行った。図 9 に各ケースで得られた含水比分布を示す。

Case 1(セメント固化処理土)、Case 3(アルミ)では、改良体に荷重が集中する改良部分は高い含水比を示し、未改良部分では低い値を示した。Case 2(砂杭)、Case 4(スラグ)では排水面に近い改良体上部および改良体下端付近で低い含水比を示した。また、改良部分では、改良体に近いほど含水比が低くなる傾向を示しており、改良体の排水作用が確認された。全てのケースにおいて、改良体直下は極めて低い含水比を示した。特に、Case 1(セメント固化処理土)、Case 3(アルミ杭)では、改良体先端に荷重が集中し大きな圧密沈下が発生したため、含水比が低下したものと考えられる。

各実験ケースにおいて、一次圧密終了時間を  $3t$  法を用いて計算した。無改良地盤では、各載荷ケースでの一次圧密終了時間  $\Delta T_0$  が、それぞれ 約 290 分および 190 分であった。各改良パターンの改良地盤の圧密終了時間を  $\Delta T$  とし、各載荷段階における改良地盤の圧密終了時間を無改良地盤の圧密終了時間で正規化することで比較を行った(図 10)。

Case 3(アルミ)を除いたすべての改良地盤において、一次圧密終了時間  $\Delta T$  は無改良地盤の圧密時間よりも短くなった。透水性の低い Case 1(セメント固化処理土)と Case 3(アルミ)の改良地盤はどちらも透水性材料を用いた改良地盤と比較して圧密終了時間が長くなっている。透水性を有する非着底改良体を用いた改良地盤の圧密終了時間は無改良ケースの約 60% 程度の時間となっている。改良体がドレーン機能を発揮し圧密が促進されたものと考えられる。今回の模型実験では水砕スラグの養生に伴う透水性の変化に顕著な違いは見られなかった。硬化した改良体での透水特性の違いによる圧密速度については、今後も検証が必要である。

(3) 数値解析による材料特性の経時変化を考慮した改良地盤の経時変化の把握

潜在水硬性によって材料特性(剛性や透水性等)が経時的に変化する水砕スラグ改良体を想定した FEM 解析を行い、改良地盤の圧密挙動について考察した。

軸対象とし、軟弱地盤層厚  $H=20\text{ m}$ 、改良体長さ  $H_1=16\text{ m}$  の条件での解析を行った。

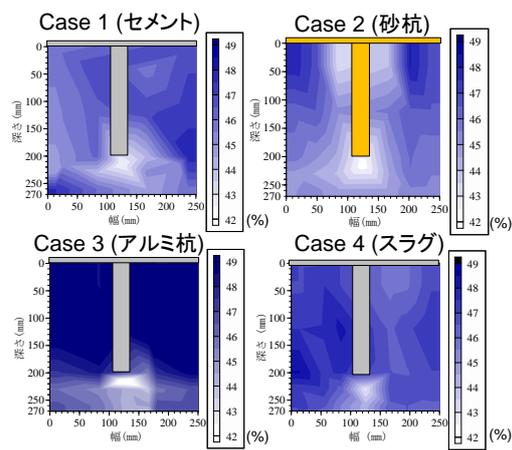


図 9 含水比分布 ( $\sigma=0-80\text{kPa}$ )

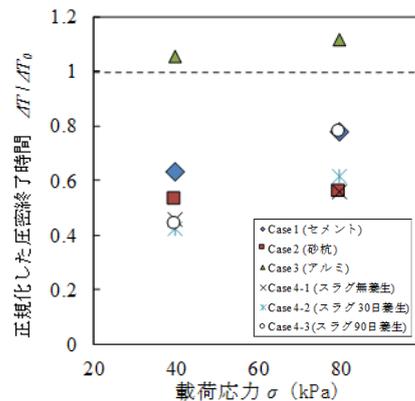


図 10 改良地盤の圧密終了時間

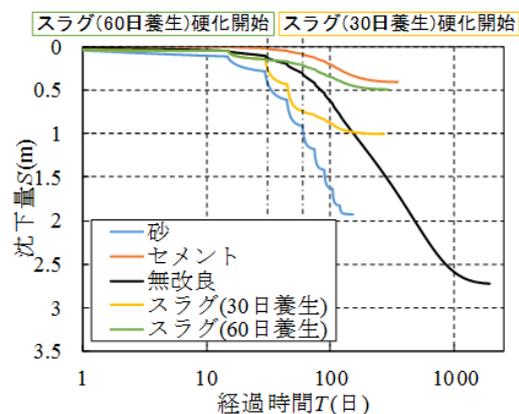


図 11 水砕スラグを用いた改良地盤の圧密挙動

既往の研究を参考に、水砕スラグの材料パラメータを選定し、材料特性が 90 日、150 日、210 日で変化するように設定した。盛土載荷前の養生日数を 30 日、60 日と設定して、ドレーン材としての圧密促進効果と支持杭としての硬化を発揮できるように調整した。30 日養生の水砕スラグは盛土載荷開始から 60 日で、60 日養生の水砕スラグは盛土載荷開始から 30 日で硬化が始まるように設定した。

