

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760315
 研究課題名 (和文) 応力・温度に依存する岩盤の化学現象の解明と連成モデルの構築
 研究課題名 (英文) Evaluation of chemical influences on rocks dependent on stress and temperatures and development of coupled models
 研究代表者
 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

研究成果の概要 (和文)：本研究では、岩盤の透水特性に着目し、拘束圧及び温度を制御した単一の亀裂を有する花崗岩の透水試験を実施し、透水特性の経時変化を観察すると共に、その変化に起因するメカニズムの解明を試みた。その結果、透水特性の変化は、作用する応力と温度に大きく依存し、90℃程度の温度条件でもその影響は大きいことが確認された。また、構築した解析モデルの有用性を確認した。

研究成果の概要 (英文)：A series of flow-through experiments has been conducted using granite fractures at confining pressures and temperatures prescribed. The output reveals that the evolution in fracture permeability is strongly dependent on the stresses and temperatures exerted. The model developed in this work relatively well-replicates the actual measurements of the fracture permeability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：岩盤力学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：岩盤，不連続面，透水特性

1. 研究開始当初の背景

現在、高レベル放射性廃棄物地層処分問題は、原子力発電を盛んに実施している日本や欧米諸国などで、土木分野における最重要研究課題の1つとなっている。

廃棄体の地層処分を考える上で、天然バリアとなる処分坑道周辺の岩盤の力学および水理学特性を長期にわたり評価・予測するこ

とは非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では、拘束圧・温度を制御した透水試験を実施し、岩石（珪質岩石、花崗岩等）の透水性の経時変化を観察するとともに、概念モデルの妥当性、有用性を明らかにする。また、透水試験後の岩石供試体を用いて力学

試験を行い、透水試験前後の岩石の力学特性（変形性、強度）の変化を定量評価する。

3. 研究の方法

(1) 拘束圧・温度を制御した岩石の透水・力学試験

① 予備実験・本実験、② 化学分析

(2) 概念モデルと物理モデル：概念モデルの改良を行う。また、力学試験結果を再現可能な物理モデルの構築を行う。

(3) 連成シミュレータの開発

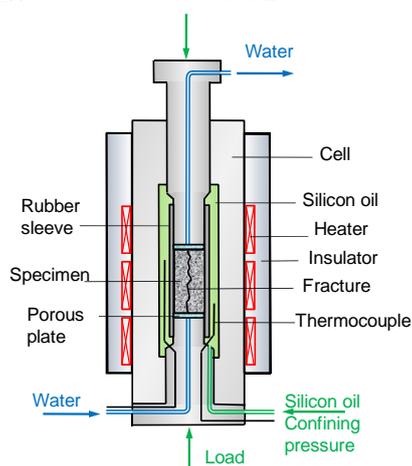


図1 透水試験装置模式図

4. 研究成果

本研究では、特に透水特性に着目し、拘束圧及び温度を制御した単一の亀裂を有する花崗岩の透水試験を実施し、透水特性の経時変化を観察すると共に、その変化に起因するメカニズムの解明を試みた。

また、鉱物の溶解・拡散・沈殿の一連の機構を記述できる概念モデルを構築し、実験結果を再現することを試みた。その結果、透水特性の変化は、作用する応力と温度に大きく依存し、90°C程度の温度条件でもその影響は大きいことが確認された。また、構築した解析モデルの有用性を確認した。

(1) 花崗岩不連続面の透水試験

本研究で使用した岩石は岐阜県瑞浪市産の花崗岩である。透水試験（図1）では、単一不連続面を有する花崗岩円柱供試体（直径29.5 mm、高さ41.2 mm、図2）を用いて、拘束条件として拘束圧を10 MPa、透水差圧を0.5 MPa、温度を20 °Cに設定して実験を開始した。透水流体には、pH約7の蒸留水を使用した。透水試験開始から210時間後に、透水状態を停止させることなくシステム全体の温度を90 °Cに上昇させ一定に保った後、最終的に550時間連続で透水試験を行った。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下300 m以深に廃棄体を埋設することが計画されているが、本研究では、静水圧条件での地下600

～700 m程度の深度に相当する有効応力10 MPaを拘束圧として選定し、また、廃棄体からの発熱温度を90 °Cと想定し、実験を実施した。



図2 実験に使用した岩石供試体

実験中、温度および拘束圧の影響による透水挙動の経時変化を観察した。また、一日に一回の頻度で流出口より溶液を採取し、流出溶液のpH変化を観察すると共に、ICP発光分析により流出物質の定量評価を行った。実験期間中のpHの平均値は7.39(±0.34)であり、鉱物の溶解等によるpHの大きな変化は観察されなかった。

