

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560602

研究課題名(和文) 圧力・化学反応による岩盤不連続面の凹凸構造の経年変化を考慮した物質移行性の評価

研究課題名(英文) Evaluation on mass transport properties of rock single fracture in considering the change of roughness structure under various stress and thermal conditions

研究代表者

岸田 潔 (Kishida, Kiyoshi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20243066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：岩盤の力学および水理学的特性を長期的な視点で論じる場合、熱などにともなう不連続面の形状・接触状態・開口状態の変化を議論する必要がある。本研究では、単一き裂を含む花崗岩を接触状態のままマイクロフォーカスX線CTで撮影し、得られたCT画像に統計的処理を施すことで不連続面情報を抽出した。また、拘束圧作用下における透水特性を評価するために、その不連続面情報を用いて透水解析を実施した。]

一方、拘束圧およびせん断速度一定の条件下、温度条件を変化させたSHS型の一面せん断試験を実施した。実験の結果、モルタル供試体および花崗岩供試体で再せん断後のせん断応力の回復現象を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate the changes in fracture aperture under various long-term confining and thermal conditions, measurements of the fracture aperture are conducted using microfocus X-ray CT. Through the imaging data, the height of the fracture surface and the contact points are evaluated, and contact ratios for the fracture, the JRC and the aperture distribution are estimated. In addition, a fracture flow simulation will be conducted using the surface roughness and aperture data obtained by the X-ray CT.

The SHS direct shear tests of single rock fracture have been carried out under various confining stress conditions and thermal conditions. Based on the experimental results, the healing process on the granite fracture can be obtained. And the shear strength recovers through the experimental results can be applied as the log-liner model and the rate- and state dependent friction law.

研究分野：岩盤力学

 キーワード：岩盤力学 岩盤水理 地下水物質移行 ヒーリング現象 THMC連成 圧力融解 放射性廃棄物地層処分
マイクロフォーカスX線CT

1. 研究開始当初の背景

エネルギー生成後の副産物である高レベル放射性廃棄物の地層処分を考える上で、処分地点周辺岩盤の力学・水理学特性とその長期的な変化の評価は最重要課題である。処分坑道の周辺では、空洞掘削に伴って変形と応力再配分が発生し、透水性の空間的な分布が変化する。また、廃棄体からの発熱により化学的に活性な環境が形成され、鉱物の溶解、沈殿、変成等の作用が活発化する。これらの現象は互いに影響しあう。例えば、不連続面内の接触部で化学反応による溶解が発生し凸部が変形すれば、不連続面は閉口し透水性は低下する。また、不連続面の閉口は周辺岩盤に新たな応力再配分と変形を生じさせ、拘束圧とその作用方向が変化する。作用圧力の変化は化学反応速度に影響を及ぼすし、間隙水の流況の変化も化学反応速度に影響する。このような化学-力学作用は構造物を不安定にするとは限らない。不連続面の接触面からの溶解物質が、間隙流体を通して拡散、移動し、間隙自由表面で再結晶すれば、空隙の減少による遮蔽性の上昇や、岩石強度・不連続面強度の増加をもたらすとも考えられる。

岩石などを構成する粒子が、粒子同士の接触面で応力集中により溶解し、溶解物質が圧力の小さい表面や領域に析出することによって変形する機構を圧力溶解という 1), 2)。このような圧力による溶解・沈殿現象は、一般には高温・高圧の条件下で顕著である。実験的研究として、例えば、拘束圧が数 10MPa、温度が数 100°C 程度の条件下で、石英等の岩石構成粒子（断層ガウジ）を用いた圧縮・せん断試験等が実施され 3)~6)、現象の観察と評価が行なわれている。また、比較的低い圧力・温度条件下 (<5 MPa, <150°C) であっても、圧力溶解現象によって不連続面や粒状体の透水性の変化に大きな影響があることが確認されている 7), 8)。しかしながら、圧力溶解に関する従来の研究は、化学反応速度の定量的表現と固体の変形速度の表現に関する検討が中心であり、透水性に関する検討は不連続面で実施されているが、不連続面の構造の変化及び力学的な検討は十分になされていないのが現状である。申請者らは、モルタルによる不連続面の一面せん断・透水試験を実施し、常温でせん断途中での長時間にわたる負荷状態が、保持期間中の透水性の変化や再せん断時のせん断強度に及ぼす影響を評価した研究を実施している 9) が、実際の岩石の不連続面でこの種の研究がなされている事例は、未だ示されていない。

