

高透水性岩盤の層流および乱流抵抗則の 原位置測定

山口嘉一*・安仁屋勉**・澁市秀雄***・
松本徳久****

近年我が国においては、多くの開口性節理の存在により地下水位が低く、かつ高透水性であるため浸透流制御に苦勞する岩盤サイトにもダム建設の要求が高まってきている。このようなダムサイトでは、設計段階で貯水池からの漏水量および経路を正確に推定する手法を確立し、基礎の浸透流制御の合理化を図る必要がある。本論文では、高透水性の節理性岩盤の層流および乱流状態の流水抵抗則を原位置で測定する方法を提案した。また、室内および現場実証試験によりその精度が高いことを示した。

Keywords : field permeability test, flow resistance laws, dam, jointed rock foundation, seepage control

1. はじめに

近年、我が国においては、強度が大きく透水性の小さい地質条件の良好なダムサイトの多くが開発されたこともあり、開口性の亀裂が発達しているため透水性が大きく、かつ地下水位が低いダムサイトにおいてもダム建設の要求が高まってきている。このようなサイトにおけるダム建設には、基礎岩盤の浸透流制御に関して大きな問題がある。つまり、左右岸地山の浸透流制御を最も一般的な工法であるグラウチングにより実施しようとする、通常その施工範囲を「透水性が所定の改良目標よりも大きい範囲およびサーチャージ水位と地下水位が交わる範囲」等を目安に決定する¹⁾ため、グラウチングの施工量が膨大になったり、尾根が薄い場合には上記思想に従った施工が困難になることがある。しかし、この考え方は、グラウチング範囲終端を迂回して下流へ流れる浸透流を発生させないというかなり安全側の設計思想である。さらに、より経済的でかつ合理的なダム建設の実現が待たれる現在、ある程度のダム貯水池からの漏水を許容しながらダム堤体および基礎の十分な安全性を確保できる浸透流制御法の確立が急務である。そこで筆者らは、浸透流制御法としてはグラウチング工法の採用を前提として、設計段階においてダム湛水時の貯水池から地山を通じての漏水量を正確に推定することにより、合理的なグラウチング施工範囲を決定したいと考えた。そのためには、岩盤の流水抵抗則を原位置で正確に測定する必要がある。ただし、本論文で対象としている高透水性岩盤

内の水流状況を把握しようとする際、たとえ岩盤を巨視的に多孔質媒体とみなしても、Darcy 則が成立する層流状態のみならず、より流速の速い状態で存在する乱流状態も考慮しなければならない。そこで本論文では、岩盤の層流および乱流状態における流水抵抗則の原位置測定（透水試験）法を示すとともに、その測定法の精度を検討するために実施した室内試験について述べる。さらに、この測定法の原位置での適用例も紹介する。

2. 研究の位置付け

本研究の主目的は、高透水性岩盤上に建設したダムの貯水池の湛水に伴い発生する漏水の総量と主方向を推定するのに必要な岩盤の透水特性を原位置で測定する方法を確立することにある。ここで研究対象としているダムにおいては、高レベル放射性廃棄物に代表される有毒産業廃棄物の岩盤内処分や石油の岩盤内貯蔵のように、たとえ局所的でかつ処分量、貯蔵量に比較して少量であっても、地下水を介しての漏洩が周辺環境に甚大な悪影響を与える場合とは異なり、貯蔵物である水の多少の漏洩は、岩盤も含めた構造物の安全性および機能が十分確保される範囲において許容される。ここでは、本研究の目的を踏まえながら、本研究が既往の岩盤浸透流に関する研究の中でどのような位置付けにあるかを整理してみる。

岩盤内の流体の浸透のとらえ方は、微視的な観点から主たる水みちである亀裂のネットワーク内の流れとして考える場合と、巨視的な観点から岩盤というマス全体を多孔質媒体とみなしてその内の流れを把握する場合に大別することができる。ただし、解析手法の側からの研究には、その他にも、上記の2つを組み合わせ、大きな亀裂はネットワークを組み、細かい亀裂群は等価な多孔体とみなす複合的な手法²⁾や、大きな亀裂と細かい亀裂群内の水圧を分離してとらえるために亀裂性岩盤を2つ

* 正会員 建設省土木研究所フィルダム研究室研究員
(〒305 つくば市大字旭1番地)

** 沖縄総合事務局北部ダム事務所 (元・建設省土木研究所フィルダム研究室研究員)

*** 正会員 工修 日特建設(株)基礎本部課長 (元・建設省土木研究所フィルダム研究室部外研究員)

**** 正会員 工博 (財)ダム技術センター首席研究員 (前・建設省土木研究所フィルダム研究室長)

の重なった仮想の連続体とみなす手法（二重空隙モデル）³⁾⁻⁶⁾などもある。

まず、微視的に岩盤内浸透流をとらえて、浸透流量を算定しようとする、亀裂のネットワークを作成しなければならない。本来、このネットワークが調査により決定論的に求めることができれば、現在の計算機を持ってすればかなりの精度で浸透流量および細部の浸透方向を知ることができる。しかし、対象領域が余程小さくない限り、その全ての亀裂ネットワークを決定論的に作成することは難しく、実際には亀裂の方向、連続性、密度、開口幅、粗度等を統計的に処理して亀裂ネットワークを作成するのが一般的である^{2),7),8)}。この際、本論文で対象にしている透水試験により直接的に透水特性を把握することよりは、亀裂の上記特性の把握が調査の主目的となる。この手法によりダム貯水池からの漏水を解析する場合、たとえ統計的手法を用いてもその亀裂の調査量は膨大となるうえ、調査が実施できても亀裂内の粗度、亀裂交差部での水の流れ、乱流領域の考慮^{9),10)}など、実用に向けてはかなりの問題が残っている。さらに、漏水の総量と主方向を把握するという目的からは作業が煩雑に過ぎる感があり、岩盤浸透流の取り扱いとしては次の巨視的な手法が有用と考える。ただし、局所的な流れの把握が重要となってくる有毒産業廃棄物の岩盤内処分などの分野では微視的な取り扱いが必要と考える。

