

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560519

研究課題名（和文）

セメント改良した浚渫土，建設発生土の力学挙動の把握と弾塑性モデルによる挙動の再現

研究課題名（英文）

Elasto-plastic description of mechanical behavior of cement-treated soil

研究代表者

中野 正樹 (NAKANO MASAKI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00252263

研究成果の概要（和文）：最終処分が問題となっている港湾海底に蓄積する土砂を土材料として有効利用するため、土砂を、セメントの固化作用を応用して改良し、セメント添加量の違いでどのような挙動をするのか、実験により確かめた。実験で得られた結果を、提案するモデルにより、ある程度再現することに成功した。これにより、地震等の外力に対し、セメント改良土がどのような変形をするかの予測することが可能となり、土材料として利用する範囲が広がる。

研究成果の概要（英文）：To use huge amount of dredged soil in Japan ports as geo-material, the dredged soil is treated with cement and mechanical behaviors of the treated soils are examined through the experiments. The experimental results can be simulated by the proposed elasto-plastic constitutive model. It means that a wide range of the dredged soil can be used as geo-material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地盤工学，地盤材料学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤材料学，セメント改良，浚渫土，建設発生土，土の骨格構造，過圧密

1. 研究開始当初の背景

名古屋港では、浚渫土砂の仮置場であるポートアイランドがすでに満杯で、浚渫土砂の有効利活用が喫緊の課題である。

泥土や浚渫土などの強度が小さい低品質土の利用技術としてスラリー化安定処理工法や管中混合処理工法などが注目され、広く活用されている。これらの工法は、強度が小さい低品質土にセメント等の固化材を用いて強度が大きな高品質土に変える、「土を固める」改良技術である。一般に改良土を用いた構造物の設計では、強度特性から評価されることが多い。しかし近年では、性能規定や構造物の大規模化により周辺地盤への影響抑制の観点から「変形」に対する検討を設計

に取り入れるようになってきている。設計が高度化する流れの中で重要な役割を果たす変形特性に着目した研究は少なく、改良土の弾塑性構成モデル研究はほとんど見ることができない。

申請者が所属する名古屋大学地盤力学研究室で開発された SYS カムクレイモデルは、塑性変形の進展によって土の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の状態が変化することを記述できる土の弾塑性構成モデルである。このモデルは「構造の劣化/破壊」と「過圧密の喪失」を共通の指標にして、砂と粘土の力学挙動の違いを説明するが、同時に「構造」と「過圧密」の発展速度の操作により、砂と粘土の間に稠密に存在する中間土へも適用

できるのが大きな特徴である。申請者は、別途、窯業副産物であるキラを地盤材料として利用するため、粉碎、石灰混合により団粒化させ、締固めたキラ改良土の力学挙動を室内試験によって把握し、SYS カムクレイモデルの構成式応答によって再現できることをすでに示している。

2. 研究の目的

そこで本研究では、セメント等の固化材を用いて「土を固める」技術によって改良された土の変形特性に着目し、次の2点を研究目的とする。

(1) セメント改良土のせん断挙動、圧縮挙動を把握し、弾塑性構成モデルを用いてその挙動を正確に表現する。

改良対象の土質は様々であり、要求される強度を発揮するための改良材の配合も土質に応じて変化するが、本研究では最適な配合を明らかにするのではなく、様々な土質に対して、セメント改良が土の骨格構造の働きを変化させると考えて、弾塑性力学挙動を明らかにする。

(2) セメント改良土からなる地盤に荷重が作用する際の地盤挙動の予測し、弾塑性力学に基づく性能評価を行う。

計算機内に地盤を作製し、その人工地盤に静的／動的荷重が作用する際の地盤挙動の予測し、弾塑性力学に基づく性能評価を行う。それに基づいて改良土設計の最適化に寄与するデータを蓄積する。

3. 研究の方法

(1) 浚渫土砂の物性、力学特性の把握と弾塑性性状の同定

- ① セメント改良の対象となる浚渫土砂試料の採取と地盤情報の収集・整理を行う。
- ② 物理試験によって密度、粒度等の物理特性を把握する。
- ③ 力学試験（圧密試験、三軸試験機による非排水せん断試験等）を実施し、圧縮・圧密特性、せん断特性を把握する。
- ④ ③の力学試験の試験条件を与えたときのSYSカムクレイモデルの応答を数値計算し、力学試験結果を再現する弾塑性性状（材料定数および状態）を同定する。

