

令和元年6月1日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04408

研究課題名（和文）二重硬化弾塑性構成式の提案とそれに基づく地盤材料力学の体系化

研究課題名（英文）The development of double hardening elasto-plastic constitutive model and the systematization of geomaterial mechanics based on the model

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000円

研究成果の概要（和文）： 独立に存在し得る二つの弾塑性構成式（自然堆積粘土の力学挙動の記述に優れたSYS Cam-clay modelと砂の非排水せん断挙動の再現に多用されてきた非関連Drucker-Prager model）が単一のモデルとして機能する新たな弾塑性構成式の枠組みを提案した。このモデルによって、様々な地盤材料の力学挙動が統一的に記述可能になった。同構成式を慣性力を考慮した水～土連成解析コードに実装し、実問題への応用を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤工学分野では、長年の間、粘土と砂の構成式は別々に扱われてきたが、これらを統合可能な数理モデルが開発されたことによって、地盤材料力学の体系化に大きな前進があった。また、同モデルを実装した水～土連成解析コードによって、地震時の液状化現象や軟弱粘土地盤の荷重載荷による変形・破壊問題など、地盤災害の予測やそれを回避するための対策効果の検討が単一の理論体系の下で実施できるようになった。

研究成果の概要（英文）： Constitutive models for describing the mechanical behavior of soils have been separated into the models for clayey soils and ones for sandy soils. In this study, to integrate a different kind of constitutive models, a new framework in elasto-plastic theory for soils called “combined elasto-plastic constitutive model” is proposed. This framework allows the SYS Cam-clay model, which can describe the mechanical behavior of naturally deposited clayey soils, and the non-associated Drucker-Prager model, which has mainly simulated the undrained shear behavior of sandy soils, to simultaneously work within a single model. We also implemented the developed constitutive model into a soil-water coupled finite deformation code with the inertial term. This code enabled us to simulate ground disasters such as liquefaction and evaluate the effects of several countermeasures against the disasters.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 地盤材料力学 弾塑性構成式 材料定数

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

土の力学挙動の数理モデル化に関する研究は、古くから行われてきた。その結果、様々な土骨格の構成モデルが生まれた。一方で、このようなモデル開発に関する研究は、一時期の勢いを失いつつある。これは理論の成熟によるものではなく、多くの研究者が当初描いたような土の様々な力学現象を記述可能なモデルの構築に見切りをつけていった結果である。構成則研究の黎明期に比べ、計算リソースが爆発的に成長した現代において、これらの様々な試みが結実していれば、地盤構造物の実設計において数値シミュレーションは有力なツールとして、もっと利用されているに違いない。本研究は、以前より試みられてきた地盤材料の力学挙動を統一的に記述可能な数理モデルの構築に挑むとともに、構築したモデルを通して、地盤力学の理論的深化および学問的体系化を図るものである。

2. 研究の目的

本研究では、各種地盤材料を対象とした高性能な構成式を開発することを第一の目的とした。これには、セメント改良土を対象にできるような構成式に拡張することも含まれる。この開発した構成式の方法の決定法を構築するとともに、必要な土質試験法を整理し、典型的な材料定数を収集し、地盤材料力学の体系化に資することを目的とした。さらに、開発した構成式を、慣性項を考慮した水～土連成解析コードに実装し、開発した構成式を実問題へ応用し、その効果を確認することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 地盤材料の要素試験と構成関係の現象論的記述

地盤材料の構成則を現象論的に記述するために、粘土や砂に加え、セメント改良土を対象に要素実験を行った。実験装置として、標準圧密試験機や通常の三軸試験装置に加え、高圧三軸試験機と中空ねじり試験機を用いた。これらの実験装置の自動計測・自動制御化を図り、複雑な載荷条件下での土の力学特性について調べた。また、これらの実験結果をもとに、新たな弾塑性構成式の開発に取り組んだ。

