

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560521

研究課題名（和文） 温度圧力環境下における結晶質岩不連続面の透水性経時変化のメカニズム解明

研究課題名（英文） Mechanism of fracture permeability in crystalline rock under controlled stress and temperature conditions

研究代表者

木下 尚樹 (KINOSHITA NAOKI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30263958

研究成果の概要（和文）：本研究では、温度・拘束圧を制御し、結晶質岩である花崗岩不連続面の透水実験を実施し、透水特性の経時変化に及ぼす影響を定量評価した。特に透過水の pH（鉱物溶解条件）および不連続面形状が及ぼす影響について検討した。また、透過水への溶出物質の定量分析、不連続面の SEM 観察、EDX 分析により不連続面の微視構造の変化を把握し、メカニズムを考察した。

研究成果の概要（英文）：In this study, flow-through experiments on a single fracture in granite has been carried out under confining pressures of 5-10 MPa, and at temperatures of 20-90°C. The fracture aperture and the permeability monotonically decreased with time at room temperature, and reached a quasi-steady state. Then, after the temperature was raised to 90 °C, the aperture decreased again throughout the rest of the experiments. Fluid samples were taken from the outlet to examine the elemental concentrations that were evaluated by inductively-coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The elemental concentrations increased with increase of temperature. After the flow-through experiments, the fracture surface was observed by scanning electron microscopy coupled with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX). The formation of a few kinds of precipitated minerals such as silica and calcite was revealed. The precipitation was limited to quite local and small areas. However, the precipitated minerals seemed to have had some influences on the permeability.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：熱水貯蔵システム、岩石不連続面、岩盤透水性、溶解沈殿現象

1. 研究開始当初の背景

ごみ焼却等の廃熱で得られた熱湯を多目的利用するための一時貯蔵施設である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。これらの施設では、空洞を熱源として周辺岩盤に非正常の温度分布が生じ、それに伴う熱応力も発生する。特に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ことが予想されるため、不

連続面内の流体の流れを時間的かつ空間的に把握することは重要な課題の一つである。

力学-化学の相互作用を考慮した岩盤不連続面の透水性変化を評価した研究は、これまで多くは行われていない。例えば、拘束圧を作用させない条件下で、熱水や塩水に岩石材料を浸潤させ、力学・水理学特性の経時変化を長期観察した研究があるが、それらは、想定される物理現象を定性的に考察しているに過ぎない。また、地質・地熱の研究分野では、拘束圧や熱水の存在する深部地質環境下における岩石構成鉱物の溶解・沈殿現象を定量評価し、水理学特性（間隙率の変化）に及ぼす影響を検討した研究事例があるが、多くは、限られた境界条件下での室内実験結果から経験則を導出しているに過ぎない。

2. 研究の目的

研究の全体構想は、不連続面での力学-化学相互作用現象の中でも、特に温度・応力条件に依存する圧力溶解および不連続面内間隙の自由表面溶解・沈殿現象のモデルを構築することにある。その中で本研究では、拘束圧下において温度条件を変化させ、単一不連続面を有する結晶質岩石の透水実験を行い、透過水中に溶解する元素量の同定、不連続面表面の微視観察による溶解後に沈殿物として生成している二次鉱物の同定などにより、温度圧力環境下における結晶質岩不連続面の透水性経時変化のメカニズムを解明しようとするものである。

3. 研究の方法

本研究に先駆けた予備的な検討として、単一不連続面を有する花崗岩供試体を限られた条件ではあるが、拘束圧下において温度条件を変化させ透水実験を行い、透水性が経時的に変化することを確認した。また、ICP 発光分析による透過水中に溶解する元素量の同定も可能なことを確認した。さらに実験終了後に、走査型電子顕微鏡を用いて花崗岩不連続面表面の微視観察を行ない、溶解後に沈殿物として生成している二次鉱物を観察した。また、EDXにより沈殿している二次鉱物の同定を試みた。これらの成果により、透水実験と元素量・鉱物同定、微視観察などにより、温度圧力環境下における結晶質岩不連続面の透水性経時変化のメカニズム解明ができるものと期待された。

本研究では様々な境界条件下で透水試験をし、それぞれの影響を定量的に評価する。また、透水試験前後の岩石供試体の薄片サンプルを作成し、電子顕微鏡 (SEM) を用いて不連続面の微視的構造の変化、不連続面表面に沈殿している二次鉱物の同定を行う。さらに、透過水を採取し、ICP 発光分析により溶解した元素量の同定を行う。これらの結果より、

