

## 岩盤浸透流の抵抗則について

On resistance law of flow through rock masses

さ とう くに あき  
佐 藤 邦 明\*

### はじめに

岩盤の浸透流も一般論からすれば、多孔質媒体における流れと見なし得るが、従来の水理学で知られた性質といくつか異なった側面がある。それは岩盤浸透流の特色と言えるが、流れの場由来するところが多い。例えば、同じ岩質の岩盤であっても、流れの生じる割れ目や節理系の幾何的特性（規模、脈絡性、分布など）は潜在的に違っており、言うまでもなく岩質に異方性があれば、幾何的特性のみならず、力学的特性も特色が生じる。しかし、實際上、複雑な流れの場をもつ岩盤浸透流も必要な平均化とモデル化によって、一般化して論じることが不可欠である。その場合、(i)岩盤浸透流の特色、(ii)流れの場となる割れ目・節理系の幾何的性質、(iii)流れの場と流れのモデル化、(iv)抵抗則の確立、(v)水理定数の測定・決定、は物理的に基本となる事柄である。

従来、上述(i)~(iv)は最も簡単な平行間隙中の粘性流体の流れと類似させて Navier-Stokes (ナビエ・ストークス)の運動方程式の厳密解から抵抗則を論じてきた。最近では二重空隙モデルや岩ブロックモデルなども採用され、抵抗則の表現についても研究が進みつつある。しかし、残念ながら、上述したような岩盤浸透流の基本事項を系統的にとらえ、水理学的側面から一貫して論じられたものは見当たらない。

本論は岩盤中の飽和浸透流に注目して、沖積地盤のそれとの相異点を明確にしつつ、流れの場、および流れ自体をどうモデル化するかを述べる。その上で抵抗則、特に岩盤浸透流固有の透水係数のもつ流体力学的な意義と定式化を理論的に提示し、いくつかの透水係数算定式を室内実験と現地実測に基づいて提案する。更に、現在行われている透水係数測定法によってどこまで透水係数値が知り得るか、また得られた値の精度と測定法の問題点についても検討を加える。

### 1. 岩盤浸透流の基本モデル

岩盤中の流れはある程度平均化、モデル化を図って一般化して論じることが不可欠であるが、それに先立って流れの場や流れ自体の基本的特色をまず念頭においておく必要

がある。ここで、水理学的側面からこのことの要点のみを述べ、岩盤浸透流の基本モデルを導入しておく。

まず、岩盤地山に見られる流れは、その流路の多くは割れ目状、あるいは空洞状のいずれかに属す。前者は主として岩盤生成中、あるいは生成後の地質営力・地山応力（熱応力も含め）と風化作用によって作られ、花崗岩や玄武岩の露頭に見られる割れ目系はなじみ深いものである。一方、後者は溶岩流や石灰岩地に見られるように、岩盤生成中や水成風化から地山自体に空洞状に生成されている。いずれも浸透流の対象となるものは内部連結空隙系 (inter-connected pore system) であって、空隙系は内部で連結して水を通ず形態となっている。しかし、この割れ目系も大小スケールは様々である。例えば、地球的規模から見た海溝、航空写真で見られるリニアメントや大断層のようなものから、通常の弱線、断層、割れ目、節理、更に岩石のもつ数十 $\mu\text{m}$ のクラックのようなものまでである。このことは空洞状の場合も同じことであって、石灰岩中の大規模な洞穴や溶岩中の空洞とそれらスケールは多様である。中程度の割れ目系は、柱状節理や板状節理のように規則性のあるものもあるが、ほとんどは不規則であり、地質営力や地山応力に依存した方向性は認められる。直観的に我々が岩盤浸透流と言った場合には人体スケールか地下構造物スケールからして、目にふれやすい節理、小断層、割れ目程度のものを暗黙のうちに前提としていることが多い。元来、このような大小様々の断層、節理・割れ目系も、土木構造物などの具体的な議論の対象と整合させてとらえていくことが適切である。

次に、岩盤中の節理・割れ目系の間隙には必ずと言ってよいほど、風化した粗粒・微粒土を挟んでおり、単純な開口割れ目とは違っている。このような場合、その透水性は微粒土のそれで支配される。また、注目すべきことは、岩盤によって岩質自体とその割れ目系が二重空隙系 (double porosity system) をもっている点である。例えば、砂岩質の破碎岩盤は岩質自体も透水し得るから、この性質を備えている。

