

1. まえがき

岩盤内の地下水流れは非常に複雑であるが、基本的には岩盤の透水性と動水勾配によって決定される。このうち動水勾配は、個々の地質環境とその移動経路(流れの場)によって決まるので、地質条件を明らかにすることが大切である。一方、岩盤の透水性は、岩石の性質と割れ目性状とに関係するが、一般に岩石に比べて割れ目の透水係数の方が数オーダー大きいので、水みちとしての割れ目の透水性評価が重要である。最近、この割れ目を評価するための研究が盛んに行われているが、割れ目の透水性は、割れ目の多くの性状に関係するので、割れ目幅等から想定される透水性と原位置透水試験から得られる透水性では、数オーダー異なる場合が多い。したがって、割れ目をモデル化し、数値解析する場合、岩盤、あるいは割れ目の水理定数をどのように評価していくかが、現在大きな課題となっている。

割れ目を含む岩盤全体の透水性は、原位置透水試験によって評価するのが一般である。原位置試験方法としては、種々の方法があるが、このうち、井戸を利用した原位置透水試験は、試験期間・費用等を考慮して対象地盤の透水性や求めたい水理定数によって選択利用される。たとえば、C.R.Wilson¹⁾(ウィルソン)他は、井戸を利用し透水試験で7日以内に試験が可能という条件で、図-1に示すような透水のための目安を示した。この結果より放射性廃棄物の地層処分等の対象となる低透水性岩盤の原位置透水試験法としては、定水位透水試験とパルス試験法が有効と考えられ、海外では、これらの透水試験技術の改良や新しい試験方法が盛んに研究されている。このうち、特に、割れ目性状や低透水性岩盤の透水性等々評価するためのパルス試験の一種であるサイン曲線による圧力変化透水試験²⁾(以下、サイン試験とする)が注目されている。

サイン試験は、注水・揚水のサイクルによりサインの曲線の圧力変化を圧力源(ボーリング孔内のある点あるいは、ある区間に与え、他のボーリング孔の受振点でその圧力変化の振幅と位相の遅れを測定し、その結果から2孔間の水頭拡散率(K^2)を求めようとするものであり、他の原位置試験に比べて、次のような特徴を持っている。①位相変化と振幅を測定するので、試験開始時間と無関係に連続的に受振点を動かし、発振点と間の水頭拡散率の空間分布を把握できる。②揚水と注水とを周期的に繰り返すような複雑な装置が必要であるが、圧力源での急激な圧力変化が小さいので平衡時間が短くて済む。③測定可能な圧力変動の浸透距離が短かく、理論的には、破碎結晶岩中で100mであるが、泥質岩等では、急激に減衰する。④求まる水理定数が透水量係数と貯留係数とを分離したものではなく、水頭拡散率である。⑤試験周波数を変化させることにより、割れ目の特性や岩石の基質の特性という異なった要素を研究することができる。

本報告では、サイン試験の適用性を検討する目的で実施した開口単一割れ目の室内実験について報告する。

2. 室内透水実験

(1) 実験装置 実験装置は、図-2に示すように、割れ目模型、水を供給する水槽、境界条件を設定するための水槽、および、これらを接続するホースからなる。割れ目模型は、その断面を図-3に示すように2枚の亚克力板(厚さ1.0cm幅5.0cm,長さ200cm)の間に2本のゴムひもを内りて2.0cm

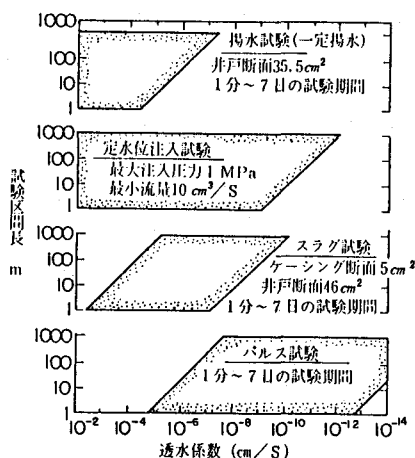


図-1 透水試験選定の目安

の横幅をあけて敷いた後、2枚の亚克力板を所定の割れ目の幅になるまでねじ締めして、亚克力板の間に一樣な幅の単一割れ目を作成する、ここで、割れ目幅は、0.7mm, 1.4mm, および2.5mmの3ケースとした。さらに、この割れ目模型に貯留効果を付加するために、割れ目模型上面の亚克力板に穴をあけ、5本の亚克力パイプを立てた。亚克力パイプの内径は、4.0mm, 7.0mm, および18.0mmの3ケースとした。