温度圧力環境下における結晶質岩不連続面の透水性経時変化のメカニズムを解明した。

4. 研究成果

実験に用いた岩石は岐阜県瑞浪市産の地下 330-350m の岩盤中より採取した花崗岩である。気乾状態における有効空隙率は 1.0% であり、岩石実部内にはほぼ透水せず、水の流れは不連続面内で支配的になる。この岩石を用いて圧裂および平滑不連続面を有する供試体を作製した。高温高压三軸透水試験装置を用いて拘束圧、温度、pH 条件を変化させ、透水性の経時変化を評価した。条件は拘束圧 5-10MPa、温度は 25-90°C とし、透水圧は 0.015-0.04MPa で制御した。また、インプット溶液は pH~7 の超純水と pH~11 の NaOH 溶液とした。不連続面の透水性の評価としては水理学的開口幅を用いた。図 1 に圧裂不連続面供試体および平滑不連続面供試体を用いて拘束圧を 5MPa とし、pH~7 の溶液を用いた場合の結果を示す。グラフ中の実線は、実験で得られた水理学的開口幅の 24 時間の移動平均を表し、点は計測データの 0.5% をプロットしている。開始時点から開口幅は減少し次第に減少速度が低下している。その後、温度を 90°C に上昇させると、室温状況下ではほぼ定常となっていた開口幅はさらに低下する。また、不連続面形状の違いに着目すると、室温下および高温下における開口幅の収束値は共に平滑不連続面の方が小さい結果となった。図 2 は拘束圧条件を変化させた場合の結果である。拘束圧が 5MPa の場合に比べ、10MPa では開口幅は相対的に小さく、また温度を上昇させた場合の変化も小さい。図 3 は透過水の pH 条件を変化させた場合の結果である。開口幅はアルカリ条件下では常に中性条件よりも大きくなっている。開口幅は、不連続面形状、拘束圧、pH 条件により差を生じ、また、温度上昇に伴って透水性が変化しており、これらの条件と透水性との関連が確認された。

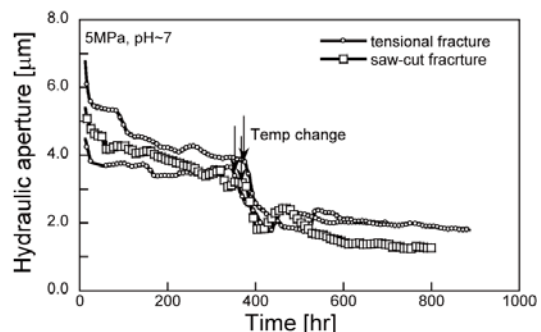


図 1 表面形状が透水性に及ぼす影響

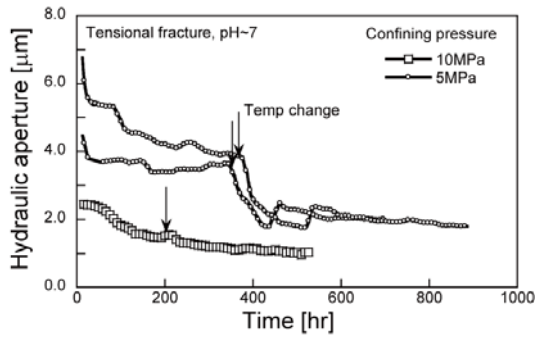


図2 拘束圧が透水性に及ぼす影響

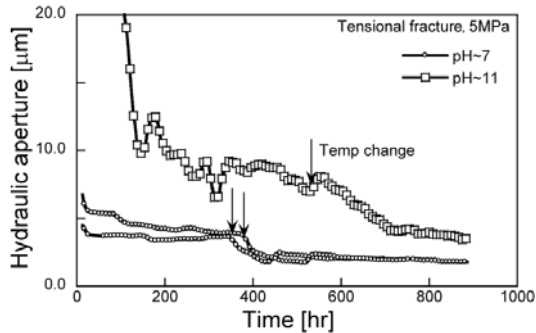


図3 pHが透水性に及ぼす影響

透水実験において採取した透過水を ICP-AES により分析し、透過水中物質の濃度評価を行った。対象元素は花崗岩の主要構成鉱物に含まれる7元素とした。図4は蛍光 X線分析で最も高い含有率を示した Si の濃度について中性条件とアルカリ条件の実験結果を比較したものである。アルカリ条件では中性条件より相対的に高濃度を示している。また、中性条件でみられた温度変化に伴う濃度変化は、アルカリ条件では比較的小さい。以上の結果より、構成鉱物の溶解現象が不連続面の透水性の変化に影響を及ぼしていることが予想される。

