

圧力波応答による岩石の透水係数の測定

-間隙圧オシレーション法-

HYDRAULIC CONDUCTIVITY TEST OF ROCK USING OSCILLATION METHOD

亀谷 裕志*・中山 栄樹*・岩本 健*・細田 光一*

Hiroshi Kameya, Eiki Nakayama, Takeshi Iwamoto and Koichi Hosoda

For the purpose of measuring hydraulic parameters during the shear of rock samples, we developed test apparatus for the oscillation methods. In this test method, oscillating fluid pressure is applied on one side of the sample, and the responded pressure on another side is measured. The amplitude ratio and the phase shift of the pressure on both sides of the sample are used to calculate the hydraulic conductivity and storage coefficient. The hydraulic parameters of sandstones measured by the oscillation methods are consistent with those by flow pump methods. In the tests during the triaxial compression, the hydraulic parameters are successfully measured.

Key Words : hydraulic conductivity test, oscillation method, storage coefficient

1 はじめに

間隙圧オシレーション法¹⁾²⁾は岩石供試体に正弦波の間隙水圧を与え、その応答を測定することにより透水係数と貯留係数を決定する手法である。図-1に本手法の概念を示すが、供試体上流側にある圧力波を与えることにより下流側貯留槽では供試体の透水係数・貯留係数に見合った振幅比および位相差を有する圧力波形が観測される。この観測波形は与えた圧力波と同じ周波数であることから、仮に他の周波数域のノイズが下流側の波形に付与されてもフィルター処理等によりそのノイズを除去できる（これがオシレーション法の最大の特徴でもある）。この場合ノイズ源として通常の電氣的なもの以外に、実験時の貯留槽内の圧力変動を考慮することが重要である。圧力変動が起こる原因としては、供試体の変形に伴う間隙水の出入りや温度変化に伴う貯留槽の体積変化等が考えられる。このような要因による圧力変動は他の手法（フローポンプ法やトランジェントパルス法）では結果に直接影響することから、これらの透水試験は温度制御された環境下で行なわれることが一般的である。またせん断時など岩石の変形に伴う試験を行う場合には、透水係数測定時に変位を一旦保持することが多い。オシレーション法はこのような状態の変化による影響を受けにくいため、

- ① せん断時など岩石の変形が継続する間での透水係数の測定
 - ② 高温状態など温度変化の影響を避けることが難しい条件下での測定
- 等に適した試験手法であると考えられる。

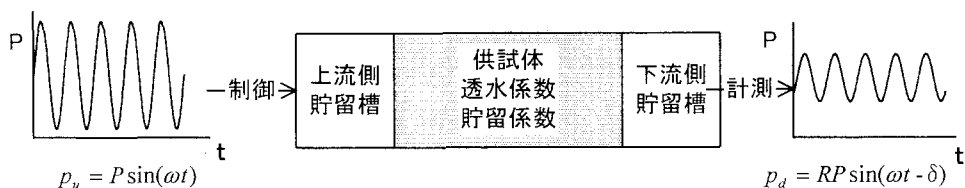


図-1 オシレーション法の概念図

* 応用地質株式会社 コアララボ

本論文では、オシレーション法の試験装置を製作し、2種類の砂岩について等方圧状態で試験を実施して結果をフローポンプ法との対比した事例を紹介するとともに、せん断過程における測定事例を示す。

2. 実験概要

2.1 実験装置および手順

実験に用いた装置の概要を図-2に示す。供試体上流側には空圧サーボバルブをメインとした圧力制御機構を採用した。空圧サーボバルブは最大出力1.0MPa/10Vで、上流側の圧力変換器の出力をフィードバック信号として制御を行う。入力信号としてはPCから任意波形とこれに加算する一定圧を与えることが可能である。この上流側の制御周波数は、実用上は1Hz以下である。一方、下流側にはシリンジポンプを接続し、その内部を貯留槽の代わりとしている。シリンジポンプを採用した理由は試験時に下流側貯留槽の圧縮性を把握できるようにするためである。貯留槽の圧縮性は具体的には下流側の背圧供給のラインを遮断しシリンジポンプから一定速度で送水することにより行う。これはフローポンプ法の手順そのものであるが、この時の圧力上昇量と送水量の初期の勾配から図-3に示すように貯留槽の圧縮性を決定することが出来る³⁾。

