

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560607

研究課題名(和文)熱環境下における岩石フラクチャーの透水・力学特性変化メカニズムの解明

研究課題名(英文) Mechanism of changing thermally induced hydraulic and mechanical character of rock fracture

研究代表者

木下 尚樹 (Kinoshita, Naoki)

愛媛大学・理工学研究科・講師

研究者番号：30263958

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)：熱水貯蔵システムや高レベル放射線廃棄物の地層処分では地下岩盤空洞の長期性能評価が重要な課題となる。これらの空洞では周辺岩盤に非定常の温度分布が生じ、熱応力も発生する。結晶質性の硬岩では不連続面が水理学・力学的な弱面になるため、これらの透水・力学挙動を把握することは重要な課題の一つである。本研究では高温・高圧下における結晶質岩不連続面の透水挙動を定量的に評価し、鉱物の溶解作用が透水性に及ぼす影響を明らかにした。また、これらの成果をさらに発展させ、不連続面への力学作用が透水挙動や鉱物溶解作用に及ぼす影響について定量的に評価し、透水・力学特性変化メカニズムを解明した。

研究成果の概要(英文)：In the heated water temporary storage system and radioactive waste disposal cavities, the rock mass around the openings will be influenced by complicated thermal behavior induced by high temperature. In this study, thermally-induced mechanical and hydraulic character of rock fracture was examined.

The flow-through experiments on a single fracture in rock were carried out. The fracture aperture and the related permeability monotonically decreased with time. Meanwhile, the sustained loading experiments using the rock that have a single fracture were conducted under controlled temperature and mineral dissolution conditions. From the tests results, it was found that the difference in displacement of the fractured rock samples is very small for all the conditions. However, it was noticeable that displacement under the wet condition was larger than those under the other conditions. The reason for this may be due to mineral dissolution at the asperity contact areas.

研究分野：岩盤力学

キーワード：熱環境 岩石フラクチャー 透水特性 力学特性

### 1. 研究開始当初の背景

岩盤空洞にごみ焼却等の廃熱を利用して得た熱水を一時貯蔵する熱水貯蔵システムでは、空洞を熱源として周辺岩盤に非定常の温度分布が生じ、熱応力も発生する。岩盤力学的観点からは熱・水・応力・化学の相互作用を考慮した岩盤の挙動評価が重要な課題となる。これは地熱エネルギー開発や高熱下のトンネル、放射性廃棄物地層処分等の分野にも関連している。

空洞周辺岩盤に及ぼす温度影響や高温の熱と拘束圧が作用した場合の岩石と地下水との相互作用に関する研究は種々行われている。また、岩盤内には亀裂が存在し、低透水性の岩石の場合、亀裂において透水が支配的になるため、岩盤の透水特性を評価するには、不連続面の透水特性の評価が必要不可欠となり、既往の研究においても不連続面の透水特性に関する研究がなされている。しかし、これらの研究成果は定性的で、条件が限定的であるものが多く、不連続面での透水が支配的になると考えられる硬岩系の結晶質岩石での不連続面透水実験データは極端に少なく、様々な境界条件において実験を実施しより詳細かつ精巧なデータを蓄積する必要がある。

### 2. 研究の目的

岩石不連続面の透水特性変化に起因するメカニズムの解明と、高温・高圧環境下における力学特性変化を評価することを目的に研究を実施する。

### 3. 研究の方法

(1)不溶性流体を用いた(鉱物溶解現象のない)透水実験による力学的作用の影響評価：不溶性流体を用いて透水試験を実施し、温度・拘束圧制御下における岩石不連続面透水特性の変化に起因するメカニズムを探索する。この試験では、鉱物溶解現象が生じないので、透水特性の変化について、鉱物溶解(化学作用)の影響を考慮しなくてよい。

(2)不連続面垂直方向への持続載荷実験(クリープ実験)による力学的作用の定量評価：不連続面を有する岩石供試体に対して持続載荷試験(クリープ実験)を実施し、力学的クリープ挙動を評価する。得られる力学的クリープ特性と、透水試験結果を比較し、透水特性変化に及ぼす影響について精査する。

(3)高温・高圧環境下で透水履歴を持つ不連続面表面の微視構造観察：高温・高圧環境下で、透水試験を実施する場合、不連続面表面では、鉱物溶解・沈殿の影響を受ける。本研究では、鉱物溶解を制御し実験を実施したため、実験後の不連続面表面の微視構造は、条件により

