

京都大学	博士（工学）	氏名	緒方 奨
論文題目	Development of Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical Models for Predicting Rock Permeability Change (岩盤の透水性変化を予測する熱・水・応力・化学連成モデルの開発)		

(論文内容の要旨)

本論文は、高レベル放射性廃棄物などエネルギー生成後の副産物を天然バリアである岩盤内に地層処分する際の長期透水性変化を予測可能なシミュレータの開発とその有効性について論じたものである。地層処分では、処分空洞掘削時の応力再配分に起因する岩盤内の掘削損傷領域（き裂発生・進展）の生成、廃棄体からの熱伝導、地下水流動に伴う水理場の変化と物質輸送、熱・応力に起因する岩石構成鉱物の溶解・沈殿による構造の変化等、長期間の性能を評価しなければならないため、種々の要因が影響しあう複雑な連成場が形成される。これらの要因は、熱（Thermal:T）-水（Hydraulic:H）-応力（Mechanical:M）-化学（Chemical:C）に関する各現象が相互に作用し、時系列的に変化するものである。本論文では、地化学反応による岩盤の透水性経時変化を予測可能な THMC 連成解析モデルの開発とそのモデルを用いた高レベル放射性廃棄物地層処分時の岩盤の長期透水性変化を論じたもので、7章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文の目的と手法を記述している。岩盤の水理学的特性（透水性）の長期変化を予測するうえで、岩石内空隙部及び割れ目の接触部で生じる岩石鉱物と空隙水間で生じる鉱物の溶解・沈殿といった地化学反応を THMC モデルに考慮することの重要性を記している。このうち、割れ目の接触部で生じる圧力溶解は、岩盤の透水性が長期的に数オーダー程度低下する可能性が示唆されているが、圧力溶解現象を考慮可能な連成解析モデルは、構築されていない。本章では、この圧力溶解現象を考慮可能な THMC 連成解析モデルの開発の必要性を示しながら、本論文の目的を記述している。

第2章は既往研究のレビューであり、本研究の目的を遂行するうえで重要となる地化学反応による岩盤の透水性変化に関する既往研究や THMC 連成現象に関する既往研究を示し、地化学反応による岩盤の透水性経時変化を予測可能な THMC 連成解析モデルの開発の問題点を示しつつ、本研究で開発する THMC 連成解析モデルに圧力溶解現象、Dual porosity 理論、損傷理論を導入することの必要性・意義を説明している。さらに、本論文の構成と各章の概要を記している。

第3章は、粒子接触部における圧力溶解を組み込み、岩石実部における地化学反応による経時的な透水性変化を計算可能な THMC 連成解析モデルの提案を行っている。また、提案したモデルを用いて高温・高圧条件下で飽和石英砂の空隙率・溶解物質濃度変化を評価した室内実験の再現解析を行い、提案したモデルの妥当性を検証した。その結果、提案したモデルは地化学反応に伴う空隙率の時系列変化について実験結果を精度よく再現し、岩石実部における地化学反応に伴う岩盤の空隙・透水性変化の予測において有効性が高いことを示している。さらに、構築したモデルを用い、多孔質岩盤を想定した放射性廃棄物地層処分空洞の周辺岩盤の長期透水性変化の予測解析を実施している。その結果、圧力溶解現象の影響により時間の経