オシレーション法の実験では実験供試体を水中でセットした後所定の拘束圧と背圧を加え、間隙水の出入りが無くなるまで放置する。背圧と同じ大きさの一定圧をサーボバルブで与えた状態で上流側・下流側ともに背圧供給ラインを遮断し、その後上流側の正弦波圧力制御を開始する。これら実験装置は通常の空調設備を有する実験室内に設置し、実験時の温度変化は最大で1℃程度であった。

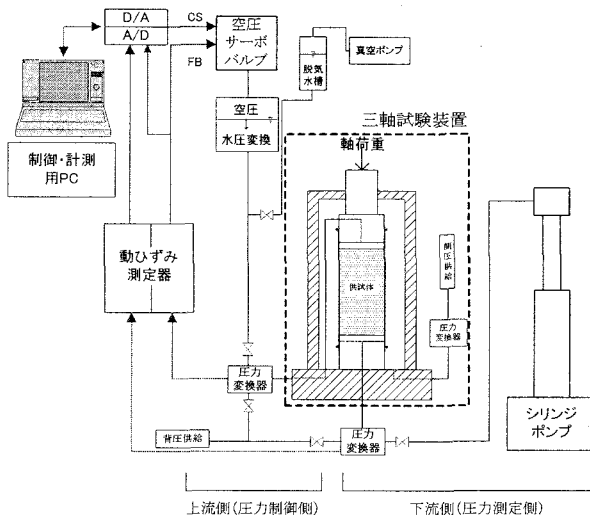


図-2 実験システムの概要

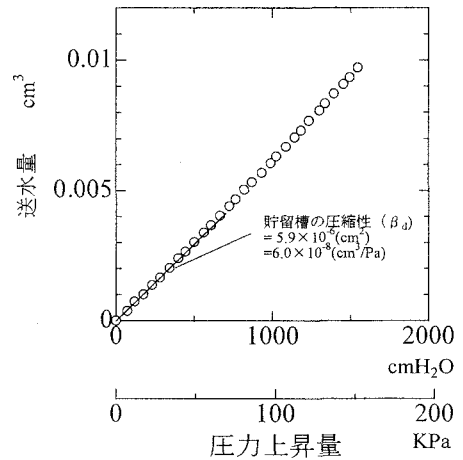


図-3 貯留槽の圧縮性の測定

2.2 解析方法

試験により得られる上流側と下流側の圧力振幅の比、 R ($0 < R < 1$) と位相角の差 δ は以下の式で表される⁴⁾。

$$\tan(\delta) = \frac{\sinh(\psi) \sin(\psi) + \gamma \psi (\sinh(\psi) \cos(\psi) + \cosh(\psi) \sin(\psi))}{\cosh(\psi) \cos(\psi) + \gamma \psi (\sinh(\psi) \cos(\psi) - \cosh(\psi) \sin(\psi))} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{\left[\left\{ \cosh(\psi) \cos(\psi) + \gamma \psi (\sinh(\psi) \cos(\psi) - \cosh(\psi) \sin(\psi)) \right\}^2 + \left\{ \sinh(\psi) \sin(\psi) + \gamma \psi (\sinh(\psi) \cos(\psi) + \cosh(\psi) \sin(\psi)) \right\}^2 \right]^{0.5}} \quad (2)$$

ϕ および γ は無次元化されたパラメータであり、以下の式で表される。

$$\psi = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} L = \sqrt{\frac{\eta\beta\omega}{2\kappa}} L \quad \& \quad \gamma = \frac{\beta_d}{AL\beta} \quad (3)$$

