

京都大学	博士（工学）	氏名	宋 忱 潞
論文題目	Long-term observation of rock fracture permeability and structure under various pressure and temperature conditions (様々な拘束圧および温度条件下での岩盤不連続面透水性と構造の長期観測)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、岩石・岩盤中に存在する割れ目（不連続面）の透水性が、様々な応力条件・温度条件でどのように変化するかを長期にわたり計測し、同時にμフォーカス X 線 CT により岩石中の不連続面構造の経時変化の可視化を行ったものである。不連続面の透水性を評価することは、高レベル放射性廃棄物や CO₂ 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安全性評価に必要不可欠な情報である。本論文では、長期的な透水性の変化だけでなく、不連続面構造の変化を可視化し、不連続面内の接触状況の変化は圧力溶解現象に起因するものであるという立場から、その現象を記述する概念モデルのパラメータの設定を論じたもので、8章から構成されている。</p> <p>第1章は序論である。まず、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処分する際、岩盤の水理学特性、特に不連続面の透水性の経時変化を把握することが、これらのプロジェクトの安全性を評価するうえで必要不可欠なことを記述し、本研究を実施する社会的意義を示している。また、種々の温度条件・拘束圧条件で不連続面の透水性の経時的に変化することは、不連続面の構造および接触状態が経時的に変化することによるものであり、μフォーカス X 線 CT による不連続面構造の可視化の意義を説明している。さらに、これら不連続面構造の変化や接触部変化は、圧力溶解現象により生じるものであるという考えに立ち、圧力溶解現象を記述する概念モデルに必要なパラメータのうち不連続面内の接触率に起因するパラメータの算定の必要性を述べている。これら背景、目的、手法を述べたのち、第1章では本論文の構成について記述している。</p> <p>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不連続性岩盤の透水性、力学特性に関する既往研究、熱-水理-力学-化学連成現象に関する既往研究、X 線 CT の不連続性岩盤への適用性に関する既往研究、単一不連続面の透水シミュレーションに関する既往研究をそれぞれ示し、本研究で実施する長期透水試験、その際の不連続面構造のμフォーカス X 線 CT による可視化の必要性・意義を説明している。</p> <p>第3章は、単一不連続面の透水試験を実施している。実験には花崗岩を用い、圧裂試験により円柱供試体の中央部に引張り裂を発生させている。実施された実験は、大別して2種類である。まず、20℃、60℃、90℃の各温度条件において、1 MPa から 3 MPa まで載荷・除荷を3回繰返し、所定の応力状態で透水性の計測を行っている。つぎに、同じく 0℃、60℃、90℃の各温度条件で 3 MPa で 180 日間拘束し、透水性と溶出鉱物の経時変化を計測している（90℃条件では、120 日間）。載荷・除荷過程の実験では、荷重の増加および減少により透水性が変化するが、20℃条件では、一定の振幅で変動し可逆的な透水性を示している。一方、60℃では、載荷・除</p>			

荷における透水性の変化とは別に、徐々に透水性が減少する傾向を確認している。さらに、90℃条件では、加温と同時に透水性が大きく減少し、載荷・除荷による透水性の変動の振幅は60℃条件より小さく、最終的に非可逆的な透水性を示している。長期試験では、20℃、60℃では、時間の経過とともに徐々に透水性が減少する傾向を示している。また、90℃に加温すると明確に透水性が減少し、その後は一定応力での保持期間中は定性的な透水性の変化傾向は確認できていない。採水分析より、20℃と60℃を比較すると、60℃条件でSiの溶出が顕著となっている。これらの実験結果より、載荷・除荷のような力学的な不連続面の構造の変化により透水性が変化するが、本研究の応力範囲では可逆的なものであること、一方、載荷・除荷の過程での加温および長期的に載荷での加温により、非可逆的な透水性の変化が生じことを確認し、非可逆的な透水性の変化は、鉱物の溶出など地化学的要因により不連続面の構造が変化していること、圧力溶解現象が不連続面の凹凸の接触部を中心に生じていることを示唆している。