2. 研究の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、天然バリア（岩盤）を対象とした核種移行評価は、岩盤内に存在する不連続面の物質移行特性を長期にわたり評価する必要がある。岩盤不連続面は、熱、地下水、応力が作用する環境下にあり、酸化・還元反

応による不連続面の構造の変化が発生し、それに伴い水理学特性や力学特性が変化する。本申請では、地質環境の中・長期的変遷の影響を考慮したより信頼性の高い核種移行モデルを構築することを目的に、熱・応力環境下での単一不連続面の構造の変化を計測し、併せてせん断・透水試験を実施し、岩盤不連続面の凹凸構造の変化メカニズムの解明と物質移行モデルとヒーリングモデルを構築する。

3. 研究の方法

(1) 不連続面の形状計測と温度-化学連成による不連続面構造評価モデルの構築

不連続面の構造および開口状態を把握するため、不連続面の形状計測を μ フォーカス X 線 CT 装置を用いて行った。X 線 CT 装置は、様々な応力状態・加温状態での撮影が可能となり、応力や温度による不連続面構造の変化を捉えることが可能となる。ここでは、撮像条件は、FCD 200 mm、マトリクスサイズ 1024、スライス厚 0.035 mm、格子幅 0.029 mm で撮影を行った。用いた供試体は、縦割れき裂を有する直径 15 mm、高さ 30 mm の花崗岩供試体である (Photo 1)。より小さな供試体を用いることで、CT 画像の解像度を上げることが可能となる。すなわち、CT 画像において、各相分離化するにあたり弊害となる各相の境目に存在する二相が混じり合った mixel 相をより少なくすることができる。



Photo 1. Granit specimen which includes tensile single fracture

不連続面構造の抽出は、以下のような二相分離方法で実施した。CT 画像上で CT 値を線形変換した Gray Value(16bit)をもとに、任意の連続体を認識・分離する機能であるセグメンテーションを行い、得られた CT 画像を空気相・岩石相に分離した。セグメンテーションには、適当な初期抽出点から出発して、次々に周囲を取り込んで抽出すべき領域を拡げていく Region Growing 法 (高木幹夫, 下田陽久: 2004) を用いた。

また、比較のために XY-ステージに搭載されたレーザー変位計を用いた不連続面計測装置を用いて、不連続面の形状計測を行っている。計測レンジは、2000 μm でレーザー変位計のスポット径は 7 μm である。また、XY-ステージの速さは 5000 $\mu\text{m}/\text{sec}$ であり、サン

プリングタイムと計測間隔はそれぞれ 8.44 ms と 50 μm である。

(2) 透水挙動の評価と物質移行パラメータの同定

加温することが可能な三軸試験装置を用いて、単一不連続面を有する花崗岩供試体に対して、温度を 20 および 90 $^{\circ}\text{C}$ に、拘束圧を 1~10 MPa に制御した環境で透水試験を実施し、温度・拘束圧に依存する透水特性の変化を計測した。また、拘束圧の保持時間が透水特性に与える影響を検証するために、短期載除荷試験、長期保持試験の 2 種類の実験を実施した。

また、(1)で取得された不連続面情報を用いて平面 2 次元モデル (Mgaya, et al.: 2004, Kishida, et al.: 2009) による透水解析を行った。

