

低温における岩石の流体浸透性評価を目的とした室内試験

愛媛大学大学院 学生会員 ○ 大内健太郎

正会員 安原英明

正会員 木下尚樹

1. はじめに

近年、社会資本を整備する上で地下岩盤の利用はこれまでより複雑化・多様化している．例えば、岩盤タンクによる天然ガスハイドレート（NGH）の備蓄，メタンハイドレートの資源開発などがある．NGH は大気圧下、-20 °C で安定するため、その特徴を生かし岩盤タンクによる長期備蓄が検討されている．しかし岩盤タンク周辺では、間隙水の氷結膨張や岩盤の熱収縮により岩盤に亀裂が発生することが予想され、岩盤タンクの気密性、堅牢性を評価する必要がある．そのため、基本的な物性の一つとして常温および低温下における岩石亀裂の気液浸透特性を把握する必要がある．そこで本研究では、低温透気試験装置、気液二相流実験装置を開発・実験し、低温下での透気性状、低温履歴が透気・透水特性に及ぼす影響を考察した．

2. 実験概要

開発した実験装置を図 1 に示す．この装置は-20 °C の環境下での透気試験を再現可能とした．供試体はベレア砂岩（B-6～B-9）を使用した．本研究での実験フローについて説明する．まず室温状態（20 °C）で透水試験、透気試験を実施する．その後 72 時間で温度を-20 °C にした後に低温透気試験を行う．その後 24 時間で室温状態（20 °C）に戻し、再び透水試験、透気試験を実施する．これにより低温履歴が透気・透水特性に及ぼす影響を精査した．なお、透過流体は脱イオン水および N₂ ガスである．次に実験条件について説明する．初期透過圧を 50 kPa とし、そこから 50 kPa ずつ透過圧を増加させ、それぞれの透過圧での固有浸透係数を求める．透気試験、透水試験では 50～450 kPa、低温透気試験では 50～1000 kPa の範囲で透過圧を増加させた．実験の境界条件を表 1 に示す．

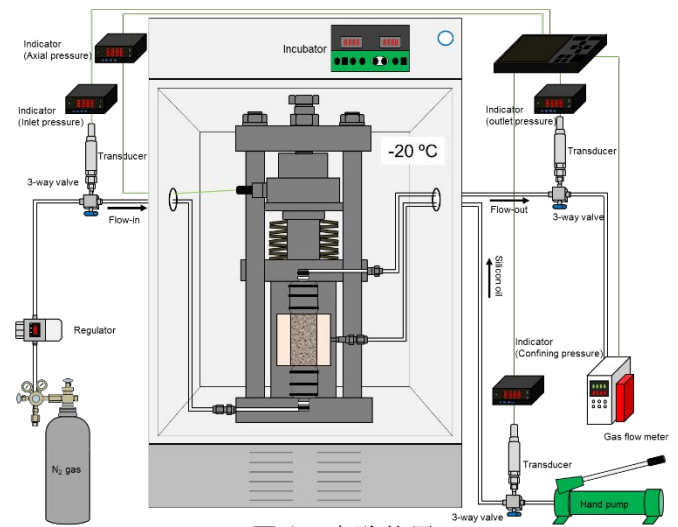


図 1 実験装置

表 1 境界条件

試験名	温度	拘束圧	透過圧
	[°C]	[MPa]	[kPa]
透気・透水試験	20	3	50～450
低温透気試験	-20	3	50～1000

3. 透気試験、透水試験、低温透気試験

透水試験における透水性評価方法について言及する．水の固有浸透係数 k_l はダルシー則が成り立つと仮定して、以下の式で表すことができる．

$$k_l = \frac{\mu_l Q_l L}{A(P_{up} - P_{down})} \quad (1)$$

ここで、 μ_l ：水の粘性係数 [Pa s]， Q_l ：透水流量 [m³ s⁻¹]， L ：供試体の高さ[m]， A ：供試体断面積[m²]， P_{up} ：試料上端の透気圧 [Pa]， P_{down} ：試料下端の透気圧 [Pa]である．

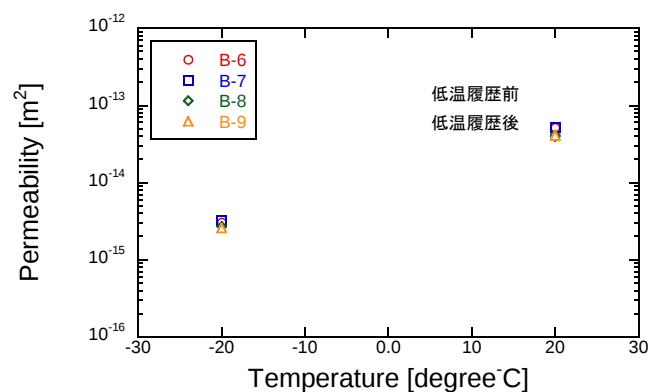


図 2 透気試験結果（B-6～B-9）

また、ガスを間隙流体として用いた場合、ガスの固有浸透係数はガスの圧縮性を考慮した下記の式で表される。透気試験、低温透気試験では、ガスの固有浸透係数 k_g はダルシー則が成り立つと仮定して、以下の式で表すことができる。

$$k_g = \frac{2P_{down}\mu_g Q_g L}{(P_{up})^2 - (P_{down})^2 A} \quad (2)$$

ここで、 μ_g ：空気の粘性係数 [Pa s]、 Q_g ：透気流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]である。