実験に使用した花崗岩の構成鉱物は、X線回折の結果より、石英、長石、黒雲母が主鉱物であることが同定できた。また、蛍光X線分析をおこなった結果、各物質の重量割合を同定することができた。長石は正長石、曹長石、灰長石が固溶体として存在しており、X線回折や蛍光X線分析では、どのような長石がどの程度含有しているか定量的な評価を行うことはできないが、正長石、曹長石、灰長石としての含有割合は同定が可能である。蛍光X線分析の結果よりC. I. P. W. ノルムの計算を行った結果、正長石約18%、曹長石約40%、灰長石約20%であることが推定された。

蛍光X線分析では、Ti、Mn、Cr、Zn等も微量に検出されたが、透水試験では、岩石供試体の構成主元素と考えられるSi、Al、K、Fe、Ca、Na、Mgの7種類に着目してICP発光分析を行い、それら元素の定量評価を行った。

透水試験より得られる不連続面開口幅と物質濃度の経時変化を図3、4に示す。不連続面開口幅（透過率）は、実験開始時およそ2.5 μm (5.2×10⁻¹³ m²)を示し、時間の経過と共に減少している。温度20 °Cの時、約200時間程度で約1.5 μm (2.0×10⁻¹³ m²)まで低下し、ほぼ定常状態に達している。その後、温度を90 °Cに上昇させると、更なる透水性の低下が観察され、実験終了550時間まで単調的に減少している。透水試験終了時の不連続面開口幅（透過率）は約1.0 μm (8.3×10⁻¹⁴ m²)であり、わずか550時間の間に透水性がほぼ1オーダー低下する現象が観察された。

また、溶解物質濃度に着目すると、Si、Ca、

Naの濃度が比較的高く、特にSi濃度は温度を90°Cに上昇させた後、濃度も大きく上昇していることが確認できる。さらに90°Cでは、Feを除きすべての物質で、20°Cよりも濃度が高くなっていることが確認された。これは、温度の上昇により鉱物の溶解性が増加したためである。

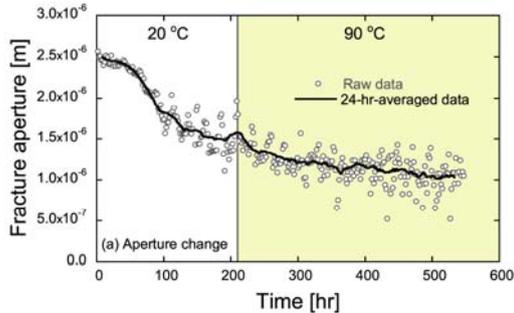


図3 不連続面開口幅の時間変化

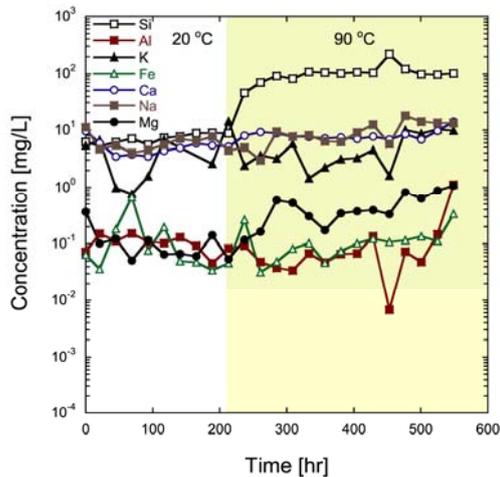


図4 不連続面間隙内の物質濃度変化

(2) 解析モデルによる解析結果と透水試験結果の比較

透水試験の再現解析では、拘束圧、透水差圧、温度条件は、実験と等しい値を用いて行う。また、石英(20 vol.%)、正長石(18 vol.%)、曹長石(40 vol.%)、灰長石(20 vol.%)、黒雲母(2 vol.%)の5種類の鉱物を考慮し計算を実施する。また、溶解物質としては、Si, Al, K, Fe, Ca, Na, Mgの7種類について評価を行う。なお、分子拡散係数は、物質による依存性が低いことより、Siイオンの分子拡散係数をすべての溶解物質の拡散計算に用いる。それぞれの鉱物に対する頻度因子、活性化エネルギーは、すべて文献から獲得した値であり、対象とする鉱物粒子の溶解試験から評価している。これらの値を用いることにより、作用温度に依存する鉱物の溶解速度定数を算定することができる。