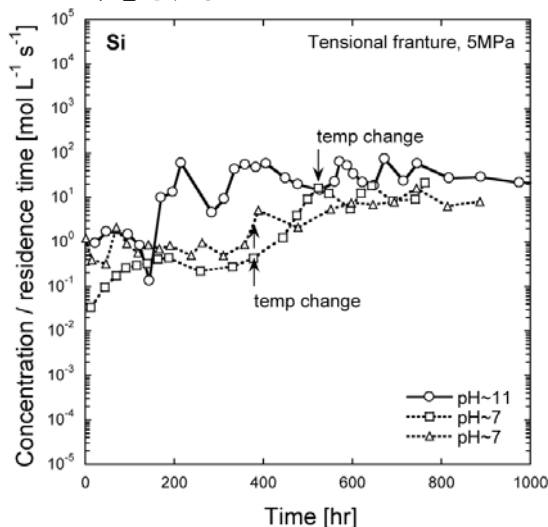


図4 Si濃度の経時変化比較

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(FE-SEM)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5に中性条件で透水実験を行った不連続面の観察結果の一例を示す。EDX分析の結果、沈殿鉱物は主に、炭酸塩、炭酸カルシウム、シリカ鉱物と同定した。炭酸塩、炭酸カルシウム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。透過水の pH は概ね 6~8 であり空気中の二酸化炭素が透過水中に溶解したことによる pH の変化はないといえる。沈殿物質の形状に着目すると、球状の物体が最も多く観察された。炭酸カルシウムについては、球状の物が比較的多く観察されたが、不定形のものも一部確認できた。シリカ鉱物については針状の物体が観察された。沈殿鉱物の寸法は、1μm 以下の物から数 10μm 規模のものまでであるが、透水実験にて得られた水理学的開口幅を考慮すると、これら沈殿物質が不連続面の透水性に影響を及ぼす可能性も否定できない。図6にアルカリ条件での観察結果の一例を示す。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。アルカリ条件では炭酸塩沈殿物が確認されなかったが、これは空気中の二酸化炭素が溶解せず、透過水中の炭酸イオン濃度が非常に小さかったためであると考えられる。



図5 中性条件での不連続面表面の観察結果

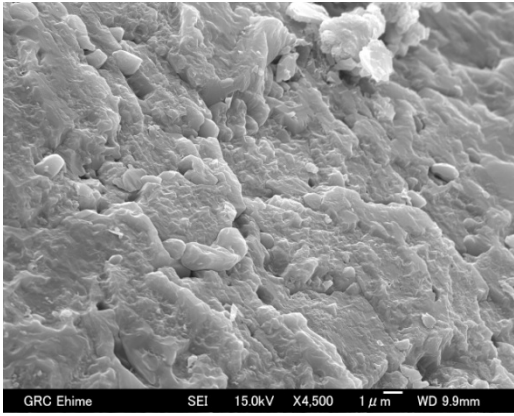


図 6 アルカリ条件での不連続面表面の観察結果

これらの結果より、温度圧力環境下における結晶質岩不連続面の透水性経時変化のメカニズムを解明した。

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, 橋本克樹, 木下尚樹: 温度・pH を制御したフローズルー溶解試験による花崗岩溶解速度定数式の提案とその妥当性の検討, Journal of MMIJ, 128, 79-85, 2012. 査読有
- ② 木下尚樹, 安原英明: 熱・拘束圧環境下における不連続面を有する花崗岩の透水性評価, Journal of MMIJ, 128, 72-78, 2012. 査読有
- ③ H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Ohfuji, D. S. Lee, S. Nakashima, and K. Kishida; Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model, Applied Geochemistry, 26, 2074-2088, 2011. 査読有
- ④ Naoki Kinoshita and Hide Yasuhara; Thermally Induced Behavior of the Openings in Rock Mass Affected by High Temperatures, International J. Geomechanics, 11, 2, 124-130, 2011. 査読有
doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000063

[学会発表] (計 4 件)

- ① H. Yasuhara, N. Kinoshita, S. Nakashima and K. Kinoshita, Evolution of fracture permeability in granite under temperature, confining pressure and pH conditions prescribed, 12th ISRM Int. Cong. on Rock Mech., Oct 6, 2011, Beijing, China.

- ② H. Yasuhara, N. Kinoshita, S. Nakashima and K. Kishida, Fracture permeability in granite under temperature, confining pressure, and pH conditions controlled: Measurements and predictions by coupled chemo-mechanical model, 4th International Conference, GeoProc 2011, July 6, 2011, Perth, Australia.
- ③ Yasuhara, H., Kinoshita, N., Nakashima, S. and Kishida, K.; Stirred-Flow-Through Experiments of Granite under Temperature and pH Conditions Controlled, 44th US Rock Mech. Symp., June 27, 2010, Salt Lake City, U.S.
- ④ Yasuhara, H., Kinoshita, N., Nakashima, S. and Kishida, K.; Evolution of Fracture Permeability in Granite and Its Evaluation via Coupled Chemo-Mechano Conceptual Model, 43rd US Rock Mech. Symp., June 28, 2009, Asheville, U.S.

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・助教
研究者番号：30263958

(2)研究分担者

なし

(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