

岩盤不連続面に対する低動水勾配状態での流れ

Experimental Studies of the permeability under the condition of low hydraulic gradient

齋藤竜平*¹・大西有三*²・大津宏康*³・西山哲*⁴・矢野隆夫*⁵・千葉周平*⁶

Ryohei SAITO, Yuzo OHNISHI, Hiroyasu OHTU, Satoshi NISHIYAMA, Takao YANO, Syuhei CHIBA

In this research, falling permeability test was performed using the specimen, on which some natural joint exists. The permeability under the condition of low hydraulic gradient was discussed.

As the results, deviations from Darcy Law, which is seen in the case of clays, have not been seen in this study. Therefore, if the conditions are similar to this study, including aperture, types of joint and roughness, it is considered that in situ, Darcy Law can be employed to evaluate the permeability using the experimental results. However, in the case of that the fracture has an extremely small aperture, or the fracture is in the middle of the different kinds of rocks, more discussion is required.

Key Words: Darcy's Law, low hydraulic gradient, rock single joint, low aperture

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する安全性評価においては、「天然バリア」としての岩盤の力学特性と水理学特性を適切に評価することが重要である。岩盤は岩石基質部と多数の不連続面から構成されるが、一般に岩盤の水理学、力学特性はその不連続面に支配されている。よって、岩盤の水理学、力学特性を把握するためには、岩盤不連続面の水理学、力学特性を把握することが必要であり、重要である。

岩盤不連続面の透水特性は、種々の力学および水理学的パラメーターにより複雑に影響を受ける。力学的パラメーターとしては、鉛直応力、せん断応力等が、水理学的パラメーターとしては、動水勾配が挙げられる。実際に地層処分が検討されている約 300 メートル以深の地下深部では、動水勾配が 4/100 程度と非常に小さくなる場所が多く存在すると報告されているが¹⁾、現在までに数多く行われてきた岩盤不連続面の透水特性に関する研究では、この原位置での動水勾配よりも大きな動水勾配が用いられているものが多い²⁾。そのため、原位置レベルの動水勾配が透水特性に与える影響に対して考察を与える必要がある。

動水勾配と透水特性については、動水勾配が流速に比例するというダルシー則が代表的なものとして知られており、地層処分の安全評価に対する数値解析的研究では、構成則としてダルシー則を用いてモデル化していることが多い³⁾。しかし、動水勾配が非常に小さい領域においては、主に未固結の粘土やシルト等を流れる流体は、非ダルシー的挙動を示すという室内・原位置実験結果が報告されている^{4), 5)}。その主な原因として、土粒子近傍の水が通常より強い吸着力の支配下におかれ、粘性だけに支配されるニュートン流体としてよりビンガム流体的な挙動を示すことなどが挙げられている^{6), 7)}。以上より、低動水勾配下では、岩盤不連続面間の流れに対してダルシー則を用いて良いのかどうか疑問が残る上に、岩石そのものや岩石の不連続面に対する、低動水勾配領域における非ダルシー的挙動の検討については、報告例が少ないのが現状である。

*¹ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

*² 工博 京都大学大学院教授 工学研究科都市環境工学専攻

*³ 工博 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻

*⁴ 博士 (工学) 京都大学大学院助手 工学研究科都市環境工学専攻

*⁵ 博士 (工学) 京都大学大学院技官 工学研究科都市環境工学専攻

*⁶ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

そこで本研究では、原位置レベルの低動水勾配が透水特性に与える影響に対して考察を与えることを目的とし、実際の地層処分の原位置となる地下深部、特にその地層処分のための地下構造物から離れた Far Field と呼ばれる範囲について想定される程度の、低動水勾配低下での変水位試験法による岩盤亀裂透水試験装置の開発を行うとともに、天然亀裂の表面形状をモルタルで複製した供試体を用い、垂直応力を載荷した状態での透水試験を行う。

2. 実験装置および実験条件

(1) 実験装置

本実験を行った試験装置は、一面せん断試験方式であり垂直応力の他にせん断応力も載荷することができる。本実験では、垂直応力のみを載荷して透水試験を行う。本実験で計測を行った項目は、1) 垂直変位、2) 垂直応力、3) 供試体上下流端での圧力差、4) 下流タンクでの透水流量である。この装置は、フィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムで、パソコンによる信号により載荷がコントロールされる。本実験では、計測項目のうち、2) 垂直応力を制御して、垂直応力一定の条件下で、それぞれのせん断変位に対して計測をおこなった。荷重の検出は歪ゲージ型圧縮・引張両用ロードセルで行い、また変位の検出は図-2に示すように、歪ゲージ型変位計を用いて行う。試験機の詳細については、文献⁸⁾に譲る。

