

(101) Oscillation Test について

通産省工業技術院地質調査所 正会員 高橋 学

Methodology of oscillation test

MITI AIST Geological Survey of Japan Manabu Takahashi

Abstract

To measure permeability and hydraulic diffusivity of rock sample, oscillating pore pressure method was tested. The method uses a pore pressure oscillation superimposed upon the ambient pore pressure at one end of the rock specimen. When both the amplitude ratio and the phase lag between the upstream and downstream reservoir can be measured, the method allows us to calculate both permeability and hydraulic diffusivity at the same time.

The amplitude ratio decreased with increasing of oscillation frequency. On the other hand, the phase lag increased with increasing of oscillation frequency. The obtained permeability and hydraulic diffusivity decreased with increase of confining pressure. Our observations indicate that transient pulse test and oscillation test yield similar values as a function of confining pressure. Although the interconnected porosity is proportional to the ratio of permeability and diffusivity in equation, the observed values were by two order higher than expected value.

1. はじめに

透水係数が著しく小さな岩石の透水係数を測定する手法に、Transient Pulse試験やFlow Pump法等の試験方法がある。Transient Pulse試験¹⁾は平衡状態に達した供試体の一端に、パルス状の間隙水圧を与え、間隙水圧の時間に対する減衰曲線から供試体の透水係数を求める方法である。Flow pump法²⁾は供試体の一端に一定速度で水を注入し、定常状態に至った時の供試体の両端の水頭差から透水係数を求めるものである。これらはいずれも測定前の間隙水圧の平衡状態を確認した後、実験が実施されるので、実際のデータ取得に要する時間よりも間隙水圧の平衡状態を待つ時間の方が長い。供試体の違いや、応力状態の違いはもちろんのことであるが、一般的には、Transient pulse試験よりもFlow Pump法の方が測定時間が短時間で済むようである。これらの手法とは少し異なるが、従来sinusoidal試験、Oscillation試験、正弦波試験等と呼ばれている試験方法も存在する。これは、供試体の一端に間隙水圧をsin curve状に与え、他端で得られる振幅の減衰比と位相差とから供試体の透水係数や水頭拡散率を求める手法である。この手法では他の手法と異なり、測定開始前の間隙水圧の平衡状態をあまり気にしないで実施できる点にある。供試体に強制的に正弦波を与え続けるので、測定値に与える種々の影響を排除でき、結果として測定精度の向上につながる。このOscillation試験は、国内における実施例は非常に少ない。原位置で花崗岩体を対象に実施した本島他³⁾と単一割れ目を想定し、アクリルの板の厚さを変えて室内試験を実施した神藤・鷺沢⁴⁾の報告があるのみである。手法的には、古くから石油関連で用いられてきているが、室内試験にて詳しく検討した例が少ない。そこで、本文

では白浜砂岩を供試岩石としてOscillation試験を実施し、preliminaryな結果を得たので報告する。

2. 実験方法

基本的なシステムの構成はTransient Pulse試験と同様である。ただし、正弦波状に間隙水圧を制御するサーボコントロールシステムが備えられている点が異なり、任意の周波数で任意の大きさの各種波形を出力できるようになっている。供試体の両端には貯留槽が接続されており、この貯留槽の大きさが透水係数に大きく影響する。入力側は強制的に正弦波状にコントロールするので、貯留槽の大きさは問題でなくなる。図-1はOscillation試験の概念を示したものである。平衡状態にある供試体に任意の振幅と周波数を有する繰り返し間隙水圧を与え、供試体内の特定の通路を経て、振幅が大きく減衰し、かつ位相差を伴って出力側で観測される。この場合の振幅の変化 R と位相差 δ は二つの無次元変数 α 、 γ で与えられる。

$$R^2 = \frac{4\alpha^2}{(2\alpha^2+1)\cosh 2\gamma + (2\alpha^2-1)\cos 2\gamma + 2\alpha(\sinh 2\gamma - \sin 2\gamma)} \quad (1)$$

$$\delta = \arctan \left\{ \frac{\tanh \gamma (2\alpha \tan \gamma + 1) + \tan \gamma}{(\tan \gamma - \tanh \gamma - 2\alpha)} \right\} \quad (2)$$

図-2, 3は振幅比 R 、位相差 δ と変数 α 、 γ との関係を示している。実験で得られた振幅比 R と位相差 δ とから、両者が交わる点の α と γ を求め、次式により透水係数と水頭拡散率 D を求める。

$$k = \frac{\mu \beta \lambda V2}{A} = \frac{\mu \beta V2}{A} \frac{\alpha \omega L}{\gamma} \quad (3)$$

$$D = \frac{\omega L^2}{2\gamma^2} \quad (4)$$

ここで、 A は供試体の断面積 (cm^2)、 L は供試体の長さ (cm)、 μ は流体の動粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$)、 β は流体の圧縮率 ($1/\text{MPa}$)、 $V2$ は出力側の貯留槽の大きさ (cm^3) をそれぞれ示している。