次に、巨視的に岩盤を多孔質媒体とみなして浸透流をとられる方法には、小田ら¹¹⁾のクラックテンソルや Long ら¹²⁾の透水係数テンソルの評価法などがある。また、これらの手法では亀裂の幾何学的性状を調査することが主たる作業となるのに対して、Hsieh ら^{13),14)}は、原位置で岩盤の平均的な透水係数と異方性を直接評価する方法を提案しており、我が国においても試験的に実施されている^{15),16)}。しかし、三者の研究においては、透水特性が、Darcy 則の成り立つ層流状態においてのみ議論されており、筆者らの目指す乱流域をも考慮したダムの漏水量解析に必要な透水特性を得るには至らない。そこで本研究では、巨視的な立場から岩盤浸透流をとらえるものの、岩盤の層流、乱流の両状態における流水抵抗則を原位置で測定する方法の確立を主目的に置いた訳である。

3. 岩盤モデル

岩盤に対して試験を行い、その結果から岩盤の諸物性を決定する際には、岩盤モデルを設定し、そのモデルが有している性質および諸物性決定時の仮定を明確しておかなければならない。よってここでは、本論文で設定する岩盤モデルが有する仮定を以下に列挙する。

- ① 岩盤は、巨視的に均質な多孔質媒体とみなせる。
- ② 岩盤は、透水性について等方性体である。

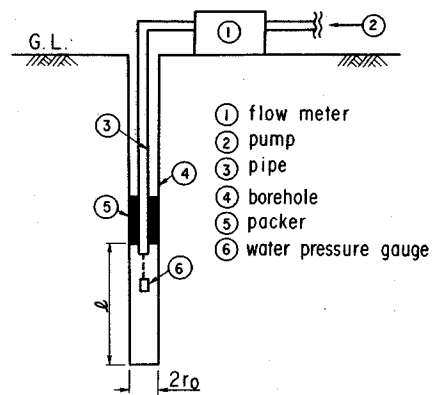


Fig.1 Schematic view of packer method

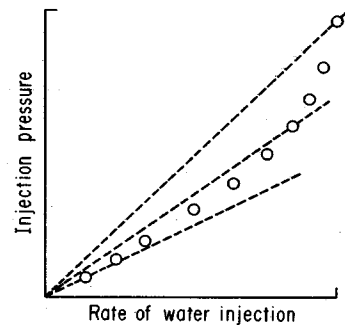


Fig.2 An example of p - q curve observed at highly permeable rock foundation

- ③ 透水試験孔からの流体の流れは、孔軸に直交して流れる（直交流）ポテンシャル流である。
- ④ 岩盤内の水みち形状は、流体の注入によって変化しない。

上記の仮定を有する岩盤モデルと実岩盤の差異、またいかなる対策を講じればその差異を克服して後述の透水試験を原位置試験として適用できるか、等については8章で詳述する。

4. 原位置透水試験法

本論文では、以下に示す2種類の原位置透水試験を実施することにより、高透水性岩盤の層流および乱流状態の流水抵抗則を算定する。

(1) 多段式定圧注水式試験

これは、ボーリングにより試験孔を設け、さらに限定した試験区間を設けて多段階の定圧力で注水し、各段階での注入圧力 p (あるいは水頭 h) と注入流量 Q (あるいは単位長さ流量 $q=Q/l$ 。ここに、 l は試験区間長。) を測定するという試験方法である (Fig.1 参照)。試験方法そのものは、ダムサイト岩盤の透水性を評価する最も一般的な現場試験であるルジオンテスト¹⁷⁾と全く同じであるが、圧力の設定段階数をルジオンテストよりも多

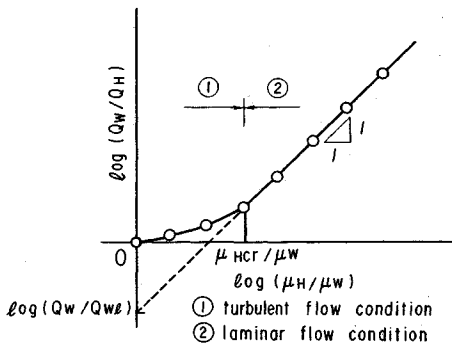


Fig. 3 A result of high-viscous-fluid test

くする(昇圧時で10段階程度)。筆者らが対象としている高透水性の岩盤で本試験を実施すると、大抵の場合、試験孔周辺での水流は乱流となり、圧力 p (あるいは h) と流量 Q (あるいは q) の関係は、Fig. 2 に示すように、 $p(h)$ が大きくなるにつれて、測定点と原点を結ぶ直線の勾配が大きくなる。筆者らは Fig. 2 に示す圧力・流量曲線(以下、 p - q 曲線と呼ぶ。)を逐次流量減少型の p - q 曲線¹⁸⁾と称している。

(2) 高粘性流体試験

この試験は、定圧注水式透水試験と同一の試験区間に、水から順次粘度が大きい流体(以下、高粘性流体と呼ぶ。)を同一圧力 p_0 (水頭で h_0) で注入し、各流体の注入流量を測定するというものである。得られた結果を Fig. 3 に示す形で整理する。図中の μ は流体の粘性係数で、添字の W と H はそれぞれ水と高粘性流体を示す。粘性が大きくなり、試験孔からの流体の流れが完全に層流になると、試験結果は勾配1の直線に乗ってくる。この直線と縦軸である $\mu_H/\mu_W=1$ との交点の値は、乱流状況の存在する水の実測流量 Q_w と仮に試験圧力 p_0 で水が層流状況で注入された場合の推定流量 Q_{wi} の比を示す。 Q_{wi} から層流の抵抗則の定数となる透水係数を求めることができる。また、図中の μ_{Hcr} は、試験を圧力 p_0 で実施した場合に、試験孔からの流れが完全に層流となる流体の最低の粘性係数である。

なお、本試験の原理は、渡辺ら¹⁹⁾によって提案されたものである。筆者らは、使用する粘性流体について、安全性、試験精度に影響する物性、経済性、取扱い易さ等の面から検討を加え、最終的に比較的低濃度のメチルセルローズ系増粘剤の水溶液を採用した。また、この試験の原位置における適用性の検討も行い、すでに原位置における実施例もある²⁰⁾⁻²²⁾。

