

## (81) ルジオンテストにおける乱流の影響と対策

建設省土木研究所 正会員 山口 嘉一

〃 〃 〇浜市 秀雄

〃 〃 松本 徳久

Influence of turbulent flow on Lugeon test and countermeasures against it

Yoshikazu YAMAGUCHI, Hideo SHIBUICHI, Norihisa MATSUMOTO

Public Works Research Institute

Ministry of Construction

### Summary

Lugeon test is usually adopted as the surveying method for the permeability of dam foundation, which is evaluated by Lugeon value(Lu). Lugeon test is water injection method using boreholes. When the relation curve between pressure and rate of injected water, so-called "p-q curve", is near a straight line, the Lugeon value is good correlative with the permeability. However, when the flow of water injection is turbulent flow for instance in high permeability rock mass, the Lugeon value is not good correlative with the permeability, and difficult to determine the Lugeon value. The authors conducted permeability test using high viscosity fluid in the high permeability rock mass having open joints to evaluate the permeability accurately. As a result, characteristic turbulent p-q curves, and laminar Lugeon value were obtained. According to these results, the estimated laminar critical injection pressure is too small to be controlled at field test. Conclusions are:

- 1) Lugeon test performed in high permeability rock mass is influenced by turbulent flow.
- 2) Permeability test using high viscosity fluid is useful as the test in high permeability rock mass.

### 1. はじめに

ダム基礎の透水性調査には、一般にルジオンテストが用いられている。ルジオンテストは、ボーリング孔を利用した注水式の透水試験方法で、注入圧力 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 時のボーリング孔長1m当りの透水量をルジオン値として透水性を評価している。注入圧力と注入流量とによる曲線（以後p-q曲線と呼ぶ）が原点をとおり直線のときは、ルジオン値と透水係数の相関は良いと考えられる。しかしながら、p-q曲線が原点をとおらない直線であったり、非直線形状であると、ルジオン値と透水係数の相関は疑わしくなる。筆者らはルジオンテストの有用性とルジオン値の意味する曖昧さを考慮し、ルジオンテストにかかわる問題点や解釈法について検討してきた。<sup>1)2)</sup>本報告においては、ルジオンテストにおける注入水の流れが乱流となった場合の結果と解釈、およびその対策について実験結果にもとづいて取りまとめた。

報告の内容は以下のとおりである。

- ① 高透水性の節理岩盤を対象として、比較的精度の高いルジオンテストを実施したところ、乱流の特性を示す、比較的規則的な逐次流量減少型のp-q曲線が得られた。
- ② 上記のサイトにおいて、高粘性流体を用いた透水試験を実施したところ、層流の透水性が得られた。

- ③ ①②の結果から、このサイトでルジオンテストを層流で行う場合の最高注入圧力を推定したところ、極めて小さい圧力で乱流が生じることが分かった。
- ④ 多孔質媒体を模擬した供試体を作成し、室内透水試験により、乱流となる限界動水勾配を測定し、ルジオンテストで乱流の発生する注入圧力を推定した。

## 2. 乱流と逐次流量減少型 $p-q$ 曲線

$p-q$  曲線が図-1に示すように、圧力の上昇分に比較して流量の増加率が漸減する場合に逐次流量減少型  $p-q$  曲線と呼ぶこととする。昇圧時と降圧時で同じ経路をたどるものと、そうでないものが存在するが、逐次流量減少の原因について、①乱流の影響、②圧力補正の誤り、③スライム等による目詰まり、などが考えられている。これらを考慮して、図-1は、孔内圧力計を用い、かつ注入管内で水が切れることのないように工夫し、冷却節理の発達した高透水性の岩盤で実施したルジオンテストの測定結果の1例である。試験区間長は標準の5mで行い、高透水性のため、流量が非常に大きく、試験圧力は極めて小さい範囲のみとなっている。この逐次流量減少の原因は乱流と考えられる。この  $p-q$  曲線について、日頃ルジオンテストにかかわっている技術者に質問したところ、およそ以下のような解答を得た。