更に、岩盤浸透流で特記すべきは、割れ目間隙水圧の変化と岩盤・割れ目系の動的変化・応答であり、割れ目呼吸 (fracture breathing) 現象もその一つである。言うまでもなく、上述のように自然状態で既に、割れ目系が形成され

\*埼玉大学助教授 工学部

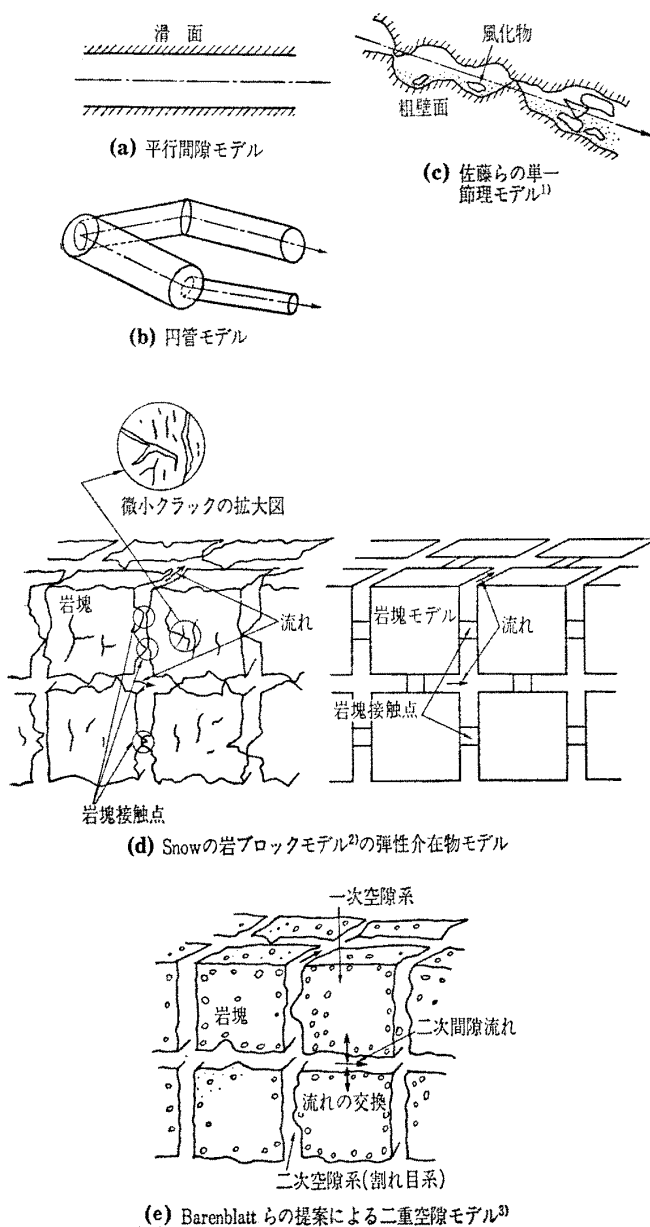


図-1 岩盤浸透流のモデル

ているもののほかに、構造物の建設後、局所的ではあるが、新規二次応力によっても割れ目系は発達・成長する。

他方、割れ目や節理中の流れは、局所的な部分や特殊なものは別として、全体にダルシー則に従い、いわゆる層流と見なして大過なく、それが支配的となる。

上述のような観点から、岩盤浸透流の水力モデルとして図-1(a)~(e)に示したような基本モデルが挙げられる。図中、(a)平行間隙モデル、(c)単一節理モデルは単一割れ目系中の流れを前提とするもので、(a)は滑面壁と粗面壁のそれに分けられ、(c)は不規則な内壁をもつ割れ目間隔が水圧変化に応答して変形し得る<sup>1)</sup>。少し違うが、(b)は円管モデルであり、空洞形態の岩盤浸透流に対応させたもので、溶岩や石灰岩・さんご礁地帯の空洞系に相当する。このような空洞系における流れはその規模が大きいと必ずしも飽和、あるいは満流状態でない場合がある。つまり、