5. 試験結果の解析法²³⁾

(1) 抵抗則

層流および乱流状態での岩盤の流水抵抗則は次式で表現する。

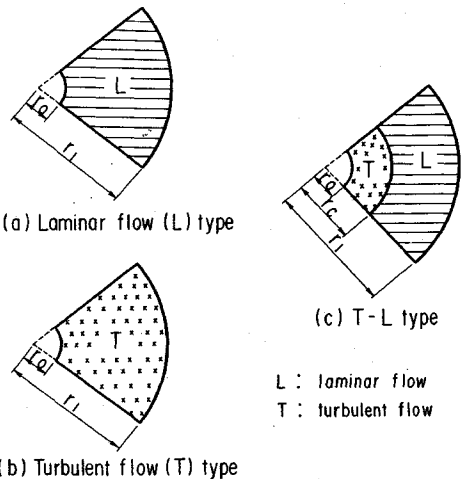


Fig. 4 Classification of water flow conditions around an injection hole

(層流の抵抗則)

$$i = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{1}{k} v \dots \dots \dots (1)$$

(乱流の抵抗則)

$$i = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = cv^n \quad (1 < n \leq 2) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 i は対象流れ方向である x 方向の動水勾配で、 ϕ は流れのポテンシャルである。 v は岩盤内の見かけの流速である。 k は透水係数、 c 、 n は乱流抵抗則の定数である。

(2) 流れの分類

試験孔からの流体の流れは放射流であり、層流と乱流の遷移領域の存在を無視しても、平面的な流れ形態には Fig. 4 に示す3種類が存在する。図中の r_1 は、影響半径で流れのポテンシャルをほぼ0とみなしても差し支えない地点と試験孔中心との距離に等しい。

(3) 注入水頭と流量の関係

多段式の定圧注水式透水試験と高粘性流体試験の結果から対象岩盤の流水抵抗則を表わす定数 (k , c , n) を算定する方法を示す前に、定圧注水式透水試験における注水水頭 h と注入流量 Q の理論的な関係を、Fig. 4 に示した流れ形態ごとに求めておく。

a) 層流型 (L type) (Fig. 4 (a) 参照)

$$Q = 2\pi l k h / \ln(r_1/r_0) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 l , r_0 はそれぞれ試験区間長と孔半径、 r_1 は影響半径である。また、 k は岩盤の透水係数である。

b) 乱流型 (T type) (Fig. 4 (b) 参照)

まず、乱流と層流の臨界点における動水勾配と流速をそれぞれ流況限界動水勾配 i_{cr} 、流況限界流速 v_{cr} として、式 (1)、(2) に代入し、 c に関して解くと、

$$c = v_{cr}^{1-n} / k = i_{cr}^{1-n} / k^n \dots \dots \dots (4)$$

式(4)の関係を考慮して、 Q と h の関係を求めると、

$$Q = 2\pi l \left\{ \frac{hk v_{cr}^{n-1} (n-1)}{(r_0^{1-n} - r_1^{1-n})} \right\}^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (5)$$

c) 乱層流型 (T-L type) (Fig.4 (c) 参照)

この型の流れでは、 $r_0 \leq r \leq r_c$ で乱流、 $r_c < r \leq r_1$ で層流であることから次式が成り立つ。なお、 $r=r_c$ での流速は v_{cr} に一致する。また、 r_c を遷移限界円半径とよぶ。

$$h = (r_c v_{cr})^n \frac{r_0^{1-n} - r_c^{1-n}}{k v_{cr}^{n-1} (n-1)} + (r_c v_{cr}) \frac{\ln(r_1/r_c)}{k} \dots\dots\dots (6)$$

r_c について陰関数である上式をNewton法等により解き、次の連続方程式から流量を求める。

$$Q = 2\pi l r_c v_{cr} \dots\dots\dots (7)$$

(4) 抵抗則の算定法

今、対象としている高透水性岩盤で多段階の定圧注水式透水試験を実施すると、試験孔からの水流は孔周辺で乱流状況にあるものとする。(ここで乱流状況が発生しないのであれば、わざわざ複雑な試験は実施していない。)よって、試験結果として得られる流量 Q は、式(5)~(7)より明らかのように、以下の関数で表現できる。

$$Q = \text{Func}(h, l, r_0, r_1, k, v_{cr}, n) \dots\dots\dots (8)$$

上記のうち、注入流量 Q 、試験注入水頭 h 、試験区間長 l 、試験孔半径 r_0 は、試験実施時点で既知である。影響半径 r_1 には、試験時の境界条件として明確にポテンシャル0の地点が認定できない場合、ポテンシャルが十分小さくなる地点と試験孔軸の距離を当てる。ルジオンテストの基本的な試験区間寸法、 $l=5$ m、 $r_0=3.3$ cmの場合は、 r_1 を100 mに設定しておけばよいと考える²⁴⁾。

よって、未知のパラメータは k 、 v_{cr} 、 n の3つである。この3つのパラメータを求める方法として、以下に示す3通りの方法を挙げる。なお、乱流抵抗則を表わす定数 c は、この3つのパラメータを式(4)に代入することで算出できる。

a) 第1法

この方法では、まず高粘性流体試験から k 、 v_{cr} を求める。さらに、多段階の定圧注水式の透水試験結果である実測 $h-Q$ データと式(5)~(7)を使って推定した理論 $h-Q$ データの残差の2乗和が最小になるように n を決定する。なお、 k は高粘性流体試験から得られた層流推定流量 Q_{w1} と注入水頭 h_0 を式(3)に代入して次式より求める。

$$k = \frac{Q_{w1}}{2\pi l h_0} \ln(r_1/r_0) \dots\dots\dots (9)$$

また、 v_{cr} は以下の手順で求める。まず、注入水頭を h_0 で実施した高粘性流体試験から得られた μ_{Hcr}/μ_w (Fig.3参照)より、水を注入した場合に、層流型 (Fig.4 (a)参照)で流れる最大の注入水頭 h_{cr} を求める。