透水流量が極端に少ない場合、定水位試験では、下流タンクの越流部での表面張力の影響により流量計測が困難になってしまうため、本実験では上・下流タンクの水頭差が変化し、連続的に動水勾配を評価することのできる変水位透水試験を採用した。透水流量の計測に関しては下流の二重管ビューレットの内管と外管の水位の差を図-1で示すような差圧計を利用した流量計により計測する。また、本実験では、上流のタンクと下流の二重管ビューレットの内管との水等差を計測しているが、流速に応じた摩擦などの損失水頭が発生するため、供試体の上・下流端での水頭差は、上・下端で与えた一定の水頭差が保たれているとは限らない。よって供試体の上・下流端での圧力差の計測を行った。なお本実験では流体として蒸留水を用いているが、一般に、流体はその温度によって粘性を異にするため、試験中は、水温を 20℃ に管理した。

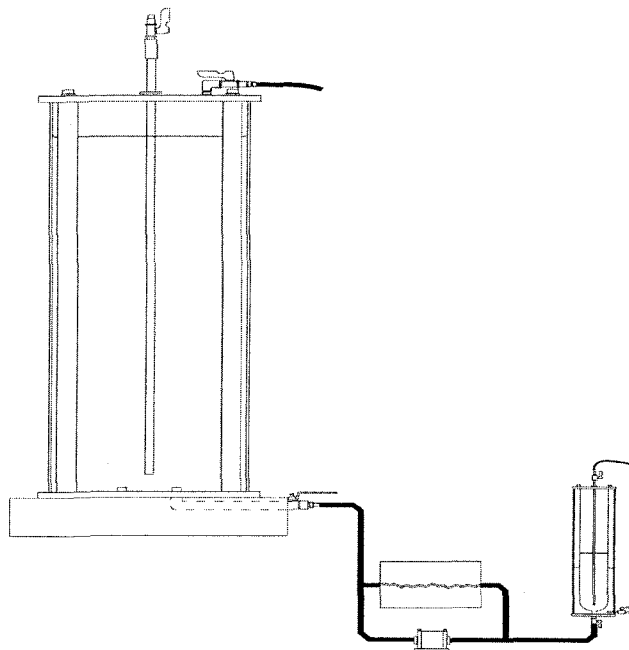


図-1 透水試験装置

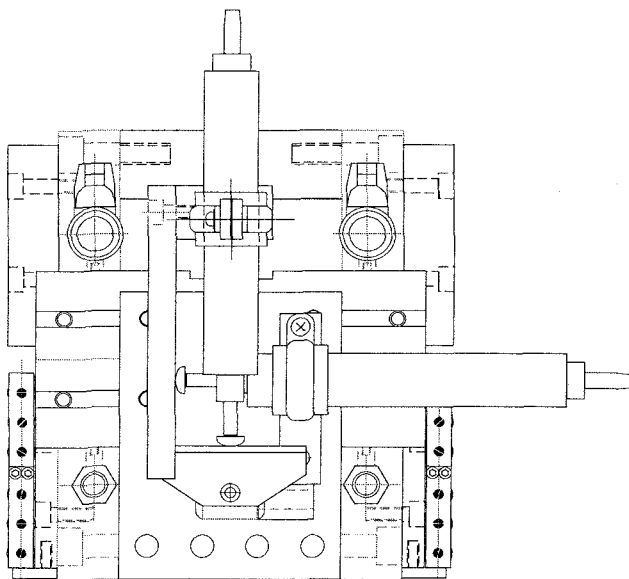


図-2 歪ゲージ型変位計の設置

(2) 供試体

本実験では、実在の岩盤不連続面をかたどった型にセメントモルタル（配合比、セメント：ケイ砂6号：蒸留水＝1：2：0.65）を流し込むことにより、底面から60mmの位置に単一不連続面を有する、長さ80mm×幅120mm×高さ120mmの直方体型の供試体を作成した。この不連続面のラフネスを示すJRC値は20.0である。不連続面表面の鳥瞰図を図-3に示す。また、定水位試験と変水位試験の結果を比較するために、長さ80mm×幅120mm×高さ120mmの直方体型の亚克力に、直径0.5mmの管路（断面積0.196mm²）を開けたものを用いて、透水試験（以下、パイプ試験と呼ぶ）を実施した。供試体の詳しい作成方法に関しては文献⁸⁾に譲る。

