

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360191

研究課題名(和文) 高レベル核廃棄物地層処分に関わる自然バリアの長期安定性の定量的評価手法の確立

研究課題名(英文) Evaluation method for long-term stability of natural barrier for geological repository of high-level nuclear waste

研究代表者

張 鋒 (Feng, ZHANG)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70303691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：堆積軟岩の力学挙動に及ぼす温度・時間依存性の影響を調べ、異なる温度、拘束圧、載荷経路の環境下での三軸圧縮・クリープ試験を系統的に実施し、その力学挙動を把握すると同時に、熱弾粘塑性構成式を提案した。構成式の合理性が要素試験データにより検証された。また、提案する熱弾粘塑性構成を取り入れ、温度・応力・水連成有限変形FEM解析手法(THMA)を開発した。さらに、人工軟岩をモデル地盤材料とした平面ひずみ型モデル試験を実施し、地盤内の温度・応力・変位場の経時変化を計測し、同様の条件で数値解析を行い、実験と解析で得られた結果を比較することにより、高レベル核廃棄物地層処分に關する解析手法の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this report, laboratory element tests on green tuff and man-made rock were systematically conducted to clarify the mechanical behavior of geomaterials related to geological repository problem of HLRW. Based on the test results, thermal-elasto-viscoplastic constitutive models for saturated/unsaturated geomaterials were proposed. Then, a finite element-finite difference scheme (FE-FD) for thermo-hydro-mechanical-air coupling problems with multi-phase field equations is proposed. Meanwhile, model tests on creep behavior of repository tunnel made of the man-made rock were also conducted to investigate the long-term stability problem. While, numerical analyses using the proposed method were simultaneously conducted to simulate the model tests. Furthermore, an in-situ deep geological repository of HLRW with both saturated/unsaturated geomaterials is simulated. It is concluded that the original purpose of the research is achieved.

研究分野：地盤工学

キーワード：高レベル核廃棄物地層処分 熱弾粘塑性構成式 三軸圧縮・クリープ試験 THMA解析 トンネルクリープ破壊 モデル実験

## 1. 研究開始当初の背景

高レベル核廃棄物の地層処分に関する技術は各国で研究されているが、解決されなければならない問題がまだ山積している。特に高レベル核廃棄物の半減衰期が極めて長い(数十年～数万年)せいで、その貯蔵には人工バリアと自然バリアである周辺母岩の熱による長期安定性が厳しく要求される。日本では、地下数百メートル～千メートルの亀裂の少ない花崗岩、堆積軟岩が貯蔵母岩の候補として挙げられている。しかし、人工バリアに関する研究はこれまでに多くなされているが、自然バリアの堆積軟岩に関する研究が比較的少ない。

地層処分技術を実用化するためには、自然バリアの長期安定性を適切に評価する手法を確立しなければならない。今までに国内においては、温度による堆積岩盤の力学挙動に及ぼす影響を調べるための室内要素試験や現場試験はいくつか実施されてきたが、個別問題に着目したものがほとんどであった。また、熱弾粘塑性構成式の提案も古くから研究されているが、軟岩の温度・時間依存性を適切に評価するものが確立されているとは言えない。温度(Thermo)・水(Hydro)・応力(Mechanical)のTHM連成境界値問題の有限要素解析手法に関する研究もなされているものの、地盤材料の構成関係の評価した総合的な研究とは言えない。一方、海外の最先端研究においても、数多くの成果が報告され、原位置温度載荷試験を含め、境界値問題のTHM解析が行われている。しかし、数値解析に用いられる自然バリアである岩盤の構成式は極めてシンプルであり、精度の良い予測にはなれない。

したがって、現在われわれが直面している主な課題は、前述の諸問題を個別に解決するのではなく、要素試験から、構成式の提案、それに基づいた境界値問題の数値解析手法の開発および可能な条件下での実験検証までの系統的な評価手法を確立することである。今まで本研究グループは堆積軟岩の力学特性に関する実験的研究、そのモデル化と岩盤の長期安定性に関する境界値問題の数値解析など、数多くの研究成果を挙げてきたが、それはまだ十分とはいえない。