- (A) 試験圧力が低すぎて換算ルジオン値を求めるのに適当でない。
- (B) 低圧部のデータは信頼性が低いので、高圧部の直線性のよい箇所のデータから換算ルジオン値を求め、必要があれば原点をとる直線として補正する。
- (C) 対数目盛りにプロットし、データの直線延長により  $10 \text{ kgf/cm}^2$  時の流量を推定し、換算ルジオン値とする。
- (D) 明らかに乱流の影響を受けているので、層流に近いと考えられる低圧部のデータから換算ルジオン値を求める。
- (E) 換算ルジオン値は一義的に決められないが、いずれにせよ高ルジオン値であり、「異常に大きい ( $50Lu$ 以上等)」の表現で十分である。

ルジオンテストでは、必ずしも層流の透水性を求めることを必要としていないことから、考え方に相違が生じていると考えられる。しかし、ダム湛水後の基礎岩盤内の浸透流の動水勾配は小さく、層流ないしそれに近い状況で流れていると考えられ、漏水量の見積もりを行うときには、透水係数の推定精度が重要となる。とくに、リム部の透水性改良範囲と漏

水量の関係などを知ろうとするときには高透水性の岩盤の透水係数の把握が必要になる。解答の中にも、層流に近い透水性を求めようとしているものもあるが、実際の試験においては、それぞれの試験圧力も異なる上、今回のように極めて低圧力で試験が行われることは稀であることから、値としての一義性に乏しい。図-1のはじめの3つの圧力段階が省略されていれば、ほとんどの技術者が原点をとらない直線と処理していたと思われる。結局、値の一義性という点では曲線の特性を考慮した(C)のような求め方が優れていると考える。図-2は図-1と全く同じデータを両対数目盛りにプロットしたものである。注入圧力と注入流量の関係が直線となり、ある規則性に従っていることがわかる。このような図において、 $p-q$ が1次の関

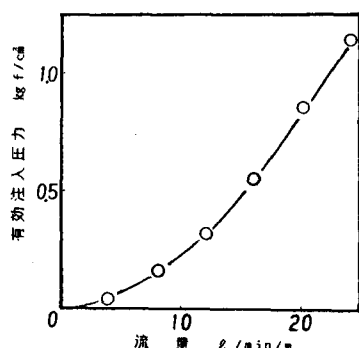


図-1 乱流の影響を受けた  
逐次流量減少型  $p-q$  曲線

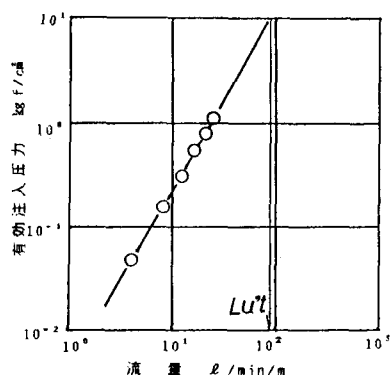


図-2 乱流の影響を受けた  
両対数  $p-q$  曲線

係から2次の関係に近づいたときは、ルジオン値または換算ルジオン値について乱流を付記することが必要と考える。以後、本文中では、このルジオン値を乱流換算ルジオン値と呼ぶこととし、乗数を乱流のべき数と呼ぶ。この乱流換算ルジオン値(Lu't)とべき数( $\beta$ )によって、乱流時の抵抗則が表現できる。今回の試験では、乱流のべき数は、試験孔の傾きによってやや異なったが、1.5~1.9の範囲であった。

### 3. 高粘性流体を用いた透水試験

注入式の透水試験を層流で実施する方法として、ビット式の定水位透水試験法や渡辺ら<sup>3)</sup>が不飽和な高透水帯に対して行った「高粘性流体を用いた透水試験法」がある。当試験サイトでは既にビット式の透水試験が行われていたが、その結果にやや乱流の影響の疑いもあり、高粘性流体を用いた透水試験をボーリング孔に適用した。試験区間はすべて地下水位以下のレベルであり、試験方法について、高粘性流体の希釈、流量の定常時間などに留意した。高粘性流体には、メチルセルローズ系の増粘材の水溶液とし、粘度の測定には事前に校正した単軸の回転粘度計を用いた。<sup>4)</sup>試験設備