第4章では、長期透水試験中の不連続面の構造変化・接触状態の変化をとらえることを目的として、 μ フォーカスX線CTによる撮影と画像分析を実施している。結果として、拘束状態での不連続面の構造の抽出に成功し、接触率を算定している。長期透水試験では、経時的に透水性が徐々に減少する傾向がとらえられているが、CTによる画像解析結果においても不連続面の開口幅が減少する傾向をとらえている。また、20℃条件では、接触率は徐々に増加の傾向にあることを示しており、透水性の変化と相関性があることを示している。また、X線CTの分析において、解像度の差異が結果に及ぼす影響を検討し、解像度の設定や画像解析の手法を明確にして議論を進める必要があることを示唆している。

第5章では、第4章でのX線CTの分析において、解像度や画像解析手法が結果に影響を及ぼすことに対する検討を行っている。岩盤不連続面の構造をX線CTより分析するには、空隙と岩石部を分離する閾値を決めなければならず、その適切な方法がないことが問題とされている。本論文は、CT値の分布から閾値を設定し岩石部と不連続面（空隙部）を分離するRegion Growing Method、岩石内に不動点（CT値が極端に異なる鉱物等）を設定し、そこから距離で不連続面形状を抽出するEdge Detection Methodの2手法を導入し、比較検討を行っている。結果から、2手法共に不連続面の構造と接触率を算出することが可能であることを示しながら、接触部分の抽出に関しては、Edge Detection Methodに優位性があることを示している。

第6章では、X線CT画像の分析から得られた不連続面構造と接触状態を用いて浸透流解析を実施している。20℃で0 MPaと3 MPaの拘束状態でのX線CT画像の分析結果を用いて、浸透流解析を実施している。浸透流解析の結果より、不連続面内の流れは、凹凸形状や接触状況により不均質に流れることが確認されている。また、時間の経過とともに透水性が減少することがとらえられている。しかしながら、浸透流量において解析結果と実験結果では乖離がみられることが示されている。X線CT撮影と透水試験で用いた供試体のサイズが異なることが、その原因の一つと考えられる。

第7章では、第3章の結果から長期拘束圧状態・加温状態において、地化学的な応答、

京都大学	博士（工 学）	氏名	宋 忱 澍
<p>すなわち圧力溶解現象が発生しているとの考えから、圧力溶解現象を説明する概念モデルに用いるパラメータの算定について検討を行っている。X線CTで求められる開口幅と接触率の経時変化を求め、圧力溶解現象の化学概念モデルでの開口幅変化を記述する式とその関係を比較検討している。開口幅変化を示す式には、パラメータ a が用いられており、従前は拘束条件下での不連続面の接触状態や開口幅の状況が不明であったため試行錯誤的に求められてきた。本論文では、限られた条件ではあるが、実際の開口幅と接触率の経時変化よりパラメータ a を 0.08 と決定している。</p> <p>第8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・固定する際の岩盤の水理学特性の長期特性を評価するため、その基礎となる不連続面の透水性と不連続面構造の変化を種々の温度・拘束圧条件下で基礎実験を実施して経時的にとらえ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. 载荷・除荷の力学的な応答に対して透水性は変化するが、化学的なものである。一方、温度条件を付加すると、载荷・除荷の過程において透水性は非可逆的な応答を示す。これは、加温に伴い圧力溶解現象等の化学的反応を示し、不連続面の構造が変化したことを示している。
2. 一定の拘束条件で長期間保持する実験では、透水性は徐々に減少することが確認された。採水分析により鉱物の溶出が確認されていること、また、加温により鉱物の溶出が促進されていることから、不連続面の接触部で圧力溶解現象が生じていることを示している。
3. 長期透水試験において、 μ フォーカス X 線 CT による不連続面の撮影および画像解析を実施し、その結果から不連続面の開口幅が徐々に併合し、接触率が増加することを示している。また、画像解析結果を用いた浸透流解析では、不連続面の流れの不均質性を示すことが可能となった。
4. 拘束状態での不連続面の開口幅分布および接触率の把握がなされないまま、パラメータ a の設定を試行錯誤的に行い圧力溶解現象の概念モデルが用いられてきた。本論文では、一定の条件下ではあるが、 μ フォーカス X 線 CT の画像分析により不連続面の開口幅と接触率の経時変化を直接とらえることが可能となり、パラメータ a を 0.08 と設定した。

以上、本論文は、各種温度・応力条件での岩石不連続面の透水性の経時変化と不連続面構造の経時変化をとらえ、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 2 年 2 月 19 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。