ここで、 ω ；角速度 (s^{-1})、 κ ；絶対浸透率 (cm^2)、 η ；流体の粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 L ；供試体の高さ (cm)、 A ；供試体断面積 (cm^2)、 β_d ；下流側貯留槽の圧縮性 (cm^3/Pa)、 D は水頭拡散率 ($D = \kappa/\eta\beta$)である。また β (Pa^{-1})は供試体単位体積あたりの貯留能力を表し、貯留係数 S とは $\beta = S/\rho g$ の関係にある (S ；貯留係数 (cm^{-1})、 ρ ；流体の密度、 g ；重力加速度；流体が水の場合 $1Pa^{-1}$ はおよそ $98.1cm^{-1}$ に相当する)。なお、本論文での透水係数 $k = \kappa\rho g/\eta$ (cm/s)は $15^\circ C$ 時の値に換算したものを表示している。

観測された (R, δ) により(1), (2)式から (ψ, γ) を求め、さらに(3)式を適用することにより (k, S) を求めることが出来る。その手順については高橋らに詳しく述べられている⁴⁾。解析上の精度に対して問題となるのは観測された2つの波形から振幅比 R と位相角の差 δ を求める方法である。これに関して Fisher ら²⁾はフーリエ変換によるスペクトルを用いる方法を提案しているが、ここでは観測データをフィルター処理し、その後1波ごとに波形を取り出し、図-4に示すような手順で面積を求めることにより振幅比および位相差を算出した。

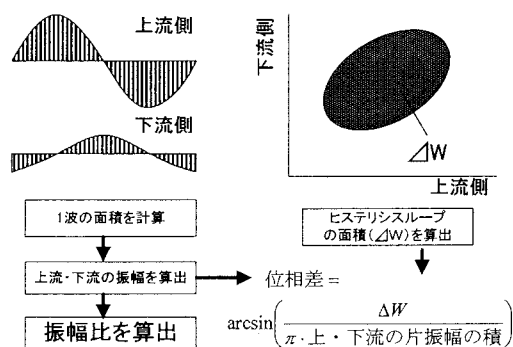


図-4 R, δ の算出方法

2. 3実験に用いた試料

実験には第三系の2種類の砂岩を用いた。ひとつは和歌山県白浜町産の砂岩(白浜砂岩)であり、もうひとつは群馬県吉井町産の砂岩(多胡砂岩)である。有効間隙率は白浜砂岩が約11%, 多胡砂岩が約15%である。林ら⁵⁾が水銀圧入式ポロシメータにより測定した結果によれば、平均細孔半径は白浜砂岩で $0.2 \mu m$ 程度、多胡砂岩が $1 \mu m$ 程度であり多胡砂岩の間隙の方が相対的に大きいと考えられる。試料は石材商よりブロックで購入し、層理面に対して直交方向に直径50mm、高さ100mmの寸法で成形し、イオン交換水に浸した状態で1週間以上真空脱気をした後、試験に供した。

3. 実験結果

3. 1等方圧状態での測定

(1) 周波数による振幅比の変化

図-5に測定結果の一例を示す。この時の有効拘束圧は4MPa、背圧は0.3MPa、圧力片振幅は約0.03MPaである。ここでは3種類の周波数で試験を行った結果を表示しているが、周波数が小さくなるほど振幅比 R は大きくなり、位相差 δ は小さくなる傾向にあることが分かる。それぞれの周波数の測定結果による (R, δ) から前述したように透水係数、貯留係数を求めることが出来る。ここで「試験を行う周波数をどのように選定すべきか?」という問題が生じる。このことを議論する前にまず周波数による振幅比の変化が解析解ではどのようになるか考えてみたい。(3)式に示すように、周波数(角速度)が変化するとパラメータ ϕ が変化する。これに伴い式(2)の R が変化するが、この R と ω の関係は D と γ が決まれば1本の曲線として表わされる。

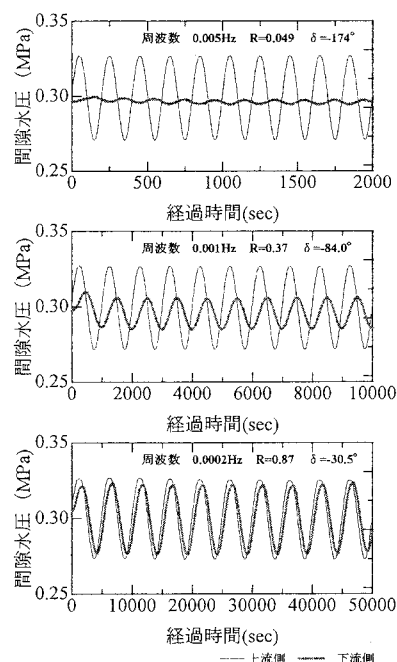


図-5 観測波形の一例 (試料は白浜砂岩)