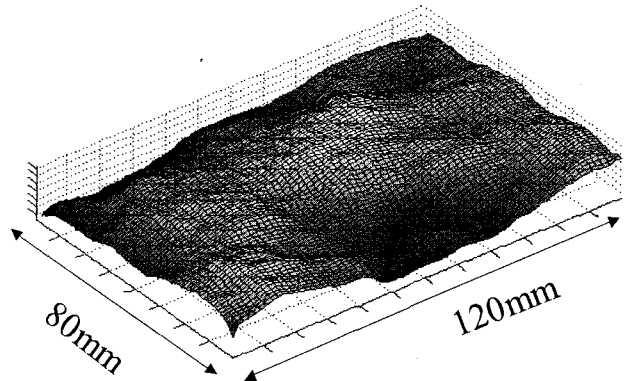


図-3 供試体鳥瞰図 JRC 値 20.0

(3) 実験方法・実験条件

まず始めに、開発した変水位試験器により求まる透水特性の妥当性を確かめるために、上記の管路を有する供試体を用いて定水位、変水位の両試験を行った。

次に、不連続面をもった供試体について、供試体のかみ合わせを良くすることと、力学的開口幅に対する初期開口幅の算出を目的として、0.25MPa から 4.0MPa までの垂直応力を 0.1MPa/min で載荷、除荷を 3 回繰り返した。その後、垂直応力を 0.1Mpa, 1.0Mpa, 20MPa の 3 種類に変化させて、それぞれについて動水勾配が 10 から 1/100 程度の範囲で変水位透水試験を行った。ここでの 3 種の垂直応力はそれぞれ、地下深部 4m, 400m, 800m 程度に相当する。

3. 実験結果と考察

変水位試験において、透水係数 k 、および透水量係数 T は次式で与えられる。

$$k = -\frac{d}{A} \left(\frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \right) \frac{\Delta \ln(h)}{\Delta t} \quad (1)$$

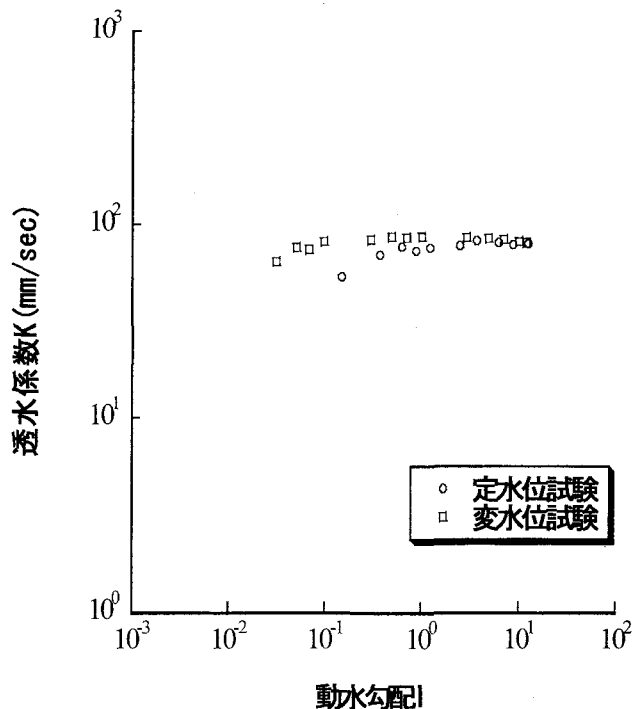


図-4 定水位試験法と変水位試験法の比較

$$T = -\frac{d}{w} \left(\frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \right) \frac{\Delta \ln(h)}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 d は透水方向の供試体長さ、 A は透水方向の断面積、 w は透水方向に垂直な方向の供試体長さ、 a_1, a_2 はそれぞれ上流タンクの断面積、および下流ビューレットの断面積である。また、 h は上流タンクと下流ビューレットの水頭差、 t は時間である。式(1)(2)における $\Delta \ln(h)/\Delta t$ は、以下のように求めた。まず、最小二乗法を用いて水頭差 h を計測時間 t の関数として $h(t)$ とし、式(3)に示すように極限值として算出する。

$$\frac{\Delta \ln h(t)}{\Delta t} = \lim_{t_2 - t_1} \frac{\ln h(t_2) - \ln h(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\partial \ln h(t)}{\partial t} = \frac{h'(t)}{h(t)} \quad (3)$$

