第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
（社）土木学会　2010 年１月　講演番号 48

静水圧下における破壊した岩石の透水特性および弾性波伝播特性に関する基礎研究

奈良 禎太[1,2*]・Philip MEREDITH[1]・米田 哲朗[2]・金子 勝比古[3]

[1]Department of Earth Sciences, University College London (Gower Street, London WC1E 6BT, United Kingdom)
[2]北海道大学 大学院工学研究科 環境循環システム専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）
[3]北海道大学 大学院工学研究科 環境フィールド工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）
*E-mail: nara@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

本研究では，岩石内のき裂や空隙の閉塞に及ぼす圧力の影響について，透水試験と弾性波速度測定によって調べた．試料として玄武岩と２種類の砂岩を用い，圧裂試験によって岩石中に巨視き裂を導入した．玄武岩では，巨視き裂を含む場合，インタクトな場合よりも透水係数がはるかに大きくなった．また，圧力の増大に伴って透水係数は減少した．砂岩では，巨視き裂が透水係数に及ぼす影響は認められなかった．また，いずれの岩石試料においても，圧力の増大に伴い弾性波速度が増大した．さらに，圧力の増大に伴って，インタクトな岩石と巨視き裂を含む岩石における弾性波速度の差が小さくなることが示された．本研究での試験により，巨視き裂の閉塞が透水性および弾性波伝播特性に及ぼす影響が明らかになった．

Key Words : *closure of macro-fracture, permeability, elastic wave velocity, hydrostatic pressure, basalt, sandstone*

1. 序論

原油地下備蓄空洞や放射性廃棄物処分施設のような岩盤構造物には，長期安定性が要求される．岩盤構造物の長期安定性の確保を目的として，これまで岩石破壊の時間依存性に関する多くの研究が行われてきた[1)]．最近でも，相対湿度[2), 3)]や水[4), 5)]が及ぼす影響について，新たな知見が得られている．特に，水中でき裂進展が著しく促進されることから[4), 5)]，岩石内での水の流通を制御することは，岩盤構造物の長期安定性の確保において極めて重要である．また，放射性廃棄物の地層処分を考える場合，岩盤には，放射性廃棄物の影響を長期間遮蔽する性質が求められる．ゆえに，岩石破壊の時間依存性だけでなく，遮蔽性能に関する理解も極めて重要である．

岩石内には多くの空隙やき裂が分布しており[6), 7)]，これらのネットワークは水の流通経路になる．しかしながら，これらを閉塞させることができれば，水の流入を遅らせ，岩盤の遮蔽性を高めることが可能となる．ゆえに，き裂や空隙の閉塞機構を調べることは極めて重要である．

そこで本研究では，岩石内のき裂や空隙の閉塞挙動についての実験的研究を行った．特に，圧力が及ぼす影響について注目し，様々な静水圧環境下での岩石の透水特性と弾性波伝播特性について調べた．

2. 岩石試料

本研究では，アイスランド産のSeljadur玄武岩，スコットランド産のClashach砂岩，和歌山県産の白浜砂岩を供試岩石として用いた．

Seljadur玄武岩は，斜長石および輝石を主成分とする，細粒で緻密なソレアイト玄武岩である[8)]．インタクトな試料での空隙率は4%である．また肉眼レベルでは，直径2mm以下の空隙は認められ，微視き裂は確認できない．