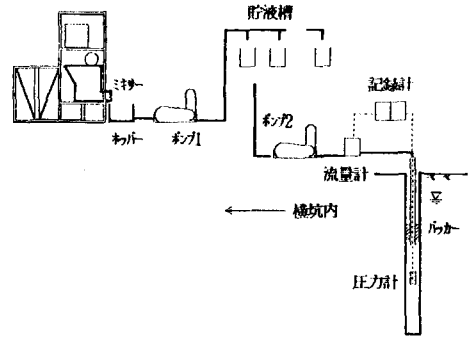


図-3 高粘性流体透水試験設備の概要

の概要を図-3に示す。  
試験結果の一例を図-4、5に示す。図中の添え字Hは高粘性流体をWは水を表す。図-4は注入圧力を一定として流体の粘度を段階的に上げたもので、水の数十倍の粘度の流体から、粘性と流量が反比例する45°の直線になり、層流になっていることがわかる。この結果から得られる層流のルジオン値は5,800Luとなる。図-5は

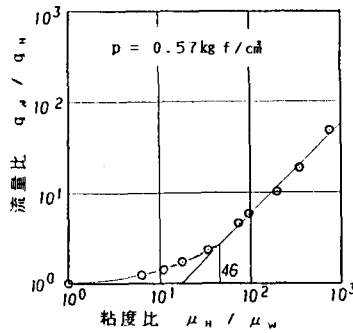


図-4 多段粘度式試験結果

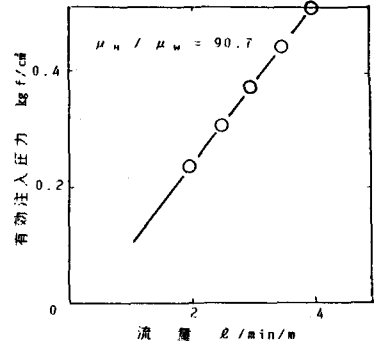


図-5 多段圧力式試験結果

流体の粘度を一定として注入圧力を段階的に上げたものであり、この圧力範囲において、p-q曲線は原点をとる直線と見なせ、岩盤の大きな変形のない範囲であることがわかる。これから得られる層流のルジオン値は、6,900Luとなる。以上のように、層流のルジオン値は高粘性流体を用いることによって求めることができる。ビット式の透水試験によっても層流が得られない場合や、対象の試験区間の震度が深い場合などには、層流の透水性を知る方法として、有用と考える。透水係数を求めるには、周りの水理条件を考える必要が有るが、アースマニュアルE-18パッカ法などと同様に求められる。層流のルジオン値と乱流のルジオン値との相関について、図-6に示した。層流のルジオン値は乱流換算ルジオン値より1オーダー程度大きい。

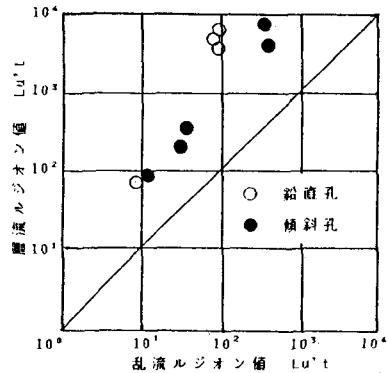


図-6 層流ルジオン値と乱流ルジオン値の相関

#### 4. 層流限界圧力の推定

ルジオンテストにおいて、どのくらいまで注入圧力を下げれば層流が得られるかについて簡単に推定した。

第1の方法は、乱流、層流のそれぞれの $p-q$ 曲線の交点を求める方法であり、第2は、高粘性流体透水試験において、注入圧力と層流に移する粘性から求める方法である。図-7にこれらより求めた層流の限界注入圧力と乱流ルジオン値の関係を示す。推定される圧力は極めて小さく、水により層流を得ることが難しいことがわかる。

