

軟岩の透水性に関する実験的考察

藤村 尚・木山 英郎・岩成 敬介・勝見 雅

(1977年5月31日受理)

An Experimental Study on Permeability of Soft Rock

by

Hisashi FUJIMURA, Hideo KIYAMA, Keisuke IWANARI, Tadashi KATSUMI

(Received May 31, 1977)

Some kinds of indoor measurements of permeability for soft rocks in Ningyo-tōge Uranium Mine were performed in order to clarify influences of soil structure on permeability of compacted soils. The results were compared with those obtained previously by indoor permeability tests on the compacted Masa and general soils.

From the experimental results, the conclusions are obtained as follows.

- 1) The permeability values obtained for the weatherring granite are greatly influenced by void ratio, but hardly effected by soil structure in comparison with the case of Masa.
- 2) The permeability values for the unhardened conglomerate are influenced greatly by void ratio and a little by soil structure, while the effects of the latter are less than in the case of usual compacted soils.
- 3) The permeability values for the mudstone indicate it is unpermeable.
- 4) Infiltration method is more suitable for finer materials in determination of the permeability rather than for sand.
- 5) Formulas for permeability of materials containing under grading soil of 2000 μ mesh can be expressed by Eq.(1).

1. はじめに

わが国の産業経済と国民生活の健全な発展を支えてゆくためのエネルギー、とくに電力需要は年々増大の一途をたどっている。この増大する電力をまかなうものとして、水力や火力と並んで原子力発電が登場している。周知のようにこの原子力の原料はウラン鉱石である。わが国ではこの鉱石の産する箇所は数少ないが、ウラン鉱石の産出する場所の1つに岡山県人形峠が掲げられる。著者らは、昭和51年に動力炉核燃料開発事業団人形峠鉱業所の依頼によって峠坑内におけるウラン鉱石を主として、その上部層および基盤の透水性を調査する機会を得た。坑内の各地盤は一部を除いてそのほとんどがいわゆる

軟岩に属するものである。現在、この軟岩に対して土木工学、土質工学および地質学のどの分野においても明確な定義はなされていない。一般に軟岩とは土と岩石の中間的な性質をもち、土よりも堅く岩石よりも柔らかい岩であるというように感覚的、現場的な用語である。このような種類に属する地盤は岩が風化・変質して土になる過程と土が岩になる過程とに存在する。調査対象とした地盤は両過程からなる軟岩である。軟岩の物性に関する研究は多岐にわたるが、そのうち透水性に関しては注水試験の一種で比較的簡単に行えるルジオンテストが軟岩地盤においてもよく用いられる。しかし、軟岩の場合 $P-Q$ 曲線（注入圧—注入量）は直線とならず低圧でわ

ん曲するが、直線でも限界圧力以上で注入すると地盤が容易に浮き上がり P が減少すると報告¹⁾ されている。したがって軟岩では低圧の試験しかできず、換算ルジオン値は実際のそれより小さく、圧力段階により注入量が大幅に異なる。それゆえ、軟岩に適した透水性の表現方法や基準などの確立が望まれている。

本文では軟岩の透水性を研究するにあたって、現場透水試験を実施する前段階として室内透水試験を行ったので、それらの結果について述べる。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

実験に供した試料は岡山県苫田郡斎原村の高清水高原（動力炉核燃料開発事業団、人形峠鉱業所内第2号坑）の泥岩とその下部に存する人形峠層レキ岩および最下部にある人形峠花崗岩の3種類である。

この地域は中国地方に広く分布している花崗岩類が基盤をなし、一部に古生層古期変質火山噴出岩類がみられる。これらの基盤の上に第三紀中新世末～鮮新世の内陸盆地堆積物があり三朝層郡とよばれている。基盤直上に厚さ1～3m（最大7m）のレキ岩層があり、さらにその上部に泥岩、砂岩がある。花崗岩はかなり風化が進みその内部にはキ裂が入っているものもあり、手で簡単に砕けるものである。