Clashach砂岩は，石英を主成分とし，炭酸塩鉱物や粘土鉱物をほとんど含まない新鮮な多孔質の砂岩である．インタクトな試料における空隙率は18%である．

白浜砂岩は，主成分は石英であり，他に炭酸塩鉱物や，イライト，カオリナイト，スメクタイト等の粘土鉱物も含む[3)]．インタクトな試料での空隙率は12%である．

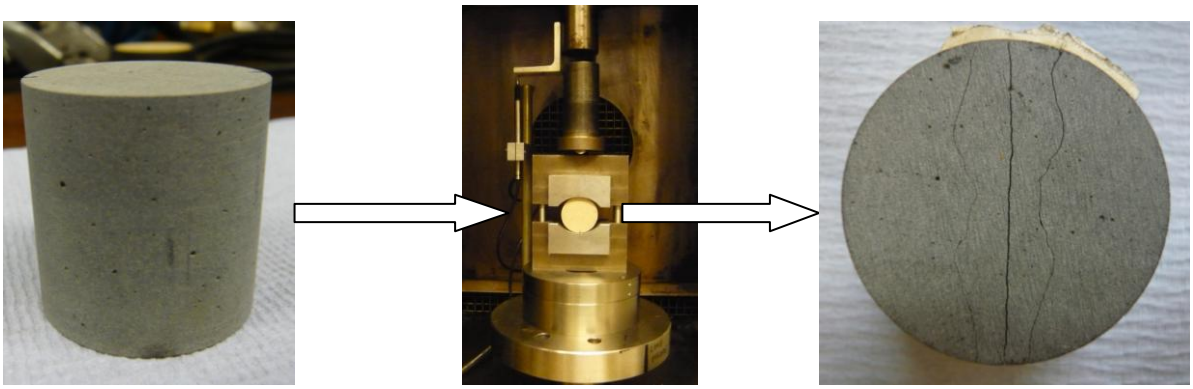
本研究では，直径および長さともに38mmの円柱形の供試体を使用する．圧力下でのき裂の閉塞を調べるために，ひずみ速度$10^{-5}s^{-1}$の圧裂引張試験によって供試体内に巨視き裂を導入し，貫通した巨視き裂を含む岩石における透水特性と弾性波伝播特性を調べた．**図−1**に圧裂引張試験の概要を示す．**図−1**(a)は岩石供試体（Seljadur玄武岩），(b)は試験装置の供試体設置部，(c)は破壊した岩石供試体（Seljadur玄武岩）の写真である．

3. 試験方法

本研究で用いた透水試験装置の概要図を**図-2**に示す．この装置は，Benson et al.[9]やVinciguerra et al.[10]が用いたものと同様の装置であり，最大100MPaの静水圧下での定常流法による透水試験が可能である．すなわち，厚さ3mmのラバージャケットで被覆した円柱形の岩石供試体（直径・長さともに38mm）にシリコンオイルによって静水圧を加えた条件下で，供試体の上端と下端に異なる間隙水圧を与えて供試体内部に水を流入し，定常流が実現されたところでダルシー則を用いて透水係数（固有透過係数）を求める．

なお，この装置では，最大圧力70MPaのサーボ制御型の増圧器を２つ用いて，上流側と下流側の間隙水圧を制御している．Clashach砂岩では，上流側の間隙水圧を2.6～2.8MPa，下流側の間隙水圧を2.1～2.3MPaとして透水試験を行った．Seljadur玄武岩と白浜砂岩については，上流側の間隙水圧は6MPa，下流側の間隙水圧は2MPaとした．

また，この装置には，Ｐ波速度とＳ波速度測定用のＰＺＴ振動子が備えられており，超音波パルス透過法により岩石供試体の上端から下端へ進行する弾性波速度も同時に測定できる．岩石供試体を設置する部分の拡大図を**図-3**に示す．本研究では，Ｐ波速度と，振動方向が巨視き裂面に垂直であるＳ波の速度を測定した．



(a)　(b)　(c)