(2) 材料定数の決定方法の構築・地盤材料力学の体系化

代表的な砂質土試料として豊浦砂を、また自然堆積粘土として浦安で採取した沖積粘土を選び実験を行った。開発した弾塑性構成式を用いて実験結果の再現を試み、得られた材料定数を分析することで、材料特性がどのような形で材料定数に反映されるか考察した。また、モデルの特徴を把握した上で、材料定数を決定するためにどのような土質試験が必要で、どのような手順で材料定数を決定してゆくのが合理的か検討した。

(3) 開発した構成式の水～土骨格連成有限変形解析コードへの実装と実問題への応用

開発した弾塑性構成式を慣性力を考慮した水～土連成有限変形解析コードへ実装し、境界値問題の中で、開発した弾塑性構成式が正しく動作するか検証した。また、同解析コードを用いて、幾つかの数値シミュレーションを実施し、構成式の高度化によって、新たにどのような現象が再現できるようになったか調べた。

4. 研究成果

(1) 複合負荷弾塑性構成式の開発

粘土と砂の力学挙動の統一的記述を目指し、複合負荷弾塑性構成式と称する土骨格の弾塑性構成式の新たな枠組みを提案した（課題申請時は二重硬化弾塑性構成式と称していたが、既存のモデルとの区別がつきにくいことから複合負荷弾塑性構成式と称することにした）。この新しい枠組みは、これまで砂の非排水せん断に主に用いられてきた非関連 Drucker-Prager model（以下、DP model）と自然堆積粘土の負荷挙動の再現に高い能力を発揮する上・下負荷面 Cam-clay model（以下、SYS Cam-clay model）から成る。同様な構成から成るモデルとして、円錐形の降伏曲面の開口部に楕円体の降伏曲面で蓋をしたキャップモデルが存在するが、キャップモデルでは、基本的に現応力が何れか一方の降伏曲面上に存在し、現応力が存在している側の降伏曲面のみが選択的に負荷状態を呈する。これに対し、提案する複合負荷弾塑性構成式では、現応力は常に両モデルの下負荷面上に存在し、両モデルが同時に負荷状態を呈し得る。独立して存在し得る二つの弾塑性構成式が複合的な負荷状態を呈するという点において提案モデルは他のモデルと一線を画する。提案モデルにより、砂と自然堆積粘土の力学挙動が統一的に記述できるようになった。

また、同構成式に誘導異方性を導入することによってこれまで難しいとされてきた砂の液状化時にみられるサイクリックモビリティ挙動が再現可能になった。

さらに、当初の予定通り、中間主応力を提案モデル上で考慮することに成功した。新たな累積損傷指標を考案し、同構成式へ導入することで、安定的に液状化計算を実施することができるようになった。加えて、塑性変形抑制域なる新たな概念を提案することによって、液状化前の有効応力の減少過程や、片振り両振り挙動の違いなどを精緻に再現することが可能になった。

(2) 種々の地盤材料の力学挙動の再現と地盤材料力学の体系化

上記で述べた通り、複合負荷弾塑性構成式の提案により砂と自然堆積粘土の力学挙動が統一的に記述可能になった。このことを示すために、豊浦砂と浦安沖積粘土の要素実験およびその再現シミュレーションを行った。その成果の一端を以下に図で示す。個々に説明は行わないが、提案モデルが砂にも粘土にも高い表現能力を有していることを確認できる。

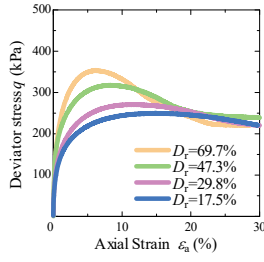


図-1 豊浦砂の排水せん断挙動 (実験)

