

砂岩の内部構造とその透水特性について

薛 自求¹⁾・大和田 朗²⁾・高橋 学³⁾・楠瀬勤一郎³⁾・石島洋二¹⁾

1. はじめに

岩石の透水挙動はその中に含まれているポアあるいはクラックなどが水が流れる現象であり、水の通りやすさなどの透水特性は岩石の内部の微視的構造、特に岩石中でポアやクラックがどのように連結しているかということに強く影響される (Brace, 1977; Koplik *et al.*, 1984). 一般的に、花崗岩のような結晶質の岩石には細長い微小な割れ目、つまりクラックが多く、砂岩のような堆積岩には球形に近いポアが多く存在しているといわれている。岩石中に含まれているポアやクラックの形状、大きさ、分布状態を調べるには偏光顕微鏡や走査型電子顕微鏡による観察が有効的な手段とされ、現在までに多くの研究報告がなされている (例えば, Caruso *et al.*, 1985; Doyen, 1988; Krohn, 1988; Sprunt and Brace, 1974など). 近年、蛍光剤や顔料を添加した着色樹脂によりポアやクラックを見分けやすくする工夫がいろいろ試みられている (安部, 1988; 西山ほか, 1990). しかし、透水性や電気伝導度などの物理的な特性をポアやクラックの性質から説明しようという目的で行われたものは数少ない。本文では、白浜砂岩と来待砂岩という二種類の砂岩中のポアやクラックを偏光顕微鏡によって観察し、観察されたこれらの特徴と同一供試体の透水試験の結果との関連性を明らかにすることにした。

2. 着色樹脂の岩石試料への充填と薄片の作成方法

近年、さまざまな目的に応じて種々の樹脂が開発されているが、本研究では従来のペトロポキシンを使用した。また、岩石中のポアやクラックなどに浸透した樹脂を簡単に識別することができるために青色顔料 (EST-2611 BLUE) を用いて樹脂を着色した。ここでは簡単にその

手順を示す。

- (1) 岩石試料の鉱物粒子の脱落を防止するため、試料切断する前に十分に乾燥させ、青色樹脂 (ペトロポキシン+青色顔料) を含浸させ、加熱し、硬化させる。
- (2) 試料を30×60×10mmに切断し、貼り付け面に青色樹脂を塗り、加熱し、硬化させる。
- (3) 試料の貼り付け面を研磨盤上で #800の研磨剤 (グリーンカーボランダム)、次にメノウ盤上で手摺りで、#2500 (ホワイトアランダム) を用いて研磨する。
- (4) 研磨後に試料を十分に乾燥させ、あらかじめ #800の研磨剤を用いてスリガラスにしたスライドグラスに、(1)で用いた青色樹脂で試料を接着し硬化させる。さらに、約1~2mmに二次切断し、普通の薄片を作る要領で、約70ミクロン程度の厚さに #800の研磨剤を使用し研磨する。
- (5) 研磨後の試料の表面のポアやクラックに青色樹脂をより含浸させるため、できるだけ薄く塗り、硬化させてから(3)の工程で約50ミクロン程度の厚さに研磨する。
- (6) 透明なカバーグラスに、青色顔料を混合させていない通常透明のペトロポキシンを使用し、貼り付けてから硬化させる。以降の工程では通常の薄片作成と同様に機械研磨、メノウ盤手摺りで薄片を完成させる。この際、切断におけるダイヤモンドカッターの冷却液及び研磨盤上ないしメノウ盤上の潤滑液はすべてオイルを使用した。

3. 供試体と透水試験法

供試体には、ともに新第三紀の和歌山県産白浜砂岩と島根県産来待砂岩を用いた。空隙率はそれぞれ13%、25%である。採取したブロックから堆積層面に直交するようにコアボーリングし、直径30mm、長さ60mmの円柱供試体に仕上げた。ひずみを計測するために、合計4枚のクロス型ひずみゲージを供試体の側面に互いに90°離して張り付けた。供試体の静水圧下における (圧縮) 体積ひずみは、これらのゲージから得たひずみ量から計