この場合水理学的に見て開水路の範ちゅうに含まれる。

次に、(d) Snow (スノー) の岩ブロックモデルは図中左側に示したような割れ目系をもつ岩盤（ここでは抽象化して図示してあるが、必ずしも立方岩塊集合でなくてもよい）を右側の図のようにモデル化したものである<sup>2)</sup>。このモデルの特色は、左側の図において各岩塊の凹凸が互いに凸な部分で接触しているが、この接触点は間隙水圧の変化に呼応して変形し、割れ目幅も変化を起こす、と考える点にある。その接触点部分は力学的には右図に示した弾性介在物でモデル化する。本モデルではこの介在物を弾性体としているが、既に述べたように、実際には割れ目中に風化物を含むこともあり得る。それは力学的には無視していることになる。また、もう一つ注意すべきことは、左図上端に岩塊自体の岩質を拡大して描いているが、一般的に、岩質自体も多数の微小クラックを含み、既に述べた二重空隙性を有しているとみられる。しかし、Snow モデルでは岩塊自体は弾性体と仮定し、岩体の透水性は考えていない。一言で言えば、割れ目系を含む花崗岩盤のようなもので、岩塊と割れ目幅が水圧変化によって動的に変化することに力点を置いたモデルとなっている。

更に、二重空隙性に力点を置いたものが(e) Barenblatt (バーレンブラット) らの二重空隙モデルである<sup>3)</sup>。このモデルの着想は次のことに由来する。元来岩盤は、岩質自体の透水性は高くないが、多孔質であり、一次空隙をもつ。しかし、その後の地山応力場の変化に起因して、割れ目が形成され、それが二次空隙系として岩盤浸透流を支配する。このような観点から、砂岩質の岩盤を見ると、一次空隙率は二次空隙率より十分大きいのに対し後者は数%でありながら、流れを支配する。すなわち、岩盤の水理的性質からすると、一次空隙系は多くの水を貯留し得るが、透水性は低い。特徴的に、一次空隙系は貯留空隙と見なせ、二次空隙系は流路系空隙と見なし得る。

以上のような岩盤浸透流のモデルをまとめると、いずれのモデルも一長一短あるが、少なくとも、(i)割れ目の連続性と幅、(ii)割れ目壁面の粗度、(iii)割れ目中の介在物、(iv)岩盤の二重空隙性、(v)間隙水圧との動的応答、の5点を重視している。問題は割れ目系の空間的分布をどう評価し、モデル化するかにある。

## 2. 抵抗則と透水係数の表現

既に述べたように、岩盤浸透流は流れの場に支配される性格が強く、流れが層流であれば、線型抵抗則に支配される。したがって、割れ目系や岩盤の水力機構が抵抗則の表現に強く反映される形となることは言うまでもない。ここでは、まず抵抗則の基本型を導入し、次にその一形式として最も大切な透水係数の定式化について述べることにする。

いま、図-2に示したような二重空隙系からなる岩盤微小エレメントを考える。1で述べたように、この場合の流

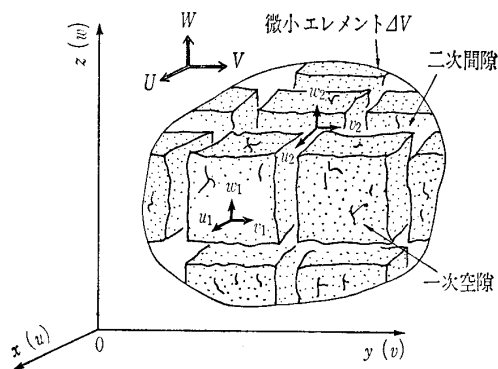


図-2 岩盤微小エレメント

れの場合は一次空隙系と二次空隙系よりなり、流れの抵抗は各々の系のその和となる。次に、Rumer (ルーメル)<sup>4)</sup>の理論を二重空隙岩盤に応用・拡張してみよう。一般に、層流の単位流体塊のエネルギー散逸率 \$\epsilon\$ は、

$$\epsilon = \mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここで、\$x, y, z\$ : 座標系, \$u, v, w\$ : 各々 \$x, y, z\$ 軸方向流速成分, \$\mu\$ : 流体の粘性係数である。式(1)は一・二次空隙系の空隙内の流れによる単位流体塊当たりの粘性エネルギー散逸率を示しているから、見かけ流速成分 \$U, V, W\$ (=流量/全断面) に変換して表現する必要がある。そのため、各々の系について、次の無次元量、

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x}{d}, & y' &= \frac{y}{d}, & z' &= \frac{z}{d} \\ u_i' &= \frac{u_i}{q}, & v_i' &= \frac{v_i}{q}, & w_i' &= \frac{w_i}{q} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

で変換するとよい。

ここで、\$d\$ : 代表寸法, \$q = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}\$, 添字 \$i=1, 2\$ であり、各々一次・二次空隙中の流速成分を示す。すると、全エネルギー散逸率 \$e\$ はスカラー量であるから一・二次空隙系のそれらの和となるから、

$$e = \mu \frac{q^2}{d^2} (\epsilon_1' + \epsilon_2') = \mu \frac{q^2}{d^2} \sum_i \epsilon_i' \dots\dots\dots(3)$$