図-1　圧裂引張試験

(a)：Seljadur 玄武岩供試体（直径・長さともに 38mm），(b)：装置の供試体設置部，(c)：破壊した玄武岩供試体

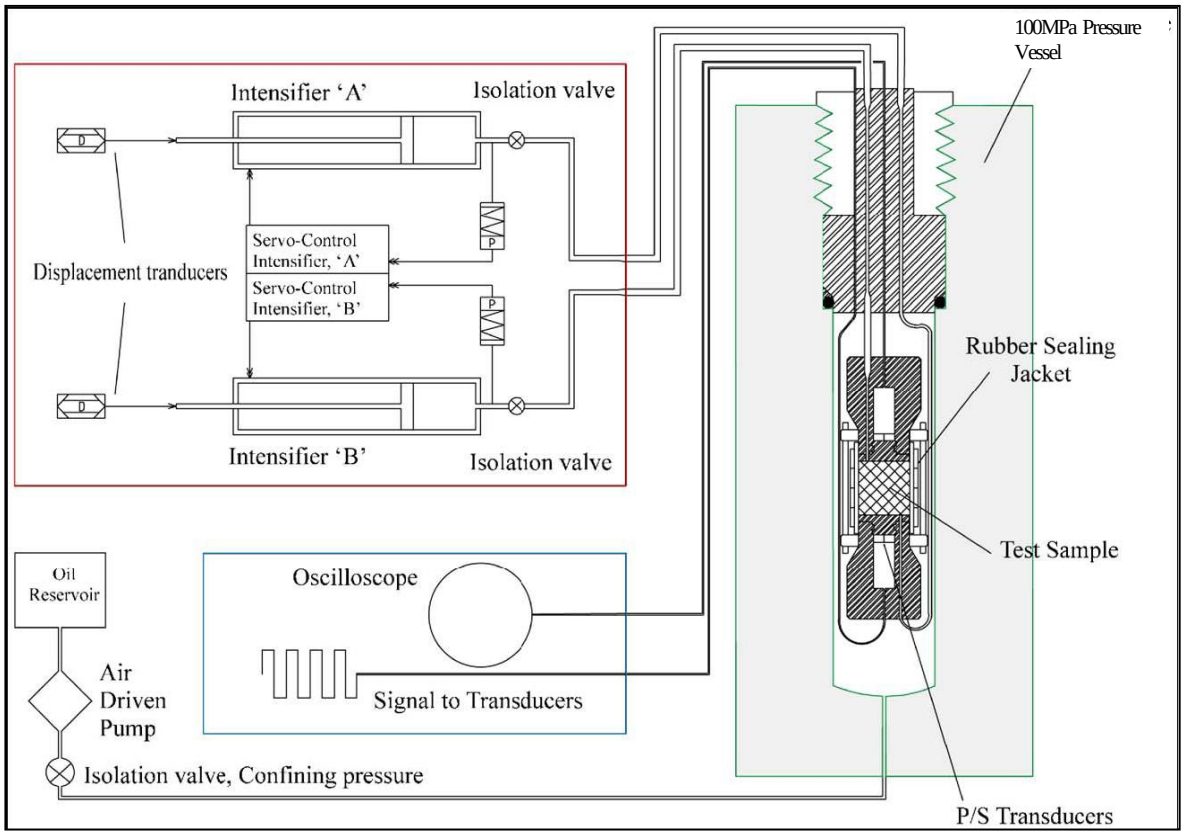


図-2　透水試験装置の概要図

4. 試験結果

(1) 透水試験結果

有効封圧と固有透過係数の関係を**図-4**に示す．**図-4(a)**はSeljadur玄武岩，(b)はClashach砂岩，(c)は白浜砂岩の結果である．なお玄武岩では，インタクトな供試体とは別の供試体に巨視き裂を導入した．砂岩では，インタクトな供試体と同一の供試体に巨視き裂を導入し，供試体ごとにプロットの形状を区別している．

図-4(a)より，インタクトなSeljadur玄武岩においては，固有透過係数に及ぼす圧力の影響は小さい．一方，巨視き裂を含む場合，インタクトな供試体よりも固有透過係数ははるかに大きくなる．また，固有透過係数に及ぼす圧力の影響は極めて大きくなり，圧力の増大とともに固有透過係数は低下している．これは，巨視き裂の閉塞を示唆するものである．特に，有効封圧が40MPa以下の場合，圧力の増大に伴う固有透過係数の低下が顕著である．

一方，**図-4(b)**に示されるように，Clashach砂岩においては，巨視き裂を含む供試体での固有透過係数は，インタクトな供試体のものと同程度であることがわかる．さらに，圧力が変化した場合でも，固有透過係数に変化が認められないことが示された．

図-4(c)に示されるように，白浜砂岩についても，巨視き裂を含む供試体の固有透過係数は，インタクトな供試体でのものと同程度であった．ただし，白浜砂岩では，圧力の増大に伴って，固有透過係数の低下が認められた．

