

岩 盤 力 学 ⑤

岩 盤 浸 透 流

嶋 祐 之*

1. 概 説

(1) 岩盤浸透流の問題点

土木工事の対象が地表面にとどまらず岩盤内部におよぶ代表的な例としてダム基礎、およびトンネルをあげることができる。これらは最近の傾向として、前者では急速なダム開発にともない、また後者では路線選定上の要請からいづれも恵まれた地形や地質条件下の施工は困難となりつつあり、同時に構造物もより高く、より長大となりつつある。したがってこれらの設計、施工ならびに保守にあたって岩盤自体の力学的性状を明確にしなければならぬことは当然であるが、これと密接に関連する岩盤内の浸透水流の諸性質を正確に把握することも誠に重要なことと考えられる。

岩盤浸透流を取り扱うばあい水理学的にはつぎの四要素、a) 流量、b) 水圧、c) 流線形状、d) 流速、が重視されなければならない。これらが具体的にはどのような問題を提起しどのような対策を必要とするかにつき簡単に述べればつぎのようである。

a) 流量 ダム基礎では貯水の漏洩による経済的損失、トンネルでは貫通の鍵を握るともいわれる湧水問題がある。漏水や湧水防止に対しては通常グラウト工が用いられ、また後者では水抜工、シールド工などが用いられていることは周知のとおりである。

b) 水圧 重力ダムでは基礎に働く揚圧力のためダムの安定性が減少し、またアーチダムでは浸潤面以下にある基礎岩盤のせん断抵抗が間げき水圧の上昇にともない低下する。このためグラウトカーテンで止水壁を構成し、あるいは水抜孔を貫入させたりして水圧の軽減をはかっている。

c) 流線形状 浸潤面は大気圧と平衡している自由流線であり、**b)**と関連しその形状は基礎岩盤の安定性を論ずる場合重要である。すなわちアーチダムにおけ

る止水壁や水抜孔の主目的は浸潤面を低下させ、着岩部周辺のせん断抵抗を増加させることだからである。

d) 流速 浸透水流は実流速がある限界値をこえると、断層面に介在する粘土などの微粒物質を押し流し岩盤を劣化させるおそれがある。したがって水抜孔によりあまりにも急激な動水勾配を与えることはかえって危険と考えられるので、この方面からの検討が必要である。

岩盤内の浸透現象は砂層内でのそれとことなり、きわめて不規則かつ複雑に分布するきれつや割れ目あるいは断層破碎帯などの形状や規模によって支配されるので、注目する岩盤全体にたいし画一的な法則たとえば Darcy 法則のようなものを単純に適用して解析を行なったとしても現象を正しく表現しつくせるとは考えられない。

そこに岩盤浸透流の研究の困難さがあり、その困難に立ち向かって Talobre¹⁾、Öllos²⁾、Варенвлатт³⁾ などの先駆的研究があるが、大局的に見ればこの分野での研究はようやくその緒についたばかりのものといえよう。しかし最近の黒四を中心とした技術者ならびに研究者グループの研究成果⁴⁾ はかなり注目にあたいするものでありまた鉱山学の分野でも坑内湧水をテーマに研究活動⁵⁾ が行なわれているので、こんご岩盤浸透流の研究もしたいに活発になって行くものと期待される。

(2) 岩盤浸透流のとらえかた

前述のように岩盤内の浸透現象はきわめて複雑であるので、湧水量、揚圧力、浸潤面、止水壁や水抜孔の効果などを定量的に把握しようとしても徒労に終るばあいが多く、現実には従来の経験や勘に頼って工事を進めるのが通常である。しかし試掘孔などによる地質および岩盤調査の資料から判断し、対象とする岩盤が全般的であれ部分的であれつぎのようなばあいに当てはまると見なされるときには、それぞれの領域に既知の透水理論を適用し解析や実験を進めるのが適当と考えられる。

a) 大局的に Homogeneous 図-1 は黒四ダムサイト右岸上部の着岩面に 3 m 間隔にグリッドを組み、その各交点にもっとも近い割れ目の走行、傾斜を測定し Schmidt ネット表示したものである。測点が図のように各象限に分布しているばあいには分離面に沿う水流の集合である浸透流も巨視的に見れば均質な媒質内の流れと見なすことができる。