3. 実験結果

振幅比と位相差に及ぼす周波数の影響を各封圧毎に示したのが、図-4である。振幅比は周波数の増加とともに減少し、封圧の増加とともにその傾きは変化せず、絶対値は小さくなっている。岩石供試体の内部構造との関連で考えるならば、封圧の増加にともない、水の通路となる亀裂や間隙の寸法は小さくなり、流体流れに対する抵抗が大きくなり、結果として振幅比が小さくなるものと思われる。周波数の増加に対する振幅比の減少は、内部構造の変化以外に流体の粘性などの変化や、さらにシステムの構成としての貯留槽の大きさなどの要因が考えられる。詳しい検討は今後の課題としたい。図-5は位相差に及ぼす周波数の影響を各封圧毎に整理したものである。いずれの封圧においても周波数の増加とともに位相差が増加していることが認められる。また、振幅比ほど明確ではないが、封圧の増加とともに、位相差が大きくなっている。これは、振幅比の変化と同様に封圧の増加にともない、間隙の寸法が小さくなり、あるいは経路が変化することとで説明できるものと思われる。以上、振幅比や位相差などの測定値におよぼす周波数の影響を整理してみたが、いずれの場合も明かな相関を示していることが認められた。ただし、その場合の傾きは対数で比例する点に特徴がある。実用化のためには、最適な周波数をどのように決めれば良いのかが問題となるが、解決のためにはより多くの実験的研究が必要と思われる。

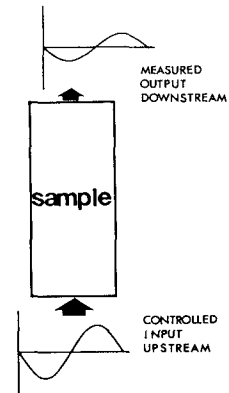


図-1 Oscillation試験の概念図

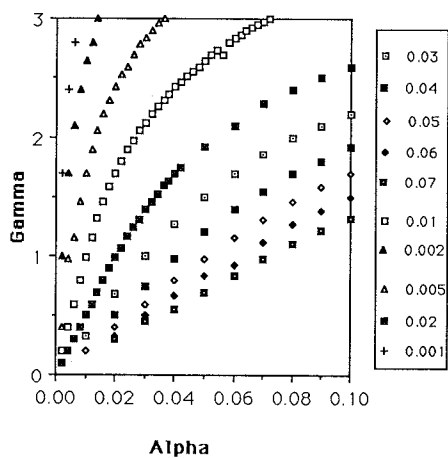


図-2 振幅比と α 、 γ との関係

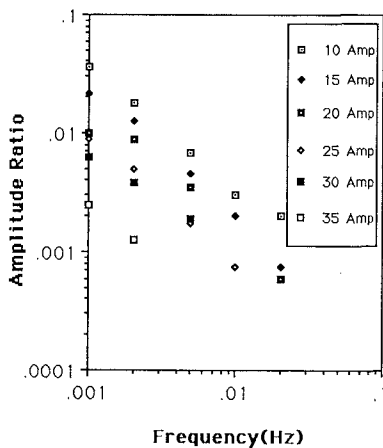


図-4 振幅比と周波数との関係

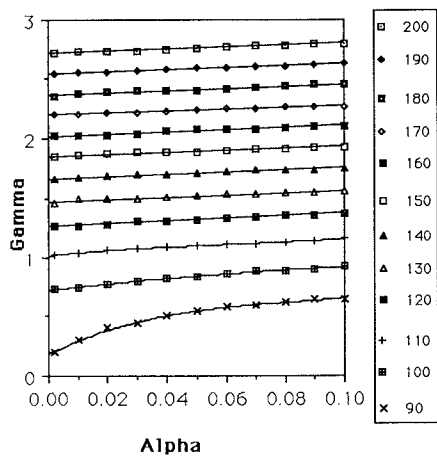


図-3 位相差と α 、 γ との関係

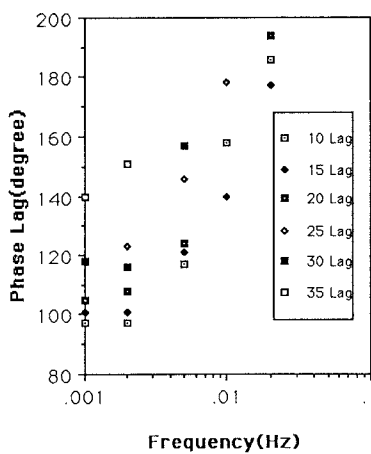


図-5 位相差と周波数との関係

また、振幅比よりは位相差の方が封圧の影響を強く受けることも確認されているので、測定に際しては位相差の測定精度を向上させることも必要である。

つづいて、実測した振幅比と位相差から求められた透水係数と水頭拡散率の結果について調べてみる。図-6、7は透水係数と水頭拡散率に及ぼす封圧の影響を示している。両者とも、封圧の増加にともない対数の傾きで減少していることが認められる。透水係数の値は、トランジェントパルス試験で得られた値とほぼ一致する。水頭拡散率の値を直接測定する手法が無かったので、直接比較はできないが、透水係数から求めた値とほぼ一致した。

