

	ホウ ホウ
氏 名	PENG Peng
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1255号
学位授与の日付	2022年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Research on mechanical behavior of geomaterials related to geological repository under different acidic environment and temperature (異なる温度・化学環境下における地層処分に関わる地盤材料の力学特性に関する研究)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 前田 健一 教授 野中 哲也 教授 中野 正樹 (名古屋大学)

## 論文内容の要旨

Deep geological repository has been adopted for disposal of high-level radioactive wastes (HLW) in Japan. In considering the problem of construction and long-term operation of a deep geological repository, it will work under a coupled thermo-chemical-mechanical condition, due to the heat emitting of the nuclear waste canisters, infiltration of groundwater, swelling of bentonite blocks and mechanical loading of surrounding rock formations. The thermo-chemical mechanical behavior under different acidic environment and temperature of not only the artificial barrier using bentonite-based material, but also of the natural barrier, most of which is sedimentary rock or granite, is definitely important to be investigated both in laboratory tests and modelling.

Firstly, since the lack of verification of geological disposal in these problems in field scope, cement-treated Masado (CTM), as a common cement-mixed geomaterial usually used in ground improvement is focused in this study, as it is despite to face similar thermo-chemical problems of the risk of exposure to environmental changes in acid

conditions and temperature. The influence of the acidic environment and temperature on the mechanical behavior of CTM was systematically investigated by element tests and constitutive modeling. Element tests, including uniaxial compression tests, triaxial compression tests and triaxial creep tests, were conducted under different pH values, temperatures and confining pressures. And all the mechanically tested specimens were also investigated with X-ray fluorescence spectrometry (XRF) analysis to determine the relation between the macromechanical behavior and the microstructure of CTM. Finally, an existing thermoelasto-viscoplastic model was modified to consider the influence of the acidic environment, temperature and confining pressure. In the modified model, substituting for the material parameter representing the stress ratio at the critical state (SRCS) that has a constant value in the original model, four new material parameters are introduced, which can be determined from triaxial compression tests and XRF analysis. By comparing the tested and simulated results of triaxial compression and creep tests, the accuracy of the modified model is confirmed.

Secondly, to verify the numerical method proposed in the works (Zhang & Kurimoto, 2016; Zhang et al., 2019) in estimating the mechanical behaviors of soft rock, heating and loading tests on cave model made of man-made rock were firstly conducted to investigate the basic features of the thermo-mechanical behavior of geological repositories at model scale. Additionally, 2D/3D FEM analyses on the model tests were conducted to simulate the model tests. By comparing the calculated results with the test results, the numerical results can identify various main features of the loading and creep tests, i.e., typical compression failure and thermal dependency.

Thirdly, the tested specimens in triaxial test were investigated with further XRF analysis to determine the distribution of calcium ions. Additionally, 3D finite element analyses were conducted to simulate triaxial tests on CTM under different conditions as a boundary value problem considering the uneven distribution of  $Ca$  ions, using the proposed thermoelasto-viscoplastic model considering the influence of the acidic environment, temperature and confining pressure. By comparing the calculated results with the test results, the numerical method used in this research offers a satisfactory accuracy to describe the mechanical behavior of CTM in triaxial test under different conditions. The influence of  $Ca$  ion distribution on the mechanical behavior of CTM was

investigated. In addition, a strain localization within the specimen can be observed.

Fourthly, in this chapter, a new method for preparing the saturated bentonite specimen on normally consolidated state was proposed firstly, based on one-dimensional (1D) compression tests. A series of triaxial compression tests were conducted under various conditions of confining pressure, which was carefully kept the same as compression stress obtained in 1D compression tests. The test results shows a typical mechanical behavior of normally consolidated soil, that relationship between the effective stress ratio and the axial strain is identical and stress paths eventually reach the same critical state line (CSL) under different confining pressure. Therefore, it is shown that the newly proposed specimen preparing method is suitable and can significantly shorten the preparation time than past studies.

According to the abovementioned discussion, the research on mechanical behavior of geomaterials related to geological repository under different acidic environment and temperature and its modeling is comprehensively conducted. It can provide a reference for the practical engineering problems about long-term stability of CTM and bentonite and promote a new theoretical study method for studying the deterioration mechanism of geomaterials related to thermo-chemical problems.