(2) 浚渫土砂を用いたセメント改良土の改良原理の解明

- ① (1)の浚渫土砂に対して、セメント添加量を系統的に変化させた改良土を作製し、未改良の浚渫土砂と同様の各種室内試験をセメント改良土に実施する。そして、改良前後の力学試験結果の比較によって改良特性を把握する。
- ② SYSカムクレイモデルの応答によってセメント改良土の力学試験結果を数値

計算で再現し、セメント改良土の弾塑性性状を同定する。

- ③ セメント改良前後の弾塑性性状の違い、特に骨格構造の働きの違いに着目して、セメント改良土の改良原理を弾塑性力学的観点から解明することを試みる。
- ④ ②において、再現が困難な場合は、セメント改良土を砕き、十分に練り返して作製した土供試体に対し、力学試験（圧密試験、三軸試験機による非排水せん断試験等）を実施し、圧縮・圧密特性、せん断特性を把握する。
- ⑤ ④の試験結果を用いて、弾塑性構成モデルでの表現を試みる。
- ⑥ ⑤において、再現不可能となった場合、その原因の抽出から、弾塑性構成モデルを改良して、力学試験結果の再現性を高める。

(3) 有限要素解析によるセメント改良土の力学挙動の再現

(2)によるモデルの再現では、改良土供試体を要素と見なした解析であり、セメント改良土の脆性的な破壊現象までも再現することは困難である。そこで、改良土供試体を境界値問題として捉え、有限要素解析を行う。

- ① 平面ひずみ条件での有限要素解析を行い、せん断初期の不連続面（せん断面）での挙動を表す。
- ② 2次元有限要素解析を行い、セメント改良土の力学挙動の再現を試みる。
- ③ ①、②の再現計算に対し、不十分な点の抽出と、弾塑性構成モデルの改良を行う。

4. 研究成果

名古屋港ポートアイランドに仮置きされている浚渫土砂を研究対象として、以下の点を明らかにした。

(1) ポートアイランド浚渫土砂の改良方法

過去に実施された地盤調査結果を整理した結果、ポートアイランド浚渫土砂は位置や深度によって含水比、粒度組成に違いがあることが分かった。浚渫土砂の排砂管口近くでは砂分が多く、遠くでは粘土分が多い。粒度分析により詳細に調べた結果、細粒分が90%以上のものから砂分が30%近くあるものまで分布していることが分かった。砂分30%を含む浚渫土砂に対し、地盤材料として有効利用するために、一軸圧縮強度を指標として調べたところ、それぞれ適した改良方法、固化材の配合量、養生日数があることが分かった（図1）。

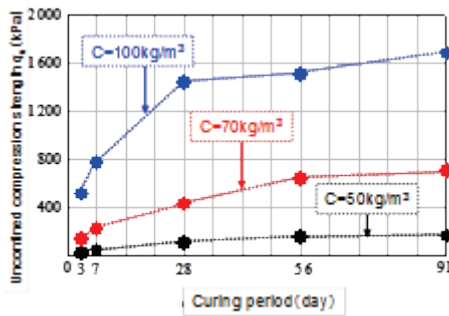


図1 養生日数—軸圧縮強度関係 (C:セメント添加量)

(2) 管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の力学挙動

管中混合固化処理工法による改良を想定したセメント改良土を作製し、その力学特性を把握するために一軸圧縮試験、標準圧密試験、三軸圧縮試験を実施した。セメント改良により、圧縮量は小さくなり、長期養生を施すことで更なる強度増加が期待できる(図1、2)。非排水三軸圧縮試験では未処理の浚渫土と異なるせん断挙動を示した。すなわちセメント添加量が多くなるにつれて、ひずみ ϵ_a に対する軸差応力 q (せん断応力)は大きくなり、有効応力経路($q-p'$ 関係)はテンションカットオフと呼ばれる直線(引張り境界、図3の $q=3p'$ の直線)に向かって軸差応力が増加し、浚渫土に比べて早期にせん断面が発生した。しかし、セメント添加量が小さい場合や、拘束圧が大きい場合には、テンションカットオフの直線に到達することなく破壊し、通常の土と類似した挙動を呈するようになる(図3)。