#### 5. 節理の開口幅の推定

ボーリングコアから判定して、試験区間に節理が1本となる位置にパッカをかけて、ルジオンテストおよび高粘性流体透水試験を実施した。試験区間長は90cmであるが、注入した流体はすべて、この節理を通じて流出すると考える。試験結果をまとめると、図-8のようである。

圧力を水頭 $h$  (cm)、流量を $Q$  (cm<sup>3</sup>/s) で表し、層流時の関係を示すと(3)式の様である。ここで、層流の限界水頭( $h=1$ cm)は、前節に示した2つの方法による結果を総合して決定した。単一平行板亀裂の流量 $Q$ と開口幅 $t$ とは、3乗則にしたがい(4)式の関係がある。

(4)式において、影響半径の影響は小さい、仮に影響半径を100mmとすると、 $t=1.4$ mmとなる。割れ目の開口幅について測定は行っていないが、この値は妥当のように思われる。水頭が1cmのときに、孔周面の亀裂内で乱流が発生するとして、円管イメージで限界レイノルズ数を求めると、(5)式のように188となる。

#### 6. 多孔質媒体に対する室内試験

岩盤内の水の流れとして、開口節理を有する硬岩と対照的な多孔質媒体においても試験を実施したいと考えたが、この種の岩盤では、層流・乱流の問題以上に変形の問題が大きく、すでに低圧のルジオンテストが普及し、その範囲において透水性が十分小さいサイトが多く、適当なサイトがなかった。また、変形の問題が生じると現段階においては

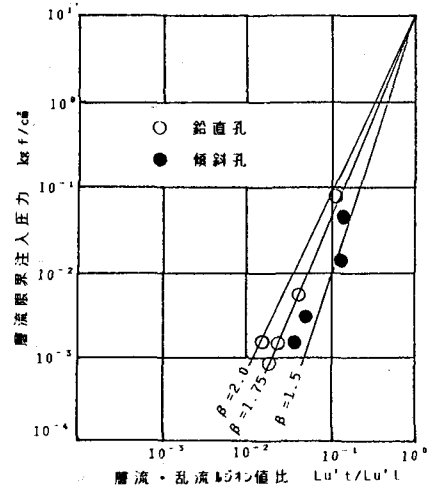


図-7 層流限界圧力

$$Q=19.5 \times h \quad (h \leq 1) \quad \text{---(3)}$$

$$t = \left\{ \frac{6Q\nu \ln(r_1/r_0)}{\pi g h} \right\}^{1/3} \quad \text{---(4)}$$

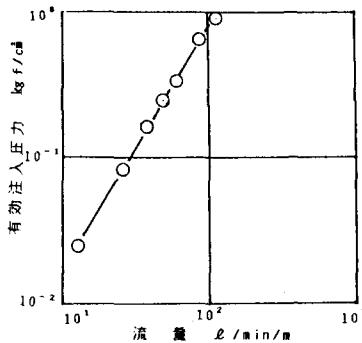
ここに、 $t$ : 開口幅、 $Q$ : 流量、

$\nu$ : 水の動粘性係数、

$r_1$ : 影響半径、 $r_0$ : 試験孔半径

$g$ : 重力加速度、 $h$ : 有効水頭

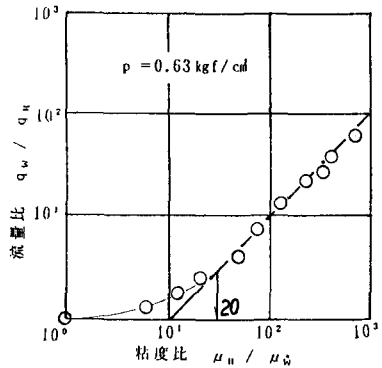
$$R_{ecr} = \frac{Q \times 2 t}{2 \pi r_0 t \nu} = 188 \quad \text{---(5)}$$



