

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360401

研究課題名(和文)熱・水・応力・化学連成環境における岩盤透水特性の解明と連成モデルの高度化

研究課題名(英文)Development of conceptual model describing long-term evolution of permeability in fractured rocks under coupled thermo-hydro-mechano-chemical conditions

研究代表者

安原 英明 (Yasuhara, Hideaki)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70432797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱・水・応力・化学連成場における岩盤の長期透水特性を室内試験および数値解析により評価した。岩盤の長期透水特性を把握することは、放射性廃棄物地層処分近傍の岩盤の堅牢性を評価する上で必要不可欠である。室内試験の結果、温度が20より90の方が透水性の低下程度が大きくなることが確認された。これは、岩石構成鉱物の溶解・沈殿現象に起因していることが判明した。鉱物の溶解・沈殿を記述する数値モデルを構築し、岩盤の透水性変化を予測した結果、実験結果を概ね再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：This study has examined a long-term evolution of permeability in fractured rocks under various stress and temperature conditions. The experimental observations show that the permeability decreases with time and the rate and the magnitude of the changes are more significant at higher temperature, which should result from the geochemical reactions such as mineral dissolution and precipitation. I have developed a numerical model that predicts the long-term evolution of permeability under arbitrary stress and temperature conditions. The predictions agree with the experimental measurements, indicating the validity of the developed model.

研究分野：岩盤力学

キーワード：岩盤 透水特性 鉱物溶解・沈殿

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物等のエネルギー生成後の副産物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期に渡りその性能を保証するためには、対象となる岩盤の地質学・力学・水理学特性を詳細に把握する必要がある。例えば、高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価を行う場合、処分施設は深部環境に建設されるため応力レベルは高く、また廃棄体からの発熱により周辺岩盤の温度は上昇する。その結果、岩石構成鉱物の溶解・沈殿現象等の化学作用が卓越し、岩盤の水理学・力学特性に大きな影響を及ぼすことが予想される。しかしながら、応力・温度に依存する化学作用を包含する岩石-水の相互作用現象に起因する岩盤の水理学・力学特性の経時評価については、これまで積極的に行われてこなかったのが現状である。

実験的な検討として、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(変形性・強度)および水理学(透水挙動)特性の経時変化を長期にわたり観察・考察した研究があるが、それらは経時変化のメカニズムを物理的なモデルで定量化しておらず、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。さらに、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(特に石英)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事例があるが、これらの多くは、様々な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。

また、理論的な検討としては、温度、pH、イオン強度等に依存する種々の鉱物の溶解・沈殿に起因する透水特性変化を時系列で評価するモデルが構築されており、THC(温度・水・化学)連成数値シミュレータも開発され、実問題に適用されている。しかしながら、これらの解析モデルや数値シミュレータは、岩石実部及び不連続面空隙内の溶解・沈殿現象についてしか考慮しておらず、圧力溶解現象等の粒子接触部での化学現象を考慮していない(作用する応力が増加すれば、鉱物溶解は加速することが知られているが、現在の汎用シミュレータではそのような影響を表現できない)。また、このような化学作用に起因する岩盤の透水特性の変化を“精度良く”評価が可能なモデルが存在していないのが現状である。

化学現象による岩盤の水理学・力学特性の変化を時系列で記述する精度の高いモデルが存在しないのは、実験室レベルでの評価データが圧倒的に不足していることに起因している。精度の高いTHMC(温度・水・応力・化学)連成シミュレータを開発するため、延いては高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価を行うためには、温度・応力に依存する鉱物溶解・沈殿現