(2) 実験方法 実験方法は、図-2に示すように割れ目模型のA端に水圧計①を設置し、割れ目模型の長手方向に78cm離れた測定孔に水圧計②を設置した。B端における境

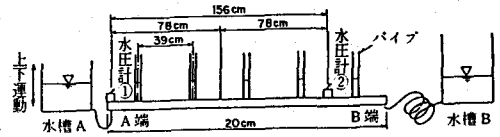


図-2 試験装置模式図

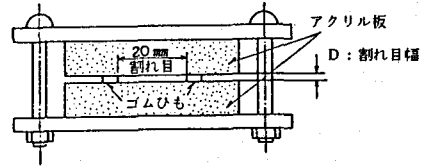


図-3 割れ目模型断面

界条件は、内径4.0mm, 長さ3.2mのシンフレックスチューブを接続し、チューブのもう一方の端を水槽により水頭を一定にして、B端で流量・水頭を自由にした条件である。このような条件の下で、A端にホースを介して接続した水槽を3～60秒の周期で上下運動（振幅2cm）させて、水圧計①、および②で水頭の経時変化を測定した。ここで使用した水圧計は、感度が水頭で0.4mm, 応答周波数が500Hz以上の特性がある高精度半導体ゲージによるものであり、測定は、動ひずみを使用し、ペンレコーダーで記録した。

(3) 実験ケース 実験は、3ケースの割れ目幅と3ケースの亚克力パイプの各々の組み合わせで9ケース実施した。なお、呼び名は、例えば、割れ目幅で0.7mmで、貯留効果としての亚克力パイプの内径7.0mmのケースを小割れ目中パイプのケースと、以後、呼ぶことにする。また、考察対象として用いる水理定数としては、平行板内の理論流れから得られる透水量係数と割れ目の面積に対するパイプの断面積の比で表される貯留係数、および、それらから得られる水頭拡散率を用いて検討を行う。各算定値は、表-1～3に示すとおりである。

3. 解析概要

(1) 帯水層内の波動伝播の理論解 波動伝播の式は、一般に次式で表される。

$$\eta = \eta_0 e^{-\sqrt{\sigma/2\kappa^2}x} \cos(\sigma t - \sqrt{\sigma/2\kappa^2}x) \quad (1)$$

ただし、 η_0 : 振幅（発振側）、 η : 振幅（受振側）

T: 周期, f: 振動数, t: 時間, x: 距離

$\sigma = 2\pi f = 2\pi/T$: 角振動数, k: 透水係数

kD: 透水係数量, S_s : 比貯留量

S: 貯留係数, $\chi^2 = k/S_s = kD/S$: 水頭拡散率

上記の記号を用いて、減衰比 η/η_0 , および位相差 ϕ は、次のように表される。

$$\eta/\eta_0 = e^{-\sqrt{\sigma/2\kappa^2}x} \quad (2), \quad \phi = \sqrt{\sigma/2\kappa^2}x \quad (3)$$

(2) 有限要素法による解析 割れ目浸透流に関する時間依存の方程式は次式で表される。

$$T_{xx} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + Q = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4)$$

ただし、 ϕ : 水頭, T: 透水量係数

Q: 流量, S: 貯留係数

表-1 透水量係数一覧表

項目	割れ目 (幅)	小割れ目 (0.7mm)	中割れ目 (1.4mm)	大割れ目 (2.5mm)
透水量係数 kD (cm^2/s)		2.86×10^0	2.29×10^1	1.30×10^2

表-2 貯留係数一覧表

項目	パイプ (内径)	小パイプ (4.0mm)	中パイプ (7.0mm)	大パイプ (18.0mm)
貯留係数 S		1.62×10^{-3}	4.94×10^{-3}	3.26×10^{-2}