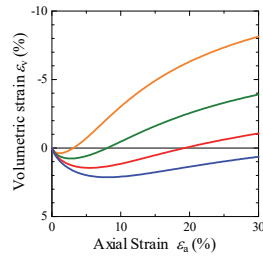
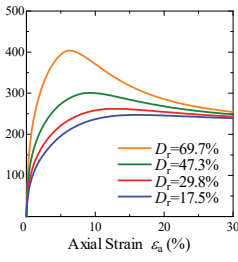
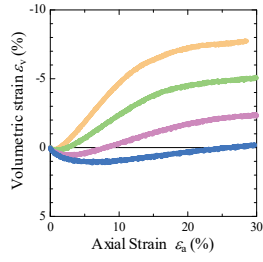


図-2 豊浦砂の排水せん断挙動 (計算)

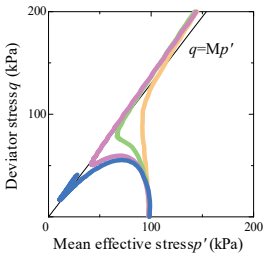
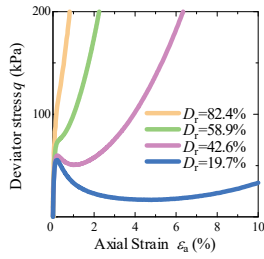


図-3 豊浦砂の非排水せん断挙動 (実験)

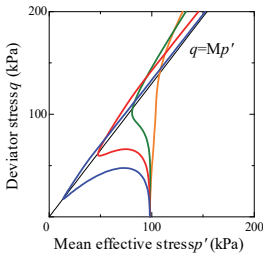
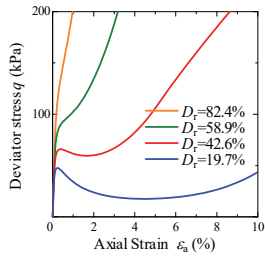


図-4 豊浦砂の非排水せん断挙動 (計算)

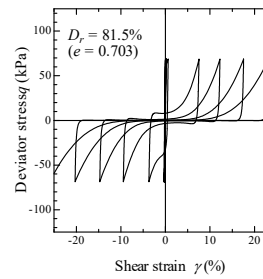
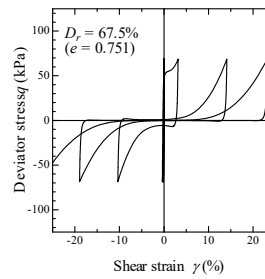
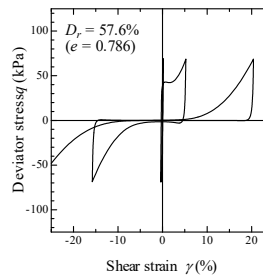
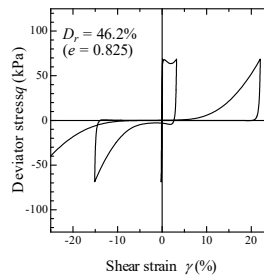
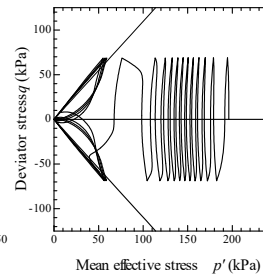
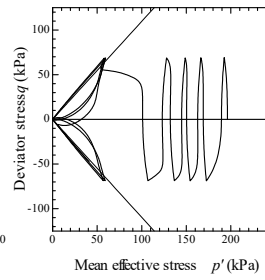
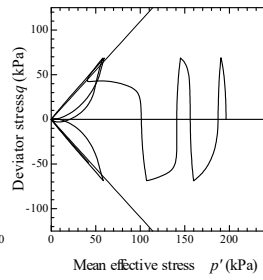
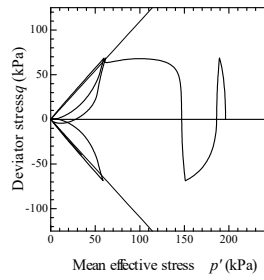


図-5 豊浦砂の繰返し非排水せん断挙動 (計算)

