

炭酸水とセメント系材料粉末の注入による岩盤強度・遮蔽性能向上機構解明と技術の構築

Improvement of strength and confining ability of rock mass by using carbonate water and powder of cementitious material

京都大学 大学院工学研究科 准教授 奈良 禎太

（研究計画ないし研究手法の概略）

世界的に問題となっている地球温暖化対策として、二酸化炭素（CO₂）を地下岩盤中に貯留する「二酸化炭素地中貯留（CCS）」が効果的と考えられている。CCSを行う際、CO₂が地下の温度・圧力下で超臨界状態となり、岩盤中の微細なき裂に浸透するとともに、き裂を進展させ、地震を誘発することが懸念される。ゆえに、地震を誘発しないCO₂貯留技術が必要といえる。また、岩盤やその中に建設される各種構造物は、年月の経過とともに通常はき裂進展に伴い劣化する。ただし、き裂進展を抑制し、さらに閉塞させて強度や遮蔽性能を向上させる現象を起こせば、長期安定性確保に大いに役立つ。水中で生じる鉱物析出によるき裂修復はその一つといえる。鉱物析出を利用すれば、岩盤中のき裂修復を促進でき、強度と遮蔽性能の向上を起こすことができる。つまり、鉱物析出による岩盤のき裂修復を促進し、強度・遮蔽性能向上に繋げるプロセスを利用した技術が課題解決に有効となる。

そこで、原位置岩盤で鉱物析出によるき裂修復を生じさせて強度と遮蔽性能を向上させるプロセスにより、地球温暖化抑制、エネルギー資源生産や放射性廃棄物処分での安全性確保、岩盤および各種構造物の長期安定性確保を実現できる機構を解明し、その技術を構築することを目的とする。特に、CO₂を炭酸水の生成に利用し、それをセメント系材料の粉末とともに岩盤に注入し、鉱物析出による地中での固定を実現し、さらにそれによる岩盤の遮蔽性能の向上（透水係数の低下）をもたらすことができるか否かを調べる。

実験手順として、初めにCO₂と水から炭酸水を用意する。次に、炭酸水とセメント系材料粉末を注入し、岩盤内で鉱物析出およびき裂修復を促進し、原位置透水試験を行うことで、遮蔽性能向上の程度を調べる。岩盤内での炭酸水とセメント系材料の保存日数の経過による透水特性の変化調べるため、原位置透水試験は保存日数を変えて行った。

CCSを考慮するため、堆積岩質岩盤を対象とし、北海道幌延町の日本原子力研究開発機構の地下岩盤を原位置透水試験において利用した。さらに、試験後に岩石試料を原位置岩盤から取り出し、鉱物析出の程度を調べることで、炭酸水とセメント系材料粉末注入による岩盤の遮蔽性能向上の有無とその技術構築に関して考察する。

（実験調査によって得られた新しい知見）

本研究で用意した炭酸水のCO₂濃度は約1.8 g/Lであり、pH=4.0である。これをセメント系材料とともに岩盤中に保存した。図1にセメント系材料粉末の電子顕微鏡画像を示す。粉末試料は、Fukuda et al. (Cement and Concrete Research, Vol.42, pp.1494-1500, 2012) で用いた高強度高緻密コンクリートのブロックから用意した。図2に粉末試料の粒度分布を示す。