となる。いうまでもなく、式(3)中 \$\epsilon\_i'\$ は式(1)の [ ] 中、\$u \to u\_i', v \to v\_i', w \to w\_i', x \to x', y \to y', z \to z'\$ と変換した表現となる。

そこで、図-2 に示した岩盤微小エレメントの全ボリュームを \$\Delta V\$ とし、全空隙率を \$\lambda\$ とすると、各々一・二次空隙率 \$\lambda\_1, \lambda\_2\$ を使い、各々の空隙中の流体ボリュームは \$\lambda\_1 \Delta V, \lambda\_2 \Delta V\$ となる。したがって、各々の空隙中の全エネルギー散逸量 \$e\_T\$ は、

$$e_T = \mu \frac{q^2}{d^2} \lambda \Delta V (\beta_1 + \beta_2) \dots\dots\dots(4)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1}{\lambda_1 \Delta V} \iiint_{\lambda_1 \Delta V} \epsilon_1' d(\lambda_1 \Delta V) \\ \beta_2 &= \frac{1}{\lambda_2 \Delta V} \iiint_{\lambda_2 \Delta V} \epsilon_2' d(\lambda_2 \Delta V) \end{aligned} \right\}$$

となる。

そこで、要素エレメントのボリューム \$\Delta V\$ で平均化すると、平均化エネルギー散逸量 \$E\_T\$ は、

$$E_T = \frac{e_T}{\Delta V} = \mu \frac{q^2}{d^2} \lambda (\beta_1 + \beta_2) \dots\dots\dots(5)$$

となる。

いま、抵抗則の表現を具体化するため合流速 \$q\$, 断面積 \$A\$, 長さ \$s\$ の有限岩盤塊に拡張して考える。そこで、単位時間に粘性によって失われる全エネルギーは、

$$E_T A s = \mu \frac{q^2}{d^2} \lambda (\beta_1 + \beta_2) A s$$

であり、定常流であるからそのエネルギーは外部から加わるポテンシャルエネルギー、\$w q A \Delta h\$ (\$w\$ : 水の単位重量, \$\Delta h\$ : 損失水頭) に等しい。よって、

$$q = k \frac{\Delta h}{s}, \quad k = \frac{w d^2}{\mu \lambda (\beta_1 + \beta_2)} \dots\dots\dots(6)$$

となる。

式(6)は二重空隙岩盤浸透流の抵抗則を与え、ダルシー則の形式をとる。言うまでもなく、通常多孔体では一次空隙がないとしているから、式(6)中 \$\beta\_1 = 0\$ である。ここで導入した抵抗則の流体力学的な意味からすれば、\$n\$ 重空隙の場合にもそのまま拡張でき、各々空隙系の粘性によるエネルギー散逸を岩盤の代表寸法 \$d\$ を用いて見かけ流速 \$q\$ で量的に表現したものがダルシー則の物理的意味ということになる。したがって、問題は代表寸法 \$d, \beta\_1, \beta\_2\$ をどう見積もるかである。従来は、これらの物理量は実験によって、適切に決定するのが定石となっている。

次に、室内実験や半理論式から得られる抵抗則について、基本的ないくつかの透水係数の表現式を基に具体的な形で述べることとしよう。

従来の透水係数の表現式は大別して、(i)単一割れ目に注目したもの、(ii)複数の割れ目系を総体としたもの、更に、(iii)岩盤・割れ目の変形を考慮したもの、に分けることができる。上述(i)については説明を要しないであろうが、(ii)の場合は(i)と違って、単一割れ目が複数個集合体として流れの場を作るため、真の流れの場が割れ目系のそれと違い、死水流路などにより、一般に減少してしまう。通常、これは有効空隙率の概念を導入して処理されているものの、単なる単一割れ目の集合体とは見なせない(後述)。更に、(iii)については、1 で述べたように、割れ目系が水圧変動や岩盤の境界条件変化に呼応して変わることを考慮して、抵抗則を考えるものである。

まず、(i)単一割れ目の流れに関しては従来、滑面平行間隙中の粘性流に着目して、透水係数 \$k\$ は、

$$k = \frac{\delta^2}{12\mu} \rho g \approx C\delta^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

とかける。ここで、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度、 $\delta$ ：平行間隙幅、 $C$ ：定数である。