組成鉱物は高島²⁾によると石英および長石を主としている。軟岩の物理的性質および粒度分布は表-1と図-1に示すとおりである。なお図-1(b)における花崗岩の2mm以上の試料に対する粒度試験は JIS・A・1201の方法によって求めたものであり、一方図-1(a)におけるレキ岩の2mm以上の試料に対する粒度試験は、30箇所採取試料をそれぞれウォッシャー（コンクリートミキサーを代用）に数回に分けて入れ（1回の給鉱量約300kg、パルプ濃度約70%）5分間洗鉱した後200mm、100

mm、50mm、25mm、10mmおよび2.38mmで給水しながらふるい分けを行って得られた結果である。自然状態の粒度分布は同図に描いた○印の2つの粒径加積曲線間に存在する。また、現場地盤において約50×50×50cm³の大きさに掘削した穴から求めたレキ岩の乾燥密度は1.96g/cm³、間げき比は約0.35であった。したがって、室内実験に供した乱されない試料は現場のそれと同じものであることを示している。

2.2 実験装置

透水試験装置は Michell によって開発された試験機と同種のものおよび JIS・A・1218 の変水位透水試験機である。前者の試験機の詳細については前報³⁾ に記述した。浸透試験装置についても前報⁴⁾ に詳しく述べたので省略する。なお、今回の土槽は前回のものと大きさが異なり内径15cm、高さ17cmの鉄製モールドである。

2.3 供試体の作製

実験に供した試料は大別して花崗岩では乱さない状態のものとして乱した状態のもの、レキ岩では乱した状態のものをを用いた。

乱さない状態にある塊状の試料は水分変化を生じないように注意深くナイフ等で削り、内径100mm、高さ100mmの変水位透水試験機用モールドと内径33mm、高さ70mmの透水試験機用モールドに入るように円柱形に成形した。成形後、ただちに供試体の重量、直径および高さを測定し、透水モールドに入れそのまわりに上質のパラフィンを流し込んで充填する。

一方、乱した状態にある試料は空気乾燥させ手でほぐし2mmふるいであるい分けを行いその通過分を試料とした。締固めはこの試料に蒸留水を加え表-2に示した条件になるように行った。締固め方法は透水試験機用モールドに重量を測定した試料を入れ、アクリル板を介して静的な圧力を試料に加えていくものである。なお、同表の締固め含水比は、図-2の JIS・A・1210 によって求めた締固め曲線の結果を参考にして、最適含水比の乾燥側と湿潤側ならびに最適含水比になるように決定したものである。

浸透試験の供試体は乱さない状態の泥岩と図-1に示した乱した状態のレキ岩および花崗岩を用い、締固めは地盤の間げき比が0.5～1.0になるように試料を3層に分けて前述の土槽に自由落下させ、重量2.48kgのランマーを用い均一地盤になるように十分な注意をはらって行った。

Table. 1 Physical properties of soft rock

Kind of rock	Specific gravity	Natural water content (%)	Dry density (g/cm ³)	Void ratio
Mudstone	2.58	22.03	1.53	0.60～0.70
Conglomerate	2.69	13.85	1.94	0.35～0.60
Granite	2.66	10.63	1.92	0.35～0.55