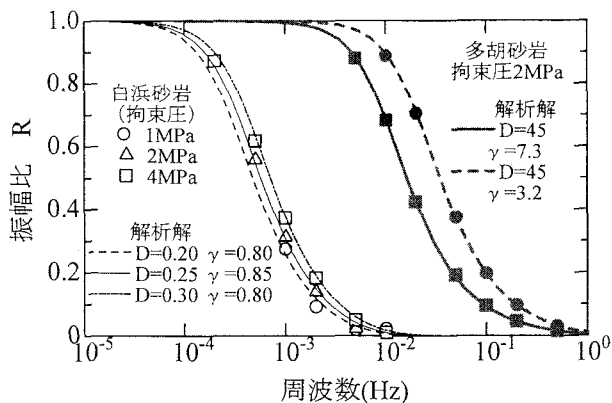


図-6 周波数と振幅比との関係

図-6は周波数と振幅比の関係について、実際に行った実験データと上述のように D , γ を設定して解析解より求めた曲線を合わせてプロットしたものである。解析解の曲線を決定するパラメータ D , γ は実験による振幅比-周波数の関係となるべく一致するように設定している。一方実験は条件を次のように変えている。白浜砂岩については有効拘束圧を1~4MPaまで変化させているが、対応する解析解の水頭拡散率 D はこれに伴い0.20から0.30に増加している。また、多胡砂岩では解析解で $\gamma=3.2$ で表される条件で実験を行った後、シリジポンプに若干の空気を吸入させることにより貯留槽の圧縮性を増加させた。これに対応する解析解は $\gamma=7.3$ である。

解析解の曲線を表わす D および γ からも透水係数と貯留係数を決定することが出来る。その値(k_{av} , S_{av})が対応する一連の実験結果(K_w , S_w)の平均的な透水パラメータを表すと考えてみると、両者の比(K_w/k_{av} , S_w/S_{av})を求めることにより測定精度に関する議論が可能であろう。図-7はこの比を縦軸に、横軸を振幅比 R にとって示したものである。図からまず言えるのは貯留係数が透水係数と比較してばらつきが大きいことである。また、振幅比が0.1よりも小さな場合は透水係数および貯留係数ともばらつきが大きくなる。これは下流側で観測される圧力波形の S/N 比が悪くなるためと考えられる。また振幅比が0.5より大きな場合も貯留係数に関してばらつきが大きくなる。

高橋ら⁴⁾は、透水係数や貯留係数の解析する上でその感度が最も高いのは振幅比が0.08~0.12程度であることを指摘している。したがって振幅比が大きな場合(例えば $R>0.6$)透水係数や貯留係数を決定する感度が低下し相対的に誤差が大きくなる。今回の実験結果からは、オシレーション法の実験を行う場合、振幅比が0.1~0.5程度の範囲に入るように周波数を調整することが適当と考えられる。

(2) フローポンプ法との対比

図-8に同じ供試体を使用して、有効拘束圧1, 2, 4MPaでオシレーション(OC)法およびフローポンプ(FP)法を実施した結果を示す(但しFP法の4MPaは漏水のため実施できなかった)。両者の結果はほぼ一致しており、この2つの手法は今回程度の透水特性を有する岩石に対してはほぼ同等の結果を与えると見なして良いであろう。

白浜砂岩と多胡砂岩の透水係数には2オーダー程度の差があるが、これは前述のように間隙径の違いが影響していると考えられる。また、白浜砂岩と多胡砂岩の貯留係数の値や拘束圧依存性はほぼ同一となっている。白浜砂岩の貯留係数については体積圧縮率の影響が大きいことが分かっており、その値は1~0.4GPa⁻¹程度(拘束圧1~4MPa)である³⁾。多胡砂岩について一軸圧縮試験から体積圧縮率を求める値と0.5~0.3GPa⁻¹程度となり、貯留係数の値と整合している。