京都大学	博士（工学）	氏名	緒方 奨
<p>過とともに想定した放射性廃棄物地層処分空洞の岩盤の透水性が、ここで設定された条件では最大で1オーダー程度低下する傾向を確認している。</p> <p>第4章では、岩石内割れ目接触部における圧力溶解現象を組み込み、経時的な岩石割れ目の透水性変化を記述可能な THMC 連成解析モデルの提案を行った。加えて、提案したモデルを用いて、温度・拘束圧制御条件下で実施された単一割れ目を有する花崗岩および泥岩供試体の透水試験の再現解析を行い、モデルの妥当性を検証している。花崗岩および泥岩透水試験の再現解析では、提案モデルは、岩石割れ目の水理学的開口幅と透過水中の溶解元素濃度変化ともに比較的良好に実験値の再現がなされていることを実証している。既存の連成解析モデルは、10^6 オーダーの値の大きなフィッティングパラメータの適用無しでは同様の実験結果を再現出来ておらず、そのようなパラメータを必要とせず実験結果を再現できた点で、ここでの提案モデルの有効性の高さが確認された。結果として、提案した連成解析モデルが、岩石割れ目内の地化学反応に伴う透水・物質輸送特性変化を高い精度で評価可能であることを実証している。</p> <p>第5章では、第3章と第4章で構築したモデルに Dual porosity 理論を援用し、岩石実部と岩石割れ目の両空隙での地化学反応による経時的な透水性変化を記述可能な THMC 連成解析モデルを提案している。さらに、開発した解析モデルを用いて、仮想される放射性廃棄物地層処分空洞の岩盤の透水特性変化の長期挙動予測解析を行っている。ここでは、本研究で提案する解析モデルで考慮可能な圧力溶解現象の内、岩石実部と割れ目における二つの圧力溶解現象の影響について、長期挙動予測解析で比較し、透水性変化への影響度の評価を行っている。解析結果から、二つの圧力溶解現象の影響を考慮する場合とそうでない場合では、明らかに透水特性の経時変化に大きな差異ができることを確認している。すなわち、岩盤割れ目での圧力溶解の影響により、空洞掘削損傷領域において、掘削後約20年以内に透水性が他の健全部と同等の値まで低下する傾向が確認されている。すなわち、空洞掘削損傷領域のような岩石実部と割れ目の異なる空隙系を有する領域では、岩石実部より割れ目における圧力溶解現象が、岩盤の透水性変化に支配的影響を及ぼすことを示唆している。また、割れ目の透水性挙動の低下は、開口幅と接触面積の関係性に強く依存することが基礎実験から確認されているが、開口幅や接触面積に関係するパラメータを変化させることで、実岩盤空洞周辺においてもこれらのパラメータが岩盤の透水性の経時変化に強く影響を及ぼすことを示している。結果として、実現象を精緻に予測するには、開口幅と接触面積の値を適切に設定することが重要であることを示唆している。</p> <p>第6章では、損傷理論を導入することにより岩盤内での割れ目発生・進展を解析するとともに、その割れ目内での鉱物溶解・沈殿プロセス（圧力溶解及び自由表面溶解・沈殿）を記述可能な THMC 連成解析モデルの提案を行っている。ここではまず、花崗岩供試体を用いた一軸圧縮試験を対象とした再現解析を行っている。損傷理論を導入することにより、一軸圧縮試験の応力-ひずみ関係、一軸圧縮強さを再現し、供試体に現れるせん断帯の発生・進展が精度よく再現出来ることを確認している。これにより、提案する THMC 連成解析モデルでは、力学挙動の解析において割れ目の発生・進展を再現できることを実証している。つぎに、提案したモデルを用いて、仮想される放射性廃棄</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	緒方 奨
<p>物地層処分坑道の周辺岩盤における長期透水性変化の予測解析を行った。解析結果から、掘削に伴い坑道周辺で割れ目が発生・進展し、その領域では透水性が健岩部より約2オーダー程度高くなることを示している。また、割れ目の発生領域は、初期応力場に影響を受け、水平応力が卓越する場合、最も広範囲に生成されることを確認している。さらに、長期連成解析の結果から、割れ目接触部で生じる圧力溶解の影響により、坑道周辺のほとんどの損傷領域（せん断損傷領域）において、透水性が他の健岩部と同等の値まで低下することを確認している。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、放射性廃棄物などエネルギー生成後の副産物を地中貯留・固定する際の天然バリアとしての岩盤の性能を精緻に評価する解析モデルおよびシミュレータの構築を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 粒子接触部における圧力溶解モデルを提案し、それを熱 (Thermal:T) -水 (Hydraulic:H) -応力 (Mechanical:M) -化学 (Chemical:C) 連成解析モデルに組み込むことを可能とした。このモデルにより、鉱物反応に伴う空隙率の経時変化の実験結果を高精度で再現することに成功し、実問題への応用が可能であることを示した。
2. 岩石割れ目接触部における圧力溶解モデルを提案し、それを THMC 連成解析モデルに組み込むことを可能とした。このモデルにより、岩石 (花崗岩) 割れ目の透水性と透過水中の溶解元素濃度の経時変化を高精度で再現することに成功し、実問題への応用が可能であることを示した。
3. 粒子接触部および岩石割れ目接触部での圧力溶解を THMC 連成解析モデルに同時に組み込むため、Dual porosity 理論を応用した。この解析モデルを用い、地下空洞周辺岩盤の掘削時および長期間の透水性変化の予測解析を実施した。二つの圧力溶解現象を考慮することにより、空洞掘削損傷領域での透水性が一定の期間を経て健岩部と同等になることを示した。
4. THMC 連成解析モデルに損傷理論を導入することで、掘削などにより空洞周辺に発生する割れ目の発生・進展挙動の再現に成功した。また、地下空洞掘削解析では、空洞周辺で割れ目が発生・進展することを示し、さらに、長期間ではその透水性がせん断性の割れ目の場合、健岩部と同様になることを示した。

以上、本論文は、圧力溶解による岩盤の透水性経時変化を予測可能な THMC 連成解析モデルの開発と実問題への適用性を示した研究で、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年 7 月 12 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。