

超臨界 CO₂ を用いた原位置岩盤破碎実験における透過性変化について

(株)大林組 鈴木健一郎 京都大学 岸本恭暢, 出崎秀一, 藤戸航, 石田毅, 直井誠
(株)レーザック 藤井宏和

1. はじめに

CO₂の有効利用と地中貯留を同時に実現する方法として, CO₂注入によって岩盤を破碎し, 熱媒体として循環させる高温岩体発電(Enhanced Geothermal System)などの利用が考えられている¹⁾. このためには, 超臨界 CO₂の圧入によって生じる破碎の特徴や, その破壊メカニズムを解明する必要がある. 超臨界 CO₂注入による岩石破碎実験は室内試験で実施されている例^{2),3)}があるが, 原位置岩盤での実施は, 破碎時の AE を測定し, 震源発生メカニズムについて検討した岸本ら⁵⁾, Ishida ら⁴⁾の実験しか例をみない. この報告では, 超臨界 CO₂と水による破碎試験前後で実施した透気・透水試験から岩盤の透過特性の変化について報告する.

2. 実験概要

(1) 実験サイト 実験は, 中部山岳地帯の地下水位以下約 50m の鉄道トンネルで実施した. 周辺岩盤は, 後期中新世から鮮新世の堅硬な花崗岩である. 当該地点のトンネルは, 雰囲気温度が 30℃以上あり, ボーリング孔内岩盤温度 31℃以上が予想され, 注入圧力が 7.4 MPa 以上となる場合には, CO₂がより深部での圧入時に予想される超臨界状態に達することから実験場として選定した.

(2) 流体圧力降下試験 実験の概略図を Fig. 1 に示す. 直径 86 mm の注入孔の底部の中心に, 直径 36 mm のパイロット孔を約 150 mm 削孔し, これを加圧区間とした. 1m 離れた場所に直径 66mm の 4 本の AE 観測孔が設置されている. 十分密閉性を確保した加圧区間に, 瞬間的に約 1 MPa の流体圧を孔内に作用させ 10 分以上の圧力降下を測定した. その後, 一旦圧力を解放し, 流体を 10 mL/min の定流量を注入しながら破碎試験を行った. 破碎試験終了後, 破碎試験前と同様に, 瞬間的に 1 MPa 前後の圧力を作用させ, 圧力降下を計測した. これにより破碎前後の岩盤の状況を流体の透過特性の変化として捉えることを試みた.

3. 試験結果と考察

CO₂による破碎試験前後の降下試験の一例を図-2 に示す. 図には破碎試験およびその前後圧力降下試験における注入孔の口元圧力と孔底温度の経時変化を示してある. CO₂は, 温度 36℃, 圧力 7.4MPa から超臨界状態となっている. 11.6 MPa でブレイクダウンが起こり, 圧力降下とともに温度も下がり, CO₂は気体状態となり, この状態でさらにせん断亀裂が伸展したことが AE の解析で得られている^{4),5)}. 孔内透気試験として, 区間内の圧力降下を測定し, 透過係数を算定する方法として, 末永ら⁶⁾は透過係数が次式のように表せるとしている.

$$K = -\frac{\mu_g}{2\rho_{gs}} \frac{Mr^2}{RT_s} \cdot \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{L + \sqrt{L^2 + 4r^2}}{2r}\right)$$

ここで, K : 浸透率または固有透過係数 (m²), μ_g はガスの粘性 (Pa・s), ρ_{gs} は標準状態密度 (kg/m³), M は気体分子量 (kg/mol) CO₂ の場合は 0.044, R は気体定数 (=8.31451 J/mol/K), T_s は標準状態の温度 (=273.15 K), L は試験区