異なると想定される。それら微視構造の観察から鉱物溶解の影響について検証を行う。

### 4. 研究成果

(1)不溶性流体を用いた(鉱物溶解現象のない)透水実験による力学的作用の影響評価：岩石不連続面の化学作用(鉱物溶解作用)では、不連続面接触部での鉱物溶解によって開口幅が減少し、透水性は低下する。逆にアスペリティが接触していない自由表面での溶解では透水性は上昇する。本実験では、鉱物溶解条件において元素濃度分析により鉱物溶解が確認され、透過率が低下していることから接触部溶解が卓越していることがうかがえる。一方で、不溶解条件の実験結果から力学作用のみでも花崗岩やそれより弾性係数の高いステンレス鋼においても透過率が低下することが確認された。これらのことから溶解条件では鉱物溶解現象である化学作用が生じるのに加えて、拘束圧によるアスペリティ接触部の破壊、変形等の力学作用が生じていると考えられる。また、自由表面やアスペリティ接触部の応力状態の変化によっても鉱物溶解に変化が生じるものと考えられる。本研究ではこれらの現象を化学・力学連成作用と呼んでいる。すなわち、前述の鉱物溶解条件下での透水実験では化学・力学連成作用により透過率が変化したものと考えている。図1は正規化透過率の経時変化を示している。鉱物溶解条件、拘束圧、温度および試料の材質の違いにより透水特性が異なり、化学・力学作用の影響を確認できた。

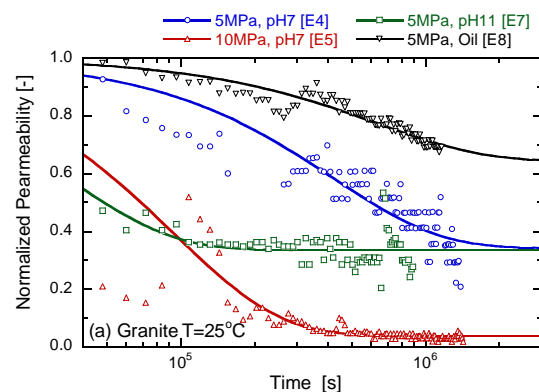


図1 透水性の経時変化

(2)不連続面垂直方向への持続載荷実験(クリープ実験)による力学的作用の定量評価：実験結果から収束値、収束時間、決定係数を算出した。決定係数より、回帰した値と実験値の相関性が低い実験結果もあり、妥当性が確認できない場合も見受けられる。また、収束値として膨張を示している結果もあり、これらは計測値として圧縮変位が小さいか、ほとんど得られていないことを示している。全体的にせん断不連続面については決定係数

が高いのに対して、Saw-cut および圧裂不連続面は決定係数が低い結果となっている。Saw-cut および圧裂不連続面ではせん断不連続面に対して接触面積が大きいため、持続载荷による垂直変位がせん断不連続面と比較しても、また、計測系の精度と比較しても相対的に小さく、計測変位にばらつきが生じ、決定係数が低くなった原因と考えられる。

収束値、収束時間と鉱物溶解条件の関係を、それぞれ図2、図3に示す。収束値は、解析値が圧縮側の値として得られたものについて絶対値で示している。収束値はWet条件のみしか比較ができないが、せん断不連続面の変位がSaw-cutと比較して大きいことが見て取れる。収束時間についてはDry条件、Non-wet条件と比較してWet条件において収束時間が小さくなっている傾向が伺え、透水実験の結果と調和的であるといえる。