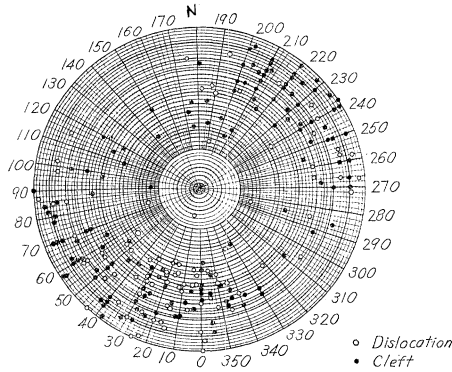
b) 大局的に Heterogeneous 砂岩や頁岩などでは透水係数が異方性を有し、またそれらの互層のばあいも巨視的に見て異方性媒質と見なされるものが多い。

c) 卓越した断層に沿う帯状破碎帯 この部分は通常ほかの岩盤に比しもっとも透水性に富むものと考えられ、トンネル工事の大湧水もほとんどこの破碎帯に飽和された水が突出したために起こっている。この場合には破碎帯だけを抽出して透水層の形状や規模を推定し境界

* 正員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

図一 シュミットネットの一例

この図はダムの着岩面において 3m 間隔にグリッドを組み、その各交点に最も近い割れ目の走行、傾斜を逐一測定して図化したものである。測点がほぼ 4 象限にわたって分布している。



条件にもとづき検討を行なうのが望ましい。

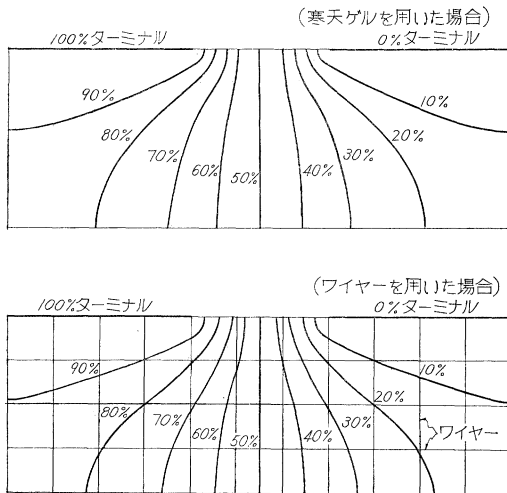
さらに以下の条件が付加されれば、岩盤浸透流の各要素にたいする定量的取り扱いがある程度可能となる。

a) 境界条件の明確なもの 地形や地質状態から、あるいは断層の走向、傾斜状態から、比較的単純な境界条件が規定できること。とくに破碎帯では露頭が湛水池に面しているか、あるいは降雨、降雪による地山の飽和度がどの程度かが重要となる。

b) きれつや割れ目の規模に比し対象物が十分に大きいこと 図-2 は寒天ゲル(均質媒質)とワイヤ(横式化したきれつ)を用いた場合の電気相似法による等ポテンシャル線の分布の比較を行なったものである。これはダム基礎を浸透する水流の圧力分布に対応するものであるが、グリッドの粗さに比較して両者はかなりよく一致している。

c) 経路の性質がつぎのような場合 mm 以上の

図-2 等ポテンシャル線の分布



open crack は取り扱いが困難であるが、たとえあっても狭くや行き止まりのため経路全体として等価な抵抗値を持つと見なされるばあい、きれつや割れ目が十分ありその結果経路が多重連結的構造をなしている場合、あるいは砂岩や風化岩のようにそれ自体が多孔質である場合には解析が容易となる。

岩盤浸透流は頭からむずかしい問題であるときめつけずに、どのようなものが定量的に取り扱えるか、そうでないかを上述の項目にしたがって判断し適切な解決をはかるよう努力すべきである。

2. 透水係数

(1) 定義

岩盤が巨視的に見て砂層のような透水層と見なされるときには Darcy 法則が成立し、透水係数 k および k' は次式で与えられる。

$$Q = kA \frac{\Delta h}{\Delta l} = k' \frac{A \Delta p}{\mu \Delta l} \dots \dots \dots (1)$$

ここに Q : 断面積 A を通過する流量, Δl : 透水層の厚さ, Δh : Δl 間の損失水頭, Δp : Δl 間の圧力低下量, μ : 粘性係数。

k は速度の次元を持ち、ふつう cm/sec 単位が用いられる。また k' は長さの 2 乗の次元を持ち、Darcy 単位が用いられる。1 Darcy は粘性係数 1 centipoise の流体が圧力勾配 1 気圧/cm のもとで断面積 1 cm² あたり 1 cm³/sec の流量を流す場合の透水度に相当する。

岩盤の透水係数は実験室では測定できないし、また現場で式 (1) を満足する条件下で測定を行なうことも困難である。そこで後述の Lugeon 試験が一般には行なわれ、試験孔よりの水の圧入度から透水係数を評価する Lugeon 単位が通常用いられている。すなわち試験孔 1 m につき 10 kg/cm² の圧力で 1 l/min の水が岩盤中に圧入されたときの圧入度を 1 Lugeon とする。