表-3 水頭拡散率一覧表

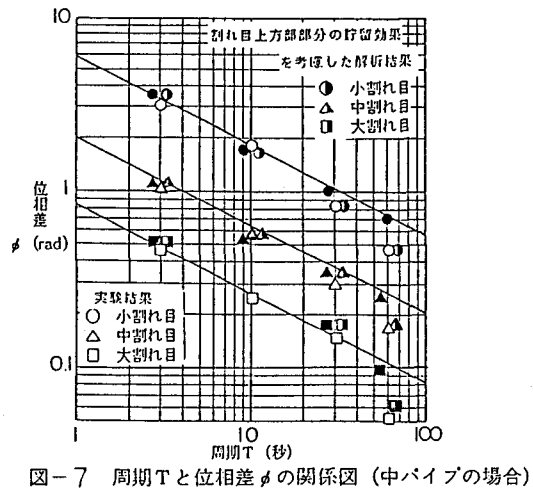
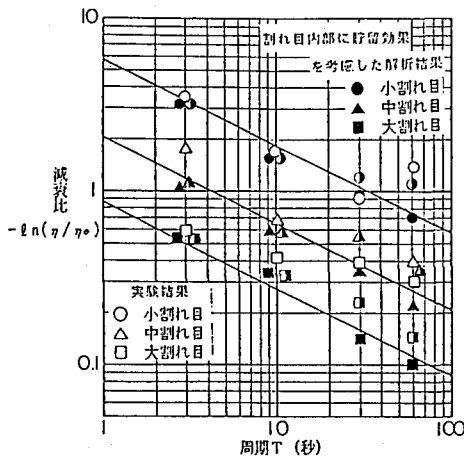
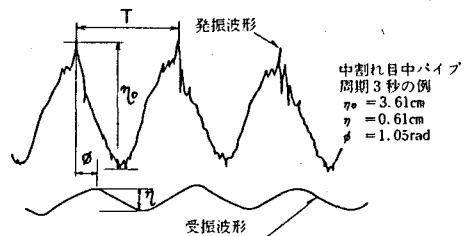
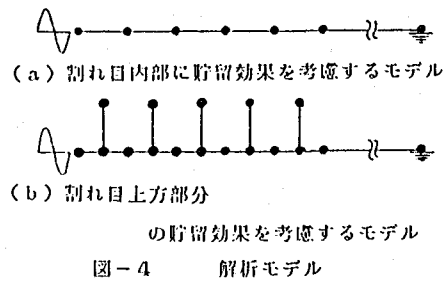
単位 (cm^2/s)

項目	パイプ (内径)	小パイプ (4.0mm)	中パイプ (7.0mm)	大パイプ (18.0mm)
割れ目 (幅)				
小割れ目 (0.7mm)		1.77×10^3	5.78×10^2	8.67×10^1
中割れ目 (1.4mm)		1.41×10^4	4.63×10^3	7.01×10^2
大割れ目 (2.5mm)		8.04×10^4	2.64×10^4	3.99×10^3

(4)式を最小化問題として扱い、時間項の処理は差分法によって行い、有限要素法に割れ目を線要素として定式化する方法とした。解析は理論解と同様に割れ目の上に立てたパイプの貯留係数を割れ目の貯留係数と仮定し、割れ目内部にとる（以下、割れ目内部に貯留効果を考慮すると呼ぶ）モデルと今回の実験のように割れ目の上方部分にパイプを立て、そのパイプに透水係数と貯留係数を与えて貯留効果を考慮する（以下、割れ目の上方部分の貯留効果を考慮すると呼ぶ）モデル（図-4 参照）で、各々、実験と同一の9ケースについて行った。

4. 結果および考察

実験結果は、図-5のように、発振側と受振側の水頭の経時変化として記録されるので、この結果から、発振側と受振側との減衰比 η/η_0 、および、位相差 ϕ を求めた。結果のうち、ここでは一例として中パイプで割れ目を大中小とした場合と小割れ目でパイプを大中小とした場合について周期 T と減衰比 η/η_0 、および、位相差 ϕ との関係を図6～9に示す。なお、図中に示した実績は、帯水層内の波動伝播の理論解であり、●は、割れ目内部に貯留効果を考慮した有限要素解析結果であり、○は、割れ目の上方部分の貯留効果を考慮した有限要素解析結果である。これらの図によれば、理論解と割れ目内部に貯留効果を考慮した有限要素解析とは、非常に良い整合性を示している。また、実験結果と理論解とは、短周期（3～10秒）のとき、ほぼ一致するが、長周期になるに従って、実験結果は理論解からはずれ、減衰比、位相差とも理論解よりも小さくなる。ただし、割れ目幅が大きく、パイプが大きくなるケースほど長い周期でも理論解と実験値が一致してくる傾向が見られる。次に、割れ目の上方部分の貯留効果を考慮した有限要素解析結果は、実験結果と同様に周期が長くなるに従って理論解からずれる傾向を示し、その結果は、試験結果と比較的良好な整合性を示している。