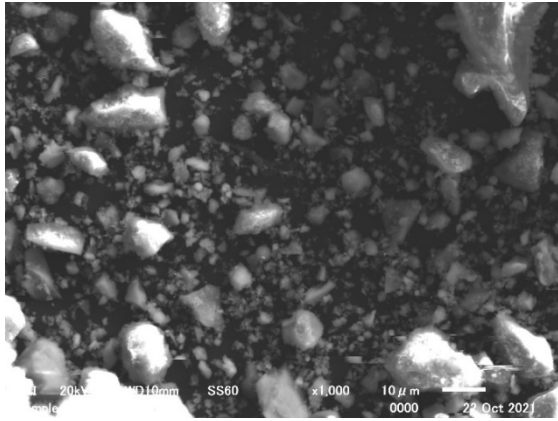


図1 セメント系材料粉末の電子顕微鏡画像

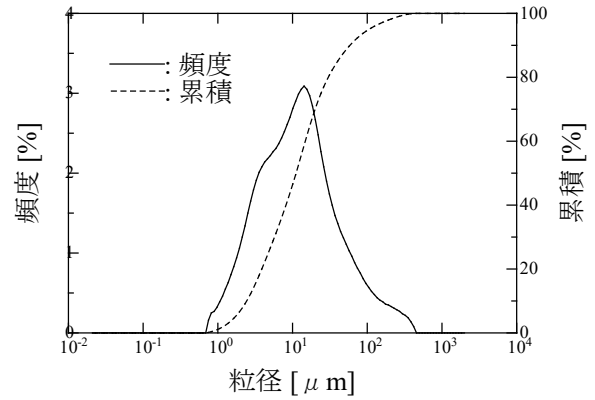


図2 粉末試料の粒度分布

本研究では、図3に示すように、岩盤の側壁に試験孔を掘削し、そこに注水をするための装置を取り付けることによって（図4参照）、炭酸水とセメント系材料粉末の岩盤内部への注入や、透水試験時における水の注入を行った。計測孔の直径は65mm、奥行きは700mm程度で、装置を取り付けた際の空間容積は300mL程度である。

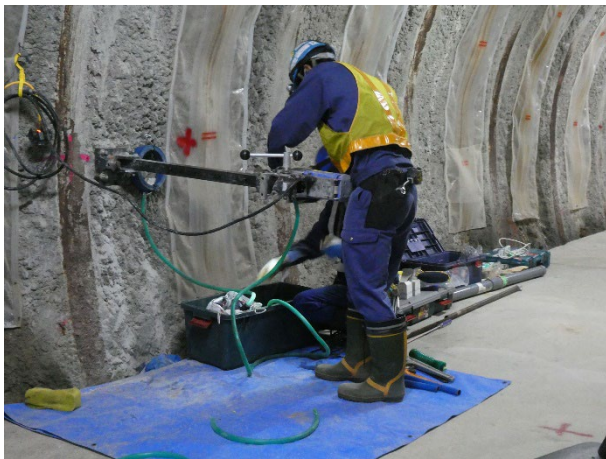


図3 計測孔の掘削の様子



図4 岩盤側壁に取り付けた注水用の装置

透水係数の測定は、原位置で採取した水を一定流量（本研究では70mL/min）で注水することによって行った。透水係数の評価は、注水時の圧力の測定値を、以下に示す Hvorslev の式（M.J. Hvorslev, Time lag and soil permeability in ground-water observations, Waterways experiment station, Corps of engineers, U.S. Army, No. 36, 1951）に代入することにより行った。

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln\left(\frac{2L}{D}\right) \quad (1)$$

ここで、 k は透水係数（m/s）、 Q は注水した水の流量（m³/s）、 L は試験区間長（m）、 D は試験孔直径（m）、 ρ_w は水の密度（m³/s）、 g は重力加速度（m/s²）、 P は注水圧（Pa）を表す。なお本研究では、注入圧を計測するために用いた圧力計から計測孔までは2mの距離があるため、管路での摩擦による圧力損失を考慮することとした。そこで次式（原田, 流体の力学, 槓書店, 1959）を用い、管路の長さによる圧力損失 ΔP （Pa）を計算し、注水圧に補正を加えた。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_w u_m^2}{2} \quad (2)$$

ここで、 λ は抗力係数、 l は管路の長さ (m)、 d は管路の内径 (m)、 ρ_w は水の密度 (kg/m^3)、 u_m は管路内の平均流速 (m/s) である。また層流の場合、次式が成り立つ。

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64\nu}{du_m} \quad (3)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 ν は水の動粘性係数 (m^2/s) である。本研究における式(1)中のパラメータの値は、表 1 のとおりである。

表 1 透水係数の算出に用いたパラメータ

パラメータ	
Q (m^3/min)	7.0×10^{-2}
L (m)	6.5×10^{-1}
D (m)	6.5×10^{-2}
ρ_w (kg/m^3)	1.0×10^3
g (m/s^2)	9.8×10^0
l (m)	2.0×10^0
d (m)	2.0×10^{-3}
ν (m^2/s)	1.0×10^{-6}