直径 0.5mm のパイプを用いて行った定水位、変水位試験からそれぞれ求めた透水係数 k と動水勾配 I の関係を図-4 に示す。両試験から求められた透水係数は近い値をとり、今回開発した変水位で計測する透水係数は十分に信頼できるものと考えられる。

次に、不連続面を持つ供試体の透水試験について論じる。本実験では、供試体をせん断機にセットした状態で垂直変位を 0mm と初期化しているため、Barton&Bandis⁹⁾の方法で初期開口幅を求め、力学的開口幅を算出した。図-5 に示すように垂直変位と垂直応力関係を次式の双曲線で近似することにより、最大閉塞量を求め、初期開口幅として 0.0980mm を得た。

$$\delta = \frac{\alpha}{\sigma_v + \beta} + \gamma \quad (4)$$

ここで、 δ は垂直変位、 σ_v は垂直応力、また α, β, γ は近似によって求まる定数である。これにより、本実験での力学的開口幅は、図-5 に示すように垂直応力が 0.1MPa, 1.0MPa, 20MPa の時にそれぞれ 25.5 μ m, 6.8 μ m, 4.8 μ m と算出された。

上記の 3 通りの応力状態に対する動水勾配と透水係数の関係を図-6 に示す。まず、動水勾配に着目すると、高レベル放射性廃棄物の地層処分において想定される動水勾配は 1/10～4/100 程度であるが、図-6 で見られるように、本実験で得られた動水勾配は、10～1/100 の範囲であり、十分原位置での低い動水勾配を実験室で再現できていると言える。

一般に、透水性の評価に用いられる Darcy 則では、動水勾配と流量が比例関係にあり、次式で表される。

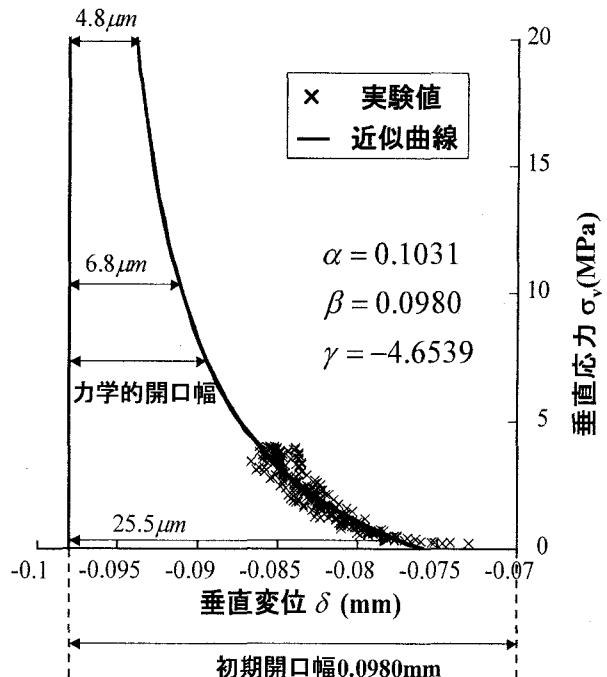


図-5 初期開口幅の算定方法

$$Q=wTI$$

(5)

ただし、 Q は一定時間あたりの透水流量、 w は透水方向に垂直な方向の供試体長さ、 I は動水勾配である。また、 T は式(2)で求まる透水量係数である。Darcy 則が成立するならば、 Q が I に比例するので、 T は I によらず一定値となる。ここで図-6 より、岩盤不連続面の透水量係数は、動水勾配に関係なく一定となっており、今回実験を行った動水勾配と開口幅の範囲においては、粘性土などで観察されているような、非 Darcy 的挙動は観測されなかった。従って、本実験で用いた開口幅、不連続面の種類・ラフネスの条件下では、実験室レベルの動水勾配下で得られた実験結果を、原位置レベルに拡張する際には Darcy 則を用いて透水性を評価できることがわかる。

しかし、本実験で用いた供試体の力学的開口幅は、かみ合わせ試験の結果より、垂直応力が 0.1MPa、10MPa、20MPa の時にそれぞれ $25.5\mu\text{m}$ 、 $6.8\mu\text{m}$ 、 $4.8\mu\text{m}$ である。一方、粘性土において非 Darcy 的な挙動が観察されている孔径は $10\text{nm}\sim 1\text{nm}$ 程度と報告されており⁴⁾、この二つのスケールの間には依然として 3 オーダー以上の差が存在する。本実験で観察したような開口幅のスケールでは、非 Darcy 的な挙動は観測されなかったものの、さらに開口幅が小さい亀裂に対しては、必ずしも Darcy 則が成立するとは言い切れない。