このように，玄武岩と砂岩では，透水性に及ぼす巨視き裂の影響は大きく異なることが示された．

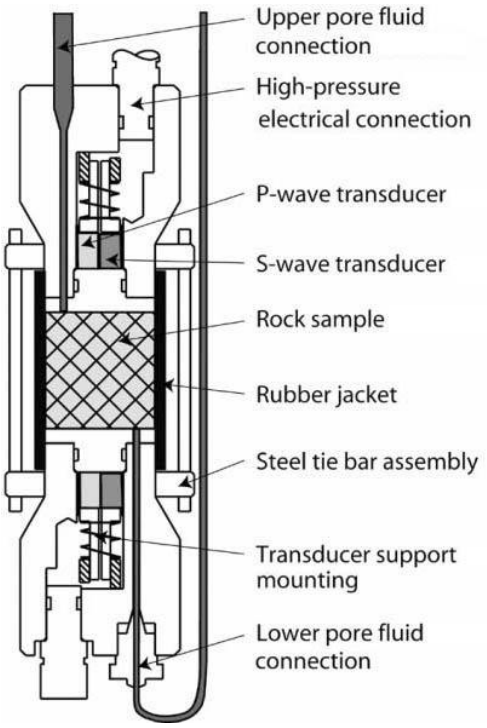


図-3 透水試験装置における供試体設置部の拡大図

(2) 弾性波速度測定結果

Ｓ波速度測定用の振動子で得られた波形の例を**図-5**に示す．**図-5(a)**はSeljadur玄武岩，(b)はClashach砂岩，(c)は白浜砂岩の，巨視き裂を含む供試体で得られた波形であり，黒の三角形はＳ波の到達点を示している．ただし，巨視き裂を含む砂岩供試体では，封圧が低い場合，Ｓ波の到達を読み取れない場合があった．

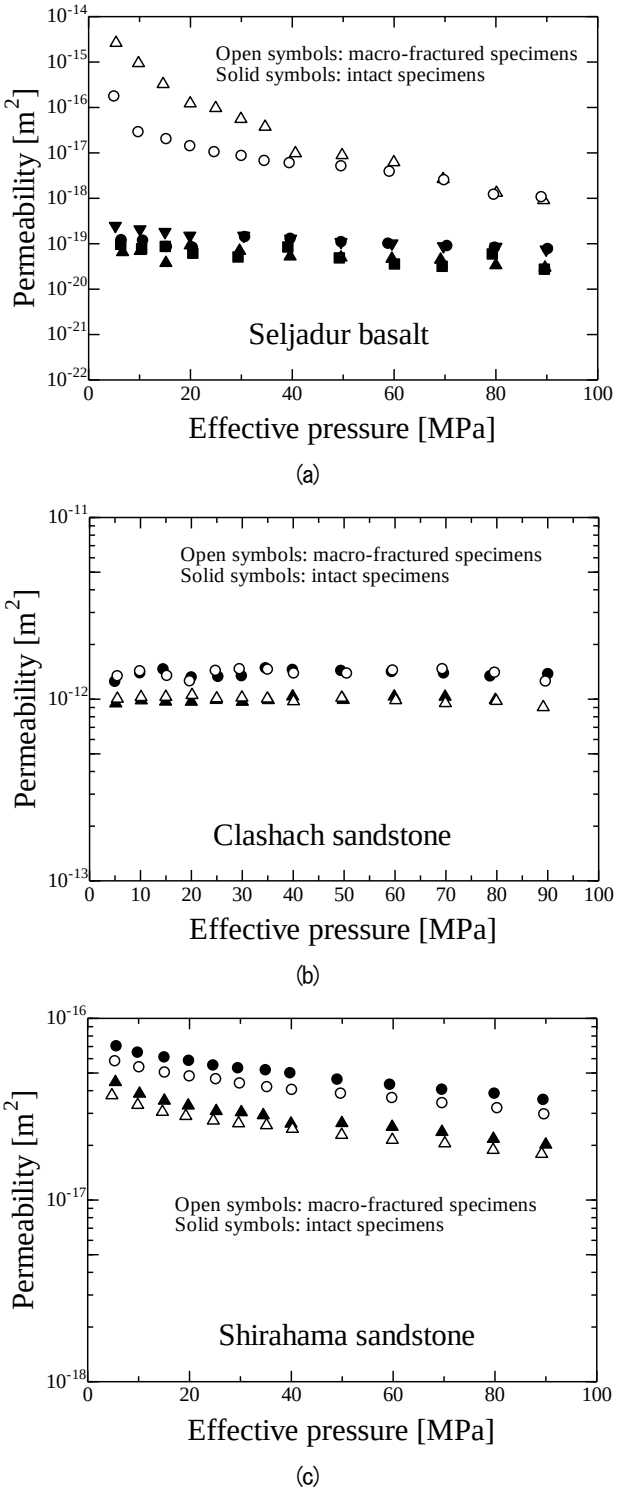


図-4 有効封圧と固有透過係数の関係

(a)：Seljadur 玄武岩，(b)：Clashach 砂岩，(c)：白浜砂岩

図-6および**図-7**に，有効封圧とＰ波速度およびＳ波速度の関係をそれぞれ示す．これらの図において，(a)はSeljadur玄武岩，(b)はClashach砂岩，(c)は白浜砂岩での結果である．前述したように，玄武岩では，インタクトな供試体とは別の供試体に巨視き裂を導入し，砂岩では同一の供試体に巨視き裂を導入している．また砂岩では，供試体ごとにプロットの形状を区別している．