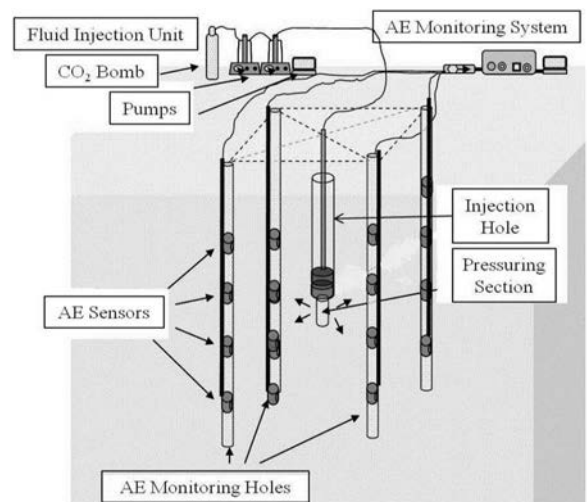


図-1 破碎実験概要図

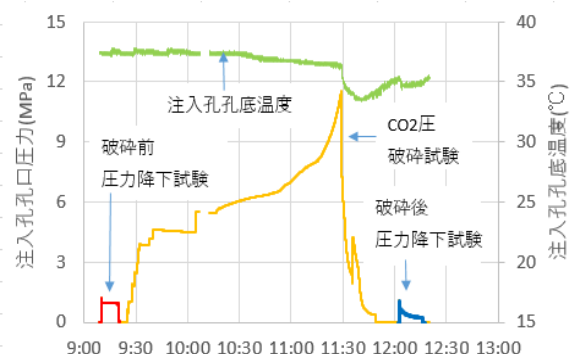


図-2 CO₂ ガス破碎試験と圧力降下試験

キーワード 超臨界 CO₂, 水圧破碎, 透水係数, 浸透率, 圧力降下試験

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株)大林組 技術研究所 TEL 042-495-0916

間長 (m) で今回のケースは 0.15 m, r はボーリング孔半径 (m) で今回のケースは 0.036m である. α は式

$$\ln\left(\frac{P_g - P_{gs}}{P_g + P_{gs}}\right) = \alpha t + \frac{P_g - P_{gs}}{P_g + P_{gs}}$$

における t の係数であり, 図-3 に示

すグラフの傾きより算出される. P_{gs} は標準状態 (0°C, 1 気圧) の圧力 (=101325 Pa), P_g は区間圧力である.

比較のために実施した水圧による破砕試験前後の降下試験の一例を図-4 に示す. 図には水圧破砕試験およびその前後の圧力降下試験における注入孔の口元圧力と孔底温度の経時変化を示してある. 水圧試験では圧力 12.9 MPa で岩盤中に引張亀裂が発生しブレイクダウンが起きた. 破砕試験前後の圧力降下試験では, 水圧破砕試験前の降下より破砕後の降下が早いことがわかる. 孔周辺岩盤の透水係数を求めるために, 降下試験結果から, 水圧を片対数グラフの対数目盛り Y 軸に, 算術目盛り X 軸に時間 t をとり, 図-5 に示すような t -Log s 曲線を作成する. 地盤の貯留性が小さい場合, t -Log s 曲線は直線の形状を示し, 透水係数はその初期の勾配より求めたり.

$$k = \frac{(2rw)^2 \cdot \ln(m \cdot L/r) \cdot \ln(s_1/s_2)}{8L(t_2 - t_1)}$$

ここで, k は透水係数 (m/s), rw はピエゾメータ管内半径 (m), r は試験孔の半径 (m), m は鉛直方向の透水係数比で 1 (等方性), L は試験区間長 (m), s_1 と s_2 は経過時間 t_1 と t_2 (s) に対応する平衡水位との水位差 (m) である. ここで rw の算定が課題であるが, パッカーの弾性係数を仮定して 2.2E-5 とした. この値には議論の余地があるが, ここでは破砕前後の透水係数の増加率を考える場合には影響がない.

それぞれ水圧による降下試験, CO₂ ガスによる降下試験結果を一覧表として表-1 に示す. 破砕後の透過特性を破砕前破砕前のそれに対する増加率として表すと, 水による破砕前後の変化は最大で 7.0 倍であるが, CO₂ ガスによる破砕では, 400 倍にもなることが認められた.

