

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04259

研究課題名(和文)高レベル放射性廃棄物処分人工バリアの安全予測に要する解析因子の定量化

研究課題名(英文) Establish quantitative parameters in order to prediction analysis for high level radioactive waste disposal barrier system

研究代表者

西村 友良 (Nishimura, Tomoyoshi)

足利大学・工学部・教授

研究者番号：00237736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人工バリアを構成するベントナイトおよび砂混合ベントナイトのThermal (T)-Hydro (H)-Mechanical (M)-Chemical (C)挙動から不飽和・飽和ベントナイトの品質性能低下、長期安定性低下が明らかである。温度変化・浸透水のイオン濃度との定量的関係は見出されていない。安全性予測には、熱物性、気液混合二相流物性、力学物性、浸透物性、変形特性などが必須であることから、系統立てた室内THMC挙動試験は見当たらないことから、力学挙動変化、変形特性、高温作用によるガス圧の発生を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は高レベル放射性廃棄物地下処分施設の人工バリア材・ベントナイトの不飽和状態と飽和状態のThermal (T)-Hydro (H)-Mechanical (M)-Chemical (C)挙動を数種の試験装置の開発を伴い室内試験を実施し明らかにした。熱的作用、浸透作用、化学的作用によるベントナイト砂混合体への力学特性、変形特性、ガス圧発生などに関する解析パラメータ設定に着目した。THMC挙動は連成挙動であることから明確な解析パラメータ抽出に至ることは困難であった。しかし、室内試験方法の手順などの貴重な情報を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Radioactive waste disposal consists of bentonite sand mixture which is placed deep underground that is estimated 500 m. The bentonites have high swelling properties due to hydration and significant low permeability. The high swelling performance and low hydro conductivity are effort to prevent the influence from disposal. Many reports and many references have focused on Thermal-hydraulic-mechanical-chemical properties that is couple properties, and underground testing, large scale test, experimental test is improve some properties. The mathematical models based on above testing data sets have some advantage This study conducted out variation tests to appear the thermal-hydraulic-mechanical-chemical properties using sodium bentonite. The develop equipment are following; Oedometer type apparatus-imposed vapor pressure technique, seepage measurement apparatus possible to correspond salinity water, thermal triaxial compression test apparatus, gas pressure measurement apparatus.

研究分野：環境地盤

キーワード：ベントナイト 膨張 熱 塩水 せん断強さ クリープ 不飽和土 ガス圧

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射性廃棄物地層処分場の超長期間にわたる安全の確保は必須であり、放射性核種の移行抑制実現は後世の人類存続安定確保につながる重要課題である。処分場閉鎖後人工バリアには岩盤からの不確定なイオン濃度を有する地下水侵入値による膨張変形と廃棄体の核種崩壊熱(100以上)による変質(粘土化)・乾燥劣化などが同時に起こる。また金属の嫌気性腐食によるガス圧発生とガス移行も含めると人工バリアは過渡的な期間中、閉鎖直後の性能が大きく変質し危険側に移行する。人工バリアの Thermal (T: 温度) - Hydro (H: 膨潤) - Mechanical (M: 力学) - Chemical (C: 化学) の現象解明の研究は限定的であり、系統的な検証が必要である。

2. 研究の目的

本研究は高レベル放射性廃棄物施設の不飽和状態の人工バリアが塩化物イオンを含む浸透水による再冠水と廃棄体核種崩壊熱による安全性低下(危険性側の高まり)について検証する。THMC 挙動の予測モデルに必要な解析パラメータを抽出し、既存のパラメータの妥当性を評価し、長期安全概念モデルに改善点を指摘することである。具体的には、化学的影響を考慮した高温を受けたベントナイトの膨潤変形性および難透水性の性能劣化の検証。高温を受けた不飽和ベントナイトのガス圧の影響。さらに不飽和・飽和ベントナイトの強度・変形特性の検証である。

3. 研究の方法

3.1 試料

本研究において主な試料は、クニゲル V1 である。他にクニボンド、ベントナイト GX も使用した。ベントナイトに混合する砂として、飯豊町産の珪砂を用いた。乾燥質量混合比は 7:3 を中心とした。試料の含水比を 17% 程度に調整した後、含水比分布の均一性を確保する目的で 24 時間以上養生した。試料を剛性モールド内で油圧ジャッキによって静的に締固めた。剛性モールド内で静的締固めに締固めた供試体乾燥密度 1.600 Mg/m^3 を主体的に最小乾燥密度として 1.000 Mg/m^3 を条件とした。

3.2 加熱式膨潤・膨張測定装置(図 1)

加熱式水槽に二重セル構造の膨潤圧測定容器を挿入する構造である。加熱式水槽内にシリコンオイルが吸水されている。シリコンオイルに膨潤圧測定容器の下部から 70% が水没する位置で試験が行われた。また膨潤圧測定容器には荷重計、吸排水の為の配管、吸排水量測定の為の二重管ピュレットが接続されている。

