

原位置での炭酸水注入による岩盤強度・遮蔽性能向上に関する研究

京都大学 ○奈良禎太*

二酸化炭素地中貯留	岩盤	透水係数
原位置透水試験	泥岩	炭酸水

研究の目的

二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物処分など、地下岩盤を利用したプロジェクトの多くにおいては、岩盤の透水特性（地下の物質を閉じ込める性能）が重要となる。一般に岩石の透水性は、き裂の存在とそれらの連結性に影響を受ける。特に、Nara et al.¹⁾²⁾は、封圧の増大や粘土鉱物の充填によって岩石のき裂が閉塞することで、透水係数が低下することを報告している。それに関連して、地下水中の電解質の化学反応により鉱物の析出が起これ、岩盤内のき裂や空隙が充填されることがある。

二酸化炭素地中貯留を行う場合、地下の温度・圧力条件下で二酸化炭素が超臨界状態になり、誘発地震を引き起こすことが指摘されている³⁾。そこで、二酸化炭素を炭酸水の状態で注入すれば、超臨界状態になる二酸化炭素の量が減少し、誘発地震のリスクが軽減される可能性がある。しかしながら、原位置岩盤に炭酸水を注入した場合に、岩盤の透水性にどのような影響があるかについては十分に調べられていない。

そこで本研究では、二酸化炭素を排出させず、炭酸塩鉱物析出の形で固定することにより岩盤内のき裂・空隙を充填して強度・遮蔽性能を向上させる技術を開発することを最大の目的とし、地下岩盤に炭酸水を注入する過程で、原位置透水試験を複数回行うことにより透水係数を測定し、岩盤の透水性への経時的な影響を調べることにした。

研究の内容

本研究での原位置透水試験は、北海道天塩郡幌延町に位置する日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センターの深度 350m 調査坑道にて行った。350m 調査坑道は珪質泥岩で構成される稚内層に位置している。

実験を始めるにあたり、坑道壁面に直径 65 mm、長さ約 800 mm の試験孔を掘削した。次に、この試験孔に透水試験装置を設置した。図 1 に透水試験装置を、図 2 に装置を設置した時の様子を示す。この装置は、坑道壁面から深さ 300mm 程度の範囲をパッカーで固定することによって岩盤壁面に固定され、外部に流体が漏れ出さない状態で岩盤内部に流体を注入できるようになっている。本研究では、パッカーに加える圧力は 1MPa 程度とした。また、透水試験装置を岩盤に設置した後では、試験坑内の隙間の容積は 300ml 程度である。

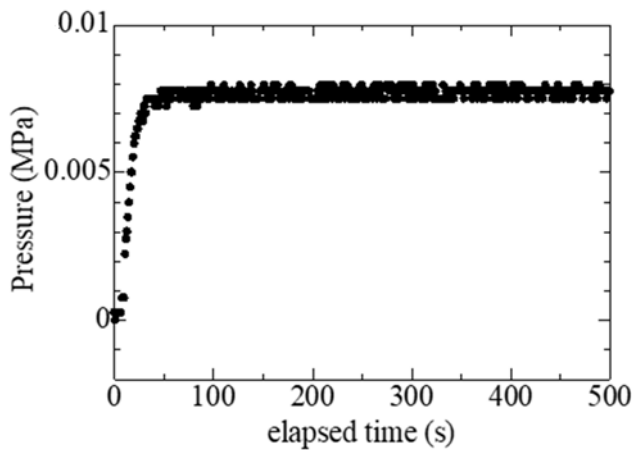


装置を設置した後、ハンドポンプで精製水を岩盤内に注入することで、試験孔内部とその周辺岩盤を十分に水で満たした。その後、定流量ポンプを用いて試験孔に一定流量 (30mL/min) で水を注入した。透水試験時に試験孔に注入する水は、現地で採取した水を使用した。その時の注水圧を圧力計で測定し、データロガーで記録した。