図-6より，いずれの岩石においても，圧力の上昇に伴って，Ｐ波速度が上昇することが示された．玄武岩においては，インタクトなものと巨視き裂を含むもので供試体が異なるため，Ｐ波速度の明確な違いは認められなかった．一方，砂岩においては，圧力が低いとき，巨視き裂を含む供試体でのＰ波速度が小さくなるが，圧力の増大に伴い，速度差が小さくなる傾向があることが分かる．

図-7より，Ｐ波速度と同様に，いずれの岩石でも，圧力の上昇に伴うＳ波速度の上昇が示された．また，巨視き裂を含む場合，インタクトな場合よりもＳ波速度は小さくなる傾向が示された．また，砂岩では，圧力の増大に伴って，速度の差が小さくなることが示された．これは，き裂の閉塞を示唆するものと考えられる．

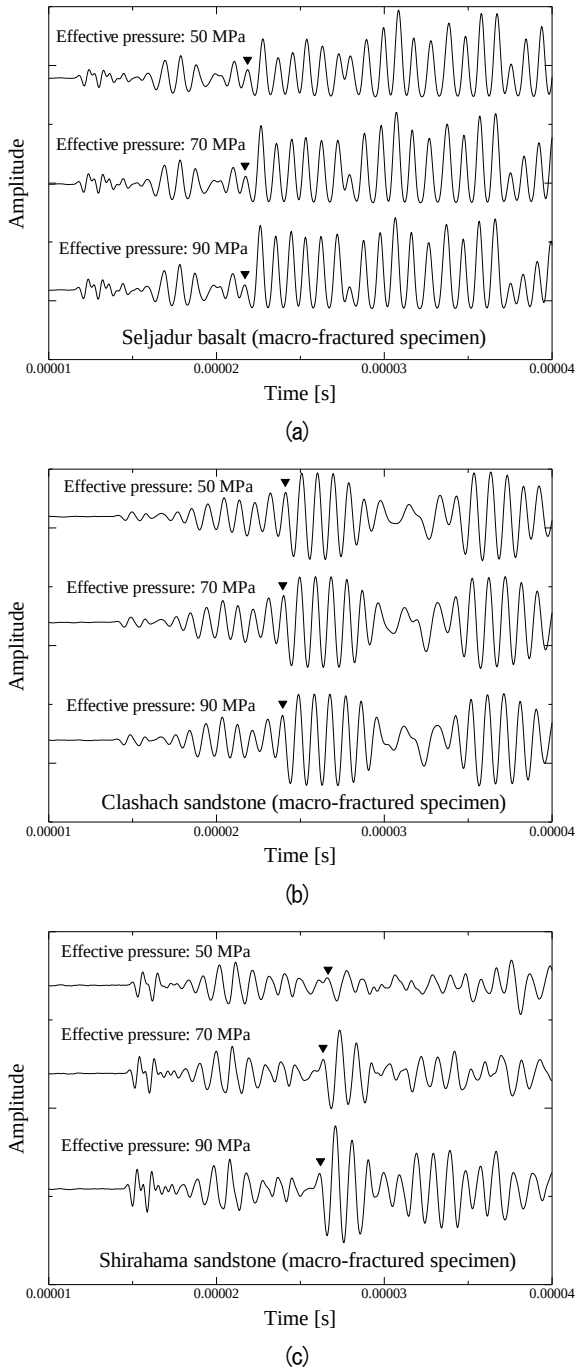


図-5　Ｓ波測定用振動子から得られた波形
(a)：Seljadur玄武岩，(b)：Clashach砂岩，(c)：白浜砂岩

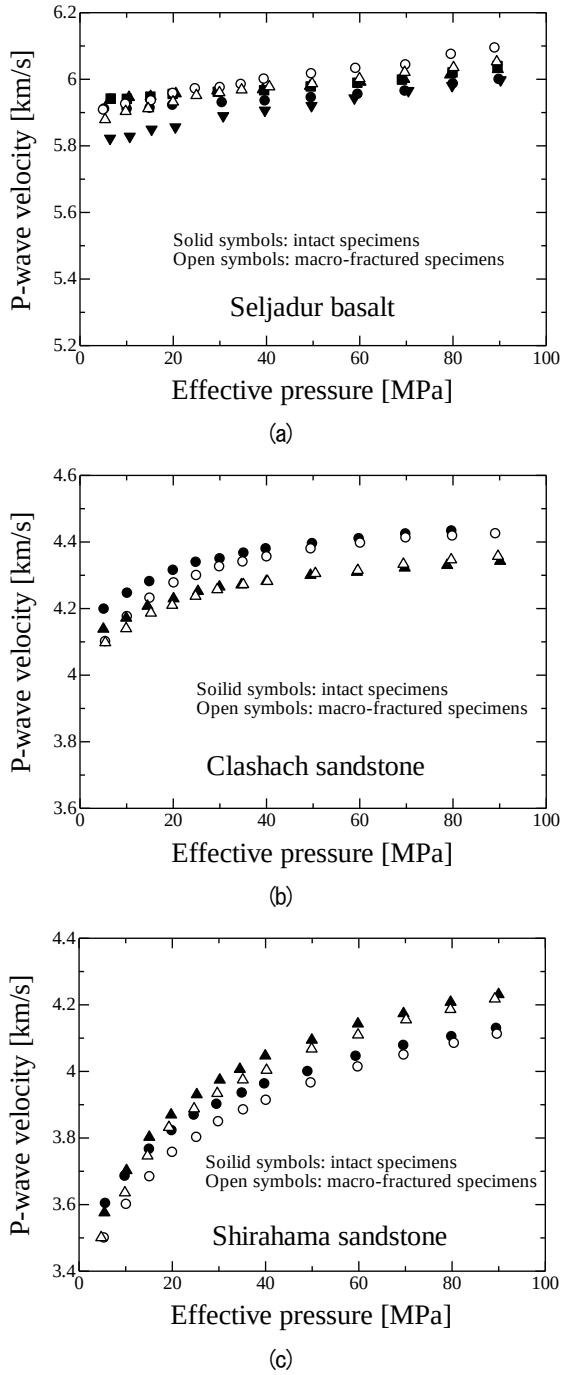


図-6　有効封圧とＰ波速度の関係
(a)：Seljadur玄武岩，(b)：Clashach砂岩，(c)：白浜砂岩

5. 考察