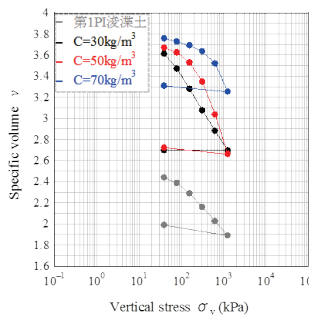


図2 セメント添加量Cの異なるセメント改良土の圧縮特性(養生日数28日)

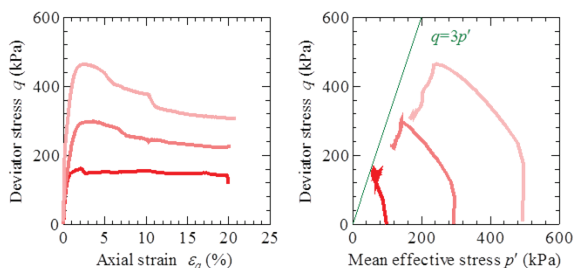


図3 拘束圧の異なるせん断挙動 (C=50kgf/cm²、養生日数28日)

(3) 弾塑性モデルを用いたセメント改良土の力学挙動の再現

(2)の試験結果を土の骨格構造の働きを記述できる弾塑性モデル(SYSカムクレイモデル)の応答で再現することを試みた。図4は養生日数28日のセメント添加量の異なる標準圧密試験結果(図2)の計算結果を示す。また図5は、同様の材料に対する三軸圧縮試験結果(C=50kgf/cm²は図3に示している)の計算結果を示している。圧縮挙動もせん断挙動も定性的に表現できた。この計算結果より、骨格構造概念に基づくと、セメント改良土は、未処理浚渫土に比べて構造が高位化、過圧密が増大し、構造劣化しにくい、過圧密解消しにくい材料と説明することができる。

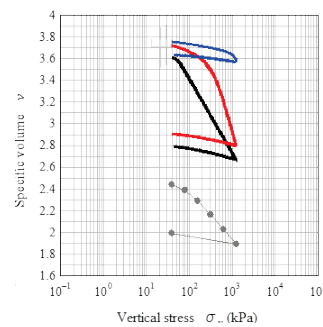


図4 標準圧密試験結果(図2)の再現計算結果

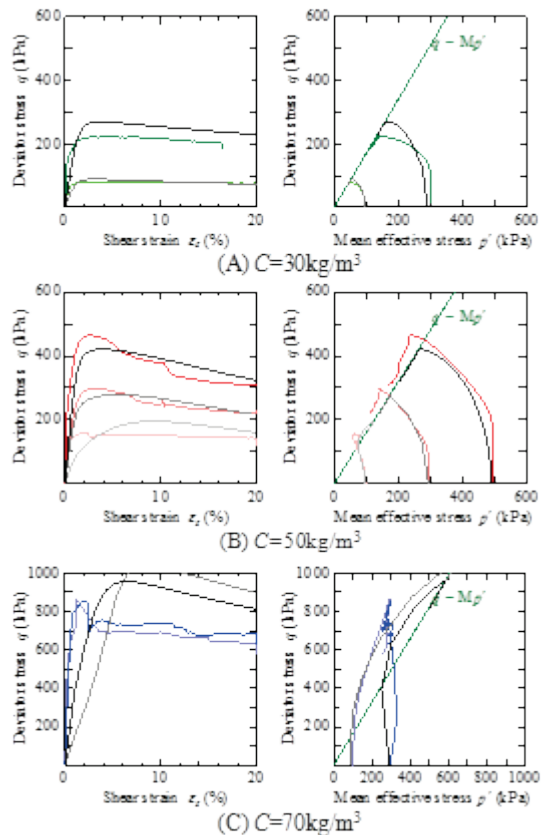


図5 セメント添加量Cの異なる改良土の三軸圧縮試験結果の再現計算

なお、再現計算においては、従来の未処理浚渫土だけでなく、セメント改良土を練り返して作製した土も骨格構造の程度を測る基準としている。後者の方が再現性が向上した。なお、セメント処理の練返し試料は、セメント添加量が多くなるほど練返し正規圧密線の切片 N および傾き λ が大きくなる(図6、7)。また、セメント添加量の違いは過圧密比の違いに反映されやすく、一方で水セメント比の違いは構造の発達程度に反映されやすいことがわかった。