図 11 に水砕スラグを用いた改良地盤における圧密沈下量の経時変化を示す。改良体長

が同一の砂材，セメント改良体を用いたケースとの比較を行っている．改良体が硬化する前(養生 90 日以前)は砂杭のような，圧密が早期に収束する傾向が示された．改良体が硬化した後(養生 90 日以降)は各載荷ステップごとに改良地盤の沈下量は収束しておらず，セメント改良地盤と同様の傾向を示した．最終的な沈下量は，無改良地盤と比較して小さくなっており，60 日養生した水砕スラグを用いた改良地盤では，沈下量が 0.5 m 程度に抑えられたのに対し，30 日養生したスラグを用いた改良地盤では約 1 m と沈下量に差が生じた．硬化前の改良体の透水係数が大きな時期の沈下量に起因しているものと考えられる．改良体の剛性や透水性といった材料特性が経時的に変化する非着底改良地盤の沈下挙動についての定性的な確認を行った．

#### 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 6 件)

- 1) Ryohei Ishikura, Wataru Arima, Zhenbo Jiang, Noriyuki Yasufuku: Mobilized Interface Friction between Soft Clay and Cement Column Focusing on the Surface Roughness, Proceedings of International Conference on Soft Ground Engineering, pp.327-335,2015.
- 2) 有間航, 石藏良平, 安福規之, 甲斐田葉丞: 粘土とセメント改良体の界面強度の評価と改良地盤の沈下解析への適用, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.37-40, 2016.
- 3) 石藏良平, 安福規之, 有間航, 駒延勝広, 了戒公利: 盛土荷重を受ける非着底壁式改良地盤の荷重分担特性と沈下予測, 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集 pp.33-36, 2016.
- 4) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之, 有間航: 改良体の材料特性に着目した非着底改良地盤の圧密沈下特性に関する基礎的考察, 第 60 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.267-270, 2016.
- 5) Wataru Arima, Ryohei Ishikura, Noriyuki Yasufuku, Yosuke Kaida: Evaluation of soft clay-cement column interface strength and its application in settlement analysis, Proceedings of the Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, pp.767-774,2016.
- 6) Ryohei Ishikura, Wataru Arima, Noriyuki Yasufuku: Interface friction between soft clay and construction material considering the correlation between surface roughness and soil particle size, Proceedings of the 7th China-Japan Geotechnical Symposium, pp.99-104,2018.

[学会発表] (計 11 件)

- 1) 有間航, 石藏良平, 安福規之, 江振波: 非着底型地盤改良体と粘土の界面強度に着目した改良地盤の沈下挙動の解析, 土木学

会第 70 回年次学術講演会, 2015 年 9 月.

- 2) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之, 有間航: セメント改良土を用いた非着底改良地盤の圧密沈下特性に関する実験的考察, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2016 年 3 月.
- 3) 有間航, 石藏良平, 安福規之: セメント固化処理土の土粒子径による表面粗さに着目した改良体と粘土の摩擦特性, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2016 年 3 月.
- 4) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之, 有間航: 複合地盤の応力分担特性に着目した非着底改良地盤の圧密沈下挙動に関する考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月.
- 5) 有間航, 石藏良平, 安福規之: 土粒子径と表面粗さに着目した粘土と地盤改良体の界面強度の評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月.
- 6) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之, 有間航: 改良体の透水性能に着目した非着底改良地盤の圧密沈下特性, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017 年 3 月.
- 7) 有間航, 石藏良平, 安福規之: セメント改良体の表面粗さと粘土の土粒子径の關係に着目した界面強度の評価, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017 年 3 月.
- 8) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之, 有間航: 非着底深層改良体の周面摩擦抵抗に及ぼす先行圧密応力と載荷圧力の關係, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017 年 7 月.
- 9) 坂田智美, 安福規之, 石藏良平: 高炉水砕スラグを低置換率 SCP 工法材として適用した改良地盤の変形特性, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018 年 3 月.
- 10) 甲斐田葉丞, 石藏良平, 安福規之: 荷重分担特性に着目した非着底壁式改良地盤の沈下予測に関する考察, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018 年 3 月.
- 11) 王イブン, 石藏良平, 安福規之, 坂田智美: 自然砂混合した高炉水砕スラグの未硬化時の液状化強度特性, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018 年 3 月.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

石藏良平 (ISHIKURA Ryohei)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 90510222

(2) 研究分担者 (なし)

(3) 連携研究者 (なし)

(4) 研究協力者 (なし)