玄武岩では，巨視き裂を含んだ場合に透水性が大きく増大した．玄武岩における透水性の増大は，巨視き裂の導入によるものであると考えられる．すなわち，圧力が低い領域では，き裂が開口しているために透水性が数オーダーも上昇し，圧力の増大に伴う透水性の低下は，巨視き裂の閉塞によるものと考えられる．ただし，有効封圧が試験装置のほぼ上限である90MPaの場合でも，巨視き裂を含む供試体での固有透過係数は，インタクトな供試体のものよりも大きかったため，本研究の圧力の範囲内では，圧裂引張によって形成された玄武岩中のき裂は，完全には閉塞していないと考えられる．したがって，玄武岩中のき裂を完全に閉塞させるには，より大きな圧力が必要であるといえる．

また，巨視き裂を含んだ玄武岩においては，き裂面に垂直に振動するＳ波の速度が低下する傾向が認められた．ただし，Ｓ波速度の変化は，固有透過係数の変化よりもはるかに小さいものであった．ゆえに，玄武岩のような緻密な岩石では，き裂の開口や閉塞の影響を調べる上では，透水性の調査が有効であると考えられる．

砂岩では，透水性に巨視き裂の影響は認められなかった．**図-8**にインタクトな砂岩におけるＸ線ＣＴ画像を示す．**図-8**(a)はClashach砂岩，(b)は白浜砂岩の画像である．Ｘ線ＣＴ画像では，密度によって画像の濃淡が決定され，濃色の部分がき裂や空隙となる．インタクトな砂岩では，**図-8**に示されるような空隙のネットワークが主な水の流通経路となる．巨視き裂を含む砂岩においても固有透過係数が同程度であったことから，砂岩では，空隙のネットワークが透水性を支配していると考えられる．