(3) SHS 型せん断-透水試験の実施とヒーリング現象を考慮した力学挙動モデルの構築

ここでは、加温下での一面せん断試験を実施可能とするため試験装置の改良を行った。さらに、モルタル供試体および花崗岩供試体を用いて、加温 (60 $^{\circ}\text{C}$) と常温 (20 $^{\circ}\text{C}$) のそれぞれの条件下で SHS 型の一面せん断-透水同時試験を実施し、温度変化が力学・水理学特性に及ぼす影響を評価した。また、速度・状態依存摩擦則を適用することで岩石不連続面の摩擦挙動について考察を行った。

本研究では、Kishida, et al.(2011)で使用された一面せん断試験装置に加温機能を付加する改良を行った。加温は、透水試験で導入する流体とせん断箱の 2 か所に機能を付加した。Fig.2 に透水システムとせん断箱および付加した加温機能の概略図を示す。せん断箱には金属板ヒーターを取り付けることで、せん断箱を経由し供試体を加温する機能を付加した。通常、一面せん断試験では、せん断面がせん断箱から露出し、外気に触れているため、加温してもすぐに放熱して温度が下がると考えられた。そこで、せん断試験を行う際には、せん断箱全体を断熱材で囲むことで、放熱を防ぐこととした。加温機能は、サーボモータにより一定の温度で行われるように制御されている。また、透水試験時に不連続面内に流れる水が供試体を冷やしてしまうのを防ぐために、上流の貯留水槽とせん断箱の間にヒーターユニットを導入し、加温した流体を不連続面内に流せるようにした。供試体の温度測定は、供試体の上流端と下流端に熱電対を設置して行った。熱電対の測定精度は、 $\pm(0.1\% \text{ of rdg} + 0.5^{\circ}\text{C})$ である。

4. 研究成果

(1) 不連続面の形状計測と温度-化学連成による不連続面構造評価モデルの構築

撮影された μ フォーカス X 線 CT 画像から三次元的に二相化されたデータを基に、き裂面の抽出を行った。供試体が接触している

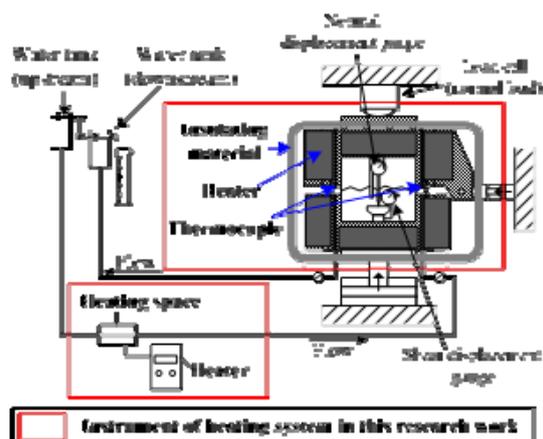


Fig.2 Schematic of installed heating systems at shear box and permeability test system

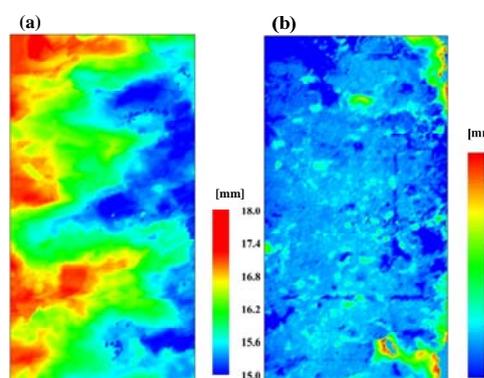


Fig.3 Contour map of surface roughness and aperture distributions on single fracture through CT image ((a) height and (b) aperture)

部分はき裂情報が抽出できないため、周囲 8 voxel の中央値で代替した。結果を Fig.3 に示す。Z₂値(Tse and Cruden: 1979)を用いて不連続面の JRC を計算したところ 2.38 であり、平均開口幅は 1.656×10^{-1} mm、接触率は 11.22 % と算出された。これらの結果から、比較的なめらかであり、接触部が多いことが確認される。一方、レーザー変位計による不連続面計測装置から求められた JRC の値は 1.40 であり、いずれの結果もスムーズなラフネス形状であることが確認された。