象等の化学作用に起因する岩盤の水理学・力学特性の経時変化を実験的に観察し、データを収集することが不可避である。その結果として、背後に存在するメカニズムを解明することができ、精度の高いモデルを構築することに繋がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、結晶質岩(花崗岩)および堆積岩(珪質泥岩)に着目し、拘束圧・温度を制御した透水試験を実施し、花崗岩不連続面および泥岩実部・不連続面の透水性の経時変化を観察するとともに、現解析モデルの拡張を行う。透水特性の変化は、拘束圧・温度による作用応力の変化に起因するものと、化学作用(圧力溶解、沈殿現象等)を介した岩石構造骨格の変性に起因するものに大別できる。前者は、短期間で収束すると考えられるが、後者はより長期間の時間を必要とすると予想される。そこで、様々な境界条件(拘束圧:0~20 MPa, 温度:20~150 °C, 化学条件:pH 3~13, 試験時間:数時間~数ヶ月)で透水試験をし、それぞれの影響を定量的に評価する。さらに、透水試験前後の岩石供試体の薄片サンプルを作製し、走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析装置(SEM-EDX)を用いて微視的構造の変化および鉱物組成の変化を観察する。現在の解析モデルは、構造(幾何学形状)の微視的变化を表現することが可能で、かつ鉱物組成の変化を再現することが可能であるので、観察結果との比較検証を行うことができる。その結果として、現解析モデルの改良・拡張が行える。

拘束圧・温度による化学作用を介した、岩石と水との相互作用(透水・力学特性の経時変化)を実験室レベルで再現できるモデルを構築した後は、実地盤の現象を予測評価するためのアップスケールが必要である。そこで本研究では、熱・水・応力連成解析を行うことのできる連成数値シミュレータを適用する。本研究により構築される解析モデルを、熱・水・応力連成シミュレータと連成させれば、熱・水・応力・化学相互作用を一貫して評価できる連成シミュレータを構築することが可能である。

3. 研究の方法

本研究では、(1)拘束圧・温度を制御した岩石不連続面・実部の透水試験を実施し、応力・温度に依存する化学溶解・沈殿現象による岩石の透水特性の経時変化を定量的に評価する。次に、得られる実験結果を再現できる(2)現象論的解析モデルを構築すると共にモデルの有用性を検討する。最終的に、構築される解析モデルを数値シミュレータに組み込み、(3)熱・水・応力・化学連成シミュ

レータを開発し、種々の工学的課題(例えば、高レベル放射性廃棄物処分施設ニアフィールドの長期性能評価)への適用性を検討する。
<研究スケジュール概略>

- ・H23 年度：透水試験装置の開発(予備実験の実施含む)、フロースルー溶解試験の実施
- ・H24 年度：本実験開始、解析(透水)モデルの評価・拡張
- ・H25 年度以降：実験継続、拡張するモデルの妥当性検討、連成シミュレータ開発

4. 研究成果

温度・高側圧を制御した岩石透水試験

堆積岩であるペレア砂岩および幌延泥岩の2種類の岩石を用いて、温度(20, 90 °C)、拘束圧(3.0-15 MPa)の地下深部の圧力環境を再現した環境下で等方圧保持試験を最大で700日間実施した。ペレア砂岩では、不連続面を含まない岩石実部および単一不連続面を有する供試体を対象とし、幌延泥岩では、単一不連続面を有する供試体に対して実験を実施した。実験期間中には、等方圧保持状態で透水試験を定期的に行い、岩石透水特性の経時変化を長期観察した。また、等方圧保持・透水試験中に透過水を採取し、ICP 発光分光分析を行うことにより、溶出元素濃度の経時変化を定量的に評価した。

長期透水試験の結果、ペレア砂岩(岩石実部)は初期値から時間の経過とともに透過率が数100日間で2~7倍程度上昇する結果が得られた。一方、幌延泥岩の場合は、透過率は時間の経過とともに減少したのち上昇に転じ、再び低下傾向を示す複雑な挙動が観察された。

また、単一の圧裂・平滑不連続面を有する花崗岩円柱供試体を用いて、透水実験を実施し、不連続面開口幅の経時変化を定量的に評価した。透水試験中には透過水をサンプリングし、ICP 発光分光分析により物質濃度を定量的に評価し、透水性変化に起因する鉱物溶解現象を精査した。さらに、実験後の供試体不連続面に対して走査型電子顕微鏡を用いた微視構造観察を実施し、鉱物の溶解・沈殿等の化学作用で生成する二次鉱物の有無を確認した。本研究で得られた知見を以下に述べる。