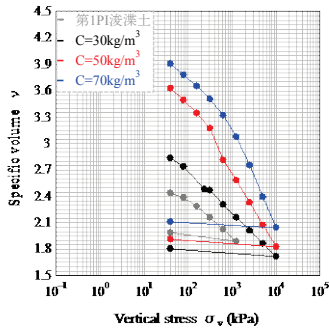


図6 セメント添加量 C の異なるセメント改良土練返し試料の圧縮特性(養生日数28日)

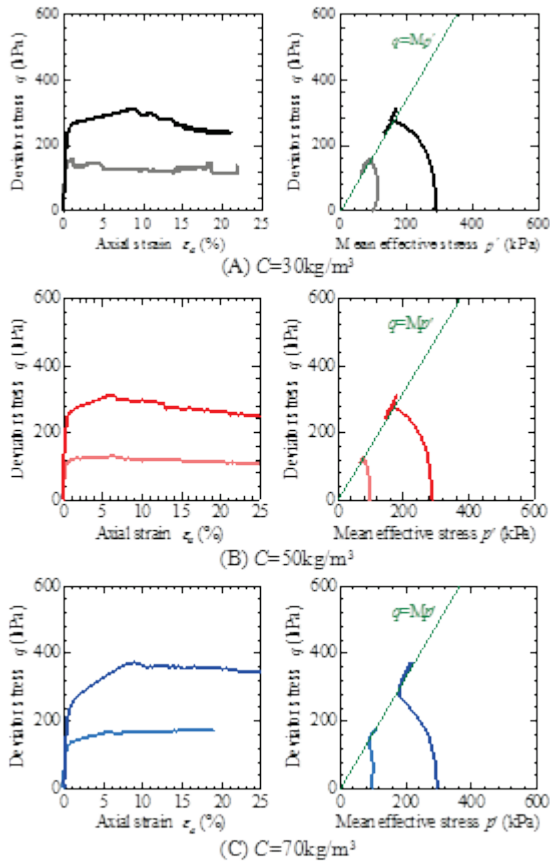


図7 セメント添加量 C の異なるセメント改良土練返し試料のせん断圧縮特性(養生日数28日)

(4)有限要素解析によるセメント改良土の力学挙動の再現

セメント改良土のせん断挙動において、セメント改良土供試体にすべり面が入ると、軸差応力はひずみの進行に対し、急激に低下する。この挙動を構成式応答で再現することはできなかった。そこで、供試体を境界値問題と捉え、せん断挙動を有限要素法により解析した。その結果、せん断面が発生した軸ひずみや q の低下量に差はあるものの、2種類の拘束圧に対してせん断面と、同時に軸差応力 q が低下する現象を、定性的に表現することができた(図8~12)。一連の解析は、三軸試験を要素試験とみなして与えた材料定数および初期値を用いていることから、改良土本来の性質を見定めていくためには、要素試験と境界値問題の両方の視点を持って取り組む必要がある。

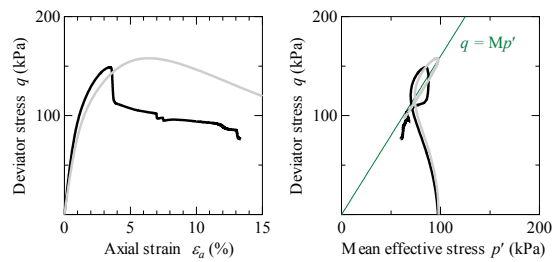


図8 構成式およびマスの非排水せん断挙動(拘束圧98kPa)

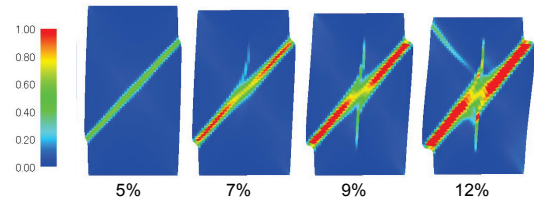


図9 せん断ひずみ分布の推移(拘束圧98kPa)

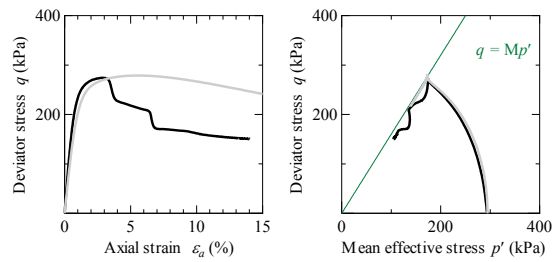


図10 構成式およびマスの非排水せん断挙動(拘束圧294kPa)