本研究では、堆積軟岩の力学挙動の温度依存性に関する要素実験を系統的に行い、その結果に基づいた厳密な熱弾粘塑性構成式を提案すると共に、既存の温度・応力・水連成境界値問題(THM)の有限要素解析手法を高度化する。また、解析手法の妥当性を検証するために、境界値問題のモデル試験と温度載荷原位置試験を行い、地層処分に関わる岩盤の長期安定性の定量的な評価手法を確立していく必要がある。

## 2. 研究の目的

研究期間内に達成しようとする具体的な目

標は下記のとおりである：

(a) 堆積軟岩の力学挙動に及ぼす温度・時間依存性の影響を調べるために、異なる温度、拘束圧、載荷経路の環境下での三軸圧縮・クリープ試験を系統的に実施し、その力学挙動を実験研究で正確に把握すると同時に、構成式の提案に結びつく基礎データを蓄積する。また、モデル試験に用いられる人工軟岩の熱力学特性を把握するために、同様な軸圧縮・クリープ試験も実施する。

(b) 堆積軟岩の主な力学特徴、特にひずみ軟化、時間依存性および温度効果を適切に評価する熱弾粘塑性構成式を開発する。この構成式は厳密な非平衡熱力学の諸定理を満足させるだけでなく、用いる材料パラメータも少なく、容易に室内試験で求められる。提案する構成式に基づき、自然バリアの長期安定性に関する既存のTHM連成境界値問題の有限要素解析手法を高度化する。

(c) 室内の平面ひずみ型モデル試験を実施し、ばらつきの少ない人工軟岩をモデル地盤の材料とし、このモデル地盤内の空洞にあらかじめ埋められた熱源からの熱と水平・鉛直2方向のクリープ荷重を与えることにより、地盤内の温度・応力・変位場の経時変化を計測する。同様の条件で数値解析を行い、実験と解析で得られた結果を比較することにより、提案する解析手法の妥当性を検証する。

(d) 提案する飽和・不飽和土熱弾塑性構成式に基づいた地層処分場の境界値問題への適用を実施する。実スケールを想定した堆積軟岩地盤中に設置する地層処分場の予測解析を実施し、不飽和状態のベントナイトの吸水による膨張、飽和度の増加によるサクシジョンの急減、自然バリアである軟岩の繰返し排水・吸水過程での熱力学挙動といった熱・水・空気・力学連成挙動を統一的に評価する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 堆積軟岩及び人工軟岩の力学挙動の要素レベルでの実験的研究

今までの研究で、体積軟岩のひずみ軟化、クリープ破壊、ひずみ速度依存性、応力経路、中間主応力の影響などの力学特性を調べるために、要素試験を実施してきた。温度の影響を調べるために、PCによる温度、応力制御可能な三軸圧縮・クリープ試験機を開発した。この試験機の特徴は自作のPC制御プログラムにより、多種多様な温度・応力載荷履歴を堆積軟岩試料に与えられることである。試験機のスペックは下記のとおりである：温度：0～90；セールの圧：10MPa；軸応力：20MPa；背圧：1MPa。要素試験においては、過去の温度一定の三軸圧縮・クリープ試験に加え、載荷途中に温度を変化させた複雑な載荷経路も実施する。

実験に用いられた堆積軟岩は栃木県宇都

宮市大谷町で採集された、大谷石と呼ばれる多孔質凝灰岩である。大谷石は密度が小さく( $\rho=2.50$ )、間隙比が大きく( $e=0.44$ )、石質がやわらかいため加工がしやすい。試料の力学特性の均一性と加工しやすさから、再現性のある実験に適している。

また、モデル試験に用いられる人工軟岩の熱力学特性を把握するために、同様な軸圧縮・クリープ試験も実施する。

### 3.2 構成式の高度化と THM 連成境界値問題の有限要素解析手法の改良

堆積軟岩の典型的な力学特性として、ひずみ軟化、ひずみ速さ効果、クリープおよび応力緩和といった時間依存性、および温度依存性が挙げられる。研究代表者はこのような力学特性を説明するための弾粘塑性構成式を提案してきた。また、平成 21 年度に新しい熱弾粘塑性構成式も提案した。この構成式は繰り返し正規圧密粘土に適したカムクレールモデルをベースに、関連流れ則を用い、ひずみ軟化現象を下負荷面の概念で表現した。また、時間依存性と温度依存性は密度変化の発展則に時間と温度の影響を定式化することにより表現している。提案する構成式は非平衡熱力学の第一、第二定理を満足している。従来の弾粘塑性モデルに比べ、線膨張率の 1 個のパラメータを増やしただけで、堆積軟岩のひずみ軟化、時間依存性、温度効果を统一的に説明することを試みた。