- 1) 透水試験では、不連続面開口幅は実験開始直後から徐々に低下し、数百時間程度でほぼ定常に至った。その後、温度を90 に上昇させると、さらなる開口幅の低下を示し、最終的な開口幅は初期開口幅の10~20%程度まで減少した。不連続面開口幅の変化は作用温度に大きく依存することが確認された。
- 2) pH 条件の違いが透水性の変化に及ぼす影響に着目して検討した結果、アルカリ条件の不連続面開口幅の低下率は中性条件と比較して大きくなることが観察された。一方、アルカリ条件の方が中性条件の時よりも鉱

物の溶解現象が卓越し、最終的な不連続面開口幅の定常値は大きくなることが確認された。

- 3) 透水実験中の透過水をサンプリングし、溶存する物質濃度をICP 発光分光分析により定量的に評価した結果、Si 濃度が他の元素よりも高いことが判明した。また、温度およびpHを上昇させた場合、全ての物質濃度が増加したことから、透水性の低下は鉱物の溶解現象に起因していることが確認された。

- 4) 微視構造観察による二次鉱物の確認を行った結果、溶出したSiの再沈殿により生成されるシリカ鉱物を確認することができた。また、中性条件では炭酸塩等も確認できた。開口幅の大きさからこれらの二次鉱物が透水性に影響を及ぼしていることが推察された。

フロースルー溶解試験

様々な温度・pH条件下でフロースルー溶解試験を実施し、花崗岩の溶解特性を精査した。その結果、Siの溶出濃度を用いて、任意の温度、pH環境下における花崗岩の見かけの溶解速度定数式を導出することができた。導出した溶解速度定数式を用いて、フロースルー溶解試験を再現したところ、他の元素濃度についても精度良く予測することができた。また、導出された溶解速度定数式を用いて過去に実施された透水試験の再現解析を行い、本研究で得られた溶解速度式の妥当性を検証した。その結果、実験値を概ね再現でき、溶解速度式の妥当性を確認することができた。

概念モデルの改良および適用

本研究では、圧力溶解現象を考慮した概念モデルを用いて、応力・温度の作用によるペレア砂岩の透水性評価を実施し、モデルの妥当性を検討した。圧力溶解現象とは、1) 不連続面内接触アスペリティ間の接触面における溶解現象、2) 接触境界面から間隙への溶解物質の拡散、3) 間隙自由表面での沈殿現象の一連のプロセスからなる。これら溶解・拡散・沈殿現象は互いに干渉し合っており、相互影響を評価する必要がある。本研究では、上述の圧力溶解現象を考慮した解析モデルを用いて透水試験の再現解析を実施した。その結果、透水試験結果で得られている透過率の増加現象について表現することが可能となった。また、圧力溶解現象によって間隙中に溶解した物質濃度についても透水試験結果を概ね精度よく再現することが可能となった。しかしながら、本解析モデルは、代表要素に対してある応力・温度条件下の化学作用による透水特性の変化を予測評価しているに過ぎず、実際の処分坑道周辺に存在する岩石の水理学特性を長期にわたり予測するためには熱・水・応力・化学の影響を連成して全体評価しなければならない。そのため、さらなるモデルの改良が必要である。

THMC 連成数値解析モデルの開発

研究では、岩石内自由表面における鉱物溶解・沈殿現象と共に粒子接触部での圧力溶解現象を考慮した熱・水・応力・化学連成解析モデルを開発し、放射性廃棄物地層処分施設の周辺岩盤の水理学特性（透水性）の長期挙動予測を行った。自由表面溶解・沈殿現象と共に圧力溶解現象を考慮した条件と、圧力溶解現象を考慮せず、自由表面溶解・沈殿現象のみを考慮した条件における透水性経時変化を比較し、圧力溶解現象による透水性変化への影響度を評価した。その結果、圧力溶解を考慮しない場合は、自由表面溶解・沈殿現象による影響のみでは透過率の変化は確認されず、圧力溶解を考慮した条件では、時間の経過に伴い空隙率および透過率が低下する傾向が確認された。特に、空洞周辺 EDZ で圧力溶解現象による透過率低下が顕著であり、空洞から離れるほどその影響は小さくなることが判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