3. 議論

Oscillation試験では、透水係数と水頭拡散率の2つの値を同時に求められることが示された。供試体内の連結した間隙、すなわち有効間隙率は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{1}{\beta - \beta_s} \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{k}{D} \right) + \beta_s - \beta_r \right\} \quad (5)$$

ここで、各記号は以下の意味とディメンジョンをもつ。

β : 流体の圧縮率 (1/MPa)

β_r : 完全飽和状態の岩石全体の圧縮率(1/MPa)

β_s : 岩石供試体の実質部分の圧縮率(1/MPa)

μ : 流体の動粘性係数(Pa·sec)

ϕ : 供試体内の連結している部分の間隙率

具体的に計算する場合に問題となるのは、 β_r や β_s の評価である。これらのデータは一般的ではないので、参照できるハンドブックやデータベースは存在していない。したがって、計算の際には適当な値を代入していることがほとんどである。著者は、従来より白浜砂岩を用いた強度・変形試験、弾性波速度試験、水注入しながら変形や弾性波速度を測定した試験、透水試験等を実施しており、これらの実験データから以下の値を用いることとした。特に、 β_s は150MPaの静水圧を負荷した試験から求めたものである。

$$\beta_r = 15.0 \times 10^{-5} (1/\text{MPa})$$

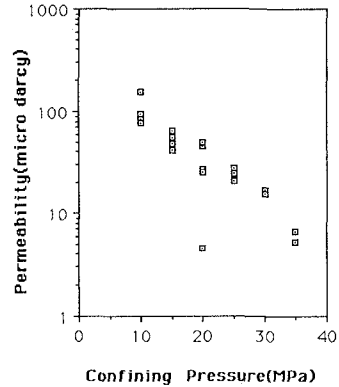


図-6 透水係数に及ぼす封圧の影響

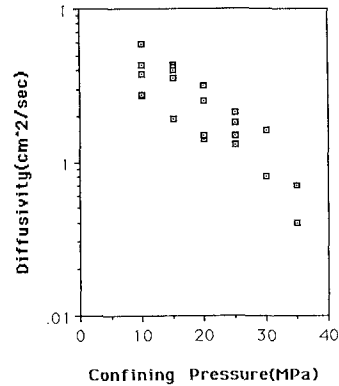


図-7 水頭拡散率に及ぼす封圧の影響

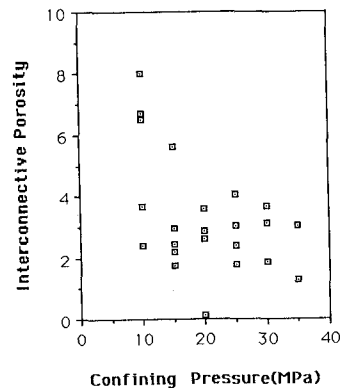


図-8 有効間隙率と封圧との関係

$$\beta_s = 6.87 \times 10^{-5} (\text{1/MPa})$$

$$\mu = 1.42 \times 10^{-9} (\text{MPa} \cdot \text{s})$$

これらの値を用いて (5) 式を書き直すと、

$$\phi = 0.02 \times (k/D) - 0.231$$

となる。白浜砂岩のインタクトな状態における間隙率は13%程度なので、封圧による圧密の効果などを考慮すると、今回の実験で得られる有効間隙率の値は数%程度と予想される。図-8は今回の実験で得られた" ϕ "を示したものであるが、封圧の増加にともない有効間隙率が減少する定性的な傾向は合っているものの、絶対値は予想される値から2オーダー程大きなものとなっている。マトリックス部分の圧縮率 β_s や流体で満たされた場合の岩石全体の圧縮率 β_r を1オーダー変えても、得られる有効間隙率の値は予想される値と大きく異なる。以上の結果から、透水係数や水頭拡散率から有効間隙率を求める方法は、今回の実験の範囲内では有効と判断できない。

4. まとめ

間隙水圧を正弦波状に供試体に与え、得られる振幅比と位相差から透水係数と水頭拡散率を求めるOscillation試験を実施した。得られた値はTransient Pulse試験で得られた値とほぼ一致する。しかしながら、透水係数や水頭拡散率を用いて求める有効間隙率の値はオーダー的に高くなった。現時点では、この手法によって有効間隙率を求めることは不可能である。ただし、実験数も非常に少なく、興味ある手法なので、今後より詳細な実験を繰り返し実施し、検討するつもりである。

【参考文献】

- 1) Brace et al.(1968):Permeability of granite under high pressure, J.Geophys.Res, 73, 2225-2236.
- 2) Olsen et al.1988):Flow pump application in triaxial testing, ASTM STP 977, "Advanced tri-axial testing of soil and rock", Donaghe et al. eds, ASTM, Philadelphia, 68-81.
- 3) 本島ほか(1990):クロスホール透水試験による超低透水性岩盤の基礎的考察、電力中央研究所報告、U90003.
- 4) 神藤・鷺沢(1987):サイン曲線的に圧力変化させた透水試験の適用性について(その1)、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、136-140.