$$h_{cr} = (\mu_w/\mu_{Hcr})^2 \cdot (\rho_{Hcr}/\rho_w) h_0 \doteq (\mu_w/\mu_{Hcr})^2 h_0 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 ρ_w は水の密度で、 ρ_{Hcr} は粘度が μ_{Hcr} の高粘性流体の密度であるが、今回使用したメチルセルローズ系の増粘剤の水溶液では、かなりの高粘度まで $\rho_w \doteq \rho_H$ である²²⁾。水頭 h_{cr} で定圧注水式透水試験を実施したときの最大流速、つまり試験孔壁部の流速が v_{cr} である。よって、式(3)と連続方程式より、

$$v_{cr} = \frac{Q_{cr}}{2\pi r_0 l} = \frac{h_{cr} \cdot k}{\ln(r_1/r_0) \cdot r_0} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 Q_{cr} を流況限界流量と呼ぶ。

b) 第2法

両対数図であるFig.3から μ_{Hcr}/μ_w を図上で決定する際、かなりの誤差が入り込む余地がある。そこで、高粘性流体試験からは k のみを求めておき、定圧注水式透水試験結果から n と v_{cr} を求めるというのが第2法である。この際、得られた v_{cr} から式(10)、(11)を使って μ_{Hcr}/μ_w を逆算し、Fig.3中の流れ状態の遷移点として妥当か否かの検証が必要である。

c) 第3法

高粘性流体試験は、通常の前位置透水試験に比べると、経費、時間がかかるものと言わざるを得ない。そこで、多段階の定圧注水式透水試験結果のみから、 k 、 v_{cr} 、 n を決定しようというのがこの方法である。ただ、3つのパラメータの値を決定しなければならないので、かなり多くの実測 $h-Q$ データが必要である。前述したように、10組程度のデータがあれば、かなりの精度で解析が可能になるものとする。

6. 室内実証試験²³⁾

(1) 供試体

前章までに示した方法より、岩盤の流水抵抗則をどの程度の精度で求めることができるのかを室内試験により検証する。そこで、3章で示した岩盤モデルになるべく近い供試体を透水性コンクリートとガラスビーズにより作製することとした。

a) 扇状供試体

透水性コンクリートの供試体は、セメントペースト(水セメント比 $W/C=0.3$)と骨材をセメントと骨材の質量比を1:7で混合し、型枠内で電動ランマにより締めてFig.5に示す円環状の供試体を作製した。なお、内空断面は原位置透水試験孔に相当する。室内試験における給水装置の能力を考慮して、円環状供試体を扇状に切断し、原位置試験を模した放射流による透水試験に供した。流体の流入、流出部となる供試体の内、外周面以外はシール材により遮水して不透水境界とした。さらに、試験孔を模した内周面には注水用パイプを取り付けた。

一方、ガラスビーズの供試体は、透水性コンクリートとほぼ同様な形状とするために、Fig.6に示す容器内にガラスビーズを詰めることにより作製した。なお、容器

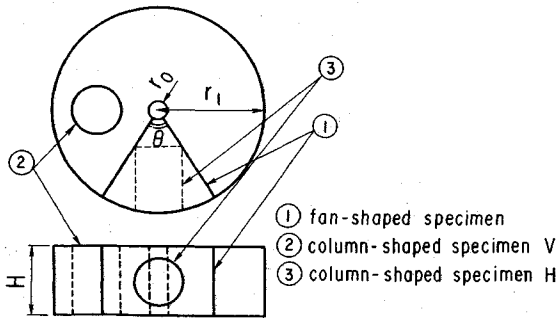


Fig. 5 Ring-shaped specimen of permeable concrete

Table 1 Profiles of fan-shaped specimens

Specimen	Materials	Grain Size (mm)	r_0 (cm)	r_1 (cm)	θ (°)	H (cm)	Dry Density (g/cm^3)
A	Permeable Concrete	Aggregate 1.18~2.0	1.65	19.83	48.25	11.95	1.788
B	Permeable Concrete	Aggregate 1.18~5.0	2.06	20.23	40.63	13.68	1.772
C	Glass Beads	0.99~1.4	2.40	20.00	29.51	8.80	1.635
D	Glass Beads	1.5~2.5	2.40	20.00	29.51	8.80	1.660

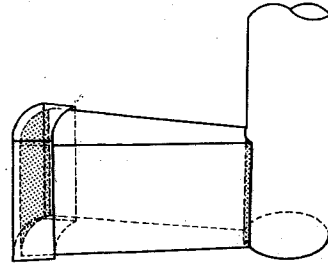


Fig. 6 Permeameter for glass beads in radial flow test

Table 2 Profiles of column-shaped specimens

Specimen	Subcategory	Diameter (cm)	Height (cm)	Dry Density (cm^3/s)
A	V	9.95	10.79	1.791
	H	9.97	9.13	1.768
B	V	9.95	10.53	1.786
	H	9.93	6.63	1.738
C	1	10.25	12.50	1.618
D	1	10.25	12.50	1.576

はアクリル樹脂製であるが、流体の流入、流出部となる内、外周面には金網を張り、透水境界とした。

扇状供試体の材質および寸法等の諸元を Table 1 にまとめて示す。

b) 円柱供試体

扇状供試体に対して、前章までに説明した透水試験を実施してその流水抵抗則を求める。その推定精度を検証する目的で、透水性コンクリートからは Fig. 5 に示す位置からコアを採取し、ガラスビーズは円筒容器内に扇状供試体とはほぼ同じ間隙比に締固めて円柱供試体を作製し、一次元流下での透水試験に供した。

なお、透水性コンクリートのコアは、供試体締固め方向とコアの高さ方向（通水方向）が一致するものと直交するものを採取し、それぞれを鉛直（V）および水平方向供試体（H）とした。扇状供試体を用いた試験では、通水方向が水平方向に一致するため、扇状供試体からは水平方向供試体を採取した。また、透水試験に際しては、円柱供試体周囲をシール材とゴムスリーブを用いて止水した。