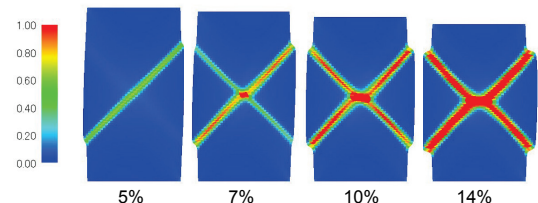


図11 せん断ひずみ分布の推移(拘束圧294kPa)



図 12 供試体破壊形状 (左:拘束圧 98kPa、右: 294kPa)

(5) 他地域の浚渫土砂の力学挙動

名古屋港ポートアイランドの浚渫土砂だけでなく、東京港の浚渫土砂も同様の研究を行った。粒径分布はほとんど同じであったが、東京港浚渫土砂の方が、浚渫土の初期含水比が高いわりに、セメントの固化作用が顕著に現れた。すなわちセメント添加量がそれほど多いわけではない $C=40\text{kgf/cm}^2$ のセメント改良土において、非排水三軸圧縮試験をおこなったところ、有効応力経路がテンションカットオフ (引張り境界、 $q=3p'$ の直線) に向かって軸差応力が増加し、早期にせん断面が発生した。東京港浚渫土のセメント改良土や、名古屋港浚渫土でもセメント添加量が多い改良土について、せん断挙動に対する更なる再現のため、有限要素解析とともに、限界状態線の上側での塑性圧縮を表現できる新たな構成モデルの開発を試みた。

(6) 名古屋港ポートアイランドの地震時安定解析

浚渫土によって造成された名古屋港ポートアイランドを対象に、*GEOASIA* を用いて、施工履歴を考慮し、周期の異なる 2 種類の地震動による地震応答解析を行った。室内力学試験により材料定数を決定し、埋立てによる造成過程を計算して、地盤調査で得られた一軸圧縮強度と地盤の比体積分布を再現することにより、地盤の初期状態を決定できた。また、入力地震動によって地盤の挙動が異なり、長周期成分が卓越しているレベル 2 地震動では、護岸の変位や沈下、地盤の変形がレベル 1 地震動よりも大きくなることが分か

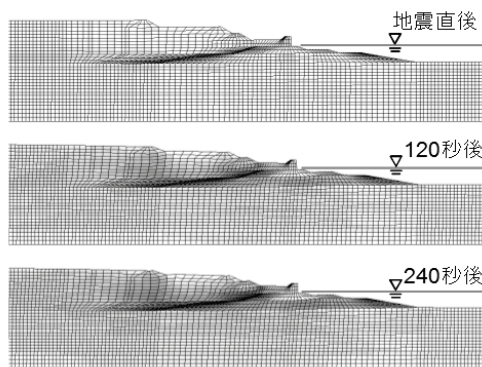


図 13 レベル 1 地震動による変形挙動

った。またせん断の卓越する地点では、地震中に吸水膨張を示した (図 13、14)。

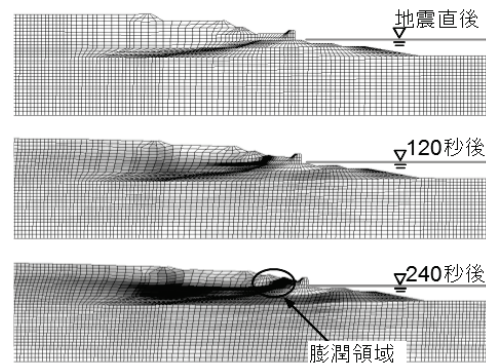


図 14 レベル 2 地震動による変形挙動

(7) セメント改良土地盤の変形を考慮した支持力解析

図 15 に示すようにセメント改良土地盤の変形を考慮した支持力解析に成功し、固化材で改良した土を利用した土・地盤構造物の破壊に至るまでの大変形を、構成する土要素の挙動を含め計算することができるようになった。