地層処分の対象となる地下深部における岩盤亀裂は、本研究で使用した供試体の亀裂に比べ、良いかみ合わせ状態を有していると推測される。また、天然の岩盤亀裂は無数のマイクロクラックを有しており、開口幅が数 nm になるような亀裂が無数に存在すると考えられる。それらの、開口幅の非常に小さな亀裂内の流れに関しては、更なる検討が必要である。さらに、非 Darcy 的な挙動を示す原因の一つであるとされる不連続面の表面から流体が受ける吸着力についても、不連続面を構成する岩石の種類やその表面形状により変化すると考えられ、その影響も考慮しなくてはならないと推察される。

4. まとめ

本研究では、天然の不連続面表面凹凸形状をモルタルで複製した供試体を対象に、変水位透水試験を行い、低動水勾配下条件での透水特性に対する検討を行った。

その結果今回実験を行った動水勾配と開口幅の範囲においては、粘性土などで観察されているような、非 Darcy 的挙動は観測されなかった。従って、本実験で用いた開口幅、不連続面の種類・ラフネスの条件下では、実験室レベルの動水勾配を用いて得られた実験結果を、原位置レベルに拡張する際に、Darcy 則を用いて透水性を評価することができると推察される。しかし、開口幅が非常に小さな亀裂内の流れや、また、異なる種類の岩石が有する不連続面間の流れに関しては、更なる検討が必要である。

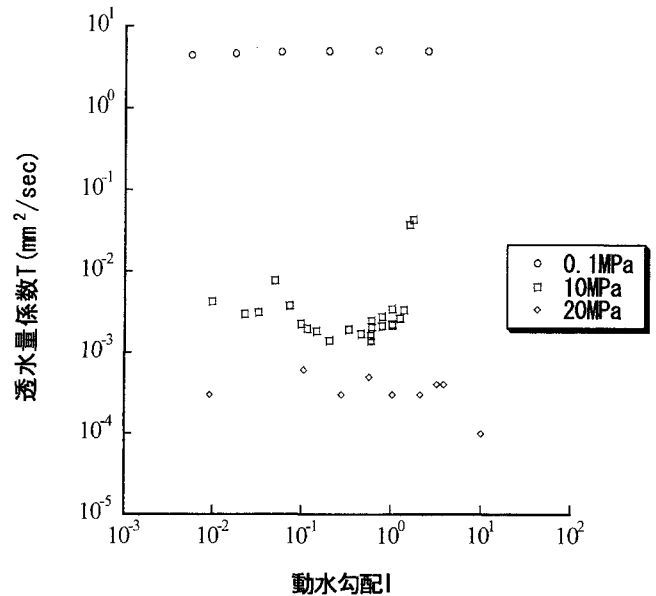


図-6 動水勾配と透水量係数の関係

5. 参考文献

- 1)核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発， p.p.2-1-2-5, 2002
- 2)例えば，核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発， p.p.5-14-5-16, 2002
- 3) 大西有三， 大津宏康， 西山哲， 小山倫史：マニフォールド法による浸透の影響を考慮した不連続面岩盤の応力・変形解析， 第 36 回地盤工学研究発表会講演概要集， pp.583-584,2001.
- 4) 佐々木泰， 渡辺邦夫， 林為人， 細谷真一：新第三紀堆積岩に対する低動水勾配状態での非ダルシー流れについて
- 5) Olsen,H.W.(1965):Deviations from Darcy's Law in Saturated Clays ,Soil Science Society of America ,pp.135-140
- 6) Martin,R.T.(1962):Absorbed water on clay , Clays and Clay Minerals 9 ,28-70
- 7) Low,P.F.(1976):Viscosity of interlayer water in montmorillonite,Soil Science of America.Proc.,40,pp500-505
- 8) 大西有三， 大津宏康， 西山哲， 矢野隆夫， 高木克美：不連続面一面せん断時の透水特性に関する研究， 土木学会代 57 回年次学術講演概要集 pp.917-918,2002.
- 9) N.R.Barton,S.C.Bandis,K.Bakhtar:Strength,deformation and conductivity coupling of rock joint ,Int.J Rock Mesh.Soil&Geomech.Abstr.,Vol.22mNo.3,pp.121-140,1985.