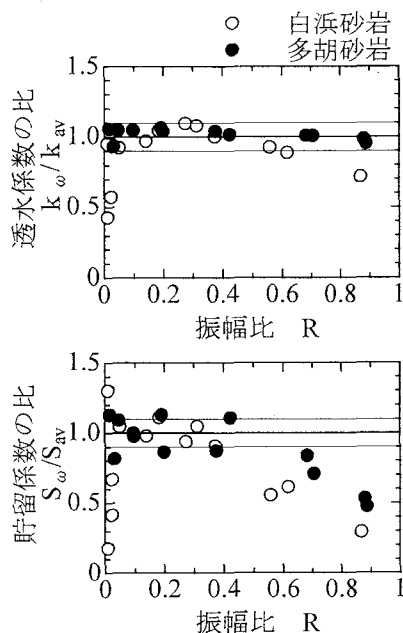


図-7 周波数と振幅比との関係

横線は、0.9~1.1 (中心1.0) の範囲を表す

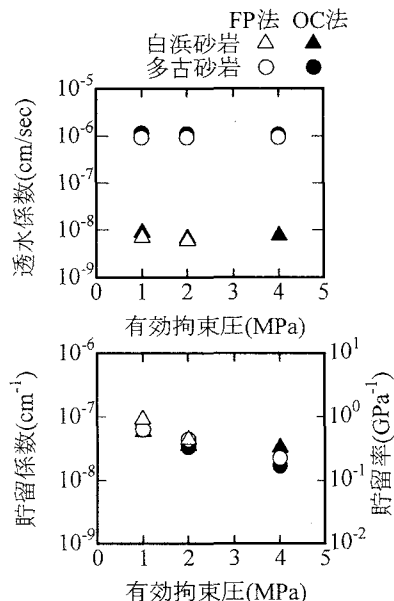


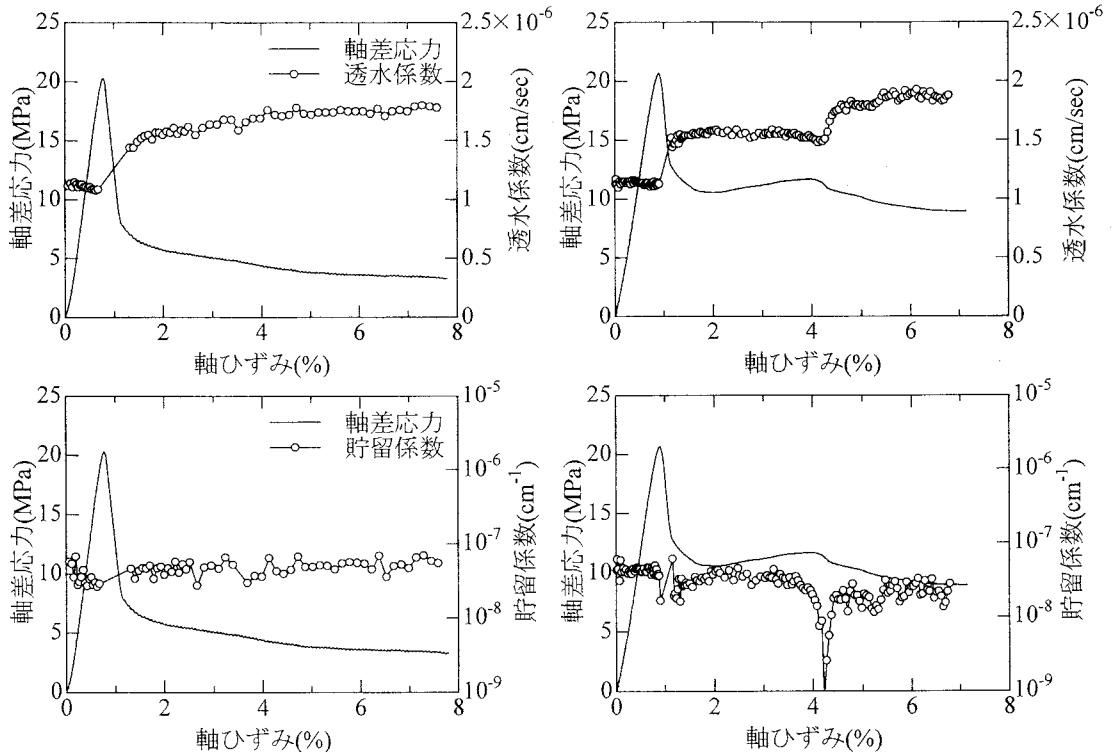
図-8 異なる手法による結果の対比

3.2せん断時の測定

せん断時の透水係数の測定としては、透水試験方法、載荷方式および供試体形状など種々のものが提案されている。今回は三軸圧縮試験を行い、その過程でオシレーション法により供試体両端面間の透水特性変化を測定した。試料は多胡砂岩を用い、有効拘束圧1MPa（供試体Ⅰ）および2MPa（供試体Ⅱ）の2条件で実験を実施した。載荷は変位制御で行い載荷速度は約0.04%/min、オシレーション法の周波数は0.01および0.02Hzとした。なお、オシレーション法では圧力制御を開始してからしばらく下流側圧力振幅は一定とならないため、載荷に先立ち10波程度の圧力波を与えた後、軸圧縮を開始している。

図-9に応力～ひずみ曲線と透水係数、貯留係数を示す。2供試体とも破壊前に透水係数は軸差応力の増加に伴いわずかに低下し、破壊に伴い供試体Ⅰで4割程度、供試体Ⅱで3割程度増大する。破壊前の透水係数の低下は平均有効応力が増大することにより間隙が圧縮されることが原因と考えられる。