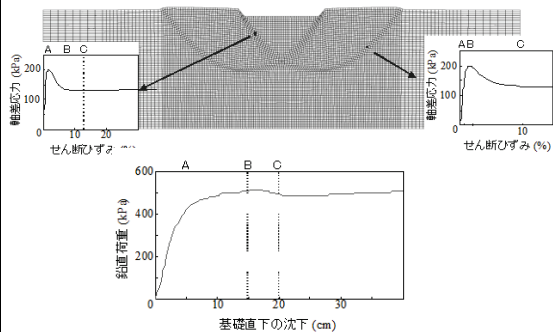


図 15 セメント改良土地盤の支持力解析とすべり面での要素挙動 (上: 地盤の変形と要素挙動、下: 鉛直荷重と基礎直下の沈下関係)

(8) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

浚渫土砂の処分問題は、日本の主要港湾においても同様の喫緊の課題である。さらに、世界の港湾においても処分問題は徐々に現れてきている。地球環境の観点から、浚渫土砂の地盤構造物としての有効利活用がその解決に貢献するが、従来設計のように、単に強度定数を設計定数として用いて、構造物の安定解析による安全性を示すだけでは、真の利活用は不可能である。対象とする地盤構造物に対し、適材適所の様々な性質をもつ改良土の利用が必要である。また外力、とくに地震外力の場合、構造物が致命的な変形を示すのかどうかを調べるためには、やはり高度な構成モデルによる変形解析が必要となる。本研究は、セメント改良土の力学挙動

を再現する弾塑性構成モデルの提案と改良を行っており、国内外では同様の取り組みは見当たらない。今後さらに構成モデルの再現精度をあげることにより、浚渫土砂だけでなく、建設発生土、災害堆積物、さらには固結したシルトや泥岩の力学挙動の説明にも応用され、地下空間やトンネルの計算だけでなく、排出された様々な発生土の有効利活用にも貢献できると考えている。

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 5 件)

- ① 依田広貴、中野正樹、山田正太郎、堀内俊輔、笹山哲司、管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の力学挙動の把握と弾塑性力学に基づく解釈、第23回中部地盤工学シンポジウム、査読無、Vol.23、2011、23-28、
<http://www.jgs-chubu.org/download/syn5/pdf/23/s2305.pdf>
- ② 中野正樹、山田英司、孫凱、Seismic analysis of reclaimed ground with dredged soil, Proc. of 14th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, 2011, CD-ROM
- ③ 椎名貴彦、山田正太郎、Progressive failure of a cement-treated ground in bearing capacity problem, Proc. of 14th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, 2011, CD-ROM
- ④ 孫凱、山田英司、中野正樹、浅岡 顕、Simulation of reclaimed ground composed of dredged soil for two kinds of earthquake ground motions with different spectral characteristics, 応用力学論文集, 査読有, Vol.13, 2010, 453-462

[学会発表] (計 12 件)

- ① 岡野雄馬、セメント改良された物理的性質の異なる土質材料の力学特性の把握、土木学会中部支部、2012年3月8日、信州大学
- ② 山田正太郎、セメント改良土および練返したセメント改良土の力学挙動と SYS Cam-clay model によるその再現、地盤工学会、2011年7月7日、神戸国際会議場
- ③ 中野正樹、水～土骨格連成有限変形解析によるセメント改良土の三軸試験の数値シミュレーション、地盤工学会、2011年7月7日、神戸国際会議場
- ④ 依田 広貴、管中混合固化処理工法を想定

したセメント改良土の力学挙動に与えるセメント添加量の影響、地盤工学会、2011年7月7日、神戸国際会議場

- ⑤ 堀内俊輔、管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の各種力学試験、地盤工学会、2010年8月19日、愛媛大学
- ⑥ 山田英司、弾塑性モデルによる管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の力学挙動の再現、地盤工学会、2010年8月19日、愛媛大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 正樹 (NAKANO MASAKI)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：00252263

(2) 研究分担者

山田 正太郎 (YAMADA SHOTARO)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号：70346815

(3) 連携研究者なし

(4) 研究協力者

孫 凱 (SUN KAI)
名古屋大学・工学研究科・博士課程後期課程

堀内 俊輔 (HORIUCHI SHUNSUKE)
名古屋大学・工学研究科・博士課程前期課程

依田 広貴 (YODA HIROKI)
名古屋大学・工学研究科・博士課程前期課程

笹山 哲司 (SASAYAMA TETSUJI)
名古屋大学・工学研究科・博士課程前期課程

岡野 雄馬 (OKANO YUMA)
名古屋大学・工学部・学部学生