1) 北海道大学工学部：〒060 北海道札幌市北区北十三条西八丁目

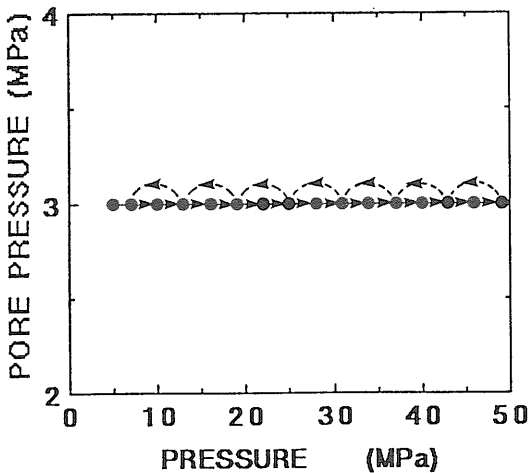
2) 地質調査所 地質標本館
3) 地質調査所 環境地質部

算して求める。

透水試験法はトランジェント・パルス法 (Brace *et al.*, 1968) を採用した。この方法は、既知の容積をもつ圧力容器を岩石供試体の両端に接続し、双方の圧力容器に水を満たし、所定の水圧まで高め、平衡状態を保つ。次に、一方の圧力容器内の水圧を急激に上昇させると供試体の両端に圧力差 (パルス) が生じ、供試体内を間隙水が流れる。この時の圧力容器内の圧力の変化から供試体の透水係数を求めようとするものである。本方法は、室内で行われてきた従来の定水位法や変水位法に比べると測定精度が高く、しかも測定時間が短い。また、応力条件を任意に設定することができるため、原位置岩盤の応力条件を再現しやすい。本研究で用いられた実験装置及び実験方法の詳細については高橋・平田 (1990)、薛ほか (1990) を参照されたい。

第1図は、両供試体にどのような静水圧や間隙水圧を加えていったかを示す負荷経路である。今回の透水実験では、間隙水圧を3 MPaに固定したまま、静水圧だけを7 MPaから3 MPaずつ49MPaまで増加させ、その後6 MPaずつ初期の値まで減少させた。この間、各経路で静水圧を変化させるごとに、岩石供試体の透水係数を測定した。

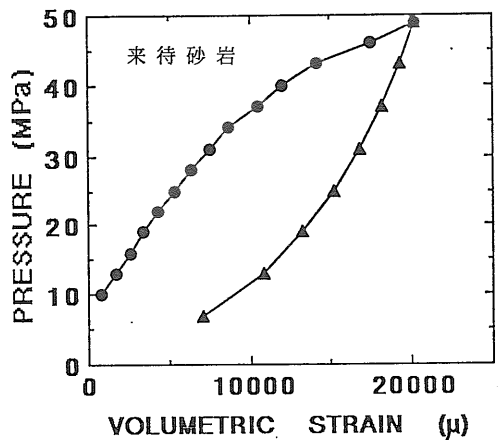
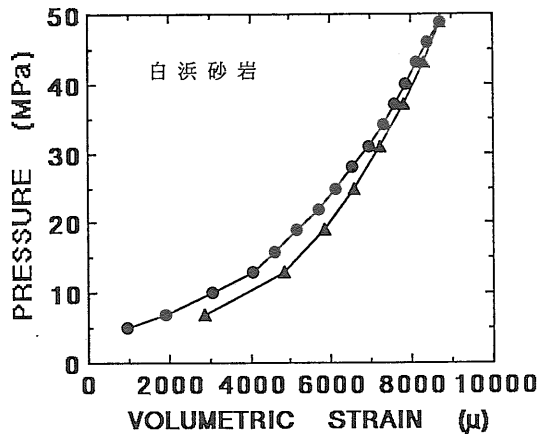
内部構造を調べるために、無負荷な供試体と透水試験後の供試体から薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて試験前後でのポアの様子を観察した。