解析および実験結果の比較として、不連続面開口幅の経時変化図5に示す。特に不連続面開口幅と接触割合の関係を表すパラメー

タ a について0.03, 0.04, 0.05の場合の解析結果を示している。さらに、 $a=0.04$ で自由表面のラフネスファクター f_r を100倍に増加させたものを追加している(図中では、FF dissolutionと記述)。自由表面のラフネスファクターを増加させると、自由表面溶解フラックスは線形的に増加し、自由表面溶解を加速させることになる。その結果として、等しい自由表面積を持つ不連続面では、より開口幅を増加させ、透水性が高くなることになる。このラフネスファクター f_r は、BET法等で求める岩石構成鉱物の微視的な表面積(注: 鉱物の溶解・沈殿に直接寄与する面積で、化学的風化等の条件で大きく変化する)と幾何学的な表面積の比を表しているが、本研究ではBET法等で鉱物の比表面積を測定していないため実際のラフネスファクター f_r を同定することが不可能である。そこで、文献値より算定した値を100倍に増加させた解析についても検証する。

図5より、解析結果は、実験開始から50時間程度までは精度良く再現できているが、その後、開口幅が急激に低下する過程は再現できていない。これは、本モデルで考慮していないアスペリティ接触部の破碎等の影響も考えられるが、明確な判断はできない。一方、90°Cに温度を上昇させた後は、実験終了までの期間は概ね再現できており、特に $a=0.04$ の条件では、最終的な開口幅(解析結果: 1.03 μm)についても精度良く予測することができた。また、文献値を用いた解析結果と自由表面のラフネスファクターを100倍に増加させた条件での解析結果を比較すると、最終開口幅が、1.03 μm から1.13 μm に微増したが、透水期間全体的に変化量が小さいことが確認できる。つまり、本解析の境界条件および解析期間では、自由表面溶解は開口幅(透水性)の変化にそれほど寄与しないことが確認された。

つまり、本研究で採用した拘束圧10 MPa、温度20および90°Cという境界条件下では、溶解現象に起因する物質濃度は、自由表面の寄与度が非常に高く、透水性の変化は、圧力溶解に大きく依存することが考えられる。

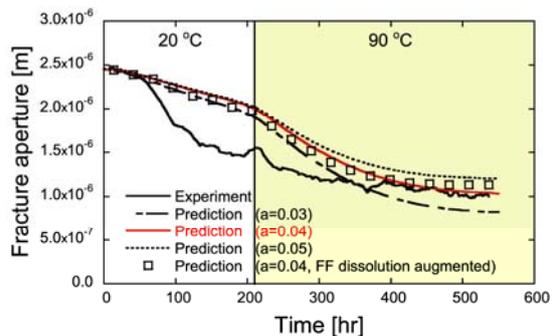


図5 実験結果および解析結果の比較図

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 2 件)

- ① 安原英明, 木下尚樹, Dae Sung Lee, 中島伸一郎, 岸田潔(2009), 力学-化学連成概念モデルによる花崗岩不連続面の透水・物質輸送経時解析, 土木学会論文集 C, 65, 41-52.
- ② Yasuhara, H. and D. Elsworth (2008), Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution, Pure Appl. Geophys., 165, 1289-1306.

[学会発表] (計 9 件)

- ① H. Yasuhara, S. Nakashima, and K. Kishida, (2009.11.2) Predicting temporal change of fracture permeability in granite via chemical-mechanical coupling model, Proc. 22nd KKCNN Symposium on Civil Engineering, Chiang Mai, Thailand, October-November, pp. 433-438.
- ② 安原英明, 木下尚樹, 中島伸一郎, 岸田潔 (2009.9.8), 熱・水・応力・化学連成現象を考慮した岩盤不連続面の透水・物質輸送解析, 日本鉱物科学会 2009 年年会総会, 札幌, p.11.
- ③ Yasuhara, H., N. Kinoshita, S. Nakashima, and K. Kishida, (2009.6.30) Evolution of fracture permeability in granite and its evaluation via coupled chemo-mechano conceptual model, Proc. 43rd US Symp. on Rock Mechs., Asheville, North Carolina, June-July, pp. ARMA 09-013.
- ④ Yasuhara, H., (2008.11.23) Temporal alternation of rock permeability by mechanically- and chemically-mediated dissolution: Aiming at an application to safe and long-term isolation of high level radioactive wastes, Proc. Int. Conf. Disasters and Developments, Kathmandu, Nepal, November 23-24, pp. 381-389.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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