(2) 透水挙動の評価と物質移行パラメータの同定

ここでは、 μ フォーカス X 線 CT から得られた不連続面情報を用いた浸透流解析の結果を示す。計算条件は、供試体の上下端にそれぞれ 1.0, 1.5, 3.0 cm の水頭差を与え 3 ケースの解析を実施した。解析により得られた流速ベクトル分布を Fig.4 に示す。

(3) SHS 型せん断-透水試験の実施とヒーリング現象を考慮した力学挙動モデルの構築

本研究では、Kishida, et al.(2011)が確認できなかった花崗岩供試体のせん断変位保持によるせん断応力回復現象が確認できた。結果の

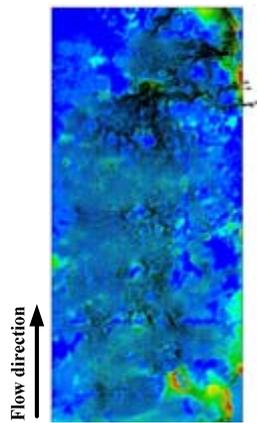


Fig.4 Flow velocity vector distribution on the aperture contour map with difference in hydraulic head of 1.0 cm

一例を Fig.5 に示す。さらに、Dieterich 型の時間依存性のモデルを適用した結果、花崗岩供試体では温度の影響によりせん断応力回復量が増加していることが確認できた。本研究で用いた花崗岩供試体は、Kishida, et al.(2011)と比べて一軸圧縮強さが小さく、鉱物の析出状況も異なっていた。結果として、せん断保持中に変形や圧力融解が生じやすく、再せん断後にせん断応力回復が確認できたことになる。ただし、保持中の透水量の明瞭な変化は確認できず、不連続面の接触状態の変状は、本研究で適用した保持時間・加温条件では、ごくわずかなものである。一方、RSF 則を適用した結果、モルタル供試体では加温による反応の速度が促進されていることが確認できた。

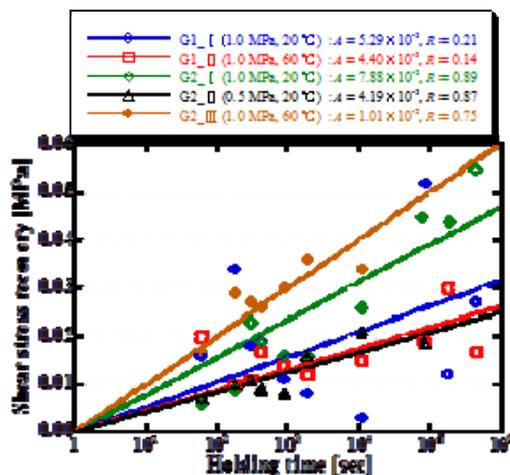


Fig.5 Change of shear stress recovery with holding time together with regression curves using Dieterich log-linear equation (Granite Specimen)

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 4 件)