第1図 透水試験時の供試体への負荷経路
 図中の●印に対応する条件下で透水係数の測定を行った。実線は静水圧の増加、破線は静水圧の減少にそれぞれ対応している。

4. 透水試験及び顕微鏡観察の結果

第2図は透水試験時に得られた体積ひずみ—静水圧の関係を示したものである。静水圧の増加に伴う白浜砂岩と来待砂岩の挙動はかなり異なっている。白浜砂岩の場合は、比較的硬い岩石によくみられるように、低い静水圧のところで大きな体積変化を示す。また、応力履歴による残留ひずみも僅かである。これに対し、来待砂岩の場合は、静水圧を35MPa以上に上げると、それより低い静水圧の時に比べ、大きな体積変化を示すようになる。また、応力履歴による残留ひずみ量も、白浜砂岩は約2000 μ を示すのに対し、来待砂岩はその3倍にあたる6000 μ を示し、両者に大きな差があることが認められた。



第2図 体積ひずみと静水圧の関係
 図中の●と▲はそれぞれ静水圧の増加と静水圧の減少時に得られた体積ひずみを表している。

第3図は、透水係数—静水圧の関係を示したものである。静水圧の増加に伴って、白浜砂岩、来待砂岩のいずれも透水係数が減少する傾向が認められた。しかし、除荷過程では、白浜砂岩の場合はほとんど透水係数の変動がみられないが、来待砂岩の場合は、静水圧の除荷に伴って静水圧が15MPa以下になると透水係数の増大が認められた。また、除荷過程の透水係数は載荷過程時の値よりも小さくなっており、これは供試体内部での不可逆的な圧密過程によるものと考えられる。

この圧密過程は、残留ひずみにも大きな影響を及ぼしている。一般的に、残留ひずみが多く現われた方が供試体内部のクラックやポアの閉鎖が著しいと考えられる。したがって、間隙水の通路となっているクラックやポア

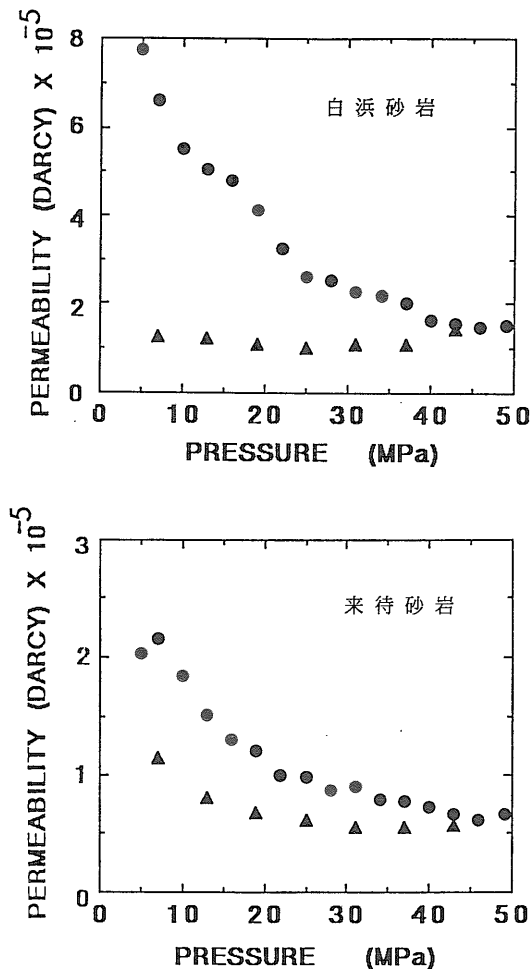
の閉鎖が著しいほど、透水係数は大きく減少する。第2図における岩石供試体の残留ひずみの量と第3図における除荷過程の透水係数の静水圧に対する変化を比べると、多くの残留ひずみを生じた来待砂岩の方に除荷過程の透水係数の増加が認められた。これは供試体内部のポアやクラックの閉鎖が必ずしも透水係数の減少に寄与するとは限らないことを示唆している。すなわち、独立したポアやクラックの閉鎖は、圧縮体積ひずみには寄与するが、間隙水の通路になっていないため、透水係数の変化には関わらない。

口絵の写真1, 2はそれぞれ透水試験前の白浜砂岩、来待砂岩中のポアの様子を示している。白浜砂岩の場合は、鉱物(岩石片を含む)の粒子間に小さいポアが多く存在しており、場所によっては連結しているポアも認められた。画像処理した結果、試験前のポアの全体に占める割合は約11%となっており、比重測定で求めたその結果よりやや低い。来待砂岩中の場合は、鉱物粒子間の充填物に大きなポアが分布していることが認められた。また、浸透した着色樹脂から、炭酸塩鉱物とみられる結晶の成長した様子がよく分かる(口絵写真5参照)。