図 5 に、炭酸水を注入する前の岩盤に水を注入して得たときの注入圧力の経時変化を示す。なお、岩盤の透水係数は、計測孔に水を 30L 注入して、計測孔周辺を十分に水で満たした後で行った。また、図 5 に示されるような注水圧の経時変化において、圧力の値がほぼ一定値に収束したところの値を注入圧 P に用い、透水係数の評価を行った。この時の透水係数の値は $4.78 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と評価された。

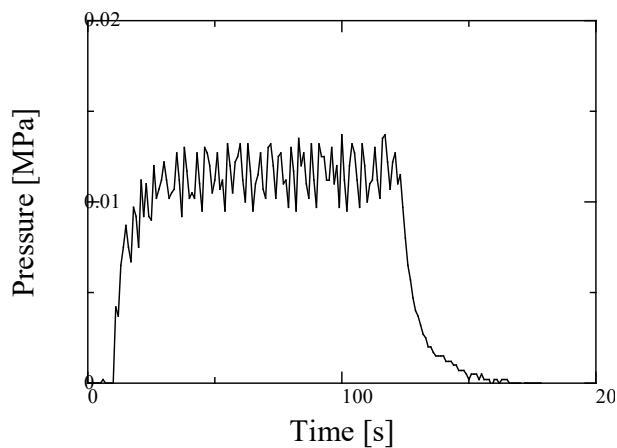
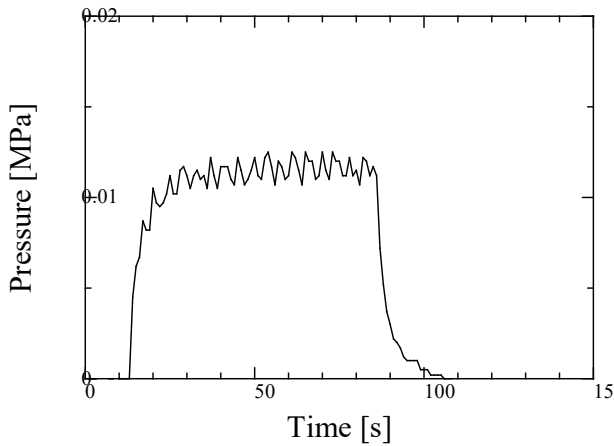
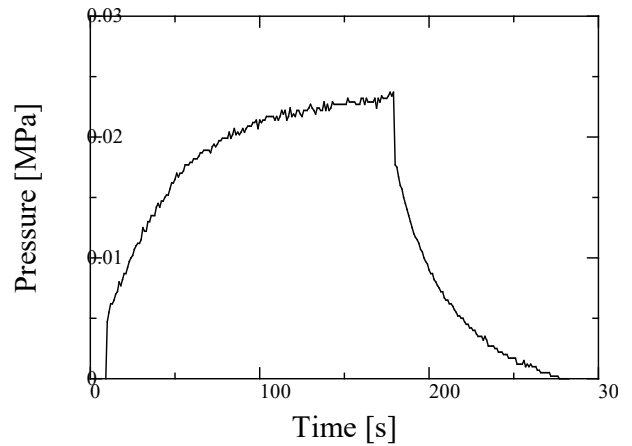


図 5 炭酸水を注入する前の岩盤で測定された水の注入圧の経時変化

続いて、岩盤に炭酸水を注入した際の水の注入圧と透水係数について述べる。図 6 に炭酸水を 3.5L (図 6a) および 62L (図 6b) 注入した後で水を 70mL/min の流量で注入した時の注入圧の経時変化を示す。この時、透水係数は $4.75 \times 10^{-7} \text{m/s}$ および $3.58 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と評価された。これより、炭酸水注入によって、岩盤の透水係数が若干低下することがわかる。