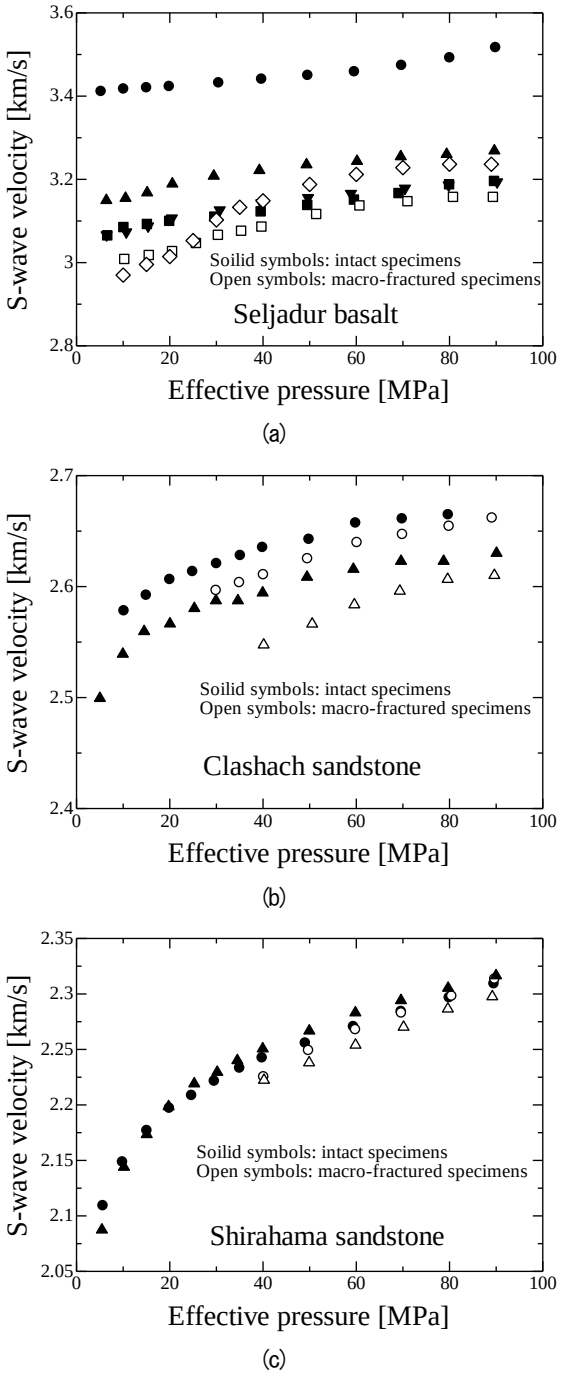


図-7　有効封圧とＳ波速度の関係

(a)：Seljadur 玄武岩，(b)：Clashach 砂岩，(c)：白浜砂岩

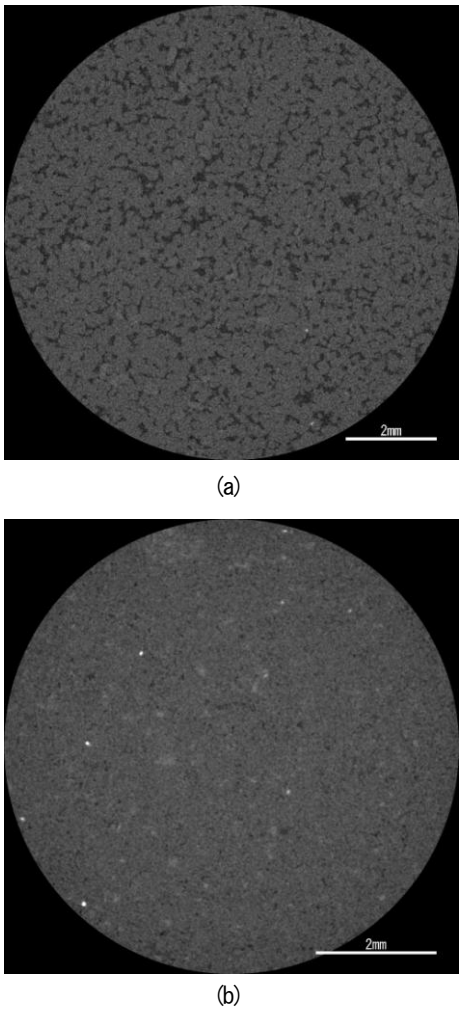


図-8　Ｘ線ＣＴ画像　(a)：Clashach 砂岩，(b)：白浜砂岩

Clashach砂岩においては，固有透過係数に及ぼす圧力の影響が認められなかった．これは，Benson et al.[9]によって，多孔質で新鮮な砂岩であるBentheim砂岩において報告されている結果とよく一致している．図-8(a)に示されているように，Clashach砂岩では，サイズおよびアスペクト比がともに大きい空隙が多数存在している．圧力を加えた場合でも，このような空隙の大部分は閉塞せず，空隙の連結性に影響が出なかったために，固有透過係数に圧力の影響が現れなかったものと思われる．

一方，砂岩の弾性波速度は，巨視き裂を含む場合，わずかながら低下する傾向が認められた．透水性の変化が認められなかったことを考えると，砂岩においては，き裂の開口や閉塞が及ぼす影響を確かめるためには，透水試験よりも弾性波速度測定が有効であることが示唆される．