また、破壊により破壊面が形成されると、その破壊面を含む供試体区間は動水勾配が小さくなり、それ以外の供試体区間では逆にその分だけ動水勾配は大きくなる（図-10）。破壊面を含まないインタクトな岩石では透水係数は変化しないため、動水勾配の増加は流量および供試体全体として評価される透水係数の増加と等しくなる。一方、試験後の破壊形状（写真-1）を図-10に示すモデルに当てはめ、破壊面を含む供試体区間の透水係数を評価すると、その値はインタクトな岩石の2倍程度であった。なお、図-11示すように破壊に伴い軸ひずみが急増する場合、供試体の体積変化により下流側貯留槽の間隙水圧が大きく変動し、オシレーション法に対するS/N比が悪化する。このため、今回は破壊直後で透水特性の評価が出来ない部分もあった。この現象を防ぐために、破壊に伴いひずみが急増しないよう載荷制御方式を工夫することも必要と考えている。

次に破壊後の挙動についてみると、2つの供試体で透水係数の変化は異なっている。供試体Ⅰでは軸ひずみの増加に伴い透水係数が徐々に増大している。これは破壊面の移動やその透水性の変化などが原因と考えられる。一方、供試体Ⅱでは軸ひずみの増加に伴い透水係数がわずかに低下した後、軸ひずみが4%を過ぎるあたりから再度急に増加している。前半の現象は破壊面の上下部がすりつけ合うことにより粒子破碎が起き、その結果透水性の低下が生じたためと考えられる。一方、後半の現象は、写真-1に示すように副次的な破壊面が生じた結果、透水係数の増加として表われたものと考えられる。