式(7)の形を拡張して、 $n$ 本の同一平行間隙がある場合、あるいは間隙幅が分布をもって存在するものも本質的には同じであり、定数 $C$ が変わるにすぎない<sup>5)</sup>。

更に、単一割れ目の内壁に粗度がある場合について、Louis (ルイス) は抵抗係数 $\zeta$ 、レイノルズ数 $Re$ を、

$$\left. \begin{aligned} Re &= \frac{u_m D}{\nu} \\ \zeta &= \frac{2gDi}{u_m^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

で定義している<sup>6)</sup>。ここで、 $u_m$ ：平均流速、 $\nu$ ：流体の動粘性係数、 $i$ ：動水勾配、 $D=2\bar{\delta}$ 、 $\bar{\delta}$ ：平均間隙幅である。式(8)の定義に相対粗度 $m=h_r/D$ の概念、 $h_r$ ：平均粗度高さ、を導入し、抵抗係数 $\zeta$ とレイノルズ数 $Re$ の関係を、

$$\left. \begin{aligned} \text{滑面と見なし得る場合}(m < 0.033) : \zeta &= \frac{96}{Re} \\ \text{粗面の場合} : \zeta &= \frac{96}{Re} \{1 + Am^{1.5}\}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

と室内実験より与えている。ここで、 $A$ ：定数であり、Lomize (ロミツ) は17.0、Louisは8.8を得ている<sup>6)</sup>。透水係数 $k$ の表現として、Louis<sup>7)</sup>は、

$$k = \kappa \frac{g\bar{\delta}^2}{12\nu C_r} \dots\dots\dots(10)$$

としている。ここで、 $\kappa$ ：割れ目の連続性の程度を示す係数(=割れ目の開口面積と割れ目の全表面積の比)、 $C_r$ ：相対粗度に関する定数であり、 $C_r=1+8.8m^{1.5}$ である。また、古田島・渡辺・佐藤は<sup>8)</sup>、割れ目内壁の凹凸粗度をスペクトル解析し、更に室内透水試験を重ねて、

$$k = \frac{g\bar{\delta}^2}{12\nu \{1 + 2.15\bar{\delta}^{0.206}\}}, \quad (\text{cm/s 単位}) \dots\dots\dots(11)$$

を得ている。

次に、(i)複数の割れ目系に注目したものとして、佐藤・

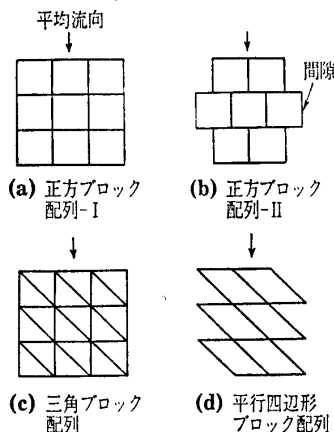


図-3 代表割れ目パターン

田中<sup>9)</sup>は、図-3に示したように、一辺5cmの亚克力ブロックで4形態の割れ目系を作り、次元解析と透水実験によって、透水係数 $k$ は、

$$k = \frac{g}{C_{0\nu}(s/l)} f(\lambda) l^2, \quad f(\lambda) = C_s \left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)^2 \dots\dots\dots(12)$$

となることを示した。ここで、 $s$ ：浸透流路長、 $l$ ：ブロック一辺長であり、 $s/l=1.000\sim 2.410$ 、 $C_0$ ：定数であり、 $C_0=1.81\sim 51.81$ 、 $C_s$ ：割れ目配列による定数であり、 $C_s=0.086\sim 0.250$ 、 $\lambda$ ：面空隙率である。

この透水係数算定式では割れ目幅は空隙率の中に陰に入った形になっており、割れ目系の形態によってかなり透水係数値が違うことをよく表している。

更に、(ii)岩盤・割れ目系の変形を考慮して抵抗則を論じ、定式化を行った理論的研究は少なく、専ら経験的か実験的なものに限られている。まず、理論的根拠の明確なものとして、Snow<sup>2)</sup>や飯沢・佐藤<sup>10)</sup>は飽和した岩ブロックモデル(図-1(d)参照)を採用し、間隙水圧の変化による水平・鉛直方向の透水係数を定式化している。飯沢・佐藤は水平方向の透水係数 $k_x$ を、

$$k_x \doteq k_{0x} \left\{ 1 + \frac{1}{M} \left( \frac{\Delta p_f}{E_r} - \frac{\Delta p_{tx}}{E_r} \right) \right\}^3 \dots\dots\dots(13)$$