円柱供試体の諸元を Table 2 に示す。

(2) 試験装置と試験手順

a) 放射流試験

扇状供試体を Fig. 7 に示すように越流水槽に入れ、試験孔に見立てたパイプ内に吐出量を制御できるポンプにより水あるいは高粘性流体を注入して、多段階の定圧注水式透水試験と高粘性流体試験を実施した。

なお、試験に先立って、色素水を注水して、遮水の不備がないことを確認した。また、試験中は、パイプ内水

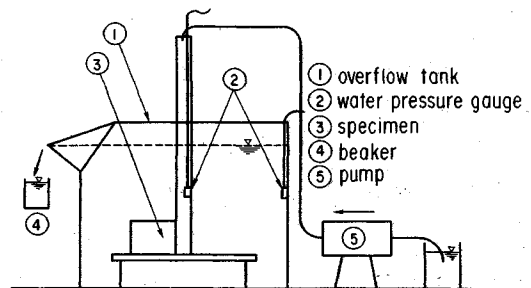


Fig. 7 Testing equipment for radial flow test

位と越流水槽内水位を間隙水圧計により測定して注入圧力をより正確に制御するようにした。

b) 一次元流試験

円柱供試体を透水容器内に設置したものを Fig. 8 に示す装置に接続して、多段階の動水勾配を設定した定水位透水試験を実施した。なお、この試験では、原則として水のみを通して層流、乱流の抵抗則を求めることを目指した。

両試験においては、流体の注入直前に流体の粘性係数と密度を測定した。また、試験は 20°C の恒温室で実施し、かつ流体温度を室温になじませてから注入したので、注入時の流体温度はほぼ 20°C であった。よって、以下の試験結果の整理に際して、 k , c , n の温度補正は考慮していない。

(3) 試験結果

扇状供試体に対する放射流試験として実施した定圧注水式透水試験と高粘性流体試験の結果のうち、供試体

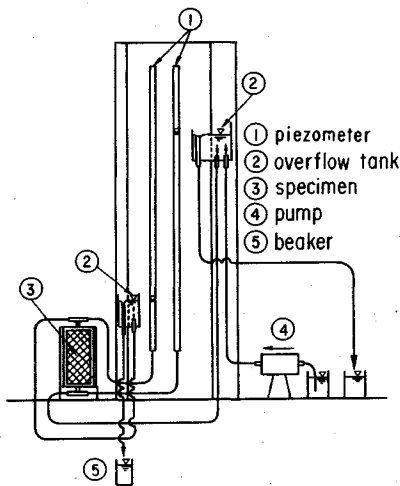


Fig.8 Testing equipment for one dimensional flow test

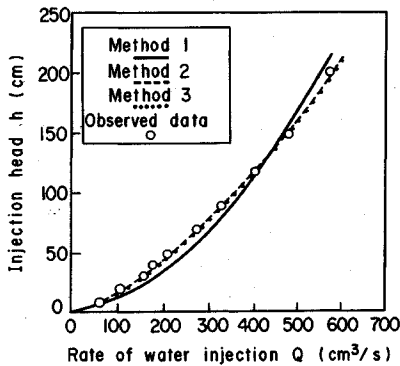


Fig.9 A result of packer method (specimen A)

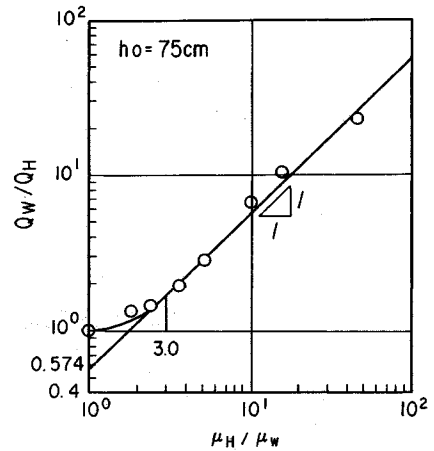


Fig.10 A result of high-viscous-fluid test (specimen A)

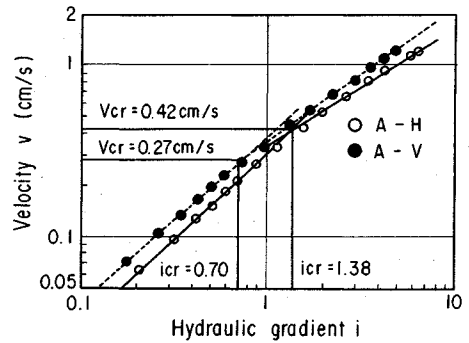


Fig.11 A result of one dimensional flow test (specimen A)

A に対するものをそれぞれ Figs.9, 10 に示す。図中の流量は、供試体が円環状であるとした場合の換算流量である。Fig.10 中の $\mu_H/\mu_w=3.0$ という値は、図上での読み取り値で、第1法の解析に供した。また、円柱供試体に対する一次元流試験の結果として得られた見かけの流速 v と動水勾配 i の関係を供試体 A に限って Fig.11 に示す。なお、供試体 B, C, D についても同様の結果を得ている。ただし、供試体 C-1 の円柱供試体に対する一次元流試験では、水の通水のみで k を求めることができなかったため、高粘性流体も流した。

放射流試験結果を用いて、前述の第1, 2, 3法から算定した k, c, n, v_{cr} と、一次元流試験結果から算定したそれらを Table 3 にまとめて示す。なお、 c の単位は $(s/cm)^n$ と、 n の関数となっている。これらの図表から以下のことがいえる。

- ① 放射流試験結果を用いて第1法と第2法から求めた k, c, n を比較すると、 k は同じ高粘性流体試験から求めているため全く一致しているが、 c, n についてはそれぞれ最大2割, 3割の差がある。これ