(a) 供試体Ⅰ；有効拘束圧1MPa

(b) 供試体Ⅱ；有効拘束圧2MPa

図-9 三軸圧縮試験時における測定結果（多胡砂岩）

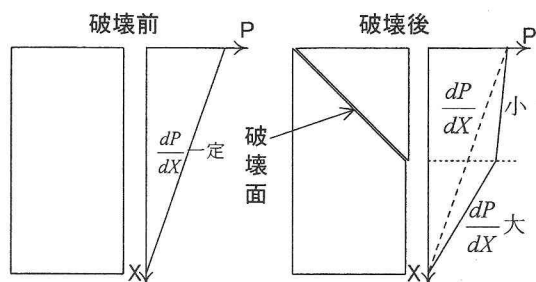


図-10 破壊に伴う動水勾配変化の概念図

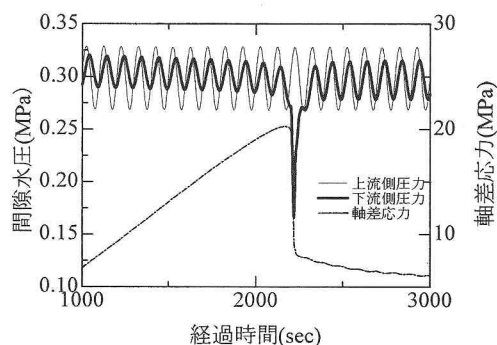


図-11 ピーク付近の下流側貯留槽の圧力変化
(実験は供試体 I)

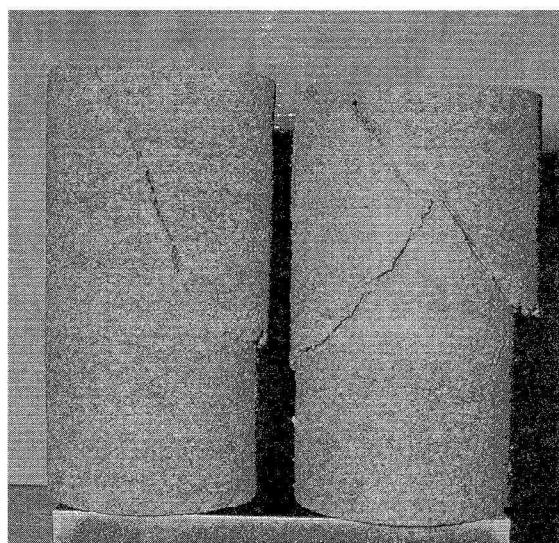


写真-1 試験後の供試体

左側=供試体 I；破壊面は供試体上端部左側より斜め右下がり(約 50 度)に生じている

右側=供試体 II；供試体上端部左側より主破壊面が斜め右下がり(約 45 度)に生じ、その中央部から供試体左側面にかけて左下がりに副次的な破壊面が発生している

4. おわりに

岩石を対象にオシレーション法の透水試験装置を作成し、2種類の砂岩を用いて基礎的な実験を行った。測定された周波数-振幅比の関係は解析解と合致するものであり、また得られた透水係数・貯留係数はフローポンプ法の結果とほぼ一致するものであった。

また三軸圧縮試験時に測定を行い、供試体破壊に伴う透水特性の変化を明確に捉えることができた。今後は種々の载荷形式の試験と組み合わせて透水特性の把握を行うことが課題である。

近年、放射性廃棄物処分の問題などで、環境の変動に伴う水理特性の変化を把握することが重要な課題となっている。今後、このようなテーマに対して本手法を積極的に活用していきたいと考えている。

謝辞

元石油公団の高橋美紀氏、鈴木清史氏には実験装置のご紹介をいただきました。また、(有)創研の小林一三氏には実験装置の設計で貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) R. L. Kranz, J. S. Saltsman, J. D. Blacic (1990): Hydraulic Diffusivity Measurements on Laboratory Rock Samples Using an Oscillating Pore Pressure Method, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. abstr., 27-5, pp345-352.
- 2) G. J. Fischer, M. S. Paterson (1992): Measurement of Permeability and Storage Capacity in Rocks During Deformation at High Temperature and Pressure, Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks ch. 9, pp213-252.
- 3) 亀谷裕志, 徳永朋祥 (2003) : フローポンプ透水試験における装置の貯留性の影響に関する実験的検討, 資源と素材, 119, pp508-513.
- 4) 高橋美紀, 金子貴信 (2003) : 間隙水圧オシレーション法による浸透率・比貯留率測定方法と岩石の変形試料に対する適用例, 資源と素材, 119, pp501-507.
- 5) 林為人, 高橋学 (2000) : 水銀圧入式ポロシメータおよび岩石の内部空隙寸法分布の測定への適用, 地質ニュース, 549, pp61-68.