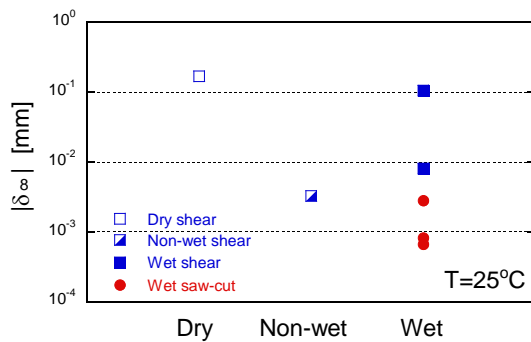


図2 収束値と鉱物溶解条件の関係

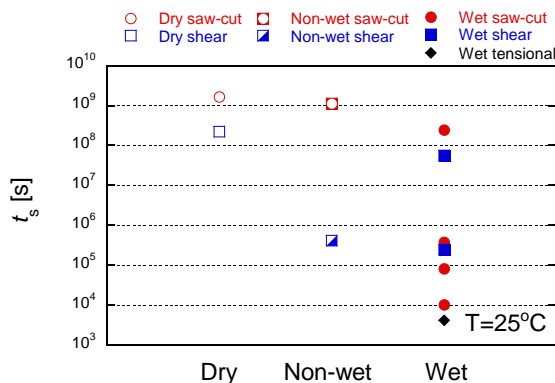


図3 収束時間と鉱物溶解条件の関係

(3)高温・高圧環境下で透水履歴を持つ不連続面表面の微視構造観察：

岩石不連続面の透水試験および ICP 発光分光分析結果より、岩石構成鉱物の溶解現象が透水性の変化に大きく影響を及ぼしていることが確認された。透水性の変化の誘因として、溶解した鉱物の再沈殿による二次鉱物の生成も想定される。そこで、電界放射型走査型電子顕微鏡を用いて、透水試験前後の花崗岩供試体の不連続面表面を微視的に観察

すると同時に、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDX)にて、沈殿している物質の元素を同定し、二次鉱物を推定した。

図4に脱イオン水を用い中性条件で透水実験を行った不連続面の観察結果を示している。分析の結果から沈殿鉱物は主に炭酸塩およびシリカ鉱物と同定した。また、炭酸カルシウムと同定できた沈殿鉱物もあった。炭酸塩は透過水中の炭酸イオンと反応し、二次鉱物として析出したとみられる。透過水中に存在する炭酸イオンは、空気中の二酸化炭素が透過水中に溶解したことに起因すると考えられる図5にアルカリ条件での観察結果を示す。EDX分析の結果、二次鉱物はシリカと同定した。また斜長石表面の溶解が進行した様子も観察された。

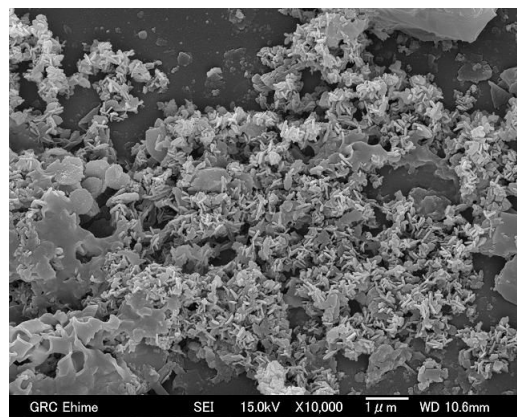


図4 中性条件の不連続面

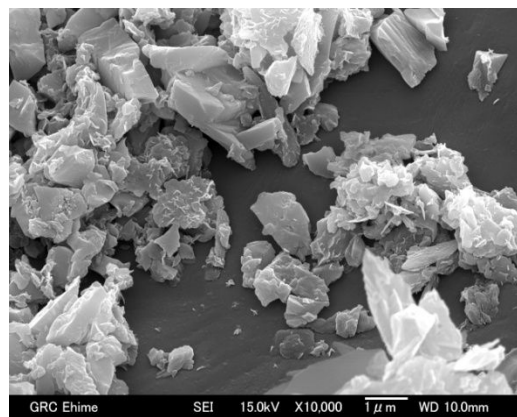


図5 アルカリ条件の不連続面

#### <引用文献>

木下尚樹，熱環境における岩石の力学・水理学特性および岩盤空洞の挙動，東京大学博士論文，pp. 129-178，2014。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

木下尚樹，安原英明，橋本克樹：熱環境下における岩石不連続面の透水特性に

及ぼす化学・力学連成作用, Journal of MMIJ, 査読有, Vol. 129, pp. 485-491, 2013.

〔学会発表〕(計 14 件)

木下尚樹, 熱環境における岩石不連続面の透水・せん断特性について, 資源・素材学会, 2015.3.27, 千葉工業大学(千葉県・習志野市)

木下尚樹, 熱環境における岩石不連続面の連続透水・せん断実験, 資源・素材学会, 2014.9.15, 熊本大学(熊本県・熊本市)

木下尚樹, 持続载荷による岩石不連続面の变形挙動に及ぼす熱・水・応力の影響, 土木学会第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2014.1.9, 土木学会(東京都・新宿区)

木下尚樹, 温度・鉱物溶解制御下の岩石不連続面の透水性, 資源・素材学会, 2012.9.11, 秋田大学(秋田県・秋田市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木下 尚樹 (KINOSHITA, Naoki)  
愛媛大学・大学院理工学研究科・講師  
研究者番号: 30263958

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

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