Table 3 Results of laboratory tests

Specimen	Flow Condition	k (cm/s)	n	c ($(s/cm)^n$)	v_{cr} (cm/s)	
A	Radial	Method 1	0.25	1.88	7.29	0.51
		Method 2	0.25	1.44	8.71	0.17
		Method 3	0.30	1.43	8.73	0.11
	One Dimensional	A-H	0.31	1.46	4.89	0.42
		A-V	0.39	1.30	3.73	0.27
B	Radial	Method 1	0.26	1.48	6.37	0.35
		Method 2	0.26	1.45	6.47	0.31
		Method 3	0.25	1.47	6.39	0.39
	One Dimensional	B-H	0.28	1.28	4.53	0.45
		B-V	0.28	1.41	5.31	0.38
C	Radial	Method 1	3.66	1.54	0.31	0.79
		Method 2	3.66	1.62	0.26	1.11
		Method 3	3.87	1.62	0.26	1.00
	One Dimensional	C-1	2.29	1.67	1.12	0.22
D	Radial	Method 1	0.84	1.41	0.78	2.39
		Method 2	0.84	1.32	0.91	2.29
		Method 3	0.84	1.33	0.89	2.42
	One Dimensional	D-1	0.80	1.33	1.83	0.31

は、第1法において、 μ_H/μ_w を両対数紙上で読み取る際の誤差に起因している。よって、定圧注水式試験と高粘性流体試験の両方を実施する際は、第2法を解析法として用いるのが良い。

- ② 第2法と第3法から求めた k, c, n は、非常に

良く一致しており、多段階の定圧注水式試験のみから岩盤の乱層流抵抗則が得られる可能性が伺える。ただし、実測 $h-Q$ データの精度、とくに低圧域での精度が落ちると、同程度の残差の2乗和で多くの k, c, n の組み合わせが求まる可能性があり、試験の実施およびその結果の解析上注意を要す。

- ③ 特に、第2, 3法より求めた流水抵抗則より算出した $h-Q$ 関係は、実験値を非常に良く再現した逐次流量減少型形状となっている。
- ④ 締固めて作製した透水性コンクリートの透水性には顕著な異方性がないことが、水平と鉛直方向円柱供試体の k, c, n に極端な差がないことからわかる。
- ⑤ 放射流試験結果を第2法で解析した k, c, n と一次元流試験から求めたそれらのうち k, n は比較的一致しているが、 c についてはやや差がある。特に、ガラスビーズ供試体の場合2~5倍の差がある。これは、式(1)と(2)の比較からも明らかなように、測定結果である流速より c, k を求める場合、流速の測定誤差に伴う c の同定誤差は、 k のそれに比べて、1よりも大きいべき数 n により拡大されることによる。加えて、ガラスビーズ供試体の場合、円柱と扇状でやや密度が異なること、扇状では天端、隅角部に水みちが発生しやすいこと等の供試体性状の差、および透水性コンクリート供試体も含めて扇状供試体寸法の精度に依るところが大きく、試験方法の精度上の問題ではないと考える。

以上より、本論文で提案した現場透水性試験および結果の解析法により、比較的精度良く岩盤の流水抵抗則が推定できることがわかった。

7. 現場実証試験²⁵⁾

試験の合理化を考えた場合、定圧注水式試験のみから岩盤の流水抵抗則を測定できる第3法の適用可能性を検証することが必要である。室内試験では、第3法の精度が第2法と同程度であるという結果を得たが、ここでは、原位置試験によりこれを検証する。

(1) 試験サイトと透水試験

開口した冷却節理が発達した第四紀の安山岩が分布している試験サイトに4本の試験孔を設け、各試験孔3区間、計12区間で高粘性流体試験と定圧注水式試験を実施した。試験サイトの状況、透水試験方法と結果の詳細については既に報告している²¹⁾ので、ここでは省略する。

なお、透水試験は全て地下水面下で実施し、試験区間寸法は $l=5\text{ m}$ 、 $r_0=3.3\text{ cm}$ である。また、前述の理由から $r_1=100\text{ m}$ とした。

(2) 試験結果

透水試験結果の解析に際しては、3章で示した岩盤モデルが成立するものとし、第2法と第3法の比較に主眼

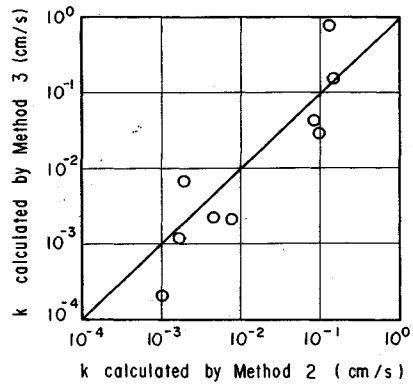


Fig.12 Comparison of k -values by methods 2 and 3

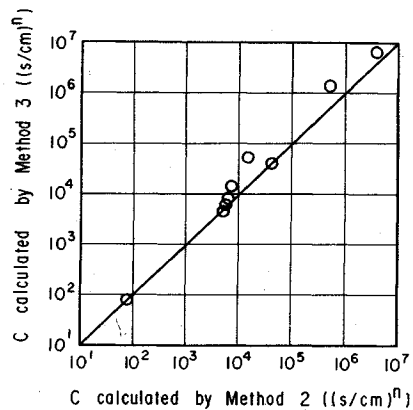


Fig.13 Comparison of c -values by methods 2 and 3

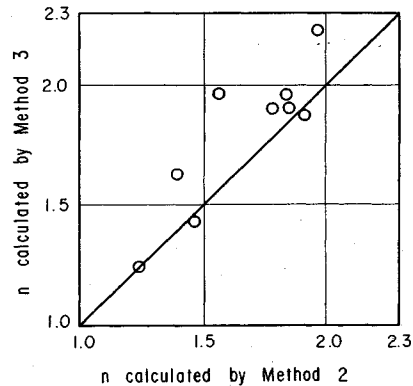


Fig.14 Comparison of n -values by methods 2 and 3

を置いた。両解析法から求めた岩盤の k, c, n の比較をそれぞれ Figs.12~14 に示す。なお、12の試験区間のうち両試験とも首尾よく実施できたのは9区間であった。また、定圧注水式試験から得られた $h-Q$ データ組数は、試験機器の能力上目標の10組を達成することはできず、4~8組(4組:1, 5組:3, 6組:3, 7組:1, 8組:1)に留まった。これらの図から以下のことがわかる。