各単位相互の関係を温度 20°C の水を使用したとして示せば以下のようである。

$$1 \text{ cm/sec} = 1035 \text{ Darcy}$$

$$1 \text{ Darcy} = 9.65 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

$$1 \text{ Lugeon} \approx 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec (Martin}^6 \text{)} \text{ による}$$

岩盤の透水係数の値は当然岩盤の性状により大きく変化することが想像されるが、黒四着岩部での試験結果では 0.8~3.6 Lugeon であった。

Lindquist⁷⁾ は小球からなる透水層につき実験を行ない、

$$R = \frac{dV}{v}, \zeta = \frac{2d \Delta p}{\rho V^2 \Delta l} \dots \dots \dots (2)$$

とおいたとき、 R の値にしたがって抵抗法則が

$$\left. \begin{array}{l} R < 4 \quad R\zeta = \text{const.} \\ R > 4 \quad R\zeta = a + bR \end{array} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

で表わされることを示した。

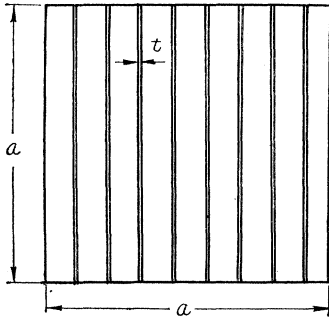
ここに d : 粒径, V : 平均の浸透流速, ρ : 密度, ν : 動粘性係数, c : 抵抗係数, a, b : 常数。

式(3)より R が 4 より小さいと間げき内の流れは層流であって式(1)と同じDarcy 法則が成立するが, R が 4 より大きいと流れは乱流となり Darcy 法則が成立しなくなることを示している。このことは岩盤内の浸透流についても, きれつや割れ目の間げき t や浸透流速 V が大きくなって $R' = Vt/\nu$ がある限界値を越えれば同様な状態となることを類推させるものである。

(2) 透水係数の解析的表示

岩盤内の透水経路をきわめて単純理想化し, 図-3 に示すように間げき t の多数の平行壁面で構成されるものと仮定する。流れに直角な断面を一边 a の正方形とし m 本の割れ目があるとする。動水勾配を I で示せばこの断面を通過する全流量 Q は層流であるとして³⁾

図-3 理想化した割れ目



$$Q = \frac{mat^3}{12\nu} gI \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。断面積が $A = a^2$, 間げき率 λ が

$$\lambda = mt/a \dots \dots \dots (5)$$

であることから式(4),(5)と式(1)より透水係数 k は次式で表示される。

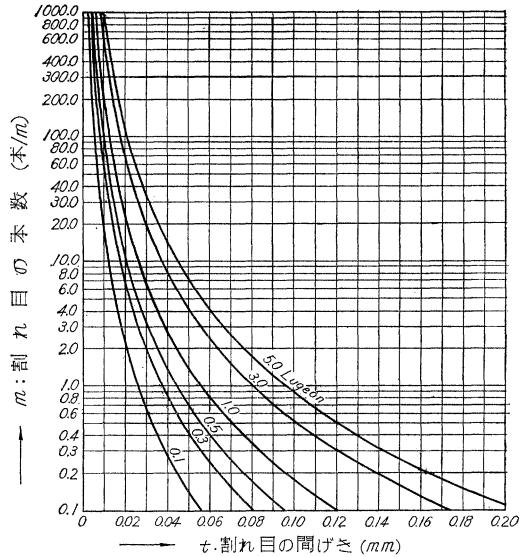
$$k = \frac{mt^3g}{12a\nu} = \frac{\lambda t^2g}{12\nu} \dots \dots \dots (6)$$

透水係数 (Lugeon 単位) をパラメーターとし, 幅 1 m 当りの割れ目の数と間げきとの関係をグラフに表わせば 図-4 のようになる。この図や式(6)は Lugeon 試験の結果より岩盤内の割れ目の性状や実流速を推定するのに役立つものである。

(3) 測定法

a) Lugeon 試験 この試験はシングルパッカー (ステージ) 方式とダブルパッカー方式とに大別され, 装置の概要とそれぞれの圧入方式の相違が 図-5 に示されている。前者は試錐孔の孔底とはめゴム (パッカー) のあいだより圧入し, 後者では上下のパッカー間 A 部より圧入する。いずれも圧入部の長さは 5 m を標準とし,