しかし、このモデルはあくまでも  $p$ - $q$  応力空間で展開するものであり、中間主応力の影響が考慮されていないため、その高度化が求められる。また、既存の実験データが乏しいため、実験と理論値の傾向は一致しているものの、予測精度の向上が必要である。従って、本研究では種々の変換応力を用いて構成式を再定式化し、熱力学の定理を満足することを確認し、要素レベルの力学挙動を高い精度で表現できる構成式の高度化を図る。

一方、研究代表者はひずみ軟化型弾粘塑性構成式に基づいた水・土連成有限変形 FEM 解析手法を開発し、実在の老朽化トンネルの長期安定性に関する現場検証とトンネルクリープ破壊のモデル試験により、解析手法の有効性と数値計算の精度を検証してきた。さらに、老朽化トンネル破損の最適対策工の選定において、一般性を有する代表地盤における様々な対策工パターンを変えた数値実験も実施し、トンネル長期安定性の評価手法の確立を目指してきた。

また、地層処分に関する温度・応力場の境界値問題においても、提案する熱弾粘塑性構成に基づき、 $T$ (温度)・ $M$ (応力)連成境界値問題の有限要素解析手法を開発し、地層処分の温度・応力の経時変化を求め、温度上昇による岩盤のひずみ発生量が破壊ひずみ量を超える可能性について調べた。本研究では、今までの研究で開発してきた THM 連成境界値問題の FEM 解析手法に、改良される熱弾粘

塑性構成を取り入れ、温度・応力・水連成有限変形 FEM 解析手法を高度化する。その有効性は後述する地下空洞の温度・クリープモデル実験より検証する。

### 3.3 地層処分を想定した地下空洞の温度・クリープモデル実験による評価手法の検証

温度・クリープモデル実験に使われる地盤材料の人工軟岩は、珪藻土を石膏で固化させた材料である。三軸圧縮試験および三軸クリープ試験より、その力学特性が堆積軟岩に似ていることが今までの実験で確認された。

本件では、地下空洞模型実験装置を新たに制作する。空洞内に、人工バリア材のベントナイトを充填し、温度制御が可能な熱源も埋め込む。載荷枠は H 鋼で作成し、試験体上部に鉄板を敷設して、その上部に油圧ジャッキを用いて載荷する。側面からは載荷板を介してフラットジャッキで一定の拘束圧を載荷する。試験体と載荷板の境界は、テフロンシートとシリコングリスを挿入して摩擦低減を図る。また、3 成分ひずみゲージおよび熱電対も多数設置する。また、モデル地盤の側面に熱の逸散を防ぐためのシートも貼り付ける。

トンネル模型実験の載荷パターンは、試験体が破壊するまで載荷を行う破壊実験と載荷応力を破壊応力の 80% までとしたクリープ実験の 2 種類とする。また、クリープ実験においては、熱源の発熱強度を調整して温度効果を確認する。このような地層処分地下空洞を模擬したトンネル温度・クリープ破壊のモデル実験を実施することにより、同様な地盤条件下で、再現性の良い温度変化の影響を定量的に把握し、FEM 解析による評価手法の精度を確かめる。

### 3.4 提案する解析手法の高レベル核廃棄物地層処分場の長期挙動の予測

提案する熱土水空気 (THMA) 有限要素連成解析手法を用いて、境界値問題である高レベル核廃棄物地層処分場の長期熱力学挙動を、実スケールにて予測する。

実スケールにおける高レベル放射性廃棄物処分施設の熱土水空気連成解析では、高レベル放射性廃棄物が放出する熱の影響を模擬するために、トンネル壁面の内側の全要素を内部熱源として設定する。ただし、実際に高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合、廃棄物の体積が占める割合は、トンネルの体積に対して 1.6% 程度であると考えられているため、トンネル内側の内部熱源の熱量は、トンネルの体積に相当する廃棄物の放出する熱量の 1.6% の値に設定する。地層処分を実施する前に地上である期間において自然放射する熱減衰を行わない場合 (Case1) と、熱減衰を行う場合 (Case2) の 2 ケースを実施する。さらに、熱源の周りを不飽和状態のべ