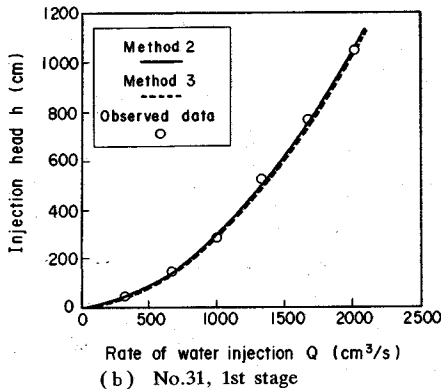
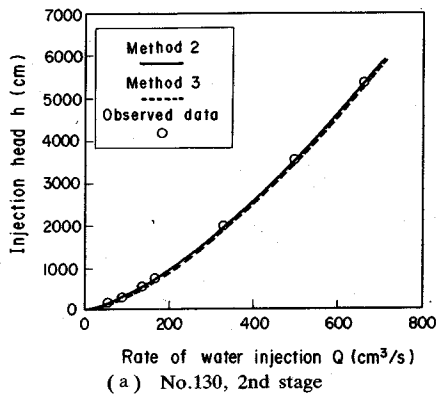


Fig.15 Some results of packer method at the dam site

- ① 第2, 3法から求めた k の関係は, 1:1 の関係を示す直線周辺に分布しているが, 数倍の開きがあるものもある。これは, 試験サイトの透水性がかなり大きい場合, h_{cr} が定圧注水式試験の最小注入水頭よりかなり小さく, 実際に得られた $h-Q$ データからかなり離れた外挿水頭部分で層流抵抗則を求めなければならないことに加えて $h-Q$ データ数が少ないことにも起因しているものと考えられる。
- ② 第2, 3法から求めた c (cm, s 単位) は, k に比して, 比較的良く一致している。これは, k とは逆に, 得られた $h-Q$ データが乱流の影響を強く受けているためだと考える。
- ③ 第3法から求めた n の方が第2法の n より全体的にやや大きい傾向にあるが, 1点を除いて, 一般に言われているとおり1から2の間に分布している。

$h-Q$ の実測値と, 第2, 3法より求めた諸係数より算出した理論曲線の比較例を Fig.15 に示す。第2, 3法から求めた諸係数にある程度の差異がある場合でも, 実測値と理論曲線は非常に良く一致している。これは, 試験水頭よりも小さい水頭領域でのデータが不足しているため, 第3法より求めた諸係数と第2法のそれらに差異

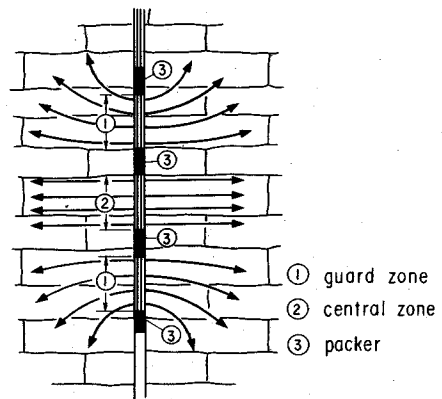


Fig.16 Schematic view of hydraulic triple probe

が出るものの, 残差の2乗和が同程度の諸係数の組み合わせが数多くあり, 結果的に $h-Q$ 関係の再現性が良かったものと考えられる。よって, 第3法による場合, 定圧注水式試験の $h-Q$ データを多くとるとということだけではなく, 低圧域で精度の高いデータをとることが望まれる。

8. 現場での適用に際しての留意点

本論文で提案した試験は, 3章で示した岩盤モデルを対象にした場合, その精度が比較的良好であることを室内試験により実証することができた。そこでここでは, 本試験を実際に現場で適用するにあたり, いかなる点に留意すれば岩盤モデルと実岩盤との差異を考慮でき, 結果としてダム貯水池からの漏水総量と主方向を把握することができるかを整理しておきたい。

(1) 均質性

岩盤の均質性を論じる際には, その対象規模が大きな問題となる。しかし, ボーリングコアやポアホールテレビによる観察により対象岩盤の亀裂間隔を把握し, 極力多くの亀裂を切るような試験区間長で透水試験を実施することにより, ダム湛水時の漏水を規定する巨視的な抵抗則を求めることができるのではないかと考える。

(2) 異方性

岩盤の透水性には, 大抵の場合, 異方性がある。そこで, 地質調査により水みちとなる亀裂の卓越方向をシュミットネット等により正確に把握したうえで, 試験孔からの水流方向とダムの地山を通じての漏水方向を考慮して試験孔を設けて透水試験を行い, k, c, n の異方性を把握することが必要となる。

(3) 直交流

ボーリング孔を試験孔とする場合, 試験区間長は孔半径よりも十分大きいことが一般的で, 孔からの流体の流れはほぼ孔に直交であるといってもよい。ただ, より岩盤モデルの仮定に近づけるためには, Fig.16 に示す多

連パッカを用いた注入も考えられる。

(4) ポテンシャル流

地下水面上での試験では、この仮定は成り立つ。しかし、地下水面上での試験では、重力の影響を受けこの仮定が成り立たない。ここで対象にしている高透水性岩盤では、地下水面上での試験も多くなると思われるので、その影響度合いについては検討が必要と思われる。

(5) 岩盤の変形性

ここで対象としている岩盤は、透水性は大きい、岩は強く変形性が小さい場合がほとんどである。さらに、第3法を推進する際には、7章で示したように低圧域でのデータが必要になることもあり、低圧域での試験が主体となる。よって、透水試験中、水みちである亀裂の開口幅が変化しないものと考えても大きな問題はない。

9. ま と め

本研究より限られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1) 現場で、高透水性岩盤の層、乱流状態の流水抵抗則を求める試験法として高粘性流体試験と定圧注水式透水試験を示すとともに、3種類の結果の解析法を提案した。

(2) 提案した手法の精度を検討するために室内試験を実施した。その結果、高粘性流体試験と定圧注水式透水試験を同一地点で実施する場合には、抵抗則を規定する未知の諸係数を全て客観的に求めることのできる第2法の方が第1法より優れていること、また、定圧注水式試験のみから抵抗則を求める第3法の実用化の可能性も高いことが判明した。