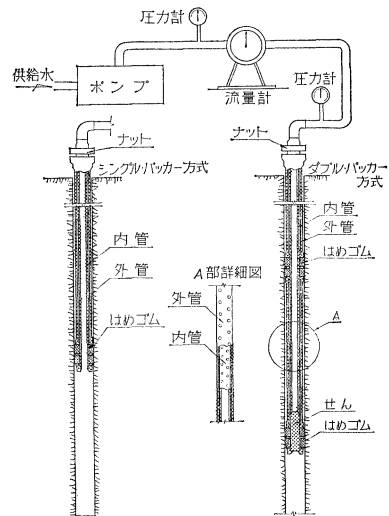
図-4



10 kg/cm² の圧力をかけ約 10 分後の安定した流入量を求めて Lugeon 値を求める。なお試錐孔の直径は 46~76 mm である。シングルパッカー方式は試験ごとに試験錐を行なうので工程は複雑になるが, パッカーの数が少ないのでろう水による誤差が少ない。ダブルパッカー方式は試錐孔全長を先に掘ってあるので工程は容易であるが, ろう水の誤差が大きい。

Lugeon 試験は岩盤の透水係数の測定が前述のように困難であってほかに適当な方法がないので, また透水層の存在がおおむね判断できるので, 一般に採用されている。しかし実測された Lugeon 値を(1)で定義される透水係数の値と直結させるにはまだかなりの問題点が残されている。その理由はつぎのようである。

図-5 Lugeon 試験装置



①孔径，ゲージ位置，圧入長などに統一規格がないこと。②パッカーに難点がある。③地下水位のような境界条件の考慮が払われていない。

したがって将来にたいする希望として上記事項の改善はもとより，さらに一歩進んで岩盤内の間げき水圧の変化にともなう透水機構の変化まで把握できるようにしたいものである。このためには，くり返し注入圧力方式をもつ Lugeon 試験がグラウト効果の判定とも関連し重視されねばならない。

b) 流速法 この方法は原理的には地下水の分野で行なわれているものとかかわりがない。すなわち一方の試験錐孔よりトレーサーを注入し他方の試験錐孔より検出するもので，このばあい流線長 $4l$ と検出に要する時間 T より岩盤中の実流速 v を

$$v = 4l/T \dots\dots\dots (7)$$

から求めようとするものである。ここで流線形状が単純で平均流速 V が

$$V = k \frac{4h}{4l} \dots\dots\dots (8)$$

とおくことができ動水勾配 $4h/4l$ も測定可能とする。実流速と平均流速とは間げき率を用いていちおう

$$V = \lambda v \dots\dots\dots (9)$$

と書き， λ が割れ目の観察により測定可能とすれば式(5)，(7)，(8) および (9) から透水係数 k が知られることになる。あるいは逆に Lugeon 試験より k の値が推定できれば λ や t の値を求めることができる。

しかし岩盤中の浸透流速は一般に小さく検出時間が大となるので縦方向の拡散現象^{9),10)}のためシャープな濃度時間曲線が得られない。また注入孔より出たトレーサーは円錐状に拡散するうえに注入孔と検出孔とが同一流線上にこないのがふつうであるから，検出孔の濃度は一般に非常に小となる。このような障害は岩盤を取り扱うむずかしさからいって止むをえないものと考えられるが，このような条件下での濃度時間曲線より適正な実流速を算定するにはどうすべきかについて基礎的な研究の必要があると思われる。

c) 風化岩や破砕帯などにおける試験法 これらはほぼ homogeneous な媒質と見られるので土質学的な現場透水試験が準用できる。したがってここではとくに触れないがこの方面での文献¹¹⁾を参照されたい。

3. ダム基礎に関連する浸透流

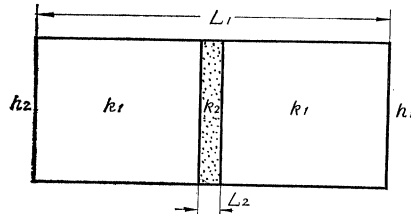
(1) 止水壁

浸透性の地盤上にダムを築くばあいには，矢板を打込むことによりろ水を防止して同時に揚圧力を軽減させることが可能である。しかしダムが基礎岩盤上であれば矢板の打込みは不可能であるので，グラウトカーテンで

止水壁を構成することにより上述の事項や浸潤面の低下を期待することになる。グラウトカーテンはどのように綿密にグラウトが施工されたとしても不完全な止水壁としか考えられないので，このようなばあいの止水効果や圧力低下について検討を行なう必要がある。

まず止水効果についての基本的な概念を得るため図-6に示すような全長 L の透水層の中間に透水係数の低い層が介在するばあいの流れを考える。いま透水層および中間層の長さを L_1 および L_2 またそれぞれの透水係数を k_1 および k_2 とする。両端の圧力水頭を h_1 および h_2 とすれば，流れに直角な単位面積あたりの浸透流量 Q は次式で与えられる¹²⁾。

図-6 中間層の介在する場合



$$Q = \frac{k_1 k_2 (h_1 - h_2)}{(k_2 L_1 + k_1 L_2)} \dots\dots\dots (10)$$

また中間層のないときの流量 Q_0 は

$$Q_0 = \frac{k_1 (h_1 - h_2)}{L} \dots\dots\dots (11)$$

よってグラウトカーテンによる止水効率 E_c はこのような流れの場では

$$E_c = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} = \frac{\beta(1-\alpha)}{\alpha(1-\beta) + \beta} \cdot 100(\%) \dots\dots\dots (12)$$

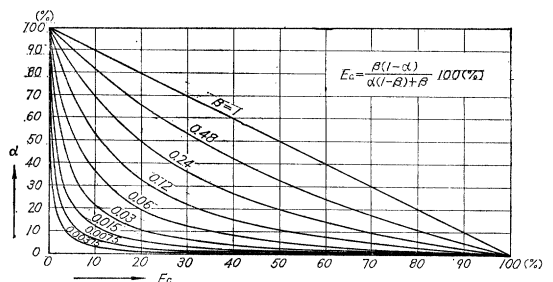
で表わされる。

ここに $\alpha = k_2/k_1 < 1$, $L_2/L = \beta$

図-7 は式(12)より β をパラメーターとし E_c と α との関係を示すものである。この図より浸透流の流線長が長く (β が小さく) となるとグラウトカーテンが完全な止水壁に近く (α がほとんど 0 に) ならない限り，止水効率 E_c は大きくならないことが示される。

つぎに圧力低下については，黒四で行なわれた電気相似実験結果¹³⁾を参照することとする。すなわち図-8に

図-7 止水効率と透水係数比および層厚比との関係



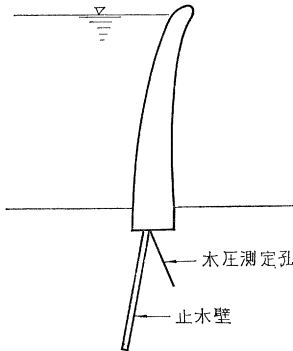
示す二次元模型において、間げき率（ α に相当）のことなる不完全止水壁を置いたとき止水壁の深さにより水圧測定孔の圧力がどのように変化するかを示したものが図—9である。ここに全水圧は 100、止水壁のない場合の水圧測定孔の圧力は 48 で示されている。この図より①完全止水壁では深さが増すにしたがい圧力低下は大きくなる。②不完全止水壁では間げき率が 15% 程度であれば圧力低下量も比較的少なくまた止水壁を深くしてもそれほど圧力低下は増加しない。③間げき率が 30~60%となればほとんど止水壁は無きに等しい。……がわかる。

以上より不完全止水壁による止水効果ならびに圧力低下の特性は完全止水壁によるものとは非常に相違することが知られる。したがってグラウトカーテンを前述の目的のためダム基礎に施したとしても、現実の岩盤改良度や経済的な施工範囲を考慮するときろう水や揚圧力の軽減をこれによって大きく期待することはできないのではないかと思われる。

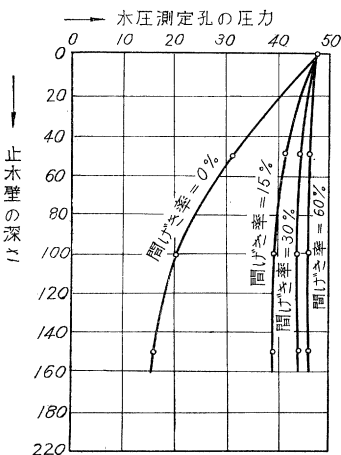
(2) 水 抜 孔

重力ダムの基礎に働く揚圧力を軽減させるため、また

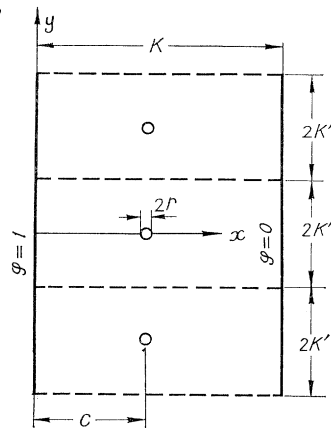
図—8 止水壁をもつ二次元模型



図—9 止水壁の深さによる水圧測定孔の圧力



図—10 水抜孔の境界条件



はアーチ ダムの基礎岩盤の安定に対し 浸潤面を低下させるため、水抜孔はグラウトカーテンに比し効果的であると考えられている。その理由は人為的手段によりろう水を止めることによってその背後の圧力を低下させることよりも、ろう水を促進させることにより水抜孔周辺およびその下流側の圧力や浸潤面を低下させることの方がより自然で確実であるからである。

水抜孔の基本的特性を調べるため、図—10 に示す簡単な浸透流の場を考える。すなわち左右端ともそれぞれ $\phi=1$ および 0 なる等ポテンシャル面でその間隔を K とする。位置 C にポテンシャル 0 の水抜孔が間隔 $2K'$ で配列されそれぞれの直径を $2r$ とする。このときの理論解¹⁴⁾は $r \ll K, 2K'$ として次式で示される。

$$w = \frac{Q_2 - Q_1}{\pi} \log \frac{\vartheta_0 \left(\frac{c-z}{2K} \right)}{\vartheta_0 \left(\frac{c+z}{2K} \right)} + \left(1 - \frac{z}{K} \right) \dots (13)$$

$$Q_2 - Q_1 = \frac{\pi \left(1 - \frac{c}{K} \right)}{\vartheta_1 \left(\frac{c}{K} \right)} = \frac{K}{c} \left(\frac{K'}{K} - Q_1 \right) \log \frac{r}{\vartheta_1 \left(\frac{r}{2K} \right)}$$

ここに $2Q_2$ および $2Q_1$ は、個々の領域でそれぞれ左辺より流出する流出量および右辺へ流入する流入量を示すもので、 $2(Q_2 - Q_1)$ は水抜孔への流入量を示すものである。また w は複素ポテンシャル、 z は物理面を表わしそれぞれ

$$w = \phi + i\psi$$

$$z = x + iy$$

一方水抜孔のないときの浸透流量を Q_0 とすれば

$$Q_0 = 2K'/K \dots \dots \dots (14)$$

式 (13), (14) の計算結果より以下の事項が指摘される。

- ① 水抜孔の有効間隔は 両辺の間隔の 1/20 程度が適当であり、それ以上密にしても集水能力はあまり増加しない。
- ② 孔径は通常 K, K' に比し非常に小さいので、この範囲では孔径の大小は集水量にほとんど無関係である。
- ③ 水抜孔の位置が右辺と一致する場合は、水抜孔がないと同様であるが、左辺に移動するとともに $Q_2, Q_2 - Q_1$ は増加し左辺に一致する極限では無限大となる。また Q_1 は水抜孔が両辺の中央にある場合最小で、両辺のいずれかに近づくにつれ対称的に増加し極限においては水抜孔のない場合と一致する。
- ④ x 軸に沿う圧力分布は、水抜孔のごく周辺をのぞいてはほとんど直線状である。水抜孔の位置での有効圧力低下を 4ϕ とすれば前述

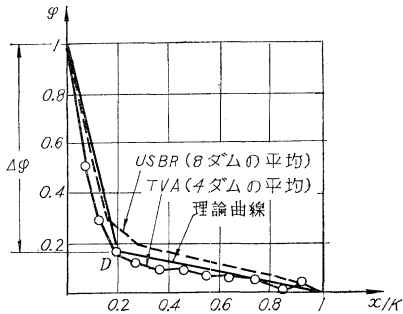
の理論より $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \frac{c}{K} \left\{ 1 + \left(1 - \frac{c}{K} \right) \frac{Q_2 - Q_1}{Q_0} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

で与えられる。 $c/K=0.2$ として揚圧力分布を求め実測値¹⁵⁾と比較したものが図-11である。この図より両者は良く一致することが認められる。⑤水抜孔は左辺に近いほど圧力が低下する領域が広くなり、したがって浸潤面の低下領域も広がるので、揚圧力や基礎岩盤の安定に対しては有利であるが、一方では水抜孔に向う動水勾配が急になるのでろ水量が過大となり、あるいは実流速が限界値を越えるおそれがあるので注意を必要とする。

以上より揚圧力の問題に対しては、実測ならびに理論結果から水抜孔がグラウトカーテンより支配的な影響をおよぼすと判断される。また水抜孔がない場合のろ水

図-11 揚圧力分布に関する実測と理論との比較、Dは水抜孔の位置



量に比し水抜孔を設けたときのろ水量が前者の数倍程度になっても貯水量の経済損失が無視される場合には、水抜孔はできるだけ貯水池に近い位置にするほうが有利である。また基礎岩盤の安定に対しては、原則的には前とほぼ同様なことがいえるが、とくに注目すべき岩盤部の直前に水抜孔を設けることにより全体のろ水量をなるべく少なくするよう配慮したほうが賢明である。さらにいずれの場合に対しても水抜孔周辺部や水抜孔が貯水池に近くなると動水勾配が急になって Piping 現象を起こすおそれがある。この問題に対する研究はまだきわめて不十分であり、一応 1μ の粒径を押し流す限界実流速が 0.3 cm/sec といわれているが実測的な裏づけはない。今後は実流速の測定とともに水抜孔より出る微粒子の定量的な検出を行なって相互の関係を確かめることが肝要である。

4. トンネルの湧水

トンネルの掘削が湧水にはばまれ、ばく大な工期と工費を要し、また多数の人命を失った例は数多い。すなわちトンネルの難工事はほとんどが湧水との闘いといっても過言ではない。湧水記録の主なものをあげれば表-1

これらの湧水原因は、水の充満した洞窟に掘当てた場合 (Mont. d'Or), 断層面の内側が被圧状態の火山荒砂層からなる滞水層であり外側から断層を突破した瞬間に噴出した場合 (丹那), 多くの断層が交差した地点に広い集水域から破碎帯をとおしての水が集中した場合 (大町) など数限りない。しかしこのような因果関係は、実際にトンネル内で湧水が起こりその状況が観測できたとき、地質調査の結果とにらみ合せて初めてうなずかれる場合が大部分である。もちろん地質調査は重視されねばならないし、それが十分であれば破滅的な大湧水を免れたり、あるいは完全な工法をもって対処することが可能かも知れないが、しかし現実の問題として湧水箇所や湧水量を高い精度で予測することはきわめて困難と考えられる。したがって現在の課題としては、地質学と水理学との谷間を埋めるべき基礎資料の整備が急がねばならない。

表-1 トンネルの湧水記録

名	称	全長 km	最大湧水量 l/sec	年
St. Gothard		14.98	348	1875
Col de Tende		8.10	1 000	1894
Montes		1.90	366	1907
Simplon		19.80	1 150	1901
Pyrhn		4.78	1 260	1905
Mont. d'Or		6.10	10 000	1913
丹那		7.81	2 300	1924
大町		5.4	610	1957

湧水は地中へ浸透した水が、トンネルが掘られたとき圧力の低いその空間に空洞、岩盤の割れ目、断層破碎帯あるいは透水性の岩を經由して非定常的に流出する現象である。一般に湧水の初期は滞水層の水量や周囲の動水勾配が大であるので大きな値となるが、時間の経過とともに低減し集水域が狭くほかの補給水源のないときには周囲の滞水層とともに涸渇する。しかし通常は雨水や降雪のため、あるいは河川や湖沼からの地下水の補給のため、やがてはやや安定した準定常的な現象に移行する。このような湧水量を月ないし旬単位に検討すると、その

図-12 大町トンネル湧水記録

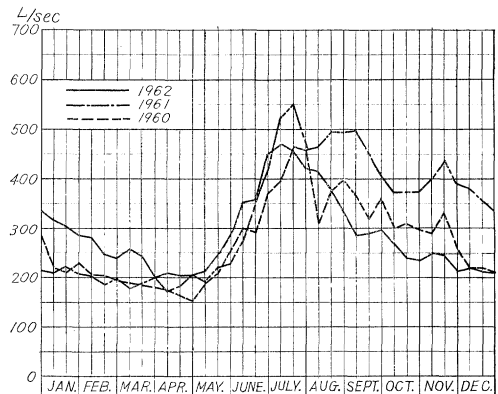
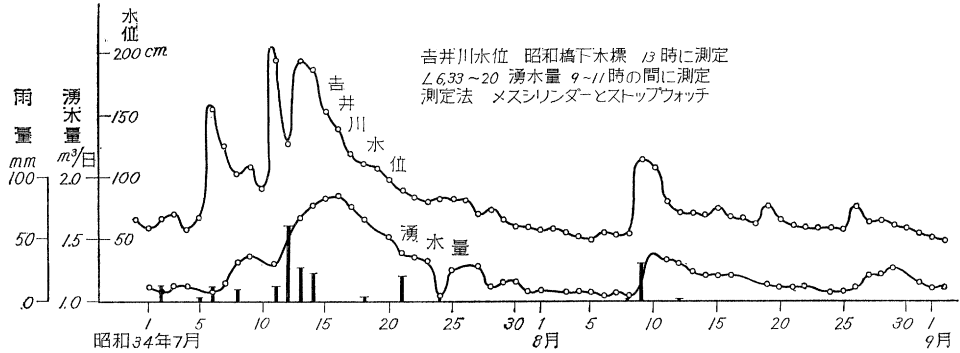