K. Kishida, A. Sawada, H. Sato, H. Yasuhara, and T. Hosoda (2013), Estimation of fracture flow considering the inhomogeneous structure of single rock fractures, *Soils and Foundations*, 53, 105-116. (査読有)

Dae Sung Lee and Hideaki Yasuhara (2013), An evaluation of the effects of fracture diagenesis on hydraulic fracturing treatment, *Geosystem Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/12269328.2013.780762>. (査読有)

安原 英明・長谷川大貴・中島 伸一郎・矢野隆夫・岸田 潔 (2013), 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, 71-79. (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

H. Yasuhara, N. Kinoshita, S. Nakashima, and K. Kishida (2015), CHEMICALLY- AND MECHANICALLY-DRIVEN ALTERATION OF PERMEABILITY IN FRACTURED ROCKS UNDER DIFFERENT STRESS, TEMPERATURE, AND PH CONDITIONS, Proc. the 13th International Congress of Rock Mechanics, ISRM Congress 2015, Montreal, Canada, May 10-13, pp. Paper 508.

H. Yasuhara, N. Kinoshita, K. Maeta, S. Nakashima, K. Kishida (2014), Evolution of Permeability in Granite Fracture under High pH Conditions, Proc. 8th Asian Rock

Mechanics Symposium (2014 ARMS8), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, October 14-16, 2014, pp. arms8_RW2-1.

Naoya Tsuda, Hideaki Yasuhara, Takao Yano, Kiyoshi Kishida (2014), Discussion on friction factor of single rock joint under slide-hold-slide process in considering influence of thermal conditions, Proc. 8th Asian Rock Mechanics Symposium (2014 ARMS8), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, October 14-16, 2014, pp. arms8_RP3-6.

S. Maskey, H. Yasuhara and K. Kishida (2014), Mechanical Behavior of Rock Joints with Various Kinds of Joint Surface Roughness under Cyclic Direct Shear Loading Conditions, Proc. 8th Asian Rock Mechanics Symposium (2014 ARMS8), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, October 14-16, 2014, pp. arms8_RP3-2.

Mamoru Kikumoto, Nguyen P. Q. Vu, Masato Ohno, Kiyoshi Kishida, Hideaki Yasuhara and Derek Elsworth (2014), Structural healing and decay of sedimentary soft rock in triaxial slide-hold-slide process and its modeling, Proc. 8th Asian Rock Mechanics Symposium (2014 ARMS8), Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, October 14-16, 2014, pp. arms8_P0-9.

Kishida, K., Tsuda, N., Yano, T., and Yasuhara, H. (2014), Time Dependency Friction Factor of Rock Single Fracture under Slide-Hold-Slide Direct Shear Experiments, Proc. 48th US Symp. on Rock Mechs., Minneapolis, Minnesota, USA, June, pp. ARMA 14-7388.

Yasuhara, H., Kinoshita, N., Nakashima, S., and Kishida, K. (2014), Evolution of Mechanical and Hydraulic Properties in Sandstone Induced by Mineral Trapping, Proc. 48th US Symp. on Rock Mechs., Minneapolis, Minnesota, USA, June, pp. ARMA 14-7112.

Hideaki Yasuhara, Manabu TAKAHASHI, Kiyoshi Kishida, Shinichiro Nakashima (2013), Chemo-Mechano Coupling Processes Inducing Evolution of Rock Permeability under Hydrothermal and Stressed Conditions (Invited), Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl., San Francisco, California, USA, December, Abstract H31G-1271.

H. Yasuhara, M. Takahashi, N. Kinoshita,

S. Nakashima, K. Kishida (2013), Evaluation of Rock Permeability Alteration by Long-term Flow-through Experiments and by Microstructural Investigation, Proceedings of the 6th International Symposium on In-situ Rock Stress, Sendai International Center, Sendai, Japan, August 20-22, 2013, pp.288-297.

Yasuhara, H., Kinoshita, N., Takahashi, M., Nakashima, S., and Kishida, K. (2013), Long-term Observation of Rock Permeability under High Pressure and Temperature Conditions and Its Microstructural Interpretation, Proc. 47th US Symp. on Rock Mechs., San Francisco, California, USA, June, pp. ARMA 13-236.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~gm/>

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