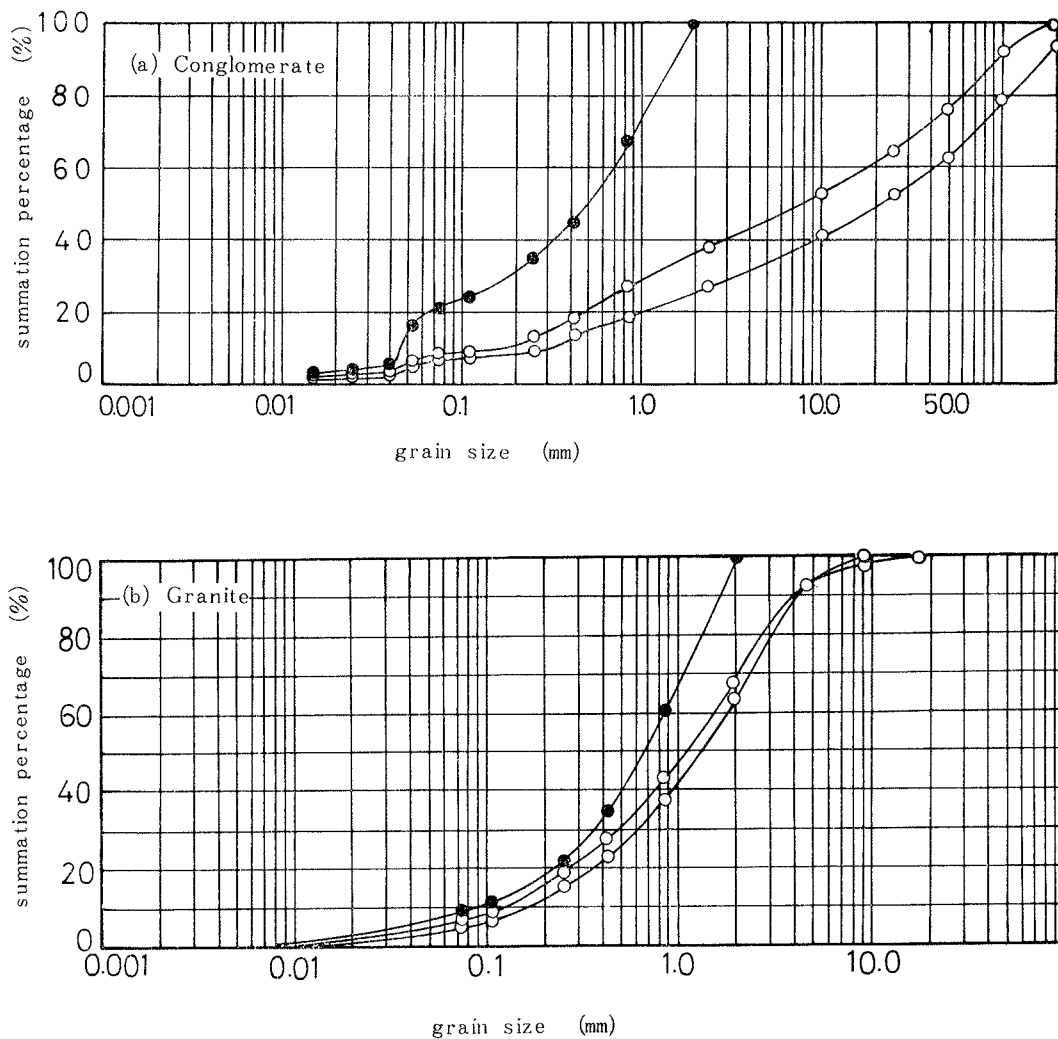


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 2. The sample properties of soft rock

Kind of rock	Molding water content w_o (%)	Void ratio e
Conglomerate	10, 20, 30	0.5, 0.6, 0.7, 0.8
Granite	10, 30	0.5, 0.6, 0.7, 0.8

3. 実験結果およびその考察

3.1 室内透水試験

土の透水の基本法則はダルシーが1856年に提唱して以来、多くの研究者によって裏付けられてきた。ダルシーの法則は層流が存在する限り、空けきの多い飽和土に対して適用される。ここで、土は均等質で等方性であると仮定されている。透水性は土の種類、土粒子の大きさ、土粒子の形、締りの度合、飽和度ならびに水の温度に依存している。

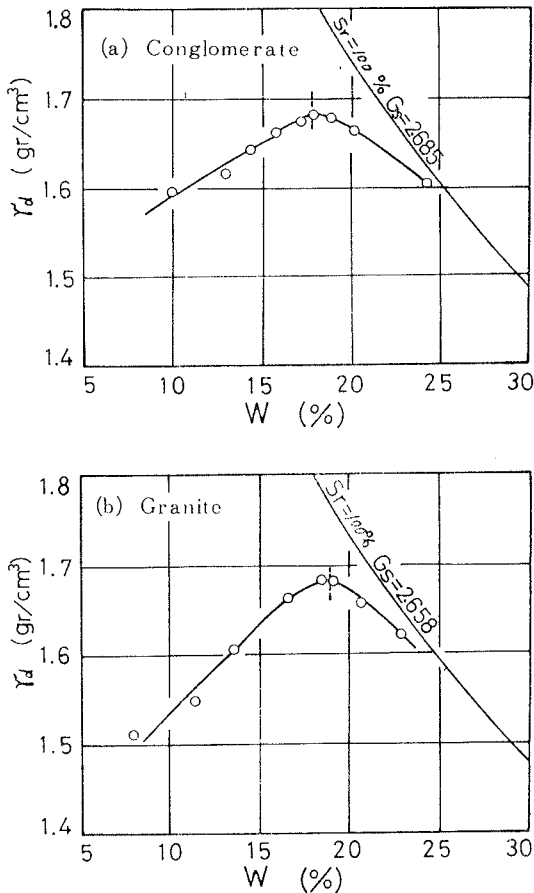


Fig. 2 Water content-dry density relationship

一方、不飽和土の場合透水を実験で求めるには間げき中の空気の存在によって非常に複雑になる。これに関連して多くの研究者は締め固めた粘土による透水試験を行い、土の構造が締め固めた粘土の透水に最も影響を及ぼすものであることを確かめている。この論文では上記の透水性に関する基本的概念を踏まえ、人形峠に産する3種類の岩を対象に乱さない試料と締め固めた試料の透水ならびに浸透試験結果について記述する。