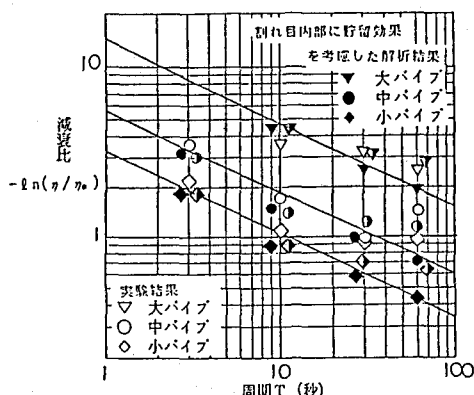


図-8 周期Tと減衰比 η/η_0 の関係図
(小割れ目の場合)

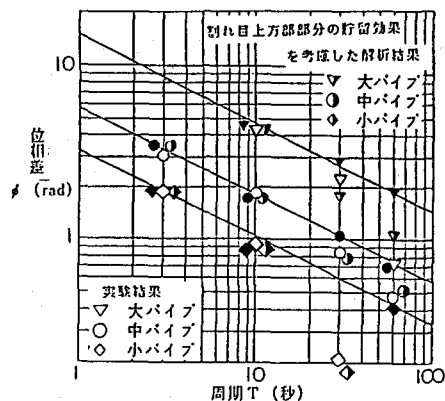


図-9 周期Tと位相差φの関係図
(小割れ目の場合)

以上の結果から、割れ目内部に貯留効果を考慮したもの（理論解、および、割れ目内部に貯留効果を考慮した解析結果）とパイプを立てて割れ目上方に貯留効果を考慮したもの（実験、および、割れ目の上方部分の貯留効果を考慮した解析結果）とは、短周期の場合、ほぼ、同じであるが、長周期の場合、両者では相違してくる。これは、長周期になるに従って、貯留効果をモデル化したパイプの影響が現れてくるためである。このパイプの影響とは、实际的に対象としている単一割れ目に交差するような割れ目や周辺の岩石基質からの水の流入の影響と考えられる。また、二重空隙モデルを用いたサイン試験の理論解析は、放射流れに対してBlack²⁾らによってあたえられており、その結果からも減衰比や位相差は、周期が短い場合、割れ目部分に支配され、周期が長くなるに従って、基質部分を含む全体に支配されることが示されている。このように、周期を変化させることにより、割れ目と割れ目周辺部分とに分離して評価することが可能である。

5. まとめ

今回、実施した単一開口割れ目の模型実験とその解析結果から、以下のことが明らかになった。

- ① 模型実験と解析から、サイン試験の周期と減衰比、位相差の関係が説明できた。
- ② サイン試験は短周期の場合、割れ目の水理定数を評価でき、長周期の場合、割れ目と周辺部分を含めた水理定数を評価できるので、非常に有効な試験である。

なお、サイン試験は、水みちとしての割れ目の方向性や連続性の評価にも有効な方法であるので、今後、ネットワーク状の割れ目モデルを用いて、その有効性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) C.R. Wilson, T.W. Doe, J.C.S. Long, and P.A. Withespon: Permeability characterization of nearly impermeable rock masses for nuclear waste repository siting, how flow, how permeability measurements in largely impermeable rock, Proc. of the NEA/IAEA Workshop, pp.13~27, 1979
- 2) J.H. Black and J.A. Barker: Application of sinusoidal pressure to measurements of Hydraulic parameters, Geological disposal of radioactive waste in situ experiment in granite, Proc. of the NEA Workshop OECD, pp.121~130, 1983

(29) STUDY ON ESTIMATION OF PERMEABILITY IN ROCK MASS (PART1)
— APPLICABILITY OF SINUSOIDAL PRESSURE TEST —

by Ken-ichi KANTO, MAEDA CONSTRUCTION CO., LTD
Eiki WASHIZAWA do.

ABSTRACT

One of the pulse tests, sinusoidal pressure test has been prevailing recently as in-situ test to estimate the permeability in low-permeable rock mass in site where the radioactive wastes are dealt with and so on.

In order to investigate the applicability of sinusoidal pressure tests for the low-permeable rock mass, model tests with single open fissure have carried out in the laboratory. Followings are thus obtain result.

1. Carrying out model tests and numerical analysis on the sinusoidal pressure test, the relation between a period and a dumping ratio or a phase shift have been explained on this test.
2. Since the sinusoidal pressure test, in case of the short period, can estimate the hydraulic constants of fissures, on the contrary in case of the long period, can estimate the hydraulic constants of fissures and around its in rock mass, it may well be one of most effective in-situ test for low-permeable rock mass.