透気試験結果を低温履歴前後で比較したものを図 2、透水試験結果を図 3 に示す。図 2 より低温履歴前後でガスの固有浸透係数の変化はみられなかった。また、低温では固有浸透係数が低くなっている。これは低温時に供試体内の空隙が収縮し、 N_2 ガスが通りにくくなり、固有浸透係数が低くなったと考えられる。図 3 より低温履歴後の水の固有浸透係数が高くなっていることがわかる。これは低温時に供試体が収縮し、その後常温に戻すと供試体は再度膨張することになるが、その体積収縮・膨張の過程で供試体内に微小な亀裂が入ったために水の固有浸透係数が大きくなったと考えられる。

また図 2、図 3 よりガスの固有浸透係数と水の固有浸透係数を比較するとガスの固有浸透係数の方が大きい。これはガスの固有浸透係数の間隙圧依存性を示す Klinkenberg 効果によるものであると考えられる。

4. Klinkenberg 効果¹⁾

Klinkenberg 効果とは、気体分子の平均自由行程（気体分子同士が衝突して再び気体分子同士が衝突するまでの距離）が間隙径と比較して大きくなる微小間隙内では、気体分子同士の衝突よりも気体分子と間隙壁面の衝突回数が増加し間隙壁面沿いの気体の流速が大きくなり、ガスの排出流量が多くなる現象である。そしてこの現象を以下の式で表すことができる。

$$k_g = k_l \left(1 + \frac{b}{p_g} \right) \quad (3)$$

ここで、 b ：Klinkenberg 定数 [Pa]、 p_g ：間隙流体圧 [Pa]である。低温履歴後の気体の固有浸透係数から Klinkenberg 効果をもとに推定した水の固有浸透係数と実験値の水の固有浸透係数の比較（B-6～B-9）を図 4 に示す。図 4 より全ての供試体で Klinkenberg 効果をもとに推定した水の固有浸透係数は、実際に水を用いて測定した固有浸透係数に近づいた。

5. おわりに

本研究では、低温履歴が透気透水特性に及ぼす影響について検討した。透水試験では低温履歴後は水の固有浸透係数が高くなり、透気試験では低温履歴前後でガスの固有浸透係数に変化は見られなかった。また気体の固有浸透係数と水の固有浸透係数の違いを説明するため、Klinkenberg 効果について考察した。その結果、Klinkenberg 効果による気体の固有浸透係数の間隙圧依存が確認できた。

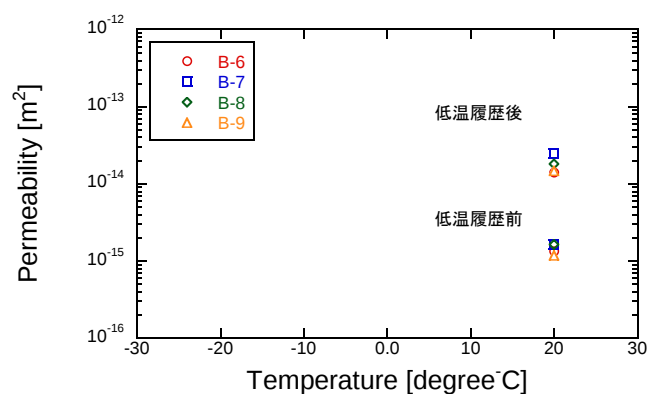


図 3 透水試験結果（B-6～B-9）

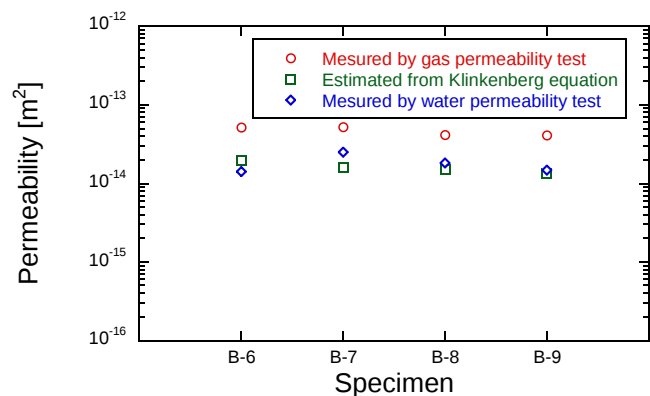


図 4 推定した固有浸透係数と実験値の比較