4. まとめと今後の課題

CO₂ による破砕と水による破砕の前後に実施した圧力降下試験により透過係数の増加率を調べた. その結果, CO₂ による破砕では, ガス状態の注入から超臨界状態で岩盤を破砕し, その後の圧力降下によるガス化での膨張によりさらに亀裂を進展させ, 水圧破砕より岩盤の透過特性を上げる傾向が示された. 今後, データを蓄積し, 確認していく必要がある.

本研究は京都大学との共同研究で実施するとともに, 科研費基盤 A 課題番号 25249131(研究代表者:石田毅)の助成を得て行った.

参考文献

1) Brown, D., Pro. of 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 233-238, 2000, 2) Yang, J. et al., Scientific Report, 18681, 2020, 3) Wang, L., et. al., Int. J. of Greenhouse Gas Control 63, 107-117, 2017, 4) 岸本ら, 超臨界 CO₂ を用いた原位置岩盤小規模水圧破砕実験における AE 震源メカニズム解析, 材料学会第 66 期学術講演会, 5) Ishida, T. et. al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2021, doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104712, 6) 末永ら, 電力中央研究所報告 U03057, p.16, 2004, 7) 平田, 地下水学会誌, 第 35 巻 第 3 号, pp.247-254, 1993

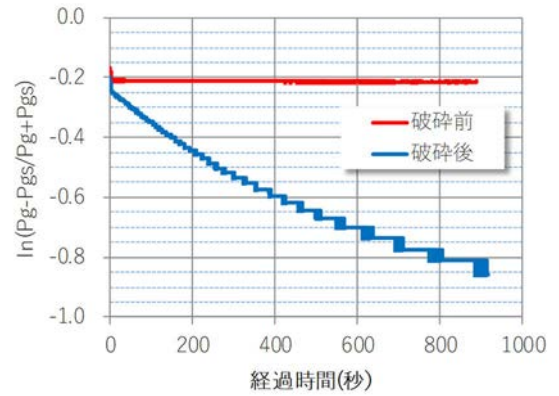


図-3 CO₂ ガス圧降下試験結果

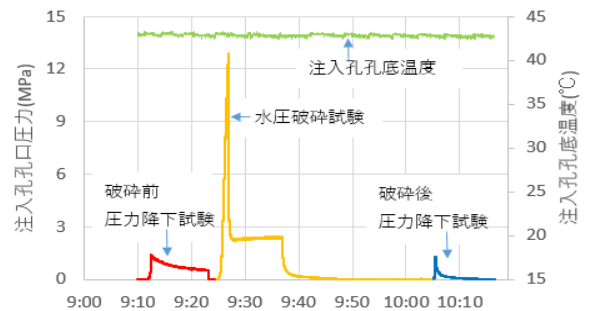


図-4 水圧破砕試験と圧力降下試験

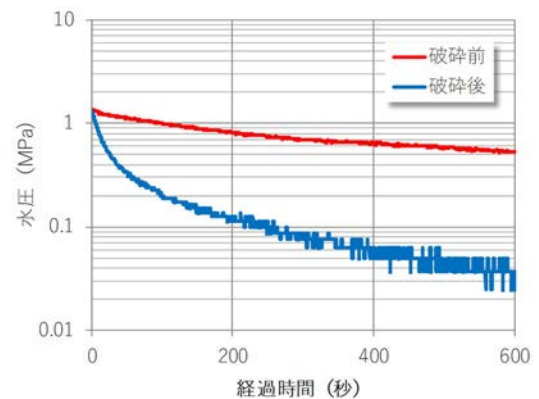


図-5 水圧降下試験結果

表-1 破砕前後の透水・透過係数一覧

	破砕前	破砕後	増加率
CO ₂ ガス破砕	K(m ²)	K(m ²)	
No.3	3.25E-19	1.41E-16	432.3
No.9	1.68E-19	6.92E-17	411.1
水圧破砕	k(m/s)	k(m/s)	
No.5	1.34E-11	9.41E-11	7.0
No.8	2.45E-11	6.17E-11	2.5