ントナイトで囲い込むように設置した。ベントナイトの初期条件は、飽和度を 86%、サクシオンを 62MPa に設定した。また、解析で用いた水分特性曲線と飽和度-透水係数関係をそれぞれ過去の研究で得られた特性を取り入れた。また、空気圧の変動がないとも仮定した。これらの条件下で 2D 及び 3D 有限要素解析を行う。

#### 4. 研究成果

##### 堆積軟岩を用いた三軸圧縮試験

三軸圧縮試験では、設定した有効拘束圧 0.49、0.98MPa、1.47MPa において、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化とダイレイタンス特性が確認され、有効拘束圧が上昇するにつれて、最大軸差応力と残留応力が上昇し、体積膨張量が低下する傾向が確認された。温度依存性に関しては、各ブロックで傾向が異なり、全てのブロックにおいて「温度が上昇するにつれて、ピーク強度が低下する」傾向は、明確には確認されなかった。

##### 堆積軟岩を用いた三軸クリープ試験

三軸クリープ試験では、クリープ応力の値を各拘束圧における最大軸差応力の 95% に設定したところ、堆積軟岩特有の力学挙動であるクリープ挙動が確認され、有効拘束圧が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短縮する傾向が確認された。温度依存性に関しては、各ブロックで傾向が異なり、全てのブロックで「温度が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短縮する」傾向は、明確には確認されなかった。これらの結果は、堆積軟岩の熱水変成作用に起因する鉱物の構造変化がもたらした可能性があり、今後は走査型電子顕微鏡 SEM による内部構造の検討や、温度環境を変化させて試験条件を増やすことなどにより、さらなる実験的検証の必要性を示唆している。

##### 人工軟岩を用いた三軸圧縮試験

三軸圧縮試験では有効拘束圧 0.1、0.3MPa において実験を行った。有効拘束圧 0.1MPa の場合、本研究室で用いる人工軟岩でも堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化が確認された。0.3MPa に上昇させるとひずみ軟化からひずみ硬化に転じた。有効拘束圧が上昇するとひずみ硬化に転じる特徴は既往の研究とも同様の傾向である。また、温度依存性に関して確認するため、有効拘束圧 0.1、0.3MPa において 20 と 60 での試験を実施した。その結果、温度をあげると軟化及び硬化の挙動は変わらないものの、強度が下がるという傾向が確認できた。以上のように三軸試験を通して、応力ひずみ関係においては拘束圧依存性、温度依存性が確認できた。しかし体積変化については堆積軟岩で見られるダイレイタンス特性、つまり体積膨

張が確認できず、圧縮しかなかった。つまり有効拘束圧 0.1MPa においてはひずみ軟化しながら体積圧縮しているということである。この挙動は典型的な、構造を持った試料のものであると言える。

##### 人工軟岩を用いた三軸クリープ試験

三軸クリープ試験では、20 における有効拘束圧 0.1MPa の 1 ケースのみ実施した。当初はクリープ応力の値を最大軸差応力の 80% に設定したところクリープ挙動が確認できなかったため 90% に設定したところ、本研究室の人工軟岩でも堆積軟岩特有の力学挙動であるクリープ挙動が確認された。温度依存性については確認できていないため、今後も試験を実施し、データを集める必要がある。

##### 提案する軟岩熱弾粘塑性構成式の堆積軟岩への適用

本研究において実施した堆積軟岩を用いた三軸試験結果と、提案する熱弾粘塑性構成式を用いた要素シミュレーションの解析結果を比較することにより、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化、ダイレイタンス特性、クリープ挙動を表現できることが確認された。また、温度に関するパラメータを加えたことにより、「温度が上昇するにつれて、ピーク強度が低下する」傾向や、「温度が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短縮する」傾向を定性的に表現できることが確認された。

##### 提案する軟岩熱弾粘塑性構成式の人工軟岩への適用

本研究において実施した、人工軟岩を用いた三軸試験結果と、提案する熱弾粘塑性構成式を用いた要素シミュレーションの解析結果を比較することにより、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化及びクリープ挙動を定性的に表現できることが確認された。また、温度に関するパラメータを加えたことにより、温度が上昇するにつれて、ピーク強度が低下する傾向を定性的に表現できることが確認された。しかし本構成式は試料の構造を加味しないため、どうしても体積膨張が発生してしまうことが課題であるといえる。