花崗岩の透水性：一般に花崗岩質岩石の風化は長時間の間に地表から地下深部へ徐々に進んでいる。風化の状態はツルハシで掘削可能なものから表層の軟弱なマサ土にいたるまで連続的に変化している。実験に用いた試料は指圧によって容易に粉碎できるものと、それよりも少し堅めのナイフ等で容易に削ることができるものであ

た。肉眼的観察によると長石は粉状に粘土化し、黒雲母は緑褐色から茶褐色に変化しているものなどが多くみられる。しかし組織そのものは母岩の状態をとどめている。したがって風化した花崗岩の透水性は鉱物粒子の細粒化、間げき比の増大および単位重量の減少等の影響を受けて未風化花崗岩の透水性と著しく異なるものと思われる。

乱さない試料の透水係数 k は変水位透水試験結果によれば 2.4×10^{-4} と 2.2×10^{-4} (cm/sec), もう1つの透水試験では 1.07, 1.17, 1.54, 1.89 および 2.73×10^{-4} (cm/sec) の値が得られている。実験資料は少ないが、以上の両透水試験結果から乱さない試料の透水係数は約 $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ (cm/sec) の範囲にあると推定される。なお、両試験に用いた乱さない供試体の作製が非常にむずかしく、完全な円柱形に成形することができなかったため十分な精度で供試体の寸法および重量の測定はできなかった。したがって、個々の供試体条件は実験に用いた供試体とは別の土塊から求めた表-1の値を採用することにする。

風化の進んだ花崗岩については乱さない供試体が数多く得られなかったため、表-2に示した条件のもとで供試体を作製した。実験結果は表-3ならびに図-3, 4, 5および6に示すとおりである。図-3は間げき比

Table 3. Test results

No.	w_0 (%)	e	γ_d (gr/cm ³)	k (cm/sec)
G				
111	8.0	0.500	1.773	9.15×10^{-5}
112	8.0	0.490	1.784	1.05×10^{-4}
121	8.0	0.605	1.660	3.13×10^{-4}
122	8.0	0.605	1.660	2.84×10^{-4}
131	8.0	0.700	1.563	6.08×10^{-4}
132	8.0	0.753	1.516	7.38×10^{-4}
141	8.0	0.795	1.481	1.01×10^{-3}
142	8.0	0.823	1.458	2.23×10^{-3}
311	29.0	0.504	1.767	7.96×10^{-5}
312	29.0	0.512	1.757	8.49×10^{-5}
321	29.0	0.601	1.660	1.18×10^{-4}
322	29.0	0.601	1.660	1.20×10^{-4}
331	29.0	0.702	1.562	3.43×10^{-4}
341	29.0	0.803	1.474	6.97×10^{-4}
342	29.0	0.803	1.474	8.80×10^{-4}

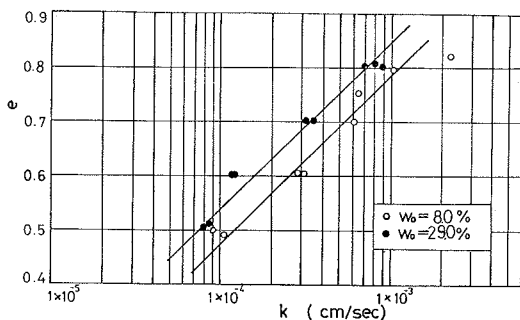


Fig. 3 Permeability on constant head permeability test (Granite)

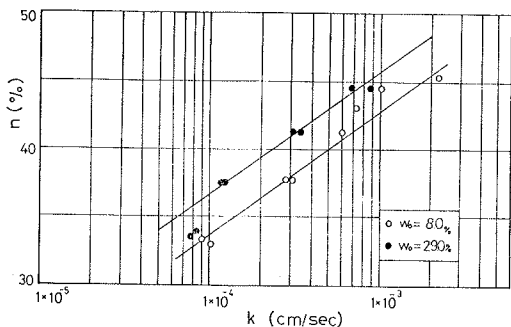


Fig. 4 Permeability on constant head permeability test (Granite)

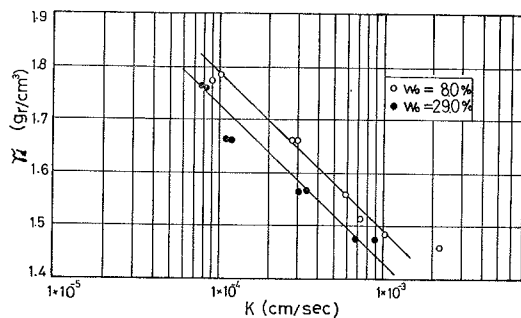


Fig. 5 Permeability on constant head permeability test (Granite)

e と透水係数 k の関係を示したもので、当然のことながら透水係数は間げきによって大いに影響を受け間げき比の増大につれて k は大きくなる。このことは透水係数と間げき率との関係を示した図-4をはじめ、ここでは図面を省略したが透水係数と e^2 および $e^3 / 1 + e$ の関係においても直線関係がみられる。また、図-5は透

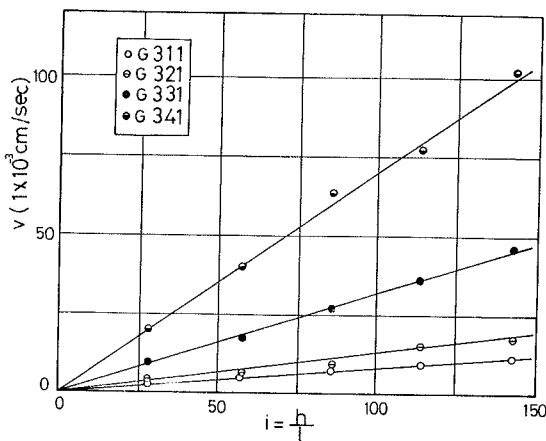


Fig. 6 Permeability on constant head permeability test (Granite, $w_0 = 28.9\%$)

水係数と乾燥密度の関係を示したもので、この図によると透水係数は乾燥密度が減少するにつれて大きくなることわかる。図-6 は間げき比の変化に伴う平均流速 v と動水こう配 i の関係を示している。同図によると間げき比が大きくなれば透水係数も大きい。さらに、 $v-i$ の関係は原点を通る直線でありダルシーの法則にのっていることがわかる。なお、前報に記した始動動水こう配が、かなりの細粒部分を有している当試料においても現われるのではないかと考え、同図を用いて検討したが明確には現われていない。このことに関しては今後低圧の実験を行って検討する必要があると考えている。つぎに、含水比を最適含水比の乾燥側 $w_0 = 10\%$ と湿潤側 $w_0 = 30\%$ で締め固めた供試体の透水係数は同一間げき比に対して乾燥側の方が湿潤側のものよりきわめて大きく現われている。このことは土質工学の分野でいわれている締め固め土の構造の相違によるもので、乾燥側の団粒構造と湿潤側の分散構造によって透水性の違いが説明できる。一般に分散構造は団粒構造に比べて水を通しにくい性質があり、本実験結果でもこれらの影響が現われたものと思われる。ここで、本実験に用いた未風化の花崗岩と前報で示した東浜産マサ土の透水性について比較する。まず、本試料における乾燥側と湿潤側の透水係数の差は東浜・マサ土に比べて小さい。さらに、透水性に直接関与していると考えられる有効径³⁾について検討すると、当試料の有効径は東浜・マサ土のものより大きい傾向がみられる。また、乾燥、湿潤側で締め固めた当試料の有効径はほとんど等しい。

以上のように間げき比の変化と土の構造を考慮した締め固め土を用いて透水試験を実施した結果を要約するとつぎのようである。風化花崗岩の透水性は間げき比によって大いに影響を受けるが、土の構造が透水係数に及ぼす影響はあまりみられない。なお、本報告では飽和度の問題、風化花崗岩の特性の1つである粒子の破碎および締め固めエネルギー等について触れなかったが、これらの事象は透水性を論じる場合には重要な要素であり改めて検討したいと考えている。

レキ岩の透水性：一般にレキ岩は既存の岩石の角りょうを失ったレキが粘土、砂または石灰質、けい質のこう結物質によって固結された堆積岩の一種である。そのレキの大小・種類、こう結物質の種類・量によっていろいろの性質をもつようになり、単一のレキから成るものもあるが、多くは2種類以上のレキからなる。当実験に用いた試料は角りょうを失った花崗岩質のレキを含み、末結状態のものである。したがってこの地盤から乱さない試料をうることは大変むずかしいことであったので、大きいレキを除く 2000 μ 以下の乱した試料を表-2 に示した所定の含水比に調整して実験に供した。

実験結果は図-7 および 8 に示すとおりである。これらの結果によるとレキ岩の透水係数は花崗岩と同様に、間げき比の増大につれて大きくなる傾向がみられる。なお、レキ岩では締め固めによる土の構造の相違が透水係数に影響を及ぼしている。最適含水比の湿潤側で締め固められた供試体の透水係数は最適含水比および乾燥側で締め固められたものに比べて相当低く現われ、最適含水比および乾燥側の透水係数はほぼ一致していることがわかる。後者の結果については従来締め固め土の透水性に関して述べられている事実と異なっている。この主な原因として試料の特性が考えられるが、今回の実験からそれを

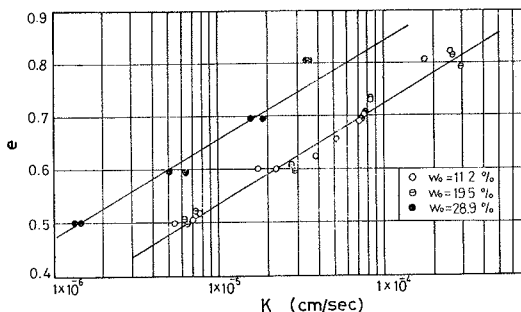


Fig. 7 Permeability on constant head permeability test (Conglomerate)

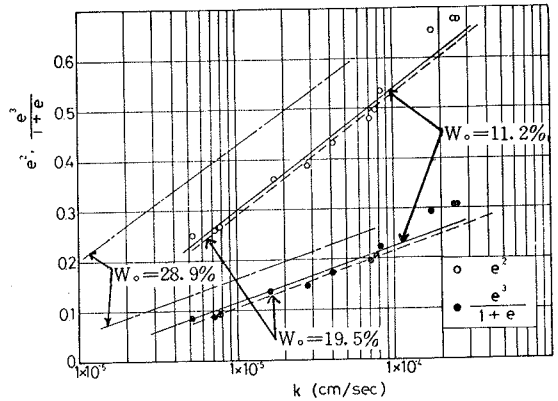


Fig. 8 Permeability on constant head permeability test (Conglomerate)

明らかにすることはできなかった。

3.2 浸透試験⁴⁾

浸透試験に用いた試料は 2000 μ ふるいを通るレキ岩と花崗岩でそれぞれの初期含水比は10.2%である。初期飽和度は約35%，最終飽和度は99~97%である。実験結果は図-9 および10に示すとおりである。同図らはレキ岩の透水係数と間げき比ならびに間げき率との関係を示したもので、透水係数は間げき比に指数比例していることがわかる。これらの関係のうち間げき率で表わした方が、間げき比よりも直線性がみられるようである。当試験で得られた透水係数と 3.1の透水試験結果とを比較すると、透水係数は前者の方が低い。また、前同行った透水性の良い砂の実験ではゆるづめ状態の両試験結果は相当異なったが、レキ岩の実験では比較的ゆるく締め固ら

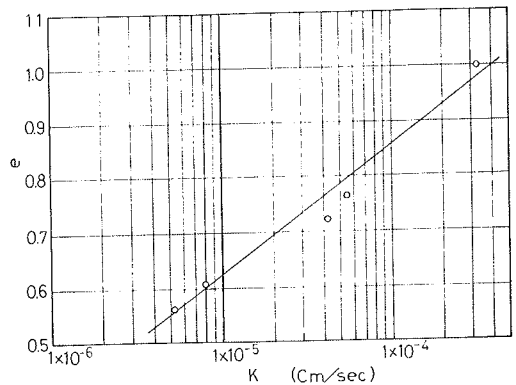


Fig. 9 Permeability on infiltration test (Conglomerate, $w_0=10.2\%$)

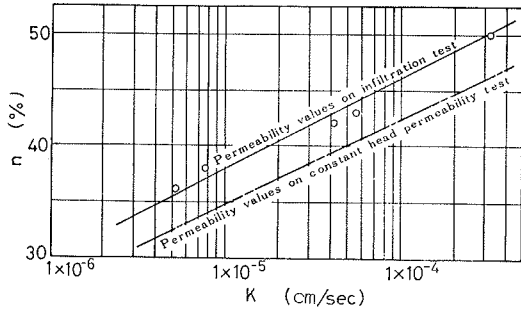


Fig. 10 Permeability on infiltration test (Conglomerate, $w_0=10.2\%$)

れた間げき比の大きい地盤においても両試験の結果は良い対応を示している。さらに、花崗岩の浸透試験結果では他の透水試験結果に比べ約2オーダー大きい透水係数が得られている。これらのことから浸透試験が一様性の高い砂よりもむしろ細粒部分を多く含んだロームや粘土の透水性を調べるのに有効であることがわかる。なお、この種の試験を現地で実施するためにはさらに多くの資料を蓄積するとともに、透水性に影響を及ぼす土の粒度や初期含水比等の要素の他、cavity、空気の間塞・圧縮および水との置換、water jumpの問題などを究明することが必要となる。しかし、今回の実験を行って現地地盤の現場透水試験やインプレスリーチングが可能である見通しを得たといえよう。

泥岩については乱さない試料を用いて浸透試験を行った。その結果、透水係数は約 10^{-8} (cm/sec) のオーダーであったことから、この岩石は難透水性岩石と判定される。なお、この試料の透水性は浸透試験についての結果だけである。

3.3 粗粒材料を含む場合の透水係数

花崗岩およびレキ岩の 2000μ 通過試料を最適含水比の乾燥側で締め固めた供試体に対して間げき比と透水係数との関係を対数を用いて示したものが図-11である。同図から両試料の透水係数を比較するとレキ岩より花崗岩の方が透水性がよい。

ここで、実験に供した試料の透水係数から現場における地盤の透水係数を推定する。図-11における直線のこの配 α を求めると、花崗岩では $\alpha=5.2$ 、レキ岩では $\alpha=7.9$ となる。これより実験を行った間げき比の範囲における試料の透水係数と間げき比との関係を表わす式は

$$k = k_1 \cdot e^\alpha \quad (1)$$

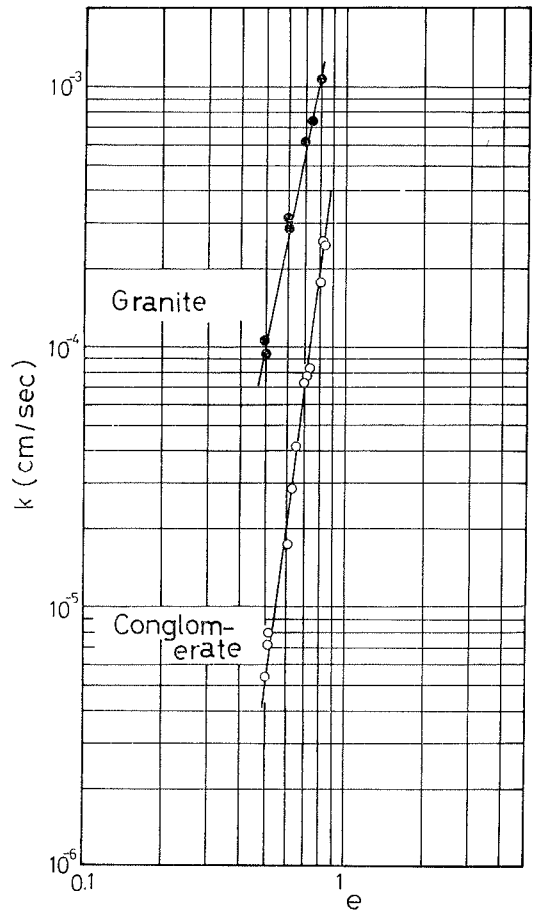


Fig. 11 Relationships between coefficient of permeability k and void ratio e on constant head permeability test (dry side)

となる。ここに、 k_1 は $e=1$ の場合の透水係数の値である。式(1)に含水比を考慮した実際の地盤に相当する間げき比を代入し、透水係数を算定すると、花崗岩では $e=0.35 \sim 0.55$ に対して $1.35 \times 10^{-5} \sim 1.50 \times 10^{-4}$ (cm/sec)、レキ岩では $e=0.35 \sim 0.60$ に対して $7.05 \times 10^{-8} \sim 1.45 \times 10^{-5}$ (cm/sec) となる。したがって 2000μ ふるいを通過した乱した試料の透水係数は乱さない試料のものと比較して低い値を示している。

つぎに、図-1の粒径加積曲線によれば実験に用いた試料は自然状態の試料全体の割合からみると、花崗岩では 2000μ 通過率 $P_{2.0} \doteq 6.5\%$ 、レキ岩では $P_{2.0} \doteq 32\%$ である。このような状態で実験結果だけから現場の透

水係数を推定することはあまりにも誤差を生じ易い。ところが粒度分布から透水係数を算定するための方法は確立されていない。またこれらに関連した報告はそのほとんどが細粒土ならびに粒径の均等な試料についてのものである。当試料に対してその透水係数を算定する方法が見当らなかつたので、ここではよく知られているハーゼンの式を用いて検討してみる。ハーゼンの式は

$$k = C_1 \cdot D^2 \quad (2)$$

で表わされる。ここに、 $D(=d_{10})$ は有効径を cm で表わし、 C_1 (1/cm \cdot sec) はだいたい100から150まで変化する。式(2)を用いて両試料の透水係数を算定すると、実験に供した花崗岩では 3.8×10^{-4} cm/sec、レキ岩では 1.2×10^{-4} cm/sec、自然状態の花崗岩では 1.7×10^{-3} cm/sec、レキ岩では 7.3×10^{-3} cm/sec になる。これらの結果から実験に供した試料の透水係数は自然状態のものに比べて約1オーダー低い値を示しているが、最大粒径を変えた実験結果の透水係数を考え併せると2~3オーダー低い値を示すものと思われる。また、式(1)と式(2)を用いて算定した2000 μ 通過試料の透水係数に注目すると、両者には花崗岩では約1オーダーもしくはそれ以下の、レキ岩では約1~4オーダーの違いがある。以上のことから花崗岩の透水係数は一応妥当な値が得られたものと思われるが、レキ岩については上記の結果をそのまま地盤の透水係数とするには問題がある。これらの問題を解決するためには粒度分布、最大粒径、均等係数、密度および初期含水比と透水係数との関係を定量的に表わすことが必要となる。今後この方面の研究を進めたいと考えている。なお、現在、現場透水試験の結果を解析しているので上記の問題解決の一助になるものと思われる。

4. おわりに

本研究は岡山県人形峠鉱業所坑内における軟岩の透水性を究明するための研究の一環として実施された室内透水試験の結果について考察したものである。得られた結果を要約するとつぎのようになる。

(1) 基盤をなす花崗岩の透水係数は間げき比に大いに影響を受け、間げき比の増大につれて大きくなる。土の構造を締固め含水比で規定した供試体の透水係数は、他のマサ土に比べて土の構造の影響を受け難いことを示す。

(2) 鈹体をなすレキ岩の透水係数は間げき比に大いに影響を受け、間げき比の増大につれて大きくなる。土の構造を締固め含水比で規定した供試体の透水係数はわずかに土の構造と関連しているが、他の締固め土にみられるように顕著なものではない。

(3) 鈹体の上部にある泥岩の透水係数はきわめて小さく、透水性の低い岩であることを示す。

(4) 現場透水試験、インプレスリーチング試験を仮定して行った浸透試験は砂よりも小さい細粒部分を多く含んだ材料に対して有効な方法であることが明らかになった。

(5) 当地盤の2000 μ 通過試料に対する透水係数は式(1)によって表わされる。しかし粗粒材料を含んだ試料に対する透水係数をハーゼンの式から求めた結果については精度を高めるためにも再検討を必要とする。

最後に本研究を実施するに際して、当時の学生河崎敏文君(現・三保土建K.K.)をはじめ動力炉核燃料開発事業団人形峠鈹業所ならびに本学土木工学科土質工学研究室の各位の協力を得たことを付記して感謝の意を表す。なお、本研究の一部は動力炉核燃料開発事業団からの委託研究費に依った。

参 考 文 献

- 1) 小島圭二：軟岩の調査法と問題点，土と基礎，vol. 22, No. 6, 196, 1974, p. 55.
- 2) 高島 彰：ウラン鈹のすべて，地学出版社
- 3) 藤村 尚・久保田敬一：締固め土の透水性，鳥取大学工学部研究報告，第3巻，第2号，昭和48.3, pp. 63~70.
- 4) 藤村 尚・勝見 雅・久保田敬一：透水係数の現場測定に関する実験的考察，鳥取大学工学部研究報告第7巻，第1号，昭和51.9, pp. 126~134.