本研究で用いた装置では，巨視き裂面に平行に進行する弾性波の速度のみが測定可能であるが，き裂の影響をより詳細に調べるには，き裂面に垂直な方向に進行する弾性波速度の測定がより有効であろう．これについては今後の課題としたい．

6. 結論

本研究では，岩石内のき裂や空隙の閉塞挙動に圧力が及ぼす影響について調べ，様々な静水圧環境下での岩石の固有透過係数と弾性波速度を測定した．

巨視き裂を含む玄武岩では，インタクトな場合よりも固有透過係数ははるかに大きくなった．インタクトな玄武岩では固有透過係数に及ぼす圧力の影響は小さいが，巨視き裂を含む場合，圧力の上昇に伴う固有透過係数の低下が顕著であった．砂岩の固有透過係数は，巨視き裂を含んだ場合でも，インタクトな供試体と同等の値となり，巨視き裂が固有透過係数に及ぼす影響は認められなかった．また，新鮮で多孔質なClashach砂岩では，圧力が変化しても，固有透過係数に変化は認められなかった．

また，いずれの岩石でも，圧力の上昇に伴う弾性波速度の増加が示された．巨視き裂を含んだ場合，圧力の上昇に伴う弾性波速度の増加はより顕著になった．

謝辞：著者は，日本学術振興会特別研究員制度から助成を受けている．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) 奈良禎太：岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する既往の研究と新たな展開，Journal of MMIJ，Vol.123 (1), pp.2-7，2007.
2) 奈良禎太，米田哲朗，金子勝比古：火成岩のサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響，Journal of MMIJ，Vol.125 (2)，pp.57-61，2009.
3) 奈良禎太，森本和也，米田哲朗，金子勝比古：砂岩のサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響，Journal of MMIJ，Vol.125 (4,5)，pp.138-145，2009.
4) 奈良禎太，高田雅史，森大介，大和田仁，米田哲朗，金子勝比古：岩石と高強度高緻密コンクリートにおけるサブクリティカルき裂進展と長期強度，材料，Vol.58 (6)，pp.525-532，2009.
5) 奈良禎太，五十嵐敏文，広吉直樹，米田哲朗，金子勝比古：岩石のサブクリティカルき裂進展指数と長期強度に及ぼす周辺環境の影響，材料，Vol.59 (3)，2010（掲載決定）.
6) 喜多治之，佐藤稔紀，辻上博司，陳友晴，西山孝，金子勝比古：温度履歴に伴う砂岩の空隙構造の変化，Journal of MMIJ，Vol.116 (8)，pp.656-611，2000.
7) 奈良禎太，加藤春實，金子勝比古：微視き裂分布評価を目的とした多面体試験片を利用した花崗岩の主軸方向決定法，Journal of MMIJ，Vol.124 (12)，pp.725-732，2008.
8) Eccles, D., Sammonds, P.R. and Clint, O.C. : Laboratory studies of electrical potential during rock failure. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 42 (7, 8), pp. 933-949, 2005.
9) Benson, P.M., Meredith, P.G., Platzman, E.S. and White, R.E. : Pore fabric shape anisotropy in porous sandstones and its relation to elastic wave velocity and permeability anisotropy under hydrostatic pressure. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 42 (7, 8), pp. 890-899, 2005.
10) Vinciguerra, S., Trovato, C., Meredith, P.G. and Benson, P.M. : Relating seismic velocities, thermal cracking and permeability in Mt. Etna and Iceland basalts. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 42 (7, 8), pp. 900-910, 2005.

FUNDAMENTAL STUDY OF PERMEABILITY AND ELASTIC WAVE VELOCITY IN MACRO-FRACTURED ROCK UNDER HYDROSTATIC PRESSURE

Yoshitaka NARA, Philip MEREDITH, Tetsuro YONEDA and Katsuhiko KANEKO

We report changes in the fluid permeability and P- and S-wave velocities of both intact and macro-fractured rock samples subjected to elevated effective pressures. It was shown that the permeability of macro-fractured basalt was initially much higher than that of intact basalt, but decreased remarkably as effective pressure increased and the fracture became closed. By contrast, the permeability of sandstone did not vary even though the rock samples were macro-fractured. For both rocks, the wave velocities increased with increasing pressure. For sandstone, the difference in the wave velocities between intact and macro-fractured samples decreased with increasing pressure, tracking the closure of the fractures.