## 論文審査結果の要旨

日本を含め世界において原子力発電で生じた高レベル放射性廃棄物 (HLW) の処分方法について地層処分が最適と考えられている。地層処分施設の建設と長期運用において、放射性廃棄物の放熱、地下水の浸透、緩衝材としてベントナイト系材料の膨潤及び周囲岩盤の変形等による熱・化学・力学的 (T-C-M) 相互作用でその長期安定性が懸念されている。そこで、異なる温度・化学環境下における地層処分システムの人工バリアに使用されたベントナイト系、まだ自然バリアである堆積岩または花崗岩の力学挙動を室内実験と数値シミュレーションの両面から検討することが必要である。地層処分に関わる地盤材料の力学特性に関する原位置試験による検証は望ましいが、実施の難しさ、温度・化学環境の影響が数万年以上掛かることから、ほとんど実施されていない。したがって、本論文では異なる温度・化学環境下における地層処分に関わる地盤材料の力学特性の研究を目的とし、合理的である室内実験と模型実験を実施した。さらに、これらの力学挙動を表現できる構成モデルを提案した。以下のような結果が得られた。

1) 地質処分に関わる地盤材料の T-C-M 問題に関する現場検証が不足しているため、同様の T-C-M 問題を直面している地盤改良で通常使用されるセメント改良マサド (CTM) を対象に、系統的に要素試験とそのモデル化の提案を実施した。まず、異なる酸、温度環境に曝露した CTM に対して、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、三軸クリープ試験を含む一連の要素試験を実施した。また、CTM の巨視的な力学挙動と微細構造との関係を検討するため、蛍光 X 線分析 (XRF) も行った。その結果、酸と温度環境の影響によるカルシウムイオンの浸出が CTM の強度低下に関連していることが分かった。また、回帰分析により状態変数とした限界状態応力比 (SRCS), カルシウムイオン相対濃度、温度、拘束圧の間に明確な関係式が見出され、構成モデルの修正に基礎データを提供することができた。そして、SRCS に影響を及ぼすそれらの要因を新しい材料パラメーターと考慮し、既存の密度・構造効果を考慮する軟岩の熱弾粘塑性モデルを修正し、要素シミュレーションで提案する構成モデルの妥当性を検証した。三軸圧縮およびクリープ試験結果とシミュレーション結果を比較することにより、修正したモデルの精度が確認された。

2) Zhang&Kurimoto(2016), Zhang ら(2019)が提案した軟岩の熱・力学連成 FEM 数値解析手法を用いて異なる温度環境下でのトンネル模型載荷試験をシミュレーションした。密度・構造の力学挙動および温度依存性を再現できる人工軟岩をモデル地盤材料とし、異なる温度環境下でトンネル模型試験を 2 方向載荷してその挙動をしらべた。このトンネル模型試験を用いて、2D / 3D の FEM 数値解析を行い、トンネル模型試験結果と比較することにより、提案した熱・力学連成 FEM 数値解析手法の適用性を検証した。人工軟岩の主な特徴とした圧縮破壊および温度依存性などをうまく再現できることが確認された。

3) 異なる酸、温度環境に曝露した CTM のカルシウムイオンの溶脱は不均一で分布すると予想できるため、CTM 供試体内部のカルシウムイオン相対濃度分布を XRF 分析で調べた。さらに、カルシウムイオンの不均一な分布を境界値問題として考慮し、異なる条件下での CTM の三軸圧縮試験に対して、提案した酸、温度、および拘束圧の影響を考慮した熱弾粘塑性モデルに基づく FEM 解析を実施した。FEM 解析結果と試験結果を比較すると、提案モデルには、異なる酸・温度環境に影響された CTM の力学挙動を十分な精度で再現出来ることが確認された。

4) 一次元 (1D) 静的締固め方法を用いて正規圧密飽和ベントナイト供試体を作成する新しい手法を提案した。また、1D 静的締固め方法で得られた供試体を用いて、静的締固め応力と同様な拘束圧条件下で三軸非排水圧縮試験を実施した。その結果、新しい方法で作られたベントナイト試料には正規圧密土の典型的な力学挙動を示した。まだ、拘束圧に関わらず、有効応力比と軸ひずみの関係は一意的となっており、有効応力経路も同じ臨界状態線 (CSL) に達していることが確認され、新たに提案された供試体作成方法の有効性が確認され、従来の方法に比べ作成時間が大幅に短縮できた。

本研究では、要素試験、模型実験及び数値シミュレーションを併用し、異なる温度・化学環境下における地層処分に関わる地盤材料の力学特性に関する研究を総合的に実施した。以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は学術的貢献だけでなく工学問題への適用にも重要な基礎データを提供することができ、り、博士 (工学) 論文として価値は十分にあるものと認める。