##### 境界値問題への適用 - 人工軟岩を用いたトンネル模型試験 -

上記三軸試験に使われる人工軟岩と同じ材料を用いて既往の研究を参考にしたトンネル模型試験を実施した。実験を実施するために、あらたに温度制御可能なトンネル模型載荷装置を作製した。ただし、載荷装置を稼働させるのに 2 年を要したため、予定していた加温載荷は実現できなかった。残りの試験は報告書を提出後引き続き実施していく。本研究期間内で実施したのは常温の破壊試

験のみである。試験結果よりトンネル壁面の天端は壁面収縮方向、インバートは拡大方向へと移動する傾向が確認できた。この傾向は既往の研究のものとすべて一致する。また、トンネル周辺のひずみを測定したところ斜め上、斜め下のひずみが大きく発達していた。

#### 人工軟岩を用いたトンネル模型試験の数値シミュレーション

本研究で実施したトンネル模型の破壊試験の再現を、提案する軟岩熱弾粘塑性構成式に基づく有限要素解析により試みた。載荷が進行するにつれて発達するひずみ分布は、試験結果と一致していることが確認された。また、破壊時の応力の大きさも実験の値に近く、定性的ではあるが、再現性が取れたと言える結果であった。このことより現段階では提案する数値解析が境界値問題への応用は適宜であると考えられる。解析に用いられる材料パラメータはすべて要素試験で得られた値であり、その値は一切変えなく計算が行われた。解析結果は実験が実施する前にすでに得ており、一種のランク A の解析とも言える。

#### 提案する飽和・不飽和土熱弾塑性構成式の地層処分場の境界値問題への適用

実スケールを想定した堆積軟岩地盤中に設置する地層処分場の予測解析も実施した。要素シミュレーションによって得られたパラメータを用いて、提案する飽和・不飽和土熱弾塑性構成式に基づいた THMA 解析により、飽和軟岩地盤と人工バリアである不飽和ベントナイトとの地下水のマイグレーション、熱の移動、変形および地盤飽和度の増減を定量的に評価した。特に、不飽和状態のベントナイトの吸水による膨張、飽和度の増加によるサクシンの急減、軟岩の繰返し排水・吸水過程での力学挙動、といった熱・水・空気・力学連成挙動を同時に評価できることは確認された。

#### 最終結論：

下記に示す当初挙げられていた目標はほぼ達成できたと言える：

(a) 堆積軟岩の力学挙動に及ぼす温度・時間依存性の影響を調べ、異なる温度、拘束圧、載荷経路の環境下での三軸圧縮・クリープ試験を系統的に実施し、その力学挙動を実験研究で正確に把握すると同時に、構成式の提案に結びつく基礎データを蓄積する。

(b) 堆積軟岩の主な力学特徴、特にひずみ軟化、時間依存性および温度効果を適切に評価する熱弾粘塑性構成式を開発する。提案する構成式に基づき、自然バリアの長期安定性に関する THMA 連成境界値問題の有限要素解析手法を開発する。

(c) 室内の平面ひずみ型トンネルモデル試験を実施し、ばらつきのない人工軟岩をモデル地盤の材料とし、水平・鉛直 2 方向

の荷重を与えることにより、地盤内の温度・応力・変位場の経時変化を計測する。同様の条件で数値解析を行い、実験と解析で得られた結果を比較することにより、提案する解析手法の妥当性を検証する。自然バリアの長期安定性に関する THMA 連成境界値問題の有限要素解析手法を高度化する。