その後、炭酸水 (炭酸濃度 1.8g/L, pH=4) を試験孔に緩やかに注入し続けた。その間、初期の透水係数の測定と同じ要領で、つまり、透水試験測定時には現地で採取した水を注入することで、原位置透水試験による透水係数評価を複数回繰り返す。炭酸水注入による透水係数への経時的な影響について調べた。原位置透水試験を行うまでに試験孔内部に注入する炭酸水の単位時間あたりの量は、炭酸水から二酸化炭素ガスが発生する影響から一定とはならなかったものの、20ml/min 未満という極めて

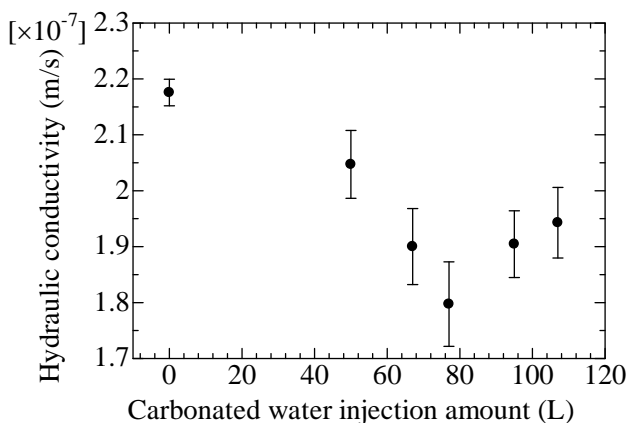
緩やかな流量での注入であった。

原位置透水試験においては、Hvorslevの方法⁴⁾により透水係数を評価した。岩盤の初期状態の透水係数を測定したときの水の注水圧の経時変化を図3に示す。流体の注入により圧力が増大したあと、時間の経過とともに注水圧がほぼ一定の値を保つ様子が確認された。この状態を定常状態とみなして、透水係数の算出を行った。



研究の成果、新知見

岩盤の透水係数と炭酸水累積注入量との関係を図4に示す。この図において、透水係数の値は定常状態の注水圧の平均値から算出した値であり、エラーバーは標準偏差を表している。この図より、炭酸水の注入量の増大に伴い、透水係数は低下する傾向が認められた。ただし、透水係数の低下の程度はごくわずかなものであった。



トランジェントパルス法によりインタクトな稚内層泥岩の透水係数を測定したところ、 2.2×10^{-11} m/s と求められた。求められた透水係数の違いと、現地で採取したボーリングコアに大変多くのき裂が入っていたということを考慮すると、試験孔周辺の岩盤にはき裂がよく発達し、水みちが形成されていることが、原位置岩盤の透水係数の高さにつながっていると考えられる。

炭酸水の注入前後で透水係数がわずかに低下したことが確認できる。このことから、炭酸水中のイオンが、地下水に含まれるイオン（カルシウムイオンやマグネシウムイオン）と反応することで炭酸塩鉱物として析出し、周辺岩盤のき裂を充填している可能性がある。

今後の予定

今後の展開としては、鉱物析出の可能性を検証するため、試験孔周辺の岩盤から岩石サンプルを採取し、鉱物分析を行うことを考えている。この目的のため、試験孔周辺岩盤から岩石サンプルを採取したところである。図11に採取したサンプルの写真を示す。このサンプルを用いて、偏光顕微鏡や電子顕微鏡等を用いた観察や、化学分析（SEM-EDSやXRDによる分析）を行い、透水係数の低下の原因について詳しく調べることを考えている。

謝辞

本研究は日本原子力研究開発機構、株式会社レーザーック、北海道大学工学部資源循環システムコース等の協力を受けて行われた。また、本研究の一部は京都大学学際・国際・人際融合事業「知の越境」融合チーム研究プログラム（SPIRITS: Supporting Program for Interaction-based Initiative Team Studies）のサポートを受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Y. Nara, P.G. Meredith, T. Yoneda, K. Kaneko, *Tectonophysics*, Vol.503, No.1-2, pp.52-59, 2011.
- 2) Y. Nara, M. Kato, R. Niri, M. Kohno, T. Sato, D. Fukuda, T. Sato and M. Takahashi, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.175, No.3, pp.917-927, 2018.
- 3) M.D. Zoback and S.M. Gorelick, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.109, No.26, pp.10164-10168, 2012.
- 4) M.J. Hvorslev, *Waterways Experiment Station Corps of Engineers, U.S.Army*, 1951.