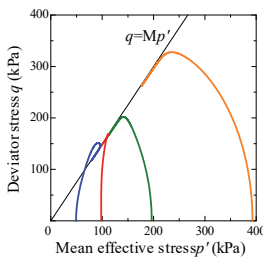
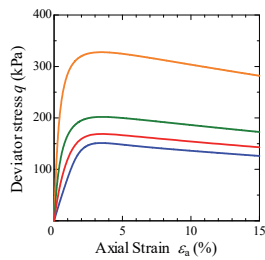
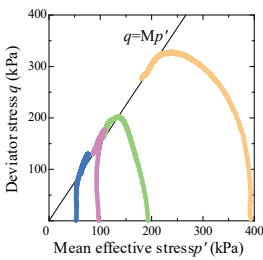
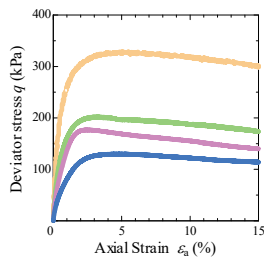


図-6 浦安粘土の非排水せん断挙動 (実験)

図-7 浦安粘土の非排水せん断挙動 (計算)

きれいな砂や自然堆積粘土の他にも、細粒分混じり砂に対しても再現性を確認している。これらの再現結果を通じて、単調載荷時でも、砂は DP model が挙動に積極的に関与するのに対して、粘土は SYS Cam-clay model のみが挙動をほぼ支配することが分かった。また、同じ砂でも、

ゆるい状態にある砂の非排水せん断時に DP model の存在が顕著に表れるのに対して、非排水せん断時は密度にかかわらず SYS Cam-clay model の挙動が支配的であることが分かった。これらに代表されるように、モデル特性を系統的に明らかにし、材料定数を定めるための試験とその決定法を明らかにした。

その他にもセメント改良土に対して実験を行い、その再現性能を確かめた。浸透固化処理土や短繊維補強土など多様な人工地盤材料に対しても適用できる可能性が十分にあることも確認した。

(3) 構成式の高度化が境界値問題に及ぼす効果の把握

複合負荷弾塑性構成式を名古屋大学地盤力学グループで開発した慣性項を考慮した水～土連成解析コード GEOASIA に実装し、実問題への応用を図った。ここでは、その中から、浸透固化処理工法による液状化対策効果について検証した計算例について示す。図-8 に示すような浸透固化処理工法を想定した解析対象に対して地震応答解析を実施した。図-9 に示すせん断ひずみや図-10 に示す平均有効応力からは、浸透固化処理工法によって液状化が抑止され、変形が抑制されていることを見て取れる。また、図-11 の水平加速度応答においては、非対策箇所(地表面(A-3))において、液状化によって地表面に揺れが伝わらなくなる様子やサイクリックモビリティの影響として考えられてきたスパイク上の応答が再現されている。図-12 に示す時間-沈下関係から対策箇所では著しく沈下が抑制されていることを確認できる。このように、同構成式の開発によって、液状化被害予測や対策効果の検討を定量的に行うことが可能になった。