と提案した。ここで、 $k_{0x}$ ：初期水平透水係数、 $\Delta p_f$ ：間隙水圧変化量、 $\Delta p_{tx}$ ：岩盤に作用する全応力の水平成分変化量、 $E_r$ ：岩ブロックの弾性係数、 $M$ ：岩ブロックおよび弾性介在物の弾性係数、岩ブロックと介在物の水平接触面積比に関する定数である。式(13)は深度ごとに測定された花崗岩盤の現地透水試験結果と非常によく一致することが認められ、定数 $M$ の値は0.0001~0.0002程度の値をとる。つまり、地盤中の水平透水係数は $\Delta p_{tx} > \Delta p_f$ の場合、その差の3乗に比例して、深度とともに減少する。もちろん、間隙水圧変化によって、鉛直方向の透水係数も変化するが、その量は少なくともこのような理論に基づく限り、小さい。それに比べて、水平方向の透水係数は鉛直深度100mの差で100倍も変化することが少なくない。

他方、Gangi(ガンギ)<sup>11)</sup>は岩盤間隙中の有効応力の変化による透水係数について、過去の研究結果を解説し、自らも特殊モデルで検討している。それによると、有効応力の増加とともに、透水係数が急激に減少し、式(13)と類似の結論を得ている。

しかし、別の研究によると、透水係数の変化が有効応力の累乗逆比例に基づくというものもあり、岩盤・割れ目系の変形を考慮した抵抗則については更に多くの現地実測成果を踏まえて定式化がなされるべきであろう。

### 3. 透水係数測定の精度と問題点

実際に岩盤の透水係数を測定しようとする時、岩石コアサンプリングによる室内実験か現地で直接測定するかのいずれかになる。岩盤透水試験法自体の大きな特色は何と言

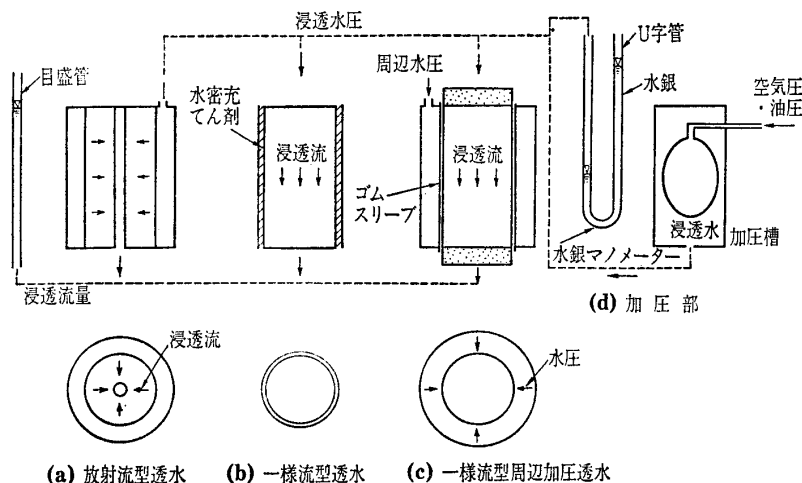


図-4 室内透水試験法の概略

っても、元来透水性が小さいことから高圧強制浸透を要する点にあり、透水量が小さいため透水流量の測定に精度を必要とする。したがって、測定法の特徴はこの高圧強制浸透と小流量測定に基づいておのずから制約され、測定精度も技術的にこれらにどう対処するか支配される。また、測定結果の判断という観点に立てば、要点はどのレベルの割れ目系の透水試験を行ったかを知ることにある。つまり、しょせん室内透水試験では、岩石コアサンプルの寸法が数十cm程度のもとなるから、岩質自体のもつ微小クラック程度の透水係数を測っているにすぎない。したがって、岩盤の透水試験となると室内ではほとんど絶望的に無理であり、現地試験に依らざるを得ない。

以下従来行われてきた測定法の要点を述べつつ、最近改良されつつある新しい測定法について考える。

室内透水試験の方法は原理的に大別して図-4(a)に示した放射流タイプの透水試験体によるものと、(b)、(c)に示した一様流タイプのものに分けられる。いずれの試験体も岩石コアサンプルの製作上、直径は5cm程度が通常であり、特殊なものに数十cmのものもある。サンプルの長さは別に制約はないが、通常、15~20cm程度のものである。(a)放射流タイプのもは二重円筒形で外側から水圧を与え、内円筒に向けて浸透させる。この場合、上述したように浸透水圧が高いため、内側円筒から水圧を加えるとサンプルは水圧で破壊してしまう。一方、(b)、(c)一様流の場合、水圧は一方向から加えるが、この場合、サンプル円周上の止水に完ぺきを要するため、一つはサンプル収納円筒とサンプル壁を接着剤で完全に密着させてしまうもの、ほかは三軸圧密試験の要領でゴムスリーブを側圧で完全に密着させて通水するものがある。

次に、加圧装置は(d)図のように、脱気蒸留水の水槽中に硬質ゴムバルーンを収納し、それ

に空気や油を入れて圧力をかけ、水圧を得る<sup>12)</sup>。その場合の圧力は2~5 kgf/cm<sup>2</sup>が適当であり、補助的に水銀マンオメーターにより水圧を調整することもある。こういった試験法で透水試験を実施した場合、一つの短所は小さなサンプルに大きな圧力差で透水させるため、微小割れ目やクラックの間隙が閉口したり、圧力段階ごとに違った透水係数を与えることがある。

浸透流量はその値が小さいため、一般に目盛り入りのビューレット管の水位上昇量で計る。言うまでもないが、試験開始前にサンプルは真空脱気しながら徐々に飽和状態にしないと、間隙中に空気を飲み込んでしまうから透水試験にならない。最近、このような方法で徐々に

岩石の透水係数がいろいろな岩種で分かっている。

一方、既に述べたように室内透水試験では試験体の大きさが高々数十cmと限られ、岩自体の微小クラックや数百μm程度の割れ目の浸透を対象としているにすぎないため、岩盤の透水試験としては不十分な面があり、どうしても現地試験に頼らざるを得ない。その目的を満たす試験法には、従来、井戸やボーリングによる試験、例えば揚水試験、回復試験、注水試験が簡便なためしばしば用いられてきた。特に、岩盤地山の場合、ボーリング孔を用いるルジオン試験、一種の注水試験が専ら用いられ、ルジオン値から透水係数を概算している。その試験法はよく知られているように、ボーリング孔中で必要な深度において、孔長区間mでパッカーを用いて、図-5(a)に示したように一定水圧(通常、10~15 kgf/cm<sup>2</sup>)の注水を行うものである。そうすると、孔長区間mが地下水面下深ければ、当然放射発散流が現れる。この場合、特に注意すべきことは、孔長区間mの上下端のパッカー付近で流れは図-5(a)に示したように、三次元流の部分が表れ、完全な放射流にはならない。したがって、どうしてもこの三次元流の部分が放射流に比べて無視できるよう孔長区間を長くする必要がある。

通常、注水試験による注水量Qは、

$$Q = \frac{2\pi km(p_0 - p_R)}{w \log_e(R/r_0)} \dots \dots \dots (14)$$

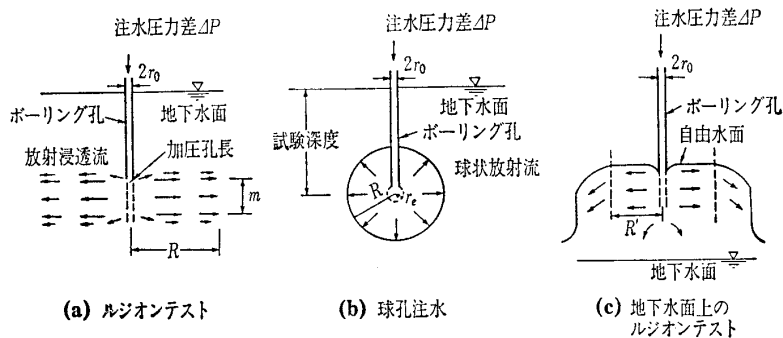


図-5 注水による透水試験

## No. 1341

となる。ここで、 $w$ :水の単位重量,  $r_0$ :孔半径,  $R$ :半径方向距離(井戸理論の影響半径に相当),  $p_0$ : $r_0$ での水圧,  $p_R$ : $R$ での水圧,  $k$ :透水係数である。

この場合, 任意断面  $r$  における流速  $v_r = Q/2\pi mr$  となり, 距離に逆比例して減少する。式(14)中  $R$  は  $m$  程度と見ることが多い。

もし, 注水試験において, 孔長区間  $m$  を小さくし,  $m \doteq 2r_0$  とすると, 流れは球状流動となってしまう(図-5(b)参照)。

この場合, 注水流量  $Q_s$  は

$$Q_s = \frac{4\pi k(p_e - p_R)}{w\left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{R}\right)} \dots\dots\dots (15)$$

となる。ここで,  $p_e$ ,  $p_R$ :それぞれ球状注水孔の半径  $r_e$ ,  $R$  での水圧,  $r_0 < r_e < R$  である。

この場合, 球状任意面  $r$  での流速  $v_r = Q/4\pi r^2$  となり, 流速は  $r^2$  に逆比例して急減することになる。いま, 圧力差を等しくとり式(14)と(15)の比をとると,

$$\frac{Q_s}{Q} = \frac{2 \log_e(R/r_0)}{m\left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{R}\right)} \dots\dots\dots (16)$$

となる。 $m$ ,  $R \gg r_0$ ,  $r_e$  と採ると  $Q_s/Q < 1$  となる。もし,  $m = 2r_0 = R$ ,  $r_e = r_0$  ととると,  $Q_s/Q = 1.40$  となり, 逆になる。つまり, この種の試験で  $m$  をどうとるかは純水理学的に見ても大切なことである。

ルジオン試験の際, 図-5(c)のように地下水面上の不飽和帯で試験すると, ボーリング孔の至近は別として, 重力効果により水束が下方に流下してしまう。もちろん, この場合は式(14), (15)に示したもので透水係数を算定するのは不都合である。このような場合には注水の代わりに, 空気を圧入するとよい。つまり, 注気試験により, 式(14)に習って得られる透気係数  $k_a$  を水のそれ  $k$  に変換する。つまり, 透水係数  $k = (\nu_a/\nu)k_a$ ,  $\nu_a$ ,  $\nu$ : 各々空気, 水の動粘性係数, が成り立つ。この場合, 空気圧をあまり高くしないことである。

更に, 注水形式の試験では, (i)孔周辺における岩盤の水理破壊 (hydraulic fracturing) と割れ目変形, (ii)孔内パッカーの水密性, (iii)透水係数の測定範囲の把握(式(14), (15)の  $m$ ,  $R$  の選定), (iv)試験継続時間, などが留意点である。また, ボーリング孔周辺を代表する平均透水係数測定には

回復試験も有効である。

## おわりに

岩盤浸透流の水理的特色が流れの場に由来すると言っても過言ではないが, 場の平均化, モデル化によって, 流れの抵抗則の力学的意義, 特性を反映した表現を系統的に導入・提示した。また, 特に透水係数値の測定精度についてもふれた。昨今, 岩盤にかかわる水理問題が急に注目されつつあり, 本論でふれることのできなかつたことも多いけれど, 一応著者の目から基本的と思えたことについて述べたつもりである。

岩盤の浸透問題を考える際には, 大小様々な割れ目系や断層系を, 対象とする構造物, 問題の規模に整合させてとらえ, それに合わせて調査・試験を行うことが肝心である。しかし, 更に重要なことは, より多数の信頼し得る現場試験を重ねた上で, その成果を集約, 整理し, 有意義な結論を引き出す方向が必要ではなかろうかと思う。

## 参考文献

- 1) 佐藤・飯沢: 岩盤浸透流の支配方程式とその性質, 第25回土木学会水講演文集, 1981. 2.
- 2) Snow, D.T.: Fracture deformation and change of permeability and storage upon changes of fluid pressure, Qual. Colorado School Mines, Vol. 63, No. 1, 1963. 1.
- 3) Barenblatt, G.I. et al.: Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, PMM, Vol. 24, No. 5, 1960.
- 4) Rumer, R.R.: Longitudinal dispersion in steady and unsteady flow, J. ASCE, Hy. Div., July, p. 150, 1962.
- 5) 土木学会: 岩盤力学(昭和50年版), p. 240, 1975.
- 6) Louis, C.: A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Imperial College Rept., London, No. 10, Sept., pp. 25-33, 1969.
- 7) Louis, C.: Rock hydraulics, Bureau de Recherches Géologiques et Minières Servis Géologique National Orléans Cédex., p. 304, 1974.
- 8) 古田島・渡辺・佐藤: 岩盤クラック壁面凹凸の透水係数に与える影響, 第25回土木学会水講演文集, 1981. 2.
- 9) 佐藤・田中: 岩ブロックモデルによる透水実験, 第36回土木学会年講, 1981. 9.
- 10) 飯沢・佐藤: 透水係数の動的変化を考慮した岩盤浸透流の解析, 第25回土木学会水講演文集, 1981. 2.
- 11) Gangi, A.F.: Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure, J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 15, pp. 249-257, 1978.
- 12) 渡辺・佐藤: 岩盤の透水性評価に関する実験的研究, 第23回土木学会水講演文集, 1979. 2.

(原稿受理 1982. 4. 14)