- ① 安原英明, 長谷川大貴, 中島伸一郎, 矢野隆夫, 岸田潔: 拘束圧・温度に依存する花崗岩不連続面の不可逆透水特性に関する実験的評価, 地盤工学ジャーナル, 8(1), 71 - 79, 2013. <http://doi.org/10.3208/jgs.8.71>
- ② Yasuhara, H., Kinoshita, N., Takahashi, M., Nakashima, S. and Kishida, K.: Long-term Observation of Rock Permeability under High Pressure and Temperature Conditions and Its Microstructural Interpretation, ARMA 13-236, 2013.
- ③ Yasuhara, H., Kinoshita, N., Nakashima, S. and Kishida, K.: Evolution of Mechanical and Hydraulic Properties in Sandstone Induced by Mineral Trapping, ARMA 14-7112, 2014.
- ④ Kishida, K., Tsuda, N., Yano, T. and Yasuhara, H.: Time Dependency Friction Factor of Rock Single Fracture under Slide-Hold-Slide Direct shear experiments, ARMA 14-7388, 2014.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 大野正登・矢野隆夫・安原英明・岸田潔: 高拘束圧下での凝灰岩のせん断-保持-せん断型三軸試験, 第 68 回土木学会学術講演会講演概要集, III-313, pp.625-626, 2013-9.
- ② 津田直弥, 矢野隆夫, 中島伸一郎, 安原英明, 岸田潔: 加温条件下でのラフネスを有するモルタル不連続面の Slide-Hold-Slide 試験, 第 68 回土木学会学術講演会講演概要集, III-314, pp.627-628, 2013-9.
- ③ 津田直弥, 矢野隆夫, 安原英明, 岸田潔: 加温条件下でのラフネスを有する不連続面の Slide-Hold-Slide 試験とヒーリング現象, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, (公)土木学会, pp. 331-336, 2014, 1, 10.
- ④ 大野正登, 矢野隆夫, 安原英明, 菊本 統, 岸田潔: 凝灰岩の三軸せん断-保持-せん断試験と拘束圧による影響, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, (公)土木学会, pp. 337-342, 2014, 1, 10.
- ⑤ Bond A.E., Chittenden N., Fedors, R., Kang, P.S., McDermott, C., Neretniecks, I., Sembera, J., Watanabe, N. and Yasuhara, H.: Coupled THMC modelling of a single fracture in novaculite for DECOVALEX-2015. International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 2014.
- ⑥ 石川智優・肥後陽介・安原英明・岸田潔: μ フォーカス X 線 CT による花崗岩不連続面形状の抽出, 第 49 回地盤工学研究発表会発表論文集, 地盤工学会, pp.479-480, 2014-7.
- ⑦ 大野正登・菊本統・安原英明・岸田潔:

凝灰岩の SHS 型三軸せん断試験と強度回復現象のモデル化に関する一考察, 第 69 回土木学会学術講演会講演概要集, III-245, pp.489-490, 2014-9.

- ⑧ 津田直弥・安原英明・矢野隆夫・岸田 潔: 速度・状態依存摩擦則を用いたモルタル不連続面の Slide-Hold-Slide 型一面せん断試験結果の一考察, 第 69 回土木学会学術講演会講演概要集, III-250, pp.499-500, 2014-9.
- ⑨ Tsuda, N., Yasuhara, H., Yano, T. and Kishida, K.: Discussion on Friction Factor of Single Rock Joint under Slide-Hold-Slide Process in Considering Influence of Thermal Conditions, Proceedings of the 2014 ISRM International Symposium – 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, 263 – 269, 2014. [査読有]
- ⑩ Kikumoto, M., Vu, N.P.Q., Ohno, M., Kishida, K., Yasuhara, H. and Elsworth, D.: Structural Healing and Decay of Sedimentary Soft Rock in Triaxial Slide-Hold-Slide, Process and Its Modeling, Proceedings of the 2014 ISRM International Symposium – 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, 536 – 545, 2014. [査読有]
- ⑪ Ohno, M., Yano, T., Yasuhara, H., Kikumoto, M. and Kishida, K.: Experimental Study on Structural Healing of Sedimentary Rock in Slide-Hold-Slide Type Triaxial process, Proc. of the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, G-4-8, Shanghai, 2014-11.
- ⑫ Tsuda, N., Yasuhara, H., Yano, T. and Kishida, K.: Evaluation on the Healing of Single Rock Fracture under Thermal Conditions during Slide-hold-slide Process, Proc. of the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, G-6-8, Shanghai, 2014-11.
- ⑬ Vu, N.P.Q., Kikumoto, M., Ohono, M., Yasuhara, H. and Kishida, K.: Structural healing and decay of sedimentary soft rock under slide-hold-slide process and their constitutive description, Proceedings of the 43rd Symposium on Rock Mechanics, JSCE, pp. 129 – 134, 2015-1.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

岸田 潔 (KISHIDA, Kiyoshi)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20243066

(2)研究分担者

澤田 淳 (SAWADA, Atsushi)

(独)日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号: 30421639

安原 英明 (YASUHARA, Hideaki)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70432797