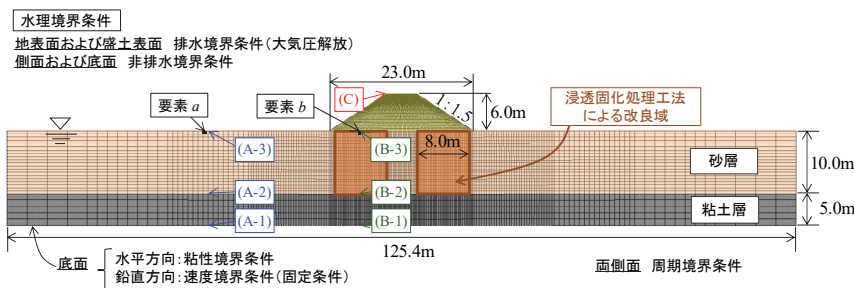


図-8 有限要素メッシュおよび境界条件

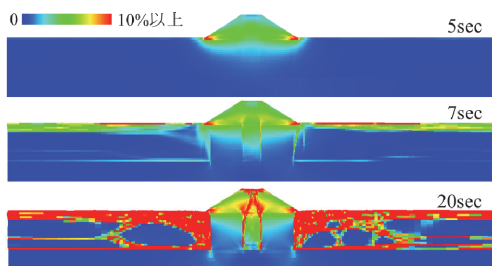


図-9 せん断ひずみ分布

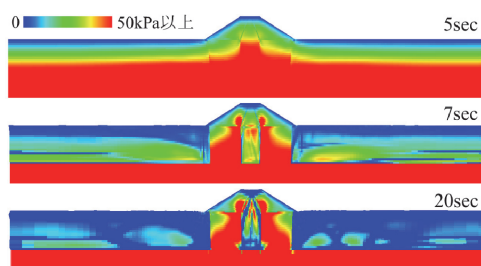


図-10 平均有効応力分布

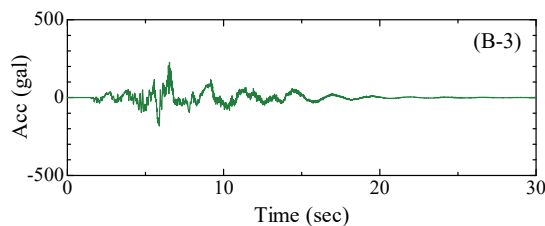
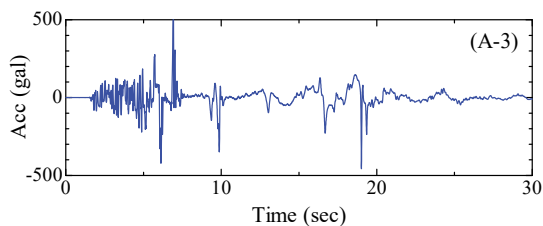


図-11 水平加速度応答

この他にも、別途開発した入力地震波の推定法との組み合わせにより、線形波動理論では解析が困難とされてきた特異な地震観測記録の特徴の再現や基盤上昇波の推定にも成功した。同じく申請者らが開発したマクロエレメント法との組み合わせにより、真空圧密工法による軟弱地盤対策効果や、過剰間隙水圧消散工法による液状化対策効果の検討にも応用し、新たな知見を見出すことに成功した。

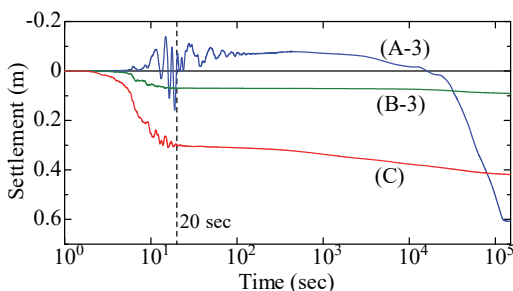


図-12 時間-沈下関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

1. Yamada, S. and Nakano, M. (2019): Basic study on the anisotropy of sand by using hollow cylindrical torsional shear apparatus, *Proc. of 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, accepted. (査読有)
2. Yamada, S. and Nakano, M. (2017): Expansion of SYS Cam-clay model for simulation of mechanical behavior of cement-treated soils, *Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul (Korea), pp.993-996. (査読有)

〔学会発表〕 (計 22 件)