(3) 現場実証試験結果を踏まえて、第3法の実用化に向けては、定圧注水式透水試験をなるべく多くの圧力段階で実施するだけでなく、低圧域で精度の高いデータを得る必要があることを指摘した。

(4) 試験結果の解析にあたって設けた仮定と実際の岩盤の差異を踏まえて、試験実施に際しての対応策を述べた。具体的には、①岩盤を均質体として処理するためには岩盤の亀裂間隔を考慮した試験規模の設定、②透水性の異方性については亀裂の卓越方向、湛水時の漏水経路を知ったうえでの試験孔の設置、という対応策を挙げた。③直交流、④水みちの非変形、の仮定については、それぞれ通常実施している原位置透水試験の寸法、本論文で対象としている岩盤の剛性、を考慮すれば、大きな問題はない。ただし、⑤地下水面上で試験を実施した場合の精度については今後の検討が必要である。

なお、本研究の一部は、平成元年度科学技術振興調整費、重点基礎研究「岩盤における透水抵抗則に関する研究」として実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局開発課監修：グラウチング技術指針・同解説、(財)国土開発技術研究センター、pp.51~52, 1983年11月。
- 2) 大西有三・鍵本広之・西野賢治：岩盤節理情報の処理とその浸透流解析への適用について、土木学会論文集、第376号/Ⅲ-6, pp.241~248, 1986年12月。
- 3) Barenblatt, G.I., I.P. Zheltov and I.N. Kochika : Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rock (strata), PMM, Vol.24, 852, pp.1286~1303, 1960.
- 4) Huyakorn, P.S., B.H. Lester and C.R. Faust : Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers, Water Resources Research, Vol.19, No.4, pp.1019~1035, 1983.
- 5) Warren, J.E. and P.J. Root : The behavior of naturally fractured reservoirs, Soc. of Petroleum Engineers Journal, pp.245~255, 1963.
- 6) 大西有三・小林晃・塩田卓央：二重空隙モデルを用いた地盤挙動に関する考察、土木学会論文集、第394号/Ⅲ-9, 1988年6月。
- 7) 小島圭二・西村毅：岩盤割れ目系の確率モデルによる評価、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.1~5, 1985年2月。
- 8) 菊地宏吉：岩盤浸透流を考えた節理性岩盤の調査、モデル化、第3回岩盤工学セミナー論文集、(社)システム総合研究所、pp.23~58, 1987年6月。
- 9) 宮田美幸、ほか：不連続面に注目した乱流領域の存在を考慮した岩盤浸透流解析、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.156~160, 1985年2月。
- 10) 末吉治彦、ほか：節理性岩盤における乱流状況と透水性評価、第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.356~360, 1986年2月。
- 11) Oda, M. and Hatsuyama, M. : Permeability tensor for jointed rock masses, Proc. of the Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, pp.303~312, Bjorkiden, 1985.
- 12) Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Witherspoon : Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resources Research, Vol.18, No.3, pp.645~658, 1982.
- 13) Hsieh, P.A. and Neuman, S.P. : Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 1. Theory, Water Resources Research, Vol.21, No.11, pp.1655~1665, 1985.
- 14) Hsieh, P.A., S.P. Neuman, G.K. Stikes and E.S. Simpson : Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 2. Methodology and Application to Fractured Rocks, Water Resources Research, Vol.21, No.11, pp.1667~1676, 1985.
- 15) 青木謙治、ほか：亀裂性岩盤の透水特性評価に対するクロスホール透水試験の適用性について、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、岩の力学連合会等、pp.441~446, 1990年11月。
- 16) 長久、ほか：孔間透水試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集

- 集, 岩の力学連合会等, pp. 447~452, 1990年11月.
- 17) 建設省河川局開発課監修: ルジオンテスト技術指針・同解説, (財) 国土開発技術研究センター, 1984年6月.
- 18) 山口嘉一・松本徳久: ダム基礎の透水性とルジオン値, 土木学会論文集, 第412号/Ⅲ-12, pp. 51~60, 1989年12月.
- 19) 渡辺邦夫・芦川亮一: 割れ目岩盤の透水試験における乱流の影響評価の試み, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 161~165, 1985年2月.
- 20) 松本徳久・山口嘉一・澁市秀雄: 高粘性流体を用いた透水試験, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 125~126, 1988年6月.
- 21) 山口嘉一・澁市秀雄・松本徳久: ルジオンテストにおける乱流の影響と対策, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 401~405, 1989年2月.
- 22) 山口嘉一・澁市秀雄・松本徳久: 高透水性岩盤に対する透水試験, 建設省土木研究所報告, 第180-1号, 1990年1月.
- 23) 松本徳久・山口嘉一・安仁屋勉: 岩盤透水性の新たな評価の試み, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会等, pp. 423~428, 1990年11月.
- 24) 松本徳久・山口嘉一・弘末文紀: ルジオンテスト各種境界条件下での精度と結果の解釈, 建設省土木研究所資料, 第2518号, pp. 228~230, 1987年11月.
- 25) 山口嘉一・安仁屋勉・松本徳久: 高透水性岩盤の流水抵抗則(第2報), 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 202~206, 1991年2月.
- (1991. 4. 24 受付)

FIELD TESTING METHODS FOR RESISTANCE LAWS OF HIGHLY PERMEABLE ROCK FOUNDATIONS IN LAMINAR AND TURBULENT FLOW CONDITIONS

Yoshikazu YAMAGUCHI, Tsutomu ANIYA, Hideo SHIBUICHI and Norihisa MATSUMOTO

Recently, in Japan, we have to construct dams even on sites where groundwater level is very deep and permeability is very high because of existence of many open joints. To control the seepage through underground completely on these sites is very expensive. If we could predict the amount of leakage from reservoir precisely at the designing stage, rational grouting, which is the most popular seepage control method for dam foundations, would be accomplished. Therefore, we have developed new field permeability testing methods in order to grasp permeability as input property for seepage analysis. In this paper, we reported the procedures of these testing and analyzing methods to get the flow resistance laws in both laminar and turbulent flow conditions of jointed rock foundations. We performed laboratory and field tests to verify the accuracy of the proposed testing methods. The results of both tests proved that the proposed ones are feasible as field testing methods