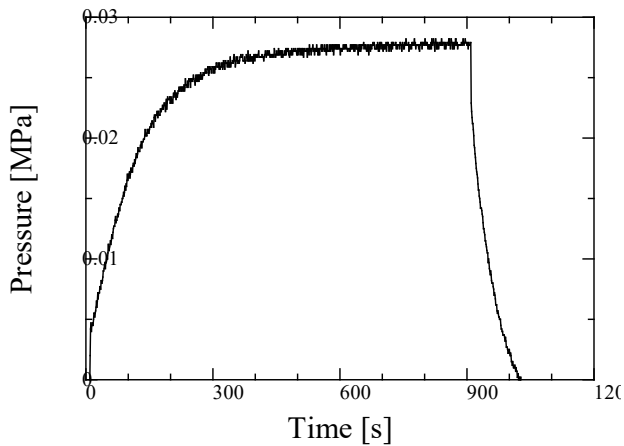
(a): 炭酸水 3.5L 注入後



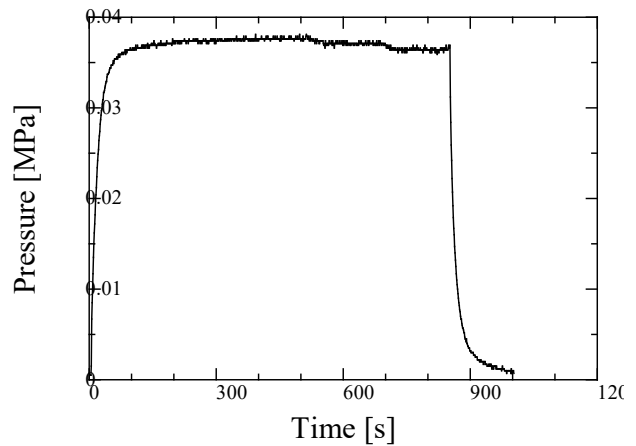
(b): 炭酸水 62L 注入後

図 6 炭酸水を注入した後の岩盤で測定された水の注入圧の経時変化

次に、セメント系材料粉末と炭酸水を注入した際の水の注入圧と透水係数について述べる。図 7 に、セメント系材料粉末 100g と炭酸水 100L (図 7a) および 354L (図 7b) を岩盤内に注入した後における水の注入圧の経時変化を示す。この時、透水係数は $2.48 \times 10^{-7} \text{m/s}$ および $1.93 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と評価された。本研究で行った試験により、セメント系材料粉末と炭酸水を岩盤に注入した場合、透水係数が低下することが示された。特に、炭酸水の注入量の増加に伴って、透水係数が低下することも示された。



(a): 炭酸水 100L 注入後



(b): 炭酸水 354L 注入後

図 7 セメント系材料粉末 100g と炭酸水を注入した岩盤で測定された水の注入圧の経時変化

図 8 に、炭酸水注入後に岩盤から採取された岩石試料の写真を示す。この図において、赤褐色の鉱物が析出していることがわかる。pH = 4.0 の炭酸水を注入したことから、岩石に含まれる Fe のような金属イオンが参加してできた鉱物と考えられる。また、Nara et al. (Pure and Applied Geophysics, Vol.175, pp.917-927, 2018) や奈良ら (Journal of MMIJ, 2022, in press) では、微細な鉱物粒子がき裂や空隙内に沈殿して流路の閉塞が起こることから、岩石の透水係数が低下することを報告している。したがって、本研究で認められた岩盤の透水係数の低下は、微細なセメント系材料粉末が岩盤内のき裂や空隙で集積して目詰まりを起こしたこと、き裂や空隙表面での鉱物の化学反応による析出によってもたらされたと考えられる。



図 8 炭酸水注入後に採取された岩石サンプル

本研究で得られた成果より、セメント系材料粉末を炭酸水とともに岩盤に注入することによって、岩盤の遮蔽性能向上が起こることが示され、将来的に岩盤の遮蔽性能の保持・向上のための技術を構築することが可能であると考えられる。特に、セメント系材料を使用することによって、Nara et al. (Carbonates and Evaporites, Vol.34, pp.1003-1020, 2019) に示されるようなカルシウム化合物の析出による岩盤の遮蔽性能の向上が、将来的に期待できると考えられる。

(発 表 論 文)

鎌田健人，奈良禎太，柏谷公希，多田洋平，藤井宏和，趙越，松井裕哉，尾崎裕介，北海道幌延地域の原位置岩盤における炭酸水注入実験，資源・素材学会関西支部 第 18 回若手研究者・技術者のための研究発表会，発表番号 12，2021 年 12 月 10 日，オンライン開催。