口絵の写真3は実験後の白浜砂岩中のポアの様子を示している。ポアの数を実験前の口絵の写真1と比べると明らかに減っており、薄片全体に占めるポアの割合は4%程度となっている。しかし、来待砂岩の場合は、実験前のポアの様子と比べてもほとんど変化しておらず、砂岩粒子の間を埋める充填物中に独立したポアが依然として残っている(口絵写真4)。もちろん、一枚の薄片の写真(2次元)から供試体全体の空隙の構造(3次元)を議論することには無理があるが、両岩石中に存在するポアの形や分布状態が大きく違うことはこれらの写真から明らかになったと思われる。

5. まとめ及び今後の課題

青色顔料を添加した樹脂を砂岩内部に充填してつくった薄片を偏光顕微鏡によって観察した結果、この手法が岩石内部のクラック・ポアの形や分布形態をみるために有効な手段であることが明らかになった(口絵写真5-8)。また、薄片の結果によって、白浜砂岩と来待砂岩の透水試験時の挙動の差異を定性的に説明することができた。しかし、来待砂岩のようにポアやクラックの分布が均一的ではなく、局所的に集中する場合に、薄片から得られた2次元の情報が岩石供試体内部の微視的な3次元構造を正確に反映しているとは言えない。薄片から得られた2次元の情報によっていかに正確に3次元の構造を推定するかがこれからの課題である。



第3図 透水係数に及ぼす静水圧の影響
 図中の●と▲はそれぞれ静水圧の増加と静水圧の減少時に得られた透水係数を表している。

参考文献

- 安部正治 (1988) : 岩石の孔隙を薄片で探る. 地質ニュース No. 404, 60.
- Brace, W. F. (1977) : Permeability from resistivity and pore shape. J. Geophys. Res., 82, No. 23, 3343-3349.
- Brace, W. F., Walsh, J. B., and Frangos, W. T. (1968) : Permeability of granite under high pressure. J. Geophys. Res., 73, No. 6, 2225-2236.
- Caruso, L., Simmons, G., and Wilkens, R. (1985) : The physical properties of a set of sandstones Part I. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 381-392.
- Doyen, P. M. (1988) : Permeability, conductivity, and pore geometry of sandstone. J. Geophys. Res., 93, B7, 7729-7740.
- Koplik, J., Lin, C. and Vermette, M. (1984) : Conductivity and permeability from microgeometry. J. Appl. Phys., 56, 3127-3131.
- Krohn, C. E. (1988) : Sandstone fractal and euclidean pore

volume distributions. J. Geophys. Res., 93, B4, 3286-3296.

- 西山 孝・楠田 啓・北川元紀 (1990) : 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出. 資源と素材. 106, 573-579.
- Sprunt, S., Brace, W. F. (1974) : Direct observation of microcavities in crystalline rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 11, 139-150.
- 高橋 学・平田実雄 (1990) : 稲田花崗岩の透水係数に及ぼす封圧, 間隙水圧の影響について, 応用地質, 31, 105-114.
- 薛 自求・石島洋二・高橋 学 (1990) : 静水圧下における砂岩の透水特性について, 第8回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 393-398.

XUE Ziqiu, OHWADA Akira, TAKAHASHI Manabu, KUNOSE Kinichiro and ISHIJIMA Yoji (1991) : Microgeometry and permeability in sandstones.

<受付: 1991年2月5日>

第2回 石のさと フェスティバル

標記が庵治石の里である香川県木田郡牟礼町与一公園内で開かれる。この会は石材を使った彫刻作成をエンカレッジすることを主目的とし、3年に一度の企画であり、第1回は1988年5月に実施された。今回は次の日程で行われる。

石の彫刻コンクール展 5月1日(水)
-6月30日(日)

石の彫刻国際シンポジウム 5月1日(水)
-5月30日(木)

入場無料, 会場は琴電^{やぐり}八栗駅北方2.5km, JR 高松駅より車で約30分, 新高松空港より車で約50分。

問合せは 〒761-01 香川県木田郡牟礼町役場 (0878-45-2111, 内線244幸野)