#### 5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 12 件)

1. S. Zhang, W. Leng, F. Zhang and Y. L. Xiong, 2012, A simple thermo-elastoplastic model for geomaterials. *International Journal of Plasticity*, Vol.34, 93-113.
2. H. H. Zhu, B. Ye, Y. C. Cai and F. Zhang, 2012, An elasto-viscoplastic model for soft rock around tunnels considering overconsolidation and structure effects, *Computers and Geotechnics*, Vol.50, 6-16.
3. Y. L. Xiong, X. H. Bao and F. Zhang, 2013, Soil-water-air coupling finite element analysis of model test on slope failure in unsaturated soil, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS&AGSSEA*, Vol.44, No.2, 1-8.
4. Y. K. Fu, M. Iwata, W. Q. Ding, F. Zhang and A. Yashima, 2012, An elastoplastic model for soft sedimentary rock considering inherent anisotropy and confining-stress dependency, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.4, 575-589.
5. X. H. Bao a, G. L. Ye, B. Ye, Y. Sago, F. Zhang, 2014, Seismic performance of SSPQ retaining wall -Centrifuge model tests and numerical evaluation, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.61-62, 63-82, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.01.019>.
6. Y. L. Xiong, S. Zhang, G. L. Ye, F. Zhang, 2014, Modification of thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock and its application to THM analysis on heating tests, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No.2,176-196, DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/j.sandf.2014.02.009>.
7. Y. L. Xiong, X. H. Bao, B. Ye, and F. Zhang, 2014, Soil-water-air coupling finite element analysis on slope failure in unsaturated ground, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No.3, 377-395, <http://dx.doi.org/10.1061/j.sandf.2014.04.19>.
8. Y. L. Xiong, S. Zhang, B. Ye, Y. Q. Li and F. Zhang, 2014, Thermo-Hydraulic-Mechanical Coupling Analysis on Heating Test in Unsaturated Ground, *Geoenvironmental Engineering, ASCE Geotechnical Special Publication No.241*, 212-221.
9. F. Zhang, Y. L. Xiong, S. Zhang, and B. Ye, 2014, Thermo-hydraulic-mechanical-air

- coupling finite element method and its application to multi-phase problems, *International Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6, 77-98, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.010>.
10. Y. L. Xiong, F. Zhang and Y. Q. Li, 2014, Numerical study on thermo-hydro-mechanical-air coupling phenomena in unsaturated ground, *Proc. International Conference 14IACMAG, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, Oka et al. (eds), © 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, 1415-1420.
  11. G.L. Ye; B. Ye and F. Zhang, 2014, Strength and Dilatancy of Overconsolidated Clays in Drained True Triaxial Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 140, No. 4, 2014, CID: 06013006, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001060](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001060)
  12. Y. Huang, H. L. Cheng, T. Osada, A. Hosoya, and F. Zhang, 2014, Mechanical Behavior of Clean Sand at Low Confining Pressure: Verification with Element and Model Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 06015005, 1-6, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001330](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001330).

[学会発表](計7件)

1. 蔭山星・栗本悠平・西村友宏・熊勇林・張鋒, 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化, 第48回地盤工学研究発表会講演集, 48巻, 2013, CR-ROM, No.303.
2. 栗本悠平・熊勇林・張鋒, 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化とその境界値問題への適用, 第48回地盤工学研究発表会講演集, 48巻, 2013, CR-ROM, No.304.
3. 西村友宏・神部智也・栗本悠平・蔭山星・張鋒, 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化とその境界値問題への適用, 平成25年度土木全国大会第68回年次学術講演会, 68巻, 2013, CR-ROM, No.III-318.
4. 蔭山星・熊勇林・山田貴大・張鋒, 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化, 第49回地盤工学研究発表会講演集, 49巻, 2014, CR-ROM, No.243.
5. 栗本悠平・熊勇林・張鋒, 等価応力および飽和度を状態変数として定式化した飽和・不飽和土の熱弾塑性構成式, 日本材料学会東海支部第9回学術講演会講演論文集, 2015, No.216.
6. 蔭山星・山田貴大・井谷優介・神部智也・邱曉燁・張鋒, 堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化と多相系有限要素解析, 第50回地盤工学研究発表会講演集, 50巻, 2015, CR-ROM.
7. 山田貴大・蔭山星・神部智也・木下貴道・栗本悠平・張鋒, 堆積軟岩を自然バリアとする高レ

ベル放射性廃棄物の地層処分に關する実験的および解析的研究, 第27回中部地盤工学シンポジウム論文集, 27巻, 2015.

[その他]

ホームページ:

<http://www.cm.nitech.ac.jp/cho/download/report.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

張鋒 (Zhang Feng)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 70303691

(2) 研究分担者

(a): 村山・モハメド・シャヒン (Hossain Mohamed Shahin)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00516495

(b): 小山倫史 (Koyama Tomofumi)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号: 20467450

(c): 鈴木誠 (Suzuki Makoto)

清水建設(株)・技術研究所・研究員

研究者番号: 90416818

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: