

節理性岩盤の透水性評価に関する一考察

角江 俊昭¹・石井 清²・吉越 洋³

¹正会員 工修 東京電力㈱ 電力技術研究所 (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎 4-1)

²フェロー会員 工博 東電設計㈱ (〒110-0045 台東区東上野 3-3-3)

³フェロー会員 工博 東京電力㈱ 建設部 (〒100-0011 千代田区内幸町 1-1-3)

ダム基礎岩盤の透水性は、ルジオン試験により評価され、 $1 \text{ルジオン} = 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ として透水係数に換算されることが多い。しかしながらこの透水係数は、試験時に岩盤内の流れが層流である場合に限り有効である。開口割れ目を有する節理性岩盤においては、ルジオン試験時に乱流が発生しやすくその際得られるルジオン値は層流状態での換算ルジオン値に比べ過小評価される傾向がある。本研究ではダム調整池からの浸透流に関する計測結果を踏まえ、実岩盤での各種試験・調査による透水性評価や浸透流解析による検証を通じて以上の問題点を具体的に明らかにし、層流状態での透水性評価について、種々試験法の有効性、適用性を示すものである。

Key Words : open-jointed rock, permeability, Lugeon test, laminar-turbulent flow, high viscous fluid flow test

1. はじめに

近年、ダム建設において堅硬で遮水性に優れた基礎岩盤を有するサイトが少なくなっており、岩石自体は堅硬であっても、節理が発達した岩盤であって、開口した割れ目を有し透水性が高い第四紀の火山岩類や第三紀の凝灰岩類をダムの基礎岩盤とすることも少なくない。

ダムの設計において、ダム本体の力学的安定性確保のために基礎岩盤の強度や変形性は重要な要求性能であるが、これと併せて特にフィルダムにおいてはその水理的安定性確保のため基礎岩盤の一定の遮水性も要求される。またダムは貯水を目的とすることから、ダム基礎のみならず調整池や貯水池の周辺岩盤がどの程度の透水性を有しているかを把握することは極めて重要なことである。この透水性評価如何で、湛水時のダムからの浸透流量予測が大きく左右され、基礎処理設計のみならずダムの経済的立地評価に与える影響は大きい。

岩盤の透水性評価については、「ルジオンテスト技術指針・同解説」¹⁾によりルジオンテスト(以下ルジオン試験)の実施要領が標準化されている。この試験方法はグラウチングに先立って注入箇所を評価する際に、簡便でしかも短時間に試験結果が得られるなど重要な手段であり、ダムの基礎岩盤の透水性評価に当たり一般的に用いられている。しかしながらこの試験により求められるルジオン値は、基準注入圧力 1MPa (10kgf/cm^2)における注入量を表すものであり、透水性の大小を示す定性的な指標に過ぎない。これが透水係数と関連付けら

れ定量的な指標となるためには、いくつかの前提条件を満足する必要がある。なかでもルジオン試験時にボーリング孔内から圧入された水が岩盤内を浸透する流れがダルシーの法則を満足すること(即ち層流であること)が必要である²⁾。

本論文で取り扱う開口割れ目を有した節理性岩盤の場合、試験ステージの中の限られた割れ目集中して水が圧入されることから、間隙が均質に分布するような岩盤と異なり、割れ目内の流速は大きくなり乱流となりやすい傾向がある。ルジオン試験を適用し岩盤の透水性を評価するにあたり以上の問題点はこれまでも多くの研究者によって指摘されてきた³⁾⁻¹²⁾。渡辺⁶⁾、山口⁹⁾⁻¹¹⁾、岩本¹²⁾、筆者¹³⁾らは以上の問題に対して、粘性の高い流体を用いた透水試験(以下「高粘性流体透水試験」)を実施することにより、割れ目内の流れを層流状態とし、その試験結果から透水性を評価することの有効性を論じている。

本研究は筆者らが関係したダムサイトにおいて、湛水時の浸透流量の実測値が、予測値を大きく上回るといった結果が得られたことからその原因を検討する中で節理性岩盤の透水性の評価に取り組んだものである。

本論文では、高粘性流体透水試験を行い、ルジオン試験によるルジオン値と上記試験から求められる層流状態でのルジオン値を比較考察し、ルジオン試験の問題点を明らかにする。併せて現地にて各種調査・試験ならびに解析を試み、層流条件下での透水性を評価するに当たり、これら調査・試験方法の有効性や妥当性を明らかにするものである。

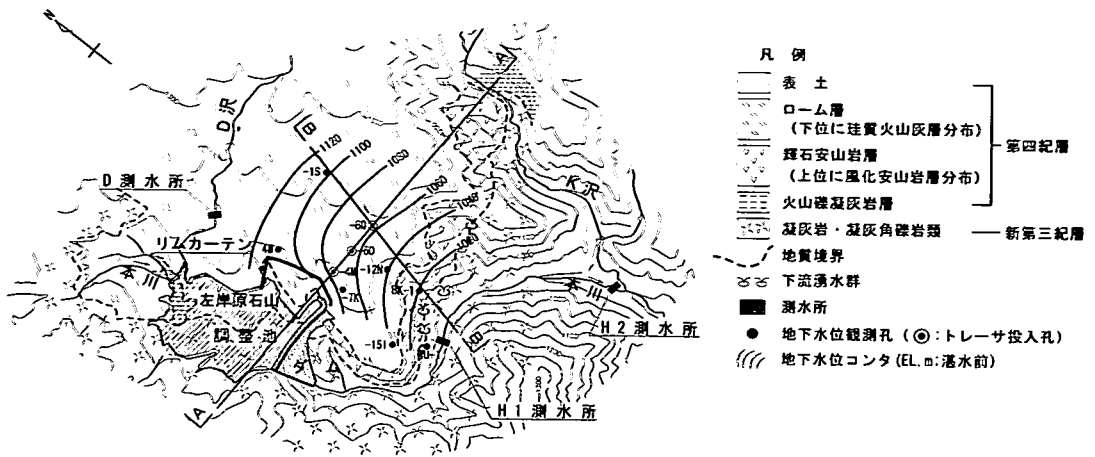


図-1 (1) 調整池周辺の地質及び地下水分布図

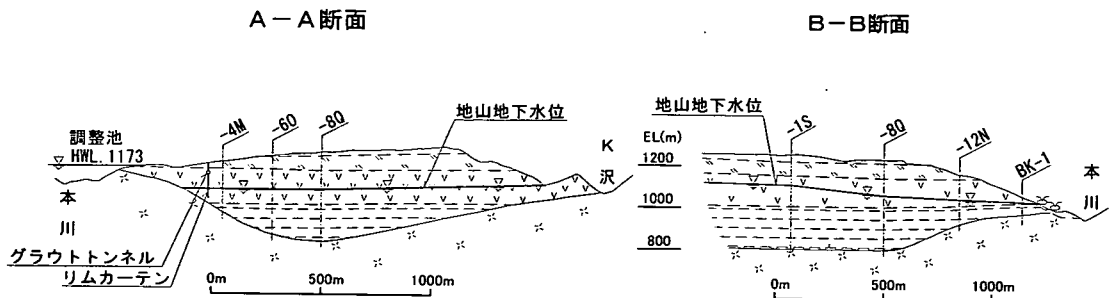


図-1 (2) 調整池左岸の地質断面図

2. ダムサイトの水理地質と浸透流量

(1) 水理地質概要

調整池周辺の地質は、図-1(1), (2)に示すとおりであり、調整池左岸一帯に第四紀火山噴出物が広く分布し水平構造を成している。

節理が発達した輝石安山岩層は、厚く水平に分布しその下位には比較的固結度の低い火山礫凝灰岩や第三紀の凝灰岩類が又上位にはローム層が分布している。輝石安山岩層の特徴として、その最上部には、多孔質な安山岩塊が混入した火山灰を基質とする地層（以下風化安山岩と称す）が10m程度の厚さで分布している。

輝石安山岩層を覆う形で分布するローム層の下位には珪質火山灰層（層厚は10m程度）が存在し、これらの透水性は、ボーリング孔内での定水位透水試験結果によれば、上部のローム層は平均 $3.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ （サンプル数 $n=16$ ）、珪質火山灰層は平均 $5.4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ （ $n=19$ ）であり、珪質火山灰層はローム層中の難透水層と形成している。節理が発達した輝石安山岩は後述するとおり高透

水性であるが、その下位に広く分布する火山礫凝灰岩の透水性はルジオン試験の結果、平均 4.2 ルジオン（以下 Lu と表示； $n=53$ ）と低くこれが左岸山体の不透水基盤を形成していると考えられる。

地山の地下水位は、左岸山体に配置した地下水位観測孔での実測の結果、図-1(1), (2)に示すとおり輝石安山岩層の下位に分布し左岸奥部から下流の湧水箇所に向かって流下していると判断される。

(2) 輝石安山岩の節理特性と透水性

輝石安山岩は、岩石自体は堅硬緻密であるが、溶岩の特徴である板状節理が著しく発達した岩盤である。その傾斜は水平に近く、開口割れ目はこれを交差する形で認められる。図-2に示す調整池左岸リムカーテン沿いのボーリング孔（5孔延長253m）にて実施したポアホールテレビ観察（以下「BTV」）の結果、開口割れ目幅の超過確率分布は、図-3に示すとおりであり、5mm以上の割れ目幅を有するものが全体の約5%、10mm以上のものが全体の約2%存在している。ステージ（5m；図中 st と表示）

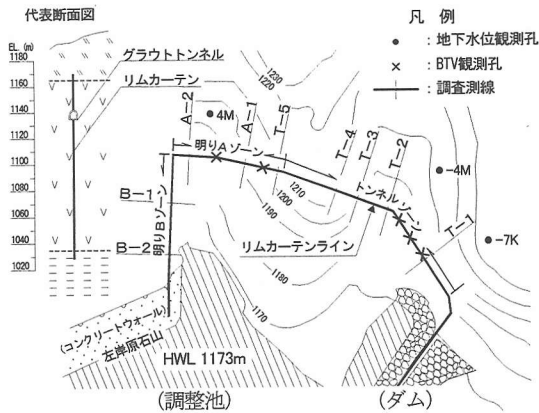


図-2 リムカーテンライン平面図

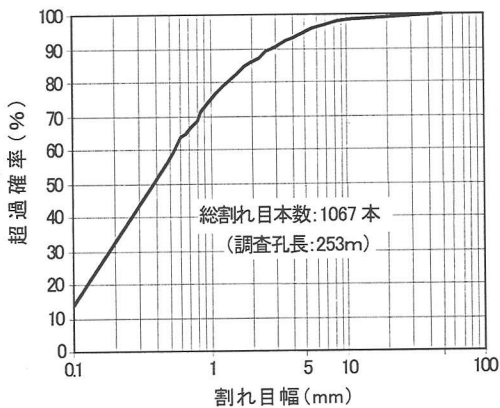


図-3 割れ目幅の超過確率図

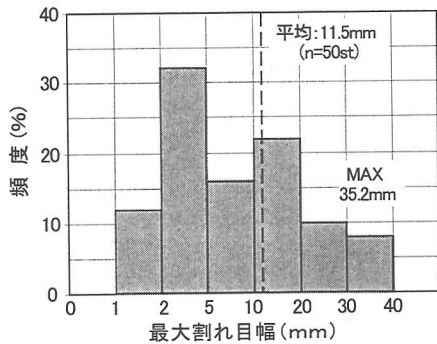


図-4 1ステージ (5m) 当たりの最大割れ目幅の頻度分布図

当りの開口割れ目本数は平均約 20本であり、この内、幅 5mm以上の割れ目がステージ当り平均 1本存在する。各ステージに存在する開口割れ目の中で、割れ目幅最大の割れ目を抽出し、その最大割れ目幅の頻度分布を示すと図-4のとおりであり、観測された最大割れ目幅は 35.2mm、最大割れ目幅の平均は 11.5mmである。また、1ステージ

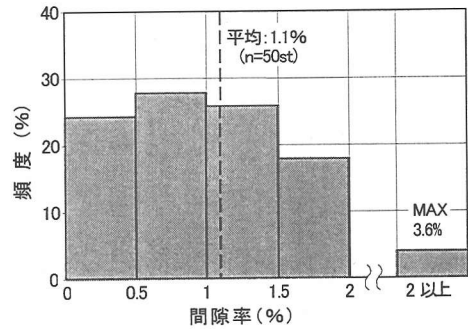


図-5 間隙率の頻度分布図

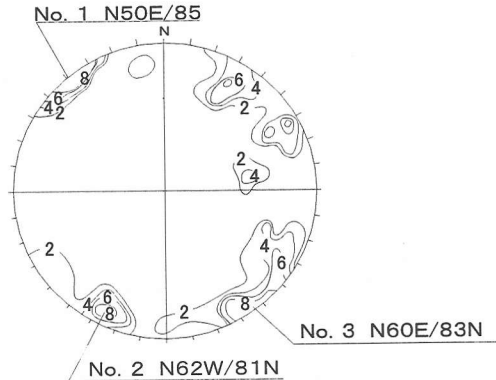


図-6 (1) シュミットネットによる開口割れ目の密度分布 (n=179; 図中の数字は%を示す) (グラウトトンネル内での開口割れ目)

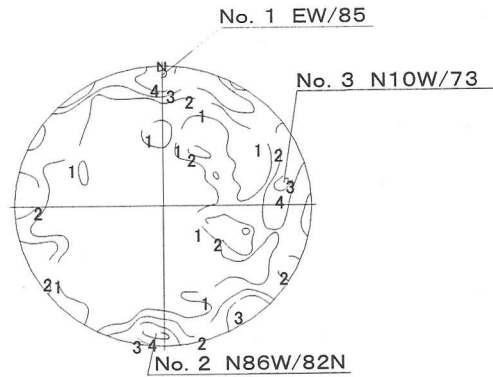


図-6 (2) シュミットネットによる開口割れ目の密度分布 (n=92; 図中の数字は%を示す) (左岸原石山他露頭での開口割れ目)

当たりの間隙率 (割れ目幅の総和/5m) は図-5に示すとおりであり、平均 1.1% (最大 3.6%) である。左岸側のグラウトトンネル内や左岸原石山他の露頭で観察された開口割れ目は、図-6(1), (2)に示すようにいずれにおいて鉛直に近い急傾斜のものが卓越し、走行においては卓越した方向が明瞭でない。

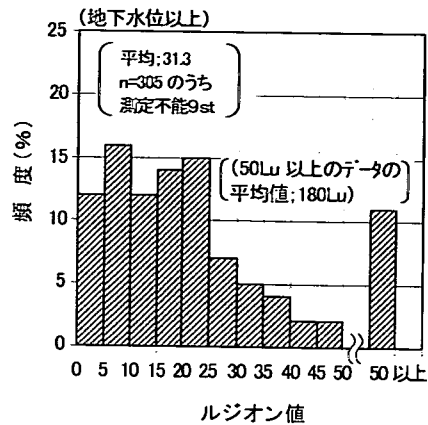
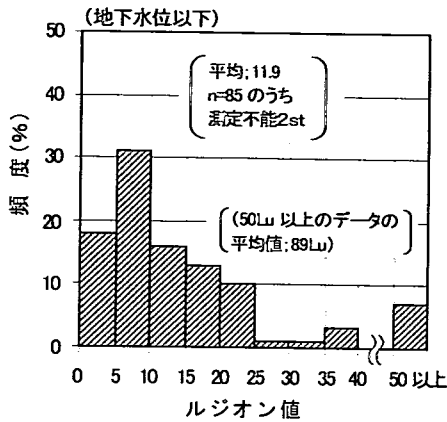


図-7 輝石安山岩のルジオン値の頻度分布図

以上のように透水性を支配する開口割れ目が密に発達し、これらに卓越する走行が認められない特徴を踏まえ、当地点の輝石安山岩層は広域的には開口割れ目の密なネットワークを有し、巨視的に見て面的な異方性は低いと考えられる。

同岩盤に対して左岸山体における調査孔(図-1(1))に示す地下水位観測孔と同じ)ならびに左岸リムカーテンライン沿いの注入孔(次に述べる止水対策工におけるグラウト注入孔)を利用してルジオン試験を実施した。試験結果は図-7に示すとおりであり、地下水位以下のステージでは、平均 11.9Lu (ただし試験時に昇圧できずルジオン値の算定が不可となる 2 ステージ(全ステージの 2.3%)を除く)であるのに対して、地下水位以上のステージでは、平均 31.3Lu (ルジオン値算出不可の 9 ステージ(全ステージの 2.7%)を除く)と高く、50Lu を超えるステージも 10%以上存在する。なおこの地下水位で区分化した輝石安山岩は、地層形成において時期を異にした溶岩流によるものと地質的には判断される。

(3) 浸透流量の予測と実績

a) 止水対策工

前述のとおり、調整池左岸に分布する輝石安山岩層は、下記の水理地質的な課題を有していることから、調整池左岸沿いに止水を目的としたリムカーテンを施工した¹⁴⁾。

- ・開口割れ目が密に認められ、透水性も極めて高い箇所が存在すること
- ・またこれに起因したものと考えられるが地下水位もダム左岸調整池近傍においてダム湛水位(満水位)に比べ 50m 以上低いこと

リムカーテンラインは図-2に示すとおりであり、ダム側 400m はグラウトトンネルを利用してまたそれに接続するリムカーテンは明りから施工した。代表断面は同図に示すとおりであり、施工範囲は輝石安山岩全層を対象

表-1 施工箇所別注入実績表

項目	単位	トンネル	明り Aゾーン	明り Bゾーン	合計
注入長	m	51,809	10,935	6,035	68,879
セメント注入量	ton	26,198	5,772	2,845	34,815
スラッジ注入量	m ³	9,411	2,181	1,350	12,942
単位注入量	Kg/m	642	677	639	646

に下位は難透水性の火山礫凝灰岩までまた上位については同じく難透水性の珪質火山灰層までとした。

グラウチングの注入仕様は、通常のセメントグラウチングを基本として、大量に注入されるステージにおいては骨材プラントから発生するスラッジやベントナイトを増量材、増粘材として活用した¹⁴⁾。改良目標を 5Lu として、単列のリムカーテンを形成した。

施工ライン箇所別の注入実績は表-1のとおりであり、いずれの箇所も 5Lu までの改良に平均注入量で 500kg/m を超える注入量を要した。特にスラッジ注入量も多い実績から分かるように大量に注入されるステージも少なくなかった。

b) 浸透流量予測

先に述べたように開口割れ目は密に分布し、その走行には卓越する傾向が無く巨視的に見て異方性は低いと考えられること、また透水層である輝石安山岩層や不透水基盤が水平構造を持って分布していることから、解析モデルとしては異方性を持たない連続体と考え、準三次元浸透流解析を適用することとした¹⁴⁾¹⁵⁾。地形ならびに水理地質構造の特徴を踏まえ、次のように解析条件を設定し、湛水時の浸透流量を予測解析した。

①解析領域と解析条件

解析領域は図-8に示すとおり調整池左岸流域を包含する範囲とし、北側は湛水末端からほぼ流域境界沿いに、また東側は河川沿いに境界を取り、下流側(流出側)は

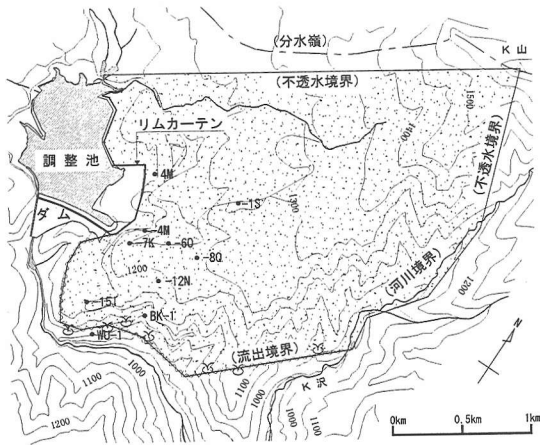


図-8 解析領域図

輝石安山岩層の下位に分布する火山礫凝灰岩の露頭線とした(図-1(1)参照)。

境界条件としては図-8に示すように、北側境界は水の出入りがない不透水境界とし、河川境界は河川の水位標高を設定した。流入部境界はリムカーテン沿いとし、湛水位を設定した。

地山の地下水涵養量については、流域の岩相が火山灰(パミス)に覆われる地域では基底比流量として $0.03 \sim 0.04 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ($2.5 \sim 3.5 \text{ mm}/\text{日}$) とされる⁸⁾ことから $3 \text{ mm}/\text{日}$ とした。

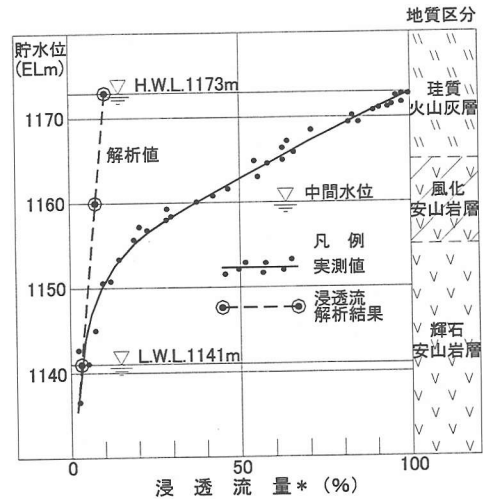
不透水基盤標高としては、難透水性の火山礫凝灰岩層の上盤とし、図-1(2)に示す地質構造を踏まえ地形に調和する形で設定した。

解析流量については図-8に示す流出境界ならびに河川境界での計算流量の総和とした。

なお解析領域に分布する輝石安山岩層の透水性に関しては局所的には開口割れ目の分布やその性状によって変化すると考えられるが、巨視的には2.(2)で述べたように異質性が少ないと考えられることをも踏まえ、全領域に平均的な透水性を一律に設定することとした。

②予測解析結果と湛水時の浸透流量実績

湛水により新たに冠水する領域は現状の地下水位以上の輝石安山岩層と考えられる。同箇所透水性は図-7から平均的には 30 Lu 程度(換算係数 $1 \text{ Lu} = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ として、 $3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 相当)であるが、高ルジオン値を示すステージや測定不可能な高透水性のステージが存在することから、湛水による浸透流量の予測に関しては安全側の評価となるように同層の透水性として、 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ を設定した。リムカーテンの透水性は改良目標の 5 Lu ($5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 相当)とし、また厚さはグラウトの注入量から推定して平均的に 10 m と設定して、湛水過程での浸透流量の増分を予測解析した。



* 浸透流量は、H.W.L.の浸透流量を100として各貯水レベルでの同量を相対表示

図-9 貯水位と浸透流量との関係

その結果、湛水に伴う浸透流量の増分は、中間水位(WL.1160m)で約 $3500 \text{ m}^3/\text{日}$ 、満水位(WL.1173m)で約 $5000 \text{ m}^3/\text{日}$ と予測された。

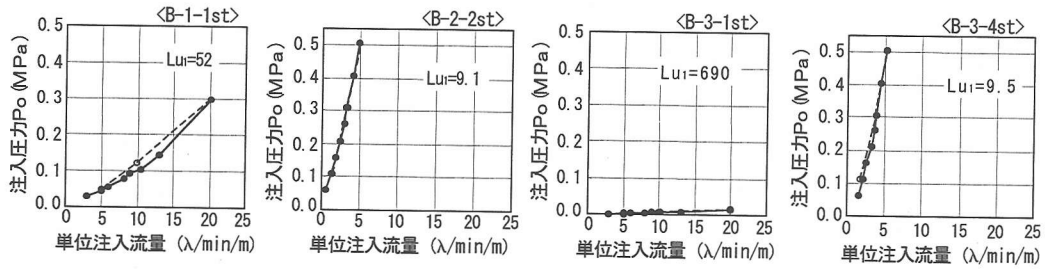
以上の予測を踏まえ湛水したところ、左岸を経由する浸透水量(貯水位一定時の日当たり貯水位低下量から算出)は図-9に示すようになり、中間水位手前まで一定の増大をし、それ以上の水位になると浸透流量は急増する傾向が認められた。満水位では予測値を大きく上回る結果となった。

以上の結果、輝石安山岩層特にこの上部の透水性は、解析で想定した値よりもさらに大きく、かつ中間水位付近以上の高標高部ではリムカーテンの仕上がりにも問題があることを示唆するものであると推察された。

このような結果を踏まえ、下記の調査・検討を進めることとした。

3. 輝石安山岩の透水性に関する調査試験

開口割れ目の発達した輝石安山岩の透水性については、先に述べたようにルジオン試験の結果、平均的には $10 \sim 30 \text{ Lu}$ (ただし測定不能ステージを除く)程度と評価された。一方、開口割れ目の発達した高透水性岩盤におけるルジオン試験においては、割れ目内の流速は大きくなり、水の流れに乱れが発生し流水抵抗の大きな乱流状態となり易い。このため同じ注入圧力でも層流状態より注入量は小さくなり、得られるルジオン値は層流状態でのルジオン値より小さく評価される傾向がある^{7)~10)}。また、湛



注) Lu_1 ; 試験注入圧の最高レベルでのP-Q/L関係を $P=1MPa$ に換算して求めた値

図-10 ルジオン値試験結果

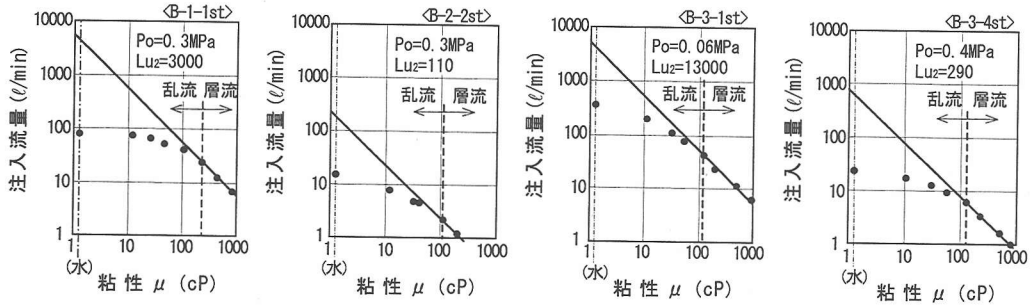


図-11 高粘性流体試験結果

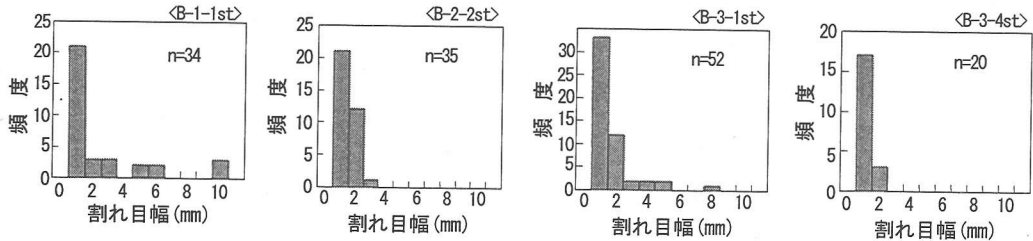


図-12 割れ目幅の頻度分布

水によって生じる輝石安山岩層の割れ目内の水の流れに関してそのレイノルズ数を式(1)により試算した。その結果想定されるレイノルズ数は高々数 10 程度以下であり、水の流れは層流状態であるものと考えられる。

$$Re = 2vt/\nu$$

$$= 2vtp/\mu = 5\sim 30 \quad (1)$$

ここで、 v は流速、 t は割れ目幅、 ν は水の動粘性係数、 ρ は密度、 μ は粘性係数である。 v はトレーサー調査の結果(後述する) $0.05\sim 0.1cm/s$ 、 t はBTV調査の結果平均 $1cm\sim$ 最大 $3cm$ 、また ν は $0.01cm^2/s$ と設定した。

層流状態での透水性を評価するため、先に述べた高粘性流体を用いた透水試験を行うこととし、併せて流域の水収支モデル解析やトレーサー調査により、輝石安山岩層の透水性をマクロ的に評価した。

(1) 高粘性流体透水試験による透水性の評価

高粘性流体透水試験については、渡辺⁹⁾によりその原理が提唱され、ピット式試験で試みられた。その後、松本・山口^{8)・10)}らによりボーリング孔内での試験方法として検討が進められてきたが、この試験の適用事例は今だ多くない^{9)・12)}。

原理的には、レイノルズ数が定義される式(1)の分母である流体の粘性を高めることにより、割れ目内の流況を乱流から層流にすることが可能となることから、高粘性流体を用いて層流状態での透水試験を行おうとするものである。

層流状態での透水係数はダルシーの法則に従い式(2)で定義される¹⁹⁾。

$$v = ki = K(\rho g/\mu)i \quad (2)$$

ここで、 v は見掛けの流速、 k は透水係数、 i は動水勾

配, g は重力加速度, ρ は流体の密度, μ : 流体の粘性係数, K は地盤の固有浸透係数 (長さの二乗の次元) である。

したがって, 高粘性流体を用いて層流状態での試験を行い地盤固有の値である固有浸透係数 K を求めれば, 水との粘性比による変換から透水係数 k を求めることができる。

試験は, グラウトトンネル内のボーリング孔 (B-1, B-2, B-3 の 3 孔; EL.1115~1135m の輝石安山岩対象) にて実施した。

高粘性流体透水試験に先立ち, まず水を使った通常のルジオン試験をその前段で実施した。その際得られた注入圧力 (P) - 単位注入流量 (Q/L : ステージ当たり注入流量 (Q) を注入区間長 L で割った値) 関係を例示すると図-10 に示すとおりである, $P-Q/L$ 関係は下に凸の形状, すなわち注入圧力の上昇に伴う流速の増加により, 流水抵抗の大きな乱流状態となり, 流量増分が抑制される傾向が認められる。この傾向は, 乱流状態における $P-Q/L$ 関係の特徴である。

次に同一ステージに対して高粘性流体透水試験を実施した。高粘性流体としてメチルセルロース系の材料 (ニュートン流体としての保証範囲は粘性 1000cp 以下¹⁰⁾) を用いた。注入圧力は, 先行実施するルジオン試験の際に負荷する最高注入圧力を目安に各ステージ毎に定めた (図-10 における事例では 0.3~0.5MPa 程度)。注入圧力を一定として, 水から始め順次粘性の高い流体を注入し, 各粘性段階ごとに安定した注入流量を把握し, 流体の粘性とそのときの注入流量の関係をプロットする。試験結果の例は図-11 に示すとおりである。

粘性と注入流量の関係については, ある一定の注入圧力 (P_0) のもとでは, 式 (2) に準じて次の式 (3) を満たす関係が層流状態において成立する。

$$Q_H = K' P_0 / \mu_H \quad (3)$$

ここで, Q_H は注入流量 (cm^3/min), K' は比例定数, μ_H は粘性係数 (cp), P_0 は一定の注入圧力 (kgf/cm^2) である。

図-11 の高粘性域で認められる両対数目盛り上での逆比例関係が, 上述の式 (3) の関係を表している。

各ステージ毎に式 (3) の関係が求まり, この関係式に水の粘性係数 (μ_w 約 1cp) を代入して, 層流状態での水の注入流量 (Q_{wL}) を求める。このようにして求めた Q_{wL} を次式 (4) に代入して, 注入圧力 1MPa ($10\text{kgf}/\text{cm}^2$) 相当での単位注入流量に換算し, 層流状態での換算ルジオン値 (以下層流換算ルジオン値; Lu_w) を求めることができる。

$$Lu_w = (10/P_0) \times (Q_{wL}/L) \quad (4)$$

ここで, L は試験区間長である。

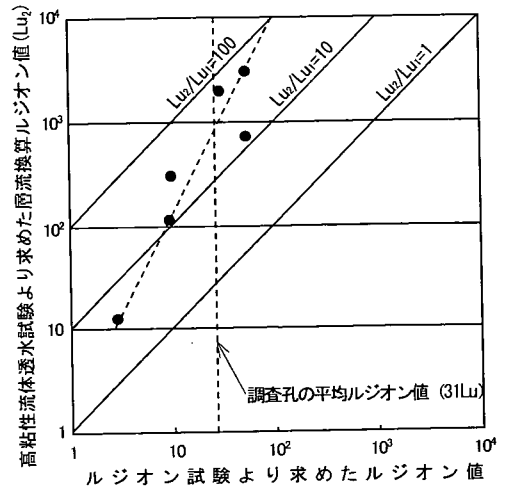


図-13 Lu_1 と Lu_2 との関係

なお, 試験ステージの割れ目性状を BTV で観測した結果は, 図-12 に示すとおりである。5mm~10mm 以上の大きな割れ目を有するステージでは層流換算ルジオン値が 1000Lu を超える大きな値となる傾向が見られ, 割れ目幅と透水性の相関が認められる。

ルジオン試験から求められたルジオン値 (Lu_1) と高粘性流体透水試験により求められた層流換算ルジオン値 (Lu_2) との関係は図-13 に示すとおりであり, 層流換算ルジオン値はルジオン試験で求められたルジオン値の 10~70 倍程度のかかなり大きな値を示した。高ルジオンになるほど, 両者の乖離度が大きくなる傾向が認められた。このことから, 通常のルジオン試験から平均 31Lu と評価していた輝石安山岩 (地下水位以上) の透水性は図-13 の関係より, 層流換算ルジオン値として 1000Lu 程度と想定され, 透水係数換算 ($1Lu = 1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ と設定) すると 10^{-2}cm/s 程度の透水性であると推察される。

また, 図-11 の試験結果に関して, 粘性が低くなると粘性と注入流量の関係は, 逆比例関係からはずれ粘性の低下とともにその乖離は大きくなる。即ち粘性が低くなると割れ目幅の大きな割れ目から順次小さな割れ目まで割れ目内の流れが乱流に遷移してゆくためと考えられる。そこで図-11 において層流から乱流に遷移する点は, 試験ステージ内における最大割れ目内の流れがまず層流から乱流に移行する臨界条件と考えられる。

ステージ内のある割れ目 (割れ目幅; t) 内を流れる流量 q_i は, ダルシーの法則に基づき次式で表される²⁰⁾。

$$q_i = 2\pi r_0 t \times k_i \\ = 2\pi r_0 t \times (gt_i^2 / 12\nu) i = ct_i^3 \quad (5)$$

ここで, r_0 はボーリング孔半径, $c = \pi r_0 g i / 6 \nu$ である。

表-2 限界レイノルズ数と層流限界注入圧力

試験箇所	ルジオン値		Recr	層流限界注入圧力	
	Lu ₁	Lu ₂		P ₀ (Pa) [μv(cp)]	P _{wc} (Pa) [μv(cp)]
B-1-1st	52.0	3000	5.1	0.29 [227]	9.2E-06 [1.27]
B-2-2st	9.1	110	3.0	0.31 [109]	4.3E-05 [1.27]
B-2-3st	2.8	12	12.1	0.31 [11.1]	4.1E-03 [1.27]
B-3-1st	690.0	13000	27.7	0.06 [119]	7.3E-06 [1.27]
B-3-2st	29.0	1900	4.9	0.21 [218]	7.3E-06 [1.27]
B-3-3st	50.0	700	4.1	0.21 [122]	2.3E-05 [1.27]
B-3-4st	9.5	290	4.8	0.41 [126]	4.3E-05 [1.27]

よってステージ内の総注入量Qは次式であらわされる。

$$Q = \sum q_i = c \sum t_i^3 \quad (6)$$

割れ目幅最大 (t_{MAX}) の割れ目内を流れる流量 q (t_{MAX}) はよって次式で算出される。

$$q(t_{MAX}) = Q \times (t_{MAX}^3 / \sum t_i^3) \quad (7)$$

先の高粘性流体透水試験における層流から乱流に移行する臨界点 (Q_{cr}, v_{cr}) における限界レイノルズ数 (Recr) は次のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{Recr} &= 2t_{MAX}V(t_{MAX}) / v_{cr} \\ &= (2t_{MAX} / v_{cr}) \times (q(t_{MAX}) / 2\pi r_0 t_{MAX}) \\ &= q(t_{MAX}) / \pi r_0 v_{cr} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、V(t_{MAX})は割れ目幅最大の割れ目内での流速、v_{cr}は臨界点における動粘性係数 (μ/ρ) である。

各ステージごとにBTVの結果から得られた割れ目幅分布に基づき式(7)により最大割れ目幅内の流量q(t_{MAX})を求め、これを式(8)に代入して限界レイノルズ数Recrを算出する。このようにして得られたRecrは表-2に示す通りであり、最大でも30程度である。これは平滑な平行平板での標準的な値である2000程度に比べ相当小さい。これは割れ目内の流れが割れ目内の凹凸や分岐・合流や局所閉塞などの複雑な形状により乱流に遷移しやすいためと考えられる^{20,22}。

高粘性流体透水試験の結果得られた以上の限界レイノルズ数は、水においても層流から乱流に遷移する同じ支配条件である。そこで最大割れ目内を流れる水の流速が速くなり上述の限界レイノルズ数となる注入圧力(以下層流限界注入圧力と称する)を求めることとする。割れ目内の流速と流量は比例するので、式(3)の関係から、次式が得られる。

$$v = K^n \frac{1}{\mu} P_0 \quad (9)$$

ここで、Kⁿは比例定数、P₀は高粘性流体透水試験時における一定の注入圧力である。

層流・乱流の臨界点でも、式(9)が成り立つことから、式(10)、(11)が成り立つ。

$$V_{Hcr} = K^n \frac{1}{\mu_{Hcr}} P_0 \quad (10)$$

$$V_{wcr} = K^n \frac{1}{\mu_w} P_{wc} \quad (11)$$

ここで、V_{Hcr}は高粘性流体透水試験時の乱流から層流への遷移時の流速、V_{wcr}はルジオン試験時の層流限界注入圧力時の流速、μ_{Hcr}は高粘性流体透水試験時の乱流から層流への遷移時の粘度、μ_wは水の粘性係数、P_{wc}は水を用いた場合の層流限界注入圧力である。

一方、式(12)、(13)で表される両者の臨界点でのレイノルズ数が等しいとすると、式(14)が得られる。

$$\text{Recr}(H) = \frac{2\rho_H V_{Hcr} t}{\mu_{Hcr}} \quad (12)$$

$$\text{Recr}(W) = \frac{2\rho_W V_{wcr} t}{\mu_w} \quad (13)$$

ここで、Recr(H)は高粘性流体を用いた場合の限界レイノルズ数、Recr(W)は水を用いた場合の限界レイノルズ数、tは割れ目幅、ρ_Hは高粘性流体の密度、ρ_wは水の密度である。

$$\frac{\rho_H V_{Hcr}}{\mu_{Hcr}} = \frac{\rho_W V_{wcr}}{\mu_w} \quad (14)$$

式(14)の流速に式(10)、(11)を代入すると、P_{wc}は次式のとおりとなる。

$$P_{wc} = \left(\frac{\mu_w}{\mu_{Hcr}} \right)^2 \frac{\rho_H}{\rho_W} P_0 \quad (15)$$

使用した高粘性流体の密度ρ_Hは近似的に水の密度ρ_wと等しいことから、P_{wc}は式(16)で近似できる。

$$P_{wc} \approx \left(\frac{\mu_w}{\mu_{Hcr}} \right)^2 P_0 \quad (16)$$

式(16)より各ステージの層流限界注入圧力を算出した結果は、表-2に示す通りである。層流状態でのルジオン値が10程度であっても、層流限界圧力は0.005MPa(0.05kgf/cm²)程度と小さく、水によりルジオン試験を行い層流条件を得ようとする事は、圧力計の管理レベル0.01MPa(0.1kgf/cm²)からも困難と考えられる。

よって当該地点のような開口割れ目を有する岩盤においては、通常の水によるルジオン試験ではいかに注入圧

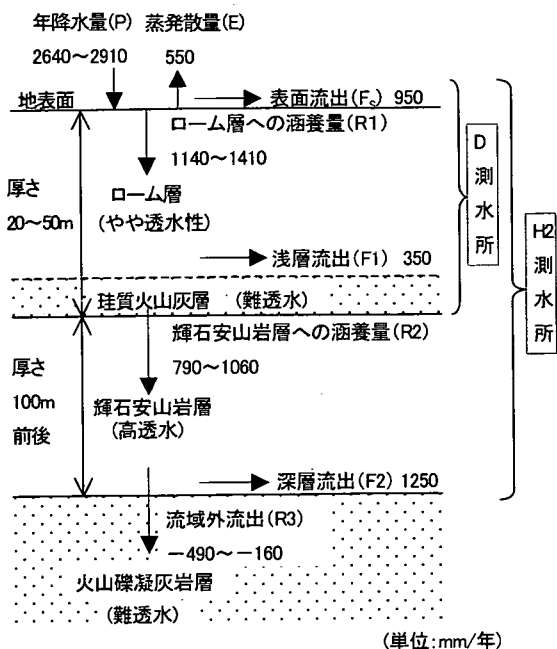


図-14 流域の水収支モデル

力を低く抑えても、層流状態でのルジオン値を求めることは実際上不可能であることが明らかとなった。

(2) 流域の水収支モデルから推定される透水性

a) 水収支モデル

前述した水理地質構造を踏まえ水収支モデルを図-14のように設定した。

図中に示す記号に関して、Pは年間降水量、Eは蒸発散量、Fsは表面流出量、F1は浅層(ローム層)からの流出量、F2は深層(輝石安山岩層)からの流出量、R1はローム層への涵養量、R2は輝石安山岩層への涵養量、R3は流域外流出(マイナスは他流域からの流入)である。

地下水涵養域での水収支は一般的に次式のように表現される²⁹⁾。

$$P - F_s - R - E = \Delta S \quad (17)$$

ここで、Rは地下水涵養量、 ΔS は地表水ならびに地下水の貯留量変化である。

ただし年単位で定常的な水収支を検討する場合、 $\Delta S = 0$ と考えられる²⁹⁾。

よって当地点における年単位での水収支の基本式は次のとおりとなる。

$$\text{地表面: } P = E + F_s + R_1$$

$$\text{ローム層内: } R_1 = F_1 + R_2$$

$$\text{輝石安山岩層内: } R_2 = F_2 + R_3$$

以上の水収支式に基づき、水文・気象記録を用いてロ

ーム層ならびに輝石安山岩層からの流出量またそれらの層への地下水涵養量を求めることとした。

必要な水文・気象記録はダムサイトにて観測記録した5年間(S53~S57)のデータを用いた¹⁴⁾。

b) 降水量と蒸発散量

・年降水量 (P)

年間降雨量 (平均) = 1280mm (4月~11月)

年間降雪量 (平均) = 13.6m (12月~3月)

雪の密度は、ダム地点での実測結果、0.10~0.12の範囲とした。

よって年降水量 (P) は 2640~2910mm/年となる。

・蒸発散量 (E)

Thornthwaite 法により月平均気温データに基づき、蒸発散量を計算で求めた。

その結果、蒸発散量 (E) は 550 mm/年となる。

この値は同法に基づいて全国的に示された可能蒸発散量の分布による値や上越の近傍地点データとも概ね一致する¹⁹⁾。

c) 流出量

流出量については、図-1(1)に示すとおり左岸流域に設けられた上流域の D 測水所、ダム下流域の H1 測水所ならびに H2 測水所の流量資料に基づき求めた。

D 測水所はローム層下位にある難透水性の珪質火山灰層を基礎として設置されており、水収支モデルにおける表面流出 (Fs) とローム層からの浅層流出 (F1) が観測されることとなる。また H1, H2 測水所はいずれも輝石安山岩下位の難透水基盤である凝灰岩類をその基礎として設置されており、D 測水所で捕捉される流量に加えて輝石安山岩層からの深層流出量 (F2) をも観測されることとなる。

各測水所の流量資料より、D 測水所、H2 測水所の年流出量(5年平均)はそれぞれ 1300 mm/年 (0.041m³/s/km²)、2500mm/年 (0.081m³/s/km²) である。前述した各測水所の流量観測特性から、Fs+F1=1300 mm/年、Fs+F1+F2=2550 mm/年となる。よって F2(輝石安山岩層からの深層流出量)は 1250mm/年 (0.040m³/s/km²) となる。

D 測水所の基底流出量(35日流量(渇水流量相当)とする)は 350mm/年 (0.011m³/s/km²) であり、これはローム層からの流出量 (F1) と考えられる。上述したとおり Fs+F1=1300mm/年であることから、表面流出量 (Fs) は 950mm/年となる。

d) 地下水涵養量

以上の結果を先の水収支の基本式に代入すると下記の結果を得る。

ローム層への涵養量 (R1) = 1140~1410 mm/年

輝石安山岩層への涵養量 (R2) = 790~1060 mm/年

流域外流出 (R3) = -460~-190 mm/年 (即ち逆に流域外から流入があるとの結果)

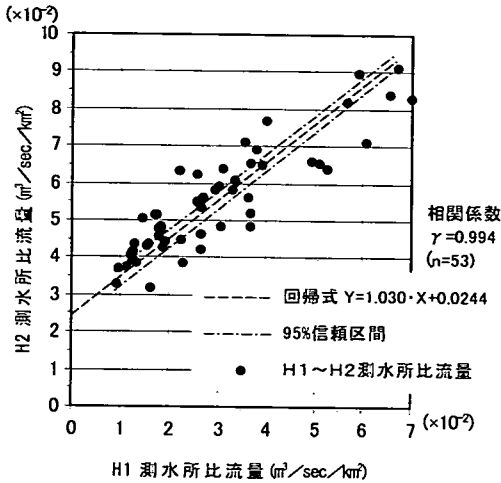


図-15 H1, H2 測水所比流量相関図

これらの結果を纏めると、図-14 の水収支モデルに示すとおりとなる。輝石安山岩層からの流出量 (F2) は比流量で $0.040\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ となり、これを一日あたりに換算すると約 $18000\text{m}^3/\text{日}$ (左岸流域面積; 5.32km^2) となる。なお図-15 に H1 測水所と H2 測水所の比流量相関図を示すが、ダム下流域の湧水群が H1 測水所の下流で H2 測水所までの区間 (図-1(1) 参照) にほとんどが集中していることから、この相関図における比流量の差分は輝石安山岩層からの流出分とみなせる。この比流量の差分 ($0.025\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) を日流量に換算 (H2 測水所の流域面積; 10.08km^2) すると約 $20000\text{m}^3/\text{日}$ となり、水収支から求めた流出量とほぼ一致する。

e) 輝石安山岩層の透水性評価

左岸山体に分布する輝石安山岩層総体の平均的な透水係数 (Ka) は次式で表される。

$$K_a = Q / A I \quad (18)$$

ここで、Q は流量 (流出量)、A は通水断面積、I は動水勾配である。

流量は先の水収支モデルから算出された基底流出量 (比流量) $0.040\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ に左岸の流域面積を乗じて $0.21\text{m}^3/\text{s}$ とする。

動水勾配は、左岸山体の地下水観測孔 (-60) から下流湧水群までの平均動水勾配より $I=0.1$ とする。通水断面積は、下流湧水群を囲む分水嶺の間隔 500m から下流湧水が散在する最大範囲約 1500m にあるものとし、また地下水水深は動水勾配の基点とした観測孔 (-60) での水深 40m を平均的な値として通水断面積を求めることとした。

以上の仮定のもとに、左岸山体に分布する輝石安山岩層の平均的な透水係数は、式 (18) により $k=3.5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ と推定された。

表-3 トレーサー調査結果

投入孔	孔内水 (EL. m)	湧出点標 (EL. m)	距離 (m)	動水勾配	初期到達時間 (日)	ピーク到達時間 (日)
-4M	1,068	980	800	0.11	13	24
-60	1,063	980	750	0.11	12	23
-8Q	1,064	980	740	0.11	12	22

表-4 輝石安山岩層の透水係数

実流速	透水係数 (cm/sec)	
	n=1%	n=3%
$v=0.04\text{cm}/\text{sec}$	3.6×10^3	1.1×10^2
$v=0.07\text{cm}/\text{sec}$	6.4×10^3	1.9×10^2

表-5 輝石安山岩層の透水性評価の結果

検討方法	結果
高粘性流体透水試験による評価	31Lu (乱流) →1,000Lu (層流)
流域の水収支モデルによる評価	400~1,000Lu
トレーサー調査による評価	400~2,000Lu

(1Lu = $1 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$ と設定)

(3) 地下水流速測定から推定される透水性

左岸山体の地下水観測孔 (-4M, -60, -8Q: 図-1(1) 参照) の輝石安山岩層中の地下水にトレーサーを投入し、下流湧水群への到達時間に基づき透水係数を算出した。トレーサーとしては、蛍光染料であるフローレスセンナトリウム (Fl - Na) やローダミン B (Rh - B)、また塩化カリウム (K Cl)、塩化マグネシウム (Mg Cl₂)、塩化リチウム (Li Cl) などを用いたが、流下過程での吸着や沈降が少なく検出が容易なフローレスセンナトリウムが当サイトにおいては最も有効と判断され、これを用いた調査を実施した。トレーサー投入後、流出が確認された湧水箇所では除々に検出濃度は高くなり 10 日程度の後ピークを迎え濃度は低下してゆくパターンであった。

結果は表-3 に示すとおりであり、これらから求められる実流速は、 $0.04\text{cm}/\text{s}$ (初期到達時間に基づき算出) ならびに $0.07\text{cm}/\text{s}$ (ピーク到達時間に基づき算出) となる。

輝石安山岩層の間隙率 (n) は BTV による調査結果 (図-5) から 1% (平均値) ~ 3% (最大値) と設定した。

この結果、輝石安山岩層の透水性は、表-4 に示すとおりとなり、トレーサーが流下した範囲の平均的な値として $10^{-3} \sim 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ オーダーと評価される。

以上、高粘性流体透水試験ならびに水収支モデル解析やトレーサー調査に基づき評価した輝石安山岩層の層流状態での透水性は、表-5 に示すとおり総括される。

当地点のような開口割れ目を有する節理性岩盤の場合、水を用いたルジオン試験では試験時に割れ目内の流れが容易に乱流になることが明らかとなり、このため得られ

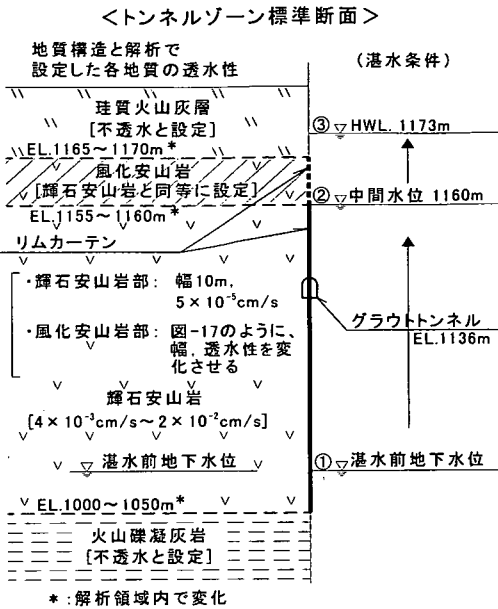


図-16 解析モデル
(解析ステップでの湛水位と地層の関係)

たルジオン値から換算 (換算係数 $1Lu=1\times 10^{-5}cm/s$) される透水係数は過少に評価されることが判明した。ルジオン試験の結果、輝石安山岩層の透水性は $30Lu$ 程度と評価されたが、同層に対して高粘性流体を用いて層流状態で試験をすれば $1000Lu$ 程度の値になっていた可能性があることが明らかとなった。

マクロ的に把握した水収支モデル解析やトレーサー調査は、いずれも現状の地下水流を前提に検討をしており、式 (1) で評価したとおり、層流状態での流れを基本的に透水性を評価しているものと考えられる。その結果マクロ的にみて輝石安山岩層は $10^{-2}\sim 10^{-3}cm/s$ のオーダーにあることが判明した。これは個別ステージについて実施した高粘性流体透水試験から得られた透水性とも整合する値の範囲である。

4. 浸透流解析による透水性の同定

湛水過程における浸透流量の測定結果や前述の輝石安山岩層の透水性の検討結果を踏まえ、2 (3). b) で用いた解析モデルに対して下記の条件を見直し、準三次元浸透流解析を実施した。

- ・輝石安山岩層の透水性は、解析対象領域全体の平均的な値として一律、 $4\times 10^{-3}cm/s\sim 2\times 10^{-2}cm/s$ ($400\sim 2000Lu$ 相当) の範囲で設定する。
- ・輝石安山岩層への地下水涵養量は、同層からの深層流出量相当とし水収支解析結果を踏まえ $3.5mm/日$ とする

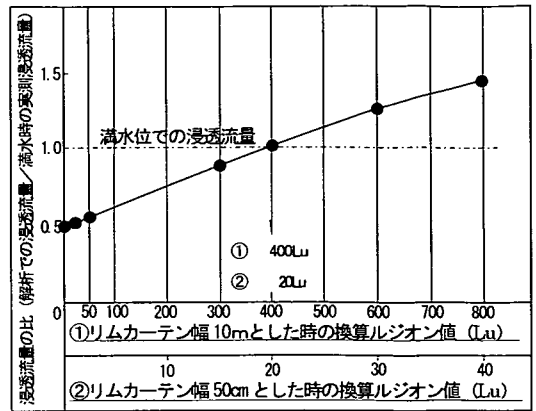


図-17 風化安山岩のグラウチング改良度と浸透流量との関係

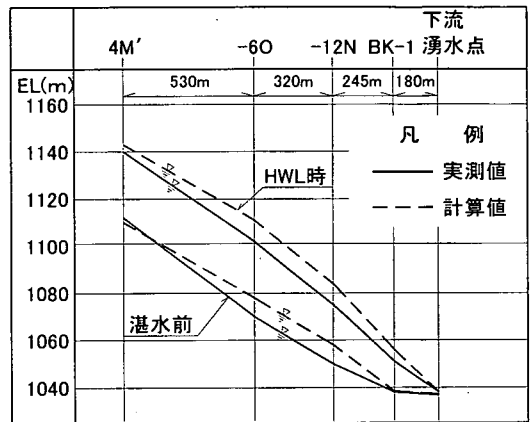


図-18 地下水位分布の比較

- ・湛水過程で浸透流量が急増した標高以上におけるリムカーテンの厚さ、透水性を種々変化させる

解析において湛水過程での浸透流量や地下水位の観測結果と照合しながら岩盤やグラウトカーテンの透水性を同定することとした。湛水過程での解析を進めるに当たり、次の3ステップを選び、順次解析値を実測値と照合させながら解析条件を同定してゆくこととした。

各ステップでの湛水位と地質の関係は図-16 に示すとおりである。なお、同図には解析で設定した各地質の透水性を表示した。

①湛水前の解析

下流湧水群における実測の湧出量 (約 $20000m^3/日$) ならびに実測地下水位と照合するように、輝石安山岩 (地下水位以下) の透水性を同定する。

②中間水位での解析

図-16 に示すとおり、この水位になると地下水位以上の輝石安山岩層がほぼ全面浸透流の対象岩盤となる。このステップでの解析は、この湛水位での浸透流量の増分

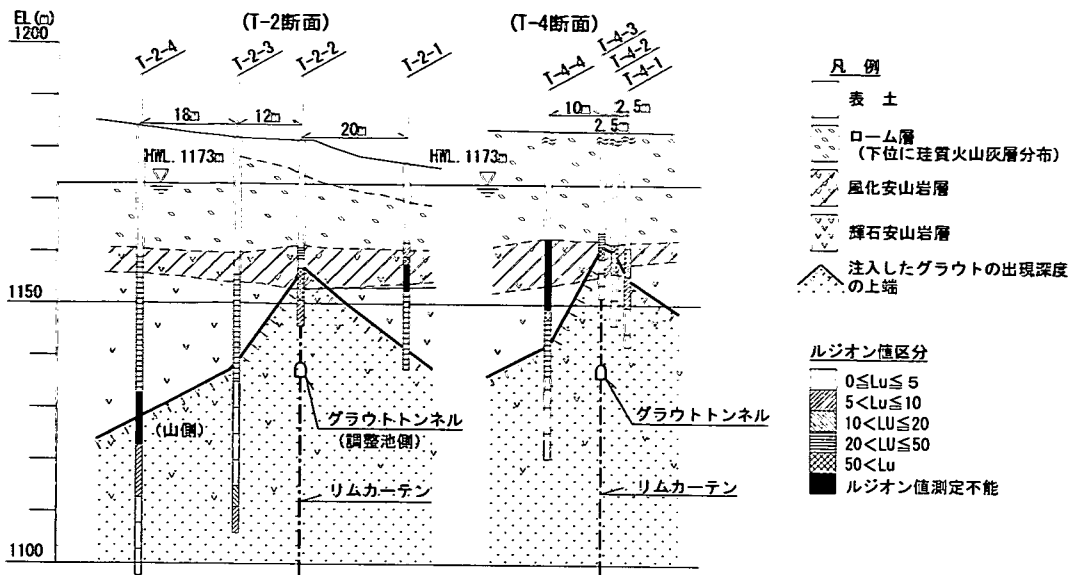


図-19 リムグラウトカーテンの調査結果

(図-9における浸透流量が急増する前段階での増分)と地下水位の実測値と照合するように、輝石安山岩層(地下水位以上)の透水性を同定する。

③満水位での解析

中間水位以上になると浸透流量は急増したことから、特にこのステップでの解析は、図-16に示すように主として輝石安山岩層上部、特に風化安山岩層におけるリムカーテンの厚さや透水性をパラメーターとして浸透流量の増分(貯水位と浸透流量の関係図(図-9)参照)を再現させるように解析した。

以上の解析結果、①により地下水位以下の輝石安山岩は $6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ (600Lu相当)、また②により地下水位以上の輝石安山岩層は $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ (1000Lu相当)と同定された。③については、図-17に示すようにリムカーテンの仕上がり品質(厚さ×改良された透水性)を種々変化させ、解析での浸透流量を求め、実測の浸透流量と比較照合した。その結果、風化安山岩層に対するグラウチングによるリムカーテンの仕上がり品質は、厚さ10mとすれば透水性は400Lu($4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)、また厚さ0.5mとすれば透水性は20Lu($2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)と評価された。

また、岩盤ならびにリムカーテンの透水性を同定する過程で、解析により求められた地下水位の分布(図-1(i)に示す地下水位観測孔-4M~-6O~-12N~-BK-1に至る測線沿い)は図-18に示すとおりであり、概ね実測地下水位と一致する。

以上の解析結果、輝石安山岩層の透水性は600~1000Lu相当と評価され、これは先に各種調査・試験で推察した値に近い。これらから今回の湛水により浸透流が及ぶ範囲の平均的な透水係数は $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度である

と判断される。

また同時に、実測データに基づく浸透流解析による同定の結果との照合により、水収支モデル解析やトレーサー調査から求めたマクロ的な透水性は概ね妥当であると判断され、層流状態での透水性を把握する手段として有効であることを示すものと考えられる。

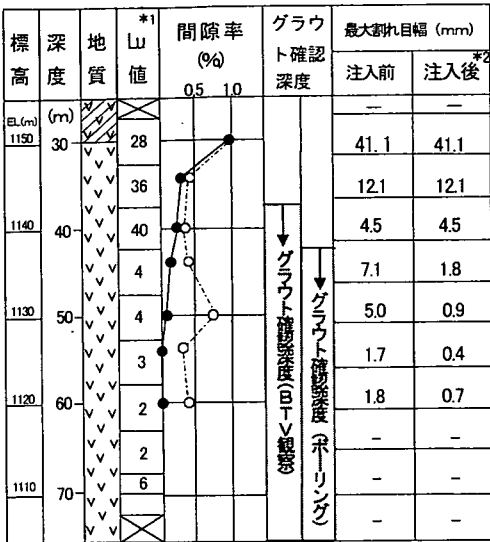
今回の解析で判明したもうひとつ重要なことは、中間水位付近より上位に分布する輝石安山岩層上部や風化安山岩層に施工されたリムカーテンの仕上がり品質が不十分であるとの示唆が得られたことである。

5. リムカーテンの品質確認調査

前節で述べたように湛水過程における浸透流量は中間水位以上になると急増する傾向が認められ、この原因について浸透流解析で検討した結果、中間水位以上のリムカーテンの仕上がり品質(カーテンの厚さと透水性の改良度)に問題がある可能性が示唆された。そこでこの解析結果を確認するために現地にリムカーテンの仕上がり状況について調査した。

(1) リムカーテンの仕上がり状況調査

図-2に示すリムカーテンライン沿いの数断面に対し、図-19に示すようにリムカーテンを横断する調査孔を配置し、2(3).a)で述べたセメントグラウチングによるリムカーテンの仕上がり状況について各種の調査・試験を行った。



*1: 注入後のルジオン値

*2: グラウトにより充填されていない開口割れ目対象

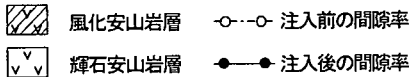


図-20 グラウト充填状況調査結果
 <T-2断面のT-2-3孔>

a) 注入されたグラウトの分布状況

ボーリングコアの詳細調査により、輝石安山岩の開口割れ目内に注入されたグラウトの充填状況ならびに風化安山岩層内に注入されたグラウトの分布状況の確認を行った。調査結果は図-19に示すとおりであり、輝石安山岩層の割れ目内や風化安山岩層中に認められるグラウトの上限標高は、カーテンラインから離れるほど低くなっている。即ちリムカーテンの改良幅は深部で厚く、浅部で薄い仕上がりになっていることが確認された。また、ルジオン値の分布についても、グラウトの充填が認められないステージでは大部分が 20Lu 以上の高い透水性を示すのに対し、グラウトが認められるステージでは概ね 5~10Lu 以下となっており、グラウティングによるグラウトの充填が透水性の改良につながっている事を示している。

またBTVによるボーリング孔内観察により輝石安山岩層の開口割れ目内へのグラウトの充填状況を調査した結果は図-20に示す通りである。BTVで確認されたグラウトの上限深度とボーリングコアで確認されたグラウトの上限深度はほぼ一致しており、これ以上のステージではステージ内の最大割れ目はグラウトにより充填されていないこと、またグラウトによる充填が認められるステージでは概ね 5Lu 以下に改良されていることが明瞭に確認された。

以上の調査の結果、リムカーテンは輝石安山岩層上部

から風化安山岩層にかけて上位になるほどその改良幅は薄くなっていることが確認された。

b) リムカーテンの仕上がり品質評価

輝石安山岩層上部ならびに風化安山岩層に施工されたリムカーテンの仕上がり品質（厚さと透水性）を確認するため、リムカーテンを挟むボーリング孔（図-19に示す調査ボーリング孔）利用してトレーサー調査を実施した。試験実施した時の貯水位はEL. 1166.2m であり、風化安山岩層が冠水する水位レベルであった。

調査結果は表-6に示すとおりである。まず、図-19に示すリムカーテン山側の T-2-3 孔に投入しさらに山側に位置する -4M 孔で採水するトレーサー調査を実施した。この調査では輝石安山岩層のみが浸透経路となるが、この結果、輝石安山岩層の透水性は $4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度と評価され、3. (3) で述べた調査の結果よりやや高い側の値となった。次にリムカーテンを挟んでトレーサーを調整池側の T-2-1 孔に投入し、リムカーテンを通過して山側の T-2-3 孔や T-2-4 孔で採水した。調査結果に関して、表-7の下端に示すような方法でリムカーテンの透水性や厚さをもとめることとした。この結果、リムカーテンの厚さを 0.5m とすればリムカーテンの透水性は $2 \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ と評価される。この値は先に浸透流解析によって推察された中間水位以上のリムカーテンの仕上がり品質（リムカーテンの厚さ 0.5m とすればその透水性は $2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ）とほぼ同等であり、解析の妥当性を示すものと考えられる。

このことから湛水過程において、中間水位以上になると浸透流量が急増する要因は輝石安山岩層上部から風化安山岩層にかけてリムカーテンの仕上がり不十分であったと結論された。

c) 調査結果のまとめ

リムカーテンの改良範囲が下部ほど厚くなっている原因として、図-21に示すように、注入されたグラウトは、輝石安山岩層に卓越する急傾斜で開口した割れ目を經由して主として下向きに流下したことによるものと想定される。

輝石安山岩層の上部に分布する風化安山岩層は、多孔質の安山岩塊と火山灰の基質から構成される軟質な火山角礫岩であり、輝石安山岩層内で生じるように大量のグラウトが自重で流れ落ちるとは考えにくい。しかしながら、グラウティング時の水押しもしくはグラウト注入により、軟質な基質部に破壊が生じて輝石安山岩層に至る水みちが通じ、注入されたグラウトはこの経路沿いに脈状に注入され、風化安山岩層下部の輝石安山岩の開口割れ目内を流下したものと想定された。このように風化安山岩層に注入されたグラウトは大部分が輝石安山岩層内の開口割れ目を通じて深部に広がるため、グラウト孔間隔を密にして大量のグラウト注入量を要しても透水性の収束は

表-6 トレーサー調査結果

ボーリング孔		孔間距離	水位差 (m)	動水勾配	検出時間 (時間)	流速 (cm/sec)	平均透水係数 (cm/sec)	備考
投入孔	採水孔							
T-2-3	-4M	90	28.59	0.32	2	1.3	4.1×10^{-2}	輝石安山岩の透水性
T-2-1	T-2-3	32	18.25	0.57	2	5.1×10^{-1}	8.9×10^{-3}	グラウトカーテンラインをはさむ
T-2-1	T-2-4	50	19.89	0.40	2	7.5×10^{-1}	1.9×10^{-2}	

注) 投入孔、採水孔の位置は図-19を参照； -4M孔はグラウトカーテンから山側102m離れ

表-7 トレーサー調査結果から推定されるグラウトカーテンの透水性

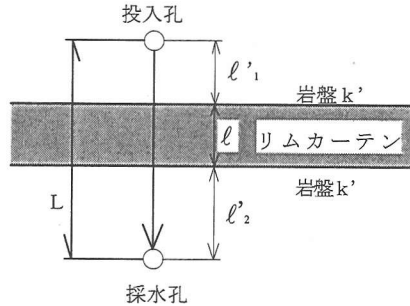
投入孔	採水孔	L (m)	K (cm/s)	ℓ' (m)	k' (cm/s)	ℓ (m)	k (cm/s)
T-2-1	T-2-3	32	8.9×10^{-3}	31.5	4.1×10^{-2}	0.5	1.8×10^{-1}
T-2-1	T-2-4	50	1.9×10^{-2}	49.5	4.1×10^{-2}	〃	3.5×10^{-1}

グラウトカーテンの透水係数の推定方法

$$\frac{L}{K} = \frac{\ell}{k} + \frac{\ell'}{k'}$$

$$k = \frac{\ell}{\frac{L}{K} - \frac{\ell'}{k'}}$$

- K : 投入孔～採水孔の平均透水係数
- k : カーテンの透水係数
- k' : 岩盤の透水性
- L : 投入孔～採水孔の浸透距離 ($\ell + \ell'$)
- ℓ : カーテン幅
- ℓ' : 岩盤の浸透距離 ($\ell'_1 + \ell'_2$)



6. 結論

以上の検討を通じて明らかになった知見は次のとおりである。

(1) 高粘性流体透水試験の結果から、開口割れ目をするような節理性岩盤においては、水を使ったルジオン試験の結果得られるルジオン値に通常の換算係数 ($1Lu = 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) を乗じて求まる透水係数は、過小に評価されることが明らかになった。ルジオン試験の結果 $30Lu$ と算出される値は、層流状態で評価するとその数10倍になる可能性があることが、またルジオン値が大きくなるほどその乖離度は大きくなることが判明した。

(2) 今回試験した輝石安山岩層においては、高粘性流体試験結果から評価される限界レイノルズ数は30程度以下と評価され、平滑な平行平板で標準的な値とされる2000程度に比べ極めて小さいことが明らかとなった。このため割れ目内の流れが層流であるためには極めて小さい流速しか許されず、層流状態を満足する限界注入圧力は $10Lu$ 程度のステージであっても 0.1kgf/cm^2 以下と小さく、實際上、層流条件下でのルジオン試験は難しいことは明らかとなった。

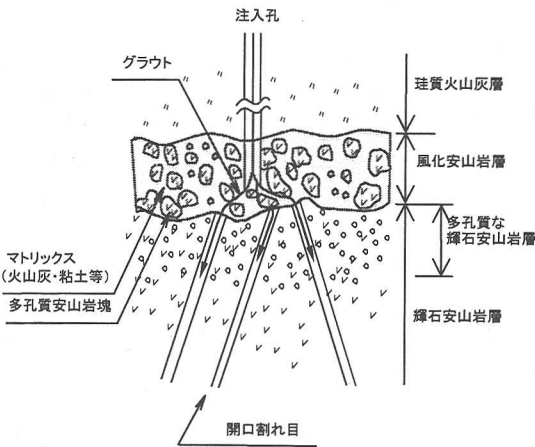


図-21 グラウトの注入状況模式図

悪く、形成されるリムカーテンの改良範囲は深部で厚く、浅部の上部標高で薄くなったものと判断された。

(3) 岩盤のマクロな透水性評価において、トレーサー調査に加えてダム地点においては先事例を見ない水収支モデルによる解析を試みた。水理地質構造の特徴を反映した水収支モデルを想定し、必要な気象・水象記録を集積し解析に供することにより、地下水の下流流出機構が明らかとなった。これにより推察された輝石安山岩層のマクロな透水性は浸透流解析結果との照合により、ほぼ妥当であることが裏付けられた。岩盤のマクロな透水性評価におけるこの手法の適用性ならびに有効性を実証したものと考えられる。

(4) グラウチングにより形成したカーテンの品質確認において、通常カーテンライン上でチェック孔により透水性を確認するのが一般的であるが、カーテンの仕上がり厚さや透水性を同時に確認する方法としてBTV調査やトレーサー調査が有効であることが判明した。

また当地点のように開口割れ目が密に発達し、その走行に異質性が少ない岩盤であって、また水平流が卓越する水理地質構造を有する場合においては、この種の浸透流問題に対する準三次元浸透流解析の適用性も確認された。

7. おわりに

本調査研究は筆者らが関係した揚水発電所の上部ダム工事において、湛水時に調整池周辺岩盤からの浸透流量が予想を大きく上回るという問題に直面し、その原因を追求する中で取り組んだものである。

今後ダムサイトの地質条件は厳しくなる中で、この種の浸透流問題の解決が益々重要になってくると考えられる。こうした問題を検討するに当たり、広域のしかも三次元的な岩盤内の流れを如何に実態に則して表現するのが重要な課題となる。水理地質調査を踏まえ如何に広域的な浸透流モデルを想定するか、またそのモデルに入力する境界条件や物性である透水性を如何に評価するかこの両者の精度が検討結果に与える影響は小さくない。

当地点においては広域的でかつ詳細なボーリング調査、節理調査ならびに水文観測・調査を実施した結果、水理地質的に妥当性の高い浸透流モデルが想定でき、また岩盤の透水性評価においても高粘性流体透水試験結果やマクロな調査結果を複眼的に評価し、解析条件の精度の向上を図ることが出来た。特に今回の浸透流問題において特筆すべきことは、ダムの湛水過程での浸透流挙動が実規模で詳細に観測・実測されたことである。そしてそれらの貴重な実測データを用いることにより、各種調査・試験の結果や広域的な浸透流モデルの妥当性が検証できたことである。

通常、ダムの計画や設計の段階においてはそのような

湛水過程での実測データは無いわけで、計画の前段階で行われる各種調査結果に基づいて湛水後の浸透流挙動を予測することになる。本論文ではその予測精度を大きく左右するのが岩盤の透水性であること、またその評価においてルジオン試験では限界があることを指摘した。

特に開口割れ目を有する節理性岩盤においては、開口割れ目の分布密度や割れ目性状(幅、走行・傾斜など)によってその透水性は大きく左右されることから、ボーリング孔を用いたBTV観測や高粘性流体透水試験などの局所的な試験に加えて、広域的な水理地質調査やそれを踏まえた水収支解析またトレーサー調査などを実施することが必要不可欠である。局所的な調査結果と広域的な調査・解析結果とを照合し、対象領域の透水性や浸透流モデルを総合的に検討することがダムの基礎処理設計に関する調査において極めて重要である。

今後、開口割れ目を有する節理性岩盤の透水性評価に関する本研究の知見が岩盤の各種浸透流問題の解決の一助となれば幸いである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京電力㈱建設部専門技術委員会の故藤井敏夫委員長(当時東京電力最高顧問)ならびに岡本舜三先生はじめ同委員会の委員の先生方からご懇篤なるご指導を賜りました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：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。
- 2) 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、No.412/Ⅱ・12、pp.51-60、1989。
- 3) Lancaster-Jones, P.F.F. : The interpretation of the Lugeon water-test, *Journal of Engineering Geology*, vol.8, pp.151-154, 1975。
- 4) Housby, A.C. : Routine interpretation of the Lugeon water test, *Journal of Engineering Geology*, vol.9, pp.303-313, 1976。
- 5) Kutzner, C. : Considerations on rock permeability and grouting criteria, Proc. *The 15th Congress on Large Dams*, Q.58, R.17, pp.315-328, 1985。
- 6) 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。
- 7) 山口嘉一、弘末文紀、松本徳久：ルジオンテスト結果の解釈、第19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、1987。
- 8) 松本徳久、山口嘉一、澁水秀雄：高粘性流体を用いた透水試験、第23回土質力学研究発表会講演集、pp.125-

126, 1988.

- 9) 山口嘉一, 滝市秀雄, 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, pp.401-405, 1989.
- 10) 山口嘉一: 『ダム基礎の浸透機構の解明に関する研究』, 大阪大学学位論文, pp.22-64, 1993.
- 11) 山口嘉一, 松本徳久: 岩盤のルジオン値と透水係数の関係, 土木学会論文集, No.454/Ⅲ-20, pp.123-126, 1992.
- 12) 岩本忠信, 園元秀夫, 有門英幸, 土妻睦夫: 高粘性流体を用いた岩盤透水係数の測定—熔結凝灰岩を対象としたルジオンテスト—, 応用地質, 第31巻2号, pp.1-10, 1990.
- 13) 角江俊昭, 久保田克寿, 萩原義孝: ルジオン試験結果の評価について, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 岩盤力学委員会, pp.471-475, 1993.
- 14) 東京電力㈱: 玉原発電所建設工事報告書, pp.24-27, pp.203-205, pp.301-329, 1986.
- 15) 河野伊一郎, 西垣誠, 高坂信章: 有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析, 土木学会第37回年次講演会, pp.531-532, 1982.
- 16) 中屋信司, 大西有三, 西垣誠: FEMによる準三次元地下水逆解析手法の開発, 透水試験ならびに地下水調査に関するシンポジウム発表論文集, pp.139-146, 1985.
- 17) 大西有三: 『岩盤浸透流の数値解析におけるモデル化手法の研究』, 京都大学学位論文, pp.63-84, 1988.
- 18) 地下水ハンドブック編集委員会編: 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp.17-21, 1998.
- 19) 日野幹雄: 明解水理学, 丸善, pp.284-288, 1999.
- 20) 池田駿介: 詳細水理学, 技報堂出版, pp.142-146, 1999.
- 21) 石山宏二, 杉村淑人, 渡辺邦夫: 岩盤浸透流における層流から乱流への変化に関する実験的研究, 土木学会第54回年次講演会, pp.516-517, 1999.
- 22) 渡辺邦夫: 地質調査と岩盤地下水評価—地質調査の重要性—, 地質工学セミナー資料「地質工学の基礎と応用」, (社)システム総合研究所地質システム工学委員会, pp.99-118, 2001.
- 23) 水収支研究グループ編: 地下水資源・環境論, 共立出版㈱, pp.96-99, 1998.

(2001.12.11 受付)

STUDY ON EVALUATION OF PERMEABILITY OF THE OPEN JOINTED ROCK

Toshiaki KAKUE, Kiyoshi ISHII and Hiroshi YOSHIKOSHI

The permeability of dam foundations is generally evaluated by Lugeon water test. Lu values obtained by the test can be converted to coefficient of permeability, which would be needed in evaluating amount of leakage from reservoir, only in the case of laminar flow condition. For the jointed rock with open fissures, Lu values are liable to be underestimated, compared to those obtained on laminar-flow condition, due to turbulent flow in testing. In this paper, examining the various kind of field testing methods to evaluate permeability on laminar-flow condition, we have shown that these methods are useful comparing the results with the analytical solutions calculated based on the actual leakage flow.