1. 山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕 (2019): 複合負荷弾塑性構成式の提案, 計算工学講演会論文集, Vol. 24, E-04-02.
2. 山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕 (2019): 複合負荷弾塑性構成式への誘導異方性の新たな発展則の導入と妥当性の検証, 第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集, 掲載決定.
3. 廣田康起, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 酒井崇之 (2019): 僅かな粒度変化が砂質土のせん断挙動に及ぼす影響, 第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集, 掲載決定.
4. 大前憲盛, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 酒井崇之 (2019): 水溶性化学肥料を用いた内部浸食の模擬実験, 第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集, 掲載決定.
5. Ganiev Jakhongirbek, Shotaro Yamada, Masaki Nakano, Takayuki Sakai, Toshihiro Noda (2019): Study on the mechanical properties and stiffening effect of short fiber-reinforced geomaterials, 第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集, 掲載決定.
6. Ganiev Jakhongirbek, Shotaro Yamada, Masaki Nakano, Takayuki Sakai, Toshihiro Noda (2019): The stiffening properties of short fiber-reinforced sands with several relative densities, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 掲載決定.
7. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博 (2018): 2008 年岩手・宮城内陸地震時に見られた荒砥沢ダム堤体の強い非線形応答の弾塑性地盤力学による再現と入力地震動の推定, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, pp. 2449-2458.
8. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博 (2018): 複合負荷弾塑性構成式による粘土の力学挙動のシミュレーション, 第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.371-372.
9. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博 (2018): 表層地盤の非線形性および多次元波動伝播の影響を考慮した基盤上昇波推定手法の提案と適用—2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダムの強震観測記録を例に—, 極大地震時における表層地盤の強い非線形現象とその影響に関する研究シンポジウム論文集, pp. 81-86.
10. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博, 阪口崇博 (2018): 水～土連成解析を用いたロックフィルダムの地震応答解析および基盤上昇波の推定, 第 53 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1109-1110.
11. 石井博将, 山田正太郎, 中野正樹, 野田利弘, 浅岡顕, 伊藤暢起 (2018): 複合負荷弾塑性構成式による液状化強度試験のシミュレーション, 第 53 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 483-484.
12. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博 (2018): 水～土連成解析を用いた 2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダムにおける基盤上昇波の推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集, SSS14-21.
13. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕 (2017): 粘性境界条件を適用した水～土連成弾塑性有限変形解析による基盤入射波の推定法の提案, 第 64 回理論応用力学講演会, OS3-01-05.
14. 山田正太郎, 岡田麻希, 中野正樹, 野田利弘 (2017): 中空ねじり試験装置を用いた砂の誘導異方性に関する実験的研究, 第 29 回中部地盤工学シンポジウム, pp.11-17.
15. 山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 福和彩果 (2017): セメント改良土を対象とした円柱供試体のせん断面形成 3 次元シミュレーション, 第 72 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.95-96.
16. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博, 永田優 (2017): 表層地盤の非線形性および

多次元波動伝播の影響を考慮した基盤入射波の推定法の提案, 第52回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1589-1590.

17. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 肥後隼大 (2017): 複合負荷弾塑性構成式を適用した水～土骨格連成有限変形解析による SCP 改良地盤の地震応答解析, 第52回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1545-1546.
18. 山田正太郎, 野田利弘, 高稲敏浩, 浅岡顕 (2016): 複合負荷弾塑性構成式を搭載した水～土骨格有限変形解析コードによる土構造物-地盤系の地震応答解析, 第51回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1673-1674.
19. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕 (2016): 液状化砂地盤のスパイク状加速度応答の数値解析, 日本地震学会 2016 年度秋季大会概要集, S15-21.
20. 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡顕, 澤田義博 (2016): 表層地盤の多次元非線形性を考慮した基盤上昇波推定法, 日本地震学会 2016 年度秋季大会概要集, S15-20.
21. 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕 (2016): 表層地盤の力学的非線形性および複雑な幾何学的形状を考慮した工学的基盤への入射波の推定法の提案, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会概要集, S-SS25-21.
22. Yamada, S., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K. (2016): Proposal of a combined loading elasto-plastic constitutive model, *International Mini Symposium Chubu*, No. 51.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：野田 利弘

ローマ字氏名：(NODA, Toshihiro)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：減災連携研究センター

職名：教授

研究者番号 (8桁)：80262872

研究分担者氏名：山田 正太郎

ローマ字氏名：(YAMADA, Shotaro)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：70346815

研究分担者氏名：酒井 崇之

ローマ字氏名：(SAKAI, Takayuki)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8桁)：20773592