図-13 吉井川水位と3鉢体 L.6.33~20 湧水量のグラフ



湧水の地質学的ならびに水理学的性質がうかがわれて興味深い。

図-12 はその一例として大町トンネルの湧水記録を示したものである。まず量的に非常に大きいことは、前述の地質的原因と見なされる。つぎに湧水量の季節的変化が毎年ほぼ同様であり、冬期は少ないが5月より7月にかけて上昇し、以後ゆるやかに低減することが認められる。これはこの地方の融雪が6、7月にさかんであるとともに7月には不連続線による降雨が多いためである。降雨の影響は比較的早く湧水に現われるが、これは地表に近い部分が貯水槽に似た性質を持ち岩盤深部では浸透水は被圧状態となっているためと思われる。なおそのほかの例を調べると、東北地方では空つゆのため融雪期の4、5月と台風期の10、11月に多く、また伊豆地方では雨期の5、6月と台風期の10月に多いが年雨量も相当あるので図-12のような顕著な季節変化は認められない。一方河川敷内に断層露頭が存在し、断層破碎帯をとおして深部の坑道へ湧水し、湧水量と河川水位とが相関性を有する場合が考えられる。図-13 は吉井川水位と柵原鉱山内の一地点の湧水量との関係を示したものである。この図は記録の一部であるが、全体を通じて見ると雨量と湧水量との相関よりも河川水位との相関の方が強いと見られる。しかし水位による圧力上昇は動水勾配の増加に換算すれば微小であるので、おそらくは出水によって河川敷が広がり浸入面が増加したためと推定される。これらの実例から湧水現象は地質的条件のみならず、降雨、降雪、融雪などの気象条件、それらを基礎とし湧水機構を規定する水理条件などと密接に関係するものであることが理解されよう。

参考文献

1) Talobre, J.: "La Mécanique des Roches" Appliquée aux Travaux publics, 1957
 Talobre, J.: "L'ean et les roches. La mecanique des roches."

2) Öllös, G.: "Possibilities of model investigation into water movement's occuring in fissured rocks," International Association for hydraulic research, (ninth convention), 1961
 3) Г.И. БАРЕНБЛАТТ. Ю.П. ЖЕЛТОВ: "ОБ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЯХ ФИЛЬТРАЦИИ ОДНОРОДНЫХ ЖИКОСТЕЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ" ДОКЛ. Акад. Наук СССР, Меканника 1960, том 132. No. 3.
 または "きれつのある岩石における均質流体の浸透に関する基本方程式", 技術研究所業務資料 (土木, 62003)
 4) 大長昭雄: "アーチダムの基盤内の浸透流に関する実験的研究", 土木学会論文集第 97 号 (昭和 38 年 9 月)
 野瀬正儀・大長昭雄: "黒部川第 4 ダムの基盤内の浸透流の浸透水の流況に関する実測結果について", 第 2 回岩盤力学研究会シンポジウム
 5) 日本鉱業会誌: 「坑内湧水特集号」, 5 月 1961 年, Vol. 77, No. 875, 社団法人日本鉱業会
 6) Martin, P.: "Les coefficients de permeabilite des roches Unitès de perméabilité," 技術研究所業務資料 (土木, 62005), 1962 年, 電力中央研究所, 技術研究所
 7) Lindquist, E.: On the flow of water through porous soil, Rep. 1st Cong. Large Dams. Stockholm, 81 (1933)
 8) 本間仁・安芸皎一: 物部水理学, 岩波書店, p 457
 9) 菅原正己: "拡散的現象を伴う流れについて", 科学技術庁資源局, 水 12, 地下水 3 (1957)
 10) Sukeyuki Shima: "On the so-called diffusion phenomena of seepage flow", Proc. of 9th Convention of International Association for Hydraulic Research, Sept. 1961
 11) 河上房義: 「土質力学」, 森北出版
 Carl N. Zanger: Engineering Monograph No. 8, United States Dept of Interior Bureau of Reclamation, Theory and Problems of water Percolation, Apr. 1953
 12) Muskat: "Flow of Homogeneous Fluids," McGraw-Hill Book Company, 1937, p. 403
 13) 大長昭雄: "アーチダムの基盤内の浸透流に関する実験的研究", 土木学会論文集 97 号 (昭和 38 年 9 月)
 14) 嶋 祐之: "浸透流の電気相似模型実験に関する理論計算", 委託研究に対する関西電力KKへの報告書, 1962
 15) Keener: "Uplift pressure in concrete dam," Proc. A.S.C.E. LXXII (25) 20, 1950, Casagrande "Control of seepage through foundations and abutments of dams," Géotechnique Vol 11, No. 3, 1961