学位論文題名

岩石の浸透性に対して
破壊や溶解が及ぼす影響に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性検証などのため、地下環境における物質移行の把握は重要な課題となっている。岩石中の移流現象は物質移行の代表的な機構の一つであり、この点から岩石の浸透性を把握すること重要であると考えられる。岩石の浸透性は、高レベル放射性廃棄物の地層処分だけでなく、石油や天然ガスの開発、地熱エネルギーの利用などにおいても重要である。

高レベル放射性廃棄物は人類にとって有害であり、これを安全に処分するためには生活圏から長期間隔離処理する必要がある。高レベル放射性廃棄物には半減期が非常に長い放射性物質が含まれているため、安全に処理するためには数万年オーダーの長期間に渡って人類から遠ざけて処理する必要がある。日本においては地層処分が高レベル放射性廃棄物処理の基本的な方針となっている。地層処分の安全性の検証においては、核種の流出を防ぎ地下の処分空洞内に封じ込めることが重要であり、原位置岩盤の浸透性も安全性の検討において不可欠である。また原位置岩盤は掘削の段階で損傷を受けることや、数万年という時間の経過と共に、浸透性が変化する可能性があり、これらの要因によって浸透性がどのように変化するかを把握する必要がある。破壊や圧力溶解現象が岩石の浸透性におよぼす影響については、まだ明らかに生っていない部分が多くあり、解明が望まれている。本研究では浸透性に影響をおよぼし得る現象として、破壊と溶解に関して検討を行った。

破壊が浸透性におよぼす影響を明かにするために、圧縮破壊過程に室内実験による検討を行った。実験には岩石試料として来待砂岩を用いた。実験では地下の応力状態を模して、供試体に三軸圧縮応力を加え、最大種応力を徐々に増加させることで破壊を進行させ、変形挙動と浸透性の変化、空隙率の変化を調査した。実験条件は、室温で封圧 5.0~15.0 MPa、最大軸ひずみ 5% 程度までで行った。浸透性の計測はトランジェント・パルス法によって行った。空隙率の変化はシリンジ・ポンプを用いて間隙水量の変化を計測することで求めた。また実験に用いた岩石から薄片を作成し、薄片の観察や画像解析を行い、破壊過程における岩石構造の変化や、封圧がおよぼす影響について調べた。

実験によって以下のことが明らかとなった。封圧 5.0, 7.5 MPa の実験では、軸差応力が比較的小さい段階において固有浸透率は若干減少し $1.0\sim 2.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 程度の値であった。その後はピーク強度に近づくにつれて増加し、 $4.0\sim 6.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 程度の値が見られた。軸ひずみ約 4.0% の段階で固有浸透率は若干減少した。封圧が 10.0, 15.0 MPa の実験では固有浸透率の変化は軸ひずみ 5.0% 程度まででは小さかった。

薄片の画像解析によって、封圧 5.0 MPa の状況における、破壊の進行の過程を定量的に調査し

た。破壊が進むにつれて、空隙の最大径などが増加することを定量的に確認した。また封圧の違いによって生じた破壊形式の違いを定量的に示した。

実験において見られた、封圧の増加によるぜい性的な破壊から延性的な破壊への破壊形式の変化が生じた原因の検討を行った。有限要素法による弾性解析によって端面拘束が及ぼす影響について検討を行い、端面拘束によって封圧が低い場合には、供試体の角の部分と中央の部分が破壊しやすく、供試体を斜めに横断する亀裂が生じ易くなることを示した。

浸透率に影響をおよぼす要因として、圧力溶解も重要な現象であると考えられており、様々な研究が行われている。しかし、応力が溶解速度を促進するメカニズムや、応力と溶解速度の定量的な関係、岩種による違いなどについては明らかにされておらず説明が望まれている。圧力溶解とは岩石を構成する鉱物が応力を受けることで、周辺の水への溶解が促進される現象である。本研究ではNaCl結晶を対象とし、応力下における自由面の溶解の機構について検討した。NaCl結晶を対象とした理由は、NaCl結晶に関する溶解の実験がいくつか行われており、これら既往の実験の結果と比較を行うことで本研究において提案するメカニズムの妥当性について検討ができると考えたためである。

本研究では応力下における自由面の溶解の速度論には結晶自由面近傍の性質が重要な役割を果たすと考え、自由面近傍の応力や、弾性定数を用いて、応力と溶解速度の関係を定式化することを試みた。提案したメカニズムを検討するためには、自由面近傍の応力や、弾性定数が必要となるがこれを実験的に計測することは難しいため、分子動力学法によるシミュレーションを行い、数値計算によって推定することを試みた。また数値計算により得られた結果と、既往の研究の比較を行い応力下における自由面溶解のメカニズムについて論じた。

分子動力学法のシミュレーションの結果、自由面近傍の一番外側のイオンにおいて自由面に平行な方向に大きな引張直応力が生じていた。応力の値は自由面近傍が真空の条件で約2.25 GPa、水分子が存在する条件では約1.02 GPaとなり、引張応力は水分子の存在によって緩和されるという結果が見られた。また弾性定数についても自由面第一層の値がこれより深い部分と多少異なる結果となった。弾性定数の計算結果は C_{xxxx} 及び C_{yyyy} は 64 GPa、 C_{xxyy} は 14 GPa、 C_{xyxy} は 18 GPa 程度の値であった。この結果から、結晶に対して自由面と平行な方向にさらに引張応力を加えることで、結晶自由面近傍における 1 mol あたりの Gibbs 自由エネルギーは増加し、溶解しやすくなると思われる。このことはいくつかの既往の研究と定性的に一致することを確認した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 井 義 明
副 査 教 授 米 田 哲 朗
副 査 教 授 金 子 勝 比 古
副 査 准教授 児 玉 淳 一

学 位 論 文 題 名

岩石の浸透性に対して

破壊や溶解が及ぼす影響に関する研究

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性検証などのため、地下環境における物質移行の把握は重要な課題となっている。岩石中の移流現象は物質移行の代表的な機構の一つであり、この点から岩石の浸透性を把握すること重要であると考えられる。岩石の浸透性は、高レベル放射性廃棄物の地層処分だけでなく、石油や天然ガスの開発、地熱エネルギーの利用などにおいても重要である。

高レベル放射性廃棄物は人類にとって有害であり、これを安全に処分するためには生活圏から長期間隔離処理する必要がある。高レベル放射性廃棄物には半減期が非常に長い放射性物質が含まれているため、安全に処理するためには数万年オーダーの長期間に渡って人類から遠ざけて処理する必要がある。日本においては地層処分が高レベル放射性廃棄物処理の基本的な方針となっている。地層処分の安全性の検証においては、核種の流出を防ぎ地下の処分空洞内に封じ込めることが重要であり、原位置岩盤の浸透性も安全性の検討において不可欠である。また原位置岩盤は掘削の段階で損傷を受けることや、数万年という時間の経過と共に、浸透性が変化する可能性があり、これらの要因によって浸透性がどのように変化するかを把握する必要がある。破壊や圧力溶解現象が岩石の浸透性におよぼす影響については、まだ明らかになっていない部分が多くあり、解明が望まれている。筆者は浸透性に影響を及ぼし得る現象として、破壊と溶解に関して検討を行った。

破壊が浸透性におよぼす影響を明かにするために、圧縮破壊過程に室内実験による検討を行った。実験には岩石試料として来待砂岩を用いた。実験では地下の応力状態を模して、供試体に三軸圧縮応力を加え、最大種応力を徐々に増加させることで破壊を進行させ、変形挙動と浸透性の変化、空隙率の変化を調査した。浸透性の計測はトランジェント・パルス法によって行った。空隙率の変化はシリンジ・ポンプを用いて空隙水量の変化を計測することで求めた。また実験に用いた岩石から薄片を作成し、薄片の観察や画像解析を行い、破壊過程における岩石構造の変化や、封圧がおよぼす影響について調べた。

実験によって以下のことが明らかとなった。低封圧の実験では、軸差応力が比較的小さい段階において固有浸透率は若干減少した。その後はピーク強度に近づくにつれて増加し、軸ひずみ約

4.0%の段階で固有浸透率は若干減少した。高封圧の実験では固有浸透率の変化は軸ひずみ5.0%程度まででは小さかった。

薄片の画像解析によって、低封圧の状況における、破壊の進行の過程を定量的に調査した。破壊が進むにつれて、空隙の最大径などが増加することを定量的に確認した。また封圧の違いによって生じた破壊形式の違いを定量的に示した。

実験において見られた、封圧の増加によるぜい性的な破壊から延性的な破壊への破壊形式の変化が生じた原因の検討を行った。有限要素法による弾性解析によって端面拘束が及ぼす影響について検討を行い、端面拘束によって封圧が低い場合には、供試体の角の部分と中央の部分が破壊しやすく、供試体を斜めに横断する亀裂が生じ易くなることを示した。

浸透率に影響をおよぼす要因として、圧力溶解も重要な現象であると考えられており、様々な研究が行われている。圧力溶解とは岩石を構成する鉱物が応力を受けることで、周辺の水への溶解が促進される現象である。本研究ではNaCl結晶を対象とし、応力下における自由面の溶解の機構について検討した。

応力下における自由面の溶解速度には結晶自由面近傍の性質が重要な役割を果たすと考え、自由面近傍の応力や、弾性定数を用いて、応力と溶解速度の関係を定式化することを試みた。提案したメカニズムを検討するためには、自由面近傍の応力や、弾性定数が必要となるがこれを実験的に計測することは難しいため、分子動力学法によるシミュレーションを行い、数値計算によって推定することを試みた。また数値計算により得られた結果と、既往の研究の比較を行い応力下における自由面溶解のメカニズムについて論じた。

分子動力学法のシミュレーションの結果、自由面近傍の一番外側のイオンにおいて自由面に平行な方向に大きな引張直応力が生じていた。この結果から、結晶に対して自由面と平行な方向にさらに引張応力を加えることで、結晶自由面近傍における1 molあたりのGibbs自由エネルギーが増加し、溶解しやすくなると考えられ、また、いくつかの既往の研究と定性的に一致することを確認した。

これを要するに、著者は、岩石の浸透性に対して破壊や溶解が及ぼす影響について数々の新知見を得たものであり、岩盤工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。