3.3 加熱式三軸圧縮試験装置

加熱式三軸圧縮試験装置はステンレス製のセルの三軸圧縮試験装置に加熱水をセル内に循環する構造である。供試体寸法は直径 38mm、高さ 76mm である。セル圧供給は無給油式のコンプレッサーの他、1.0MPa 以上のセル圧供給時には窒素ガスポンプを用いる。

3.4 サクション制御併用変形測定装置

サクション制御併用変形測定装置は膨張測定装置にサクション制御方法の一つである蒸気圧法の適用を取り入れた構成である。膨張測定装置の上部に湿度制御した空気を供給・排気するシステムである。サクション制御を受けた供試体の変形量を測定する。

3.5 加熱式ガス圧測定装置(図 2)

剛性ステンレス製モールドの側面 2 箇所に間隙圧計を取付た構造である。使用した間隙圧計は測定時の許容温度が 100 を上回る性能を有する。供試体を納めたモールドを温度調整可能な乾燥装置に置き、試験条件に合わせて加熱し、加熱時に発生するガス圧を測定する。

3.6 塩水供給可能膨潤圧測定装置

塩水供給可能膨潤圧測定装置は膨張測定装置に連結・接続されている配管の接合継ぎ手や吸排水量を計測する二重管ピュレットならびに差圧計などシステム全体を塩水による腐食を防ぐため材質改善している。

3.7 供試体境界面サクション制御可能装置

供試体端面の境界面におけるサクション制御を目的とした装置であり、境界面のサクションを一定維持することでモールド内に納められた供試体全体の水分分布を確認することが出来る。

3.8 試験方法

2021年度

化学的影響を含む高温作用を受けたベントナイトの膨潤変形性および難透水性性能劣化の検証の実施(THC 挙動の確認)。塩化イオンを含む溶液の浸透によるベントナイト砂混合体の膨潤圧および透水係数について測定。

2022年度

高温作用を受けた不飽和ベントナイト中のガス圧や飽和ベントナイト中の過剰間隙水圧発生の測定。塩化化合物耐腐食ステンレス材(SUS316)モールドに耐熱間隙圧計を装着する。イオン交換水(蒸留水)・塩水を浸透させ、不飽和から飽和化へ移行。高温時のベントナイト砂混合体の間隙圧測定を行う。

2023年度 高温作用を与えたベントナイト砂混合体の変形、強度特性の検証。供試体にはサクシオン制御を施し、高温作用時の吸排水量などの測定を実施。不飽和・飽和状態のパラメータを室内試験から取得を検討。

4. 研究成果

2021年度

ベントナイトと砂の混合供試体の膨潤圧・膨潤変形および透水係数について検証した。比較検証のために吸水溶液としてイオン交換水を用いた。供試体はベントナイトと珪砂混合体を用いた。研究室保有の二重セル構造の膨張圧・膨張性測定装置において塩化物イオン溶液を使用することで装置全体の化学反応腐食による計測障害防止の対策を施した。得られた実験結果では供試体乾燥密度、温度・イオン濃度の影響を定量的に示す結果には至らなかった。

2022年度

特殊モールド内の不飽和状態・飽和状態の供試体を完全な密閉状態で等方的な高温加熱を与えた。予備試験の段階で内径38mm、高さ76mmの密閉空間内に発生する温度上昇と内圧の校正を取得した。また温度増減時の間隙圧計の性能を把握した。3種類のベントナイトを試験対象とし、非排気・非排水状態での高温環境下での間隙圧(間隙水圧含む)を測定した。間隙乾燥密度や砂混合比を変数として間隙圧を求めた。加熱後、不飽和供試体は収縮を引き起こし、小峯らが提案している有効拘束力と飽和膨潤ひずみの関係式と整合性は見られず、温度効果を導入した検討の必要性が課題である。

2023年度

一軸圧縮試験・三軸圧縮試験を行いベントナイト砂混合体のパラメータを抽出した。ベントナイトは難透水性・高保水性(含水比の変化が高いサクシオン領域で確認される状態)を有する特性からサクシオン制御は蒸気圧法を採用した。化学的作用として異なる塩水濃度の塩水による飽和供試体を準備した。また高温作用を与える場合はひずみ拘束の違いにも着目した。加熱作用を受けることで供試体中に工学的性質を支配する亀裂・クラックが成長し、CODE BRIGHTの支配方程式に導入可能なパラメータの抽出は限定的であった。

5. まとめ

本研究は高レベル放射性廃棄物施設の不飽和状態の人工バリアが塩化物イオンを含む浸透水による再冠水と廃棄体核種崩壊熱による安全性低下(危険性側の高まり)について検証することを背景に数種類の試験装置の開発を積極的に実施した。同時に本研究が取り上げた課題解決には精細に装置開発が不可欠であった。THMC挙動であるため複合的な特性とその測定・解析を実施したが、定量的評価を当初研究計画全てを満たしているには至らなかった点があった。しかし、今後の課題項目とその解決アプローチを将来提案したい。