ルジオンテスト (乱流)

$$p=4.12 \times q^{1.64} \times 10^{-4} \quad \text{---(1)}$$

乱流換算ルジオン値:  $Lu't=470$



高粘性流体透水試験 (層流)

$$p=7.69 \times q \times 10^{-4} \quad \text{---(2)}$$

層流換算ルジオン値:  $Lu'l=13,000$

図-8 単一割れ目を対象とした試験結果

解析上問題が大きいと考え、室内試験にとどめた。

数種の透水性の異なる浸透性コンクリートによる円筒供試体（ $\phi 100\text{mm}$ ,  $L=150\text{mm}$ ）を作成し、室内定水位透水試験装置により、動水勾配をおよそ0.1～12まで変化させ、層流の限界動水勾配を測定した。この限界動水勾配からルジオンテスト時に孔周面で乱流の発生する最小の圧力を推定し、乱流の発生のしやすさについて比較した。試験結果を表-1に示す。

この結果から、透水係数が $10^{-3}\text{cm/s}$ 以下（100Lu以下程度）であれば、低圧のルジオンテストにより層流が得られることが可能と考えられる。しかし、 $10^{-2}\text{cm/s}$ 以上の透水性となると、注入の有効水頭を50cm以下程度とする必要があり、層流は得られにくくなる。節理性の岩盤では10Lu程度でも層流がえられなかったことと比べれば、多孔質媒体では乱流が発生しにくいことがわかる。

表-1 多孔質媒体試験結果

| 透水係数<br>$k_{15}\text{ cm/s}$ | 限界動水勾配<br>$i_{cr}$ | 層流限界注入圧<br>$P_{cr}\text{ kgf/cm}^2$ |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| $5.7 \times 10^{-1}$         | 0.410              | $6.6 \times 10^{-3}$                |
| $1.3 \times 10^{-2}$         | 4.0                | $6.4 \times 10^{-2}$                |
| $1.7 \times 10^{-3}$         | 12以上               | $1.9 \times 10^{-1}$ 以上             |

## 7. ルジオンテストにおける乱流対策

ダム基礎の透水性調査といっても、個々に目的の主眼は異なり、一概に層流の透水性を求めなければならないというものではない。しかしながら、同一の試験結果によって技術者の考え方により異なった値となる現状は好ましくない。第2節で述べたように一義的な値としていくことが望ましいと考える。また、乱流の発生するような岩盤を対象とした透水試験は、孔内圧力計を用いて、注入管の摩擦損失に係わる不確かな補正を除外し、低圧で圧力ステップの細かい精度の高い試験を行えば、乱流時の抵抗則としての測定が可能である。さらに、層流の透水性が必要な場合には、高粘性流体を用いた透水試験を実施することにより、推定が可能である。水によるルジオンテストの注入圧力を下げて層流の透水性を求めることが可能なのは、多孔質媒体など乱流の発生しにくい条件のときに限られる。

## 8. おわりに

高透水性の岩盤を対象とするルジオンテストでは乱流の影響を受けているものが多いように思われる。今後、経済的な改良範囲の決定やルジオン値とグラウチング注入量との関係などの解析精度を上げるには、層流から乱流までの抵抗則を知ることが必要になると考えられ、そうした意味で本研究が役にたてばと考えている。さらに、高粘性流体による透水試験法は、ドレーン材のような高透水性の媒体の室内透水試験にも応用できると考える。

## 9. 謝辞

本研究に当り、現場の試験について、建設省九州地方建設局の関係各位の方々には、並々成らぬ御協力を頂いたことについて、末尾ながら、深く感謝の意を表し、お礼申し上げます。また、多くの現場技術者の方々に、 $p-q$ 曲線の解釈について、多数の貴重な御意見を賜りました。心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 山口・弘末・松本：ルジオンテストにおける結果の解釈，第19回岩力シンポ，1987年2月
- 2) 山口・弘末・松本：各種条件下におけるルジオンテストの精度の検討，第19回岩力シンポ，1987年2月
- 3) 渡辺・芦川：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回岩力シンポ，1985年2月
- 4) 松本・山口・渋谷：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，1988年6月