図 1 加熱式膨潤・膨張測定装置



図 2 加熱式ガス圧測定装置

参考文献

- Gens, A. 2008. "Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 33, S516-S526. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.10.056>
- Chen, Y. G., Jia, L. Y., Li, Q., Ye, W. M., Cui, Y. J. and Chen, B. 2017. "Swelling deformation of compacted GMZ bentonite experiencing chemical cycles of sodium-calcium exchange and salinization-desalinization effect." *Applied Clay Science*. 141, pp. 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.016>
- Samper, J., Mon, A. and Montenegro, K. 2020. "A coupled THMC model of the geochemical interactions of concrete and bentonite after 13 years of FEBEX plug operation." *Applied Geochemistry*. 121. <https://doi.org/10.1016>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of pore pressure for unsaturated-saturated bentonite sand mixture	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Accumulated axial strains for bentonite sand mixture due to cyclic loading with low confining pressure	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Producing pore pressure due to heat for bentonite-sand mixture with difference dry densities	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 =
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 On the thermal hydro mechanical chemical behavior of bentonite sand mixture	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The 8th International Conference on Unsaturated Soils	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Motoshima, Sachie Iso, Tomoyoshi Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation on hydraulic-mechanical properties in bentonite-sand mixture with consideration of salinity water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The 8th International Conference on Unsaturated Soils	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Iso, T. Motoshima, T. Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Swelling pressure for bentonite-sand mixture subjected to drying and wetting application	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 9th International Congress on Environmental Geotechnics	6. 最初と最後の頁 213-227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of heating application on deformations and pore pressures of a bentonite sand mixture subjected to suction distribution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 9th International Congress on Environmental Geotechnics	6. 最初と最後の頁 3-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Observation of deformation and pore pressure for bentonite-sand mixture due to heating application	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 国際地盤工学会第17回アジア地域会議	6. 最初と最後の頁 1858-1861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Deformations of bentonite-sand mixture without lateral confining pressure subject to high suctions changing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村友良, 本島貴之, 磯 さち恵	4. 巻 -
2. 論文標題 ベントナイト混合砂の変形・強度特性に与える塩水の影響とクリープ挙動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第15回環境地盤工学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松本政文, 西村友良	4. 巻 -
2. 論文標題 高サクション制御を受けたベントナイト混合砂のクリープ変形と一軸圧縮強さの関係	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第15回環境地盤工学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi Nishimura	4. 巻 -
2. 論文標題 Creep behavior for bentonite-sand mixture in unsaturated-saturated condition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The 5TH International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村友良	4. 巻 -
2. 論文標題 不飽和シルトの圧縮性と一軸圧縮強さに与えるサクシオン勾配の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第63回地盤工学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村 友良, 古関 潤一	4. 巻 17(3)
2. 論文標題 ベントナイト混合砂の熱・流体・力学・化学連成特性に関する実験的考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 297-306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白河部 匠, 佐藤 伸, 山本 修一, 志村 友行, 西村 友良	4. 巻 17(3)
2. 論文標題 締固めたベントナイトのひずみ挙動に及ぼす乾湿履歴の影響評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 353-360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 A preliminary study of hydro-mechanical properties for bentonite-sand mixture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining, Eurock 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村友良	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 熱的作用を考慮したベントナイト-砂混合体の強度・変形・透水性測定技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 49-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Motoshima, S. Iso, T NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Interpretation of changing pore pressure on heated unsaturated/saturated bentonite-sand mixture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining, Eurock 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村友良	4. 巻 70(1)
2. 論文標題 熱的作用を考慮したベントナイト-砂混合体の強度・変形・透水性測定技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 49-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoyoshi NISHIMURA	4. 巻 -
2. 論文標題 INTEGRATED APPROACH BASED ON FLUID PHENOMENA FOR BENTONITE SUBJECTED TO THERMAL ACTION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 11th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment	6. 最初と最後の頁 510-515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松本 政文, 西村 友良	4. 巻 -
2. 論文標題 高レベル放射性廃棄物処分施設構造体を想定した不飽和ベントナイト混合砂の一軸圧縮強さの特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第 14 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 169-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 磯 さち恵, 本島 貴之, 西村 友良	4. 巻 -
2. 論文標題 ベントナイト混合土の膨潤圧及び透水性に与える塩水影響に関する考察	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第 14 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 145-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村 友良, 古関 潤一	4. 巻 -
2. 論文標題 不飽和ベントナイト混合砂の熱・流体・力学・化学連成特性に関する実験的考察	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第 14 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 131-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 成島 誠一, 新井 靖典, 佐古田 又規, 西村 友良	4. 巻 -
2. 論文標題 不飽和ベントナイト砕石の塩水浸透による膨潤圧の変化と塩水透水係数に関する実験的把握	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第 14 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 127-130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村友良
2. 発表標題 軸応力増減を受けた不飽和ペントナイト砂混合体の一軸圧縮強さの変化
3. 学会等名 第78回土木学会全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------