

(42) 高透水性岩盤の流水抵抗則 (第2報)

建設省土木研究所 正会員 山口嘉一

建設省土木研究所 ○安仁屋勉

建設省土木研究所 正会員 松本権久

Flow Resistance Laws of Highly Permeable Rock Masses (Part 2)

Yoshikazu YAMAGUCHI, Tsutomu ANIYA and Norihisa MATSUMOTO

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Abstract

Recently, in Japan, we have to construct dams even on sites where groundwater level is very deep and permeability is very large because of existence of many open joints. It costs much money to control the seepage through underground completely on these sites. If we could predict 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 these testing procedures and interpretation methods to get the flow resistance laws in both laminar and turbulent flow conditions of jointed rock foundations briefly. Furthermore, we conducted these permeability tests at two dam sites which are composed of hard and jointed rock foundations. We also showed the results of these tests.

1. はじめに

近年の良好なダムサイトの減少を鑑みると、地下水位が低く、かつ高透水性な節理性岩盤上にも合理的かつ経済的にダムを建設することが望まれる。このようなダムサイトでは、浸透流制御関連の施工量が膨大となり、ダム建設費全体に占める割合もかなり高くなることが一般的である。よって、合理的かつ経済的なダム建設は、合理的かつ経済的な浸透流制御法および制御範囲決定法の確立に依っていると看做しても過言ではない。そこで筆者らは、①節理性岩盤の流水抵抗則(乱流および層流)の原位置測定法^{1)~4)}、②岩盤内の複雑な地下水圧分布の合理的測定法^{5), 6)}、③乱、層流域を併せて考慮できる浸透流解析プログラム³⁾を開発、かつ有機的に結合することにより、設計段階にダム貯水池からの漏水量をより正確に推定し、合理的な浸透流制御範囲の決定法を確立することを目指している。なお、この際、浸透流制御法としては、最も一般的なグラウチングを想定している。

以上のような研究課題のうち、本論文では、節理性岩盤の流水抵抗則を、特に乱流、層流という流れの形態に着目して測定する原位置試験法の実際のダムサイトにおける適用例について報告する。

2. 試験および解析法

原位置透水試験法としては、ボーリングにより設けられた試験孔内に多段階の定圧力で注水する定圧注水式試験と、水から順次粘性の高い流体を同一圧力で注入して高透水性岩盤の層流状態での流水抵抗則を求め

る高粘性流体試験の2種類を採用した^{2)~4)}。

結果の解析にあたって、岩盤の流水抵抗則は次式で表現できるものとした。

(層流の抵抗則)

$$i = v/k$$

.....(1)

(乱流の抵抗則)

$$i = c v^n \quad (1 \leq n \leq 2)$$

.....(2)

ここに、 i は動水勾配、 v は岩盤内の見かけの流速、 k は透水係数、 c 、 n は乱流抵抗則の定数である。なお、前報³⁾で示したように、定圧注水式試験をルジオンテスト⁷⁾とみなして求める層流状態の透水性の指標である層流ルジオン値 $Lu' l$ は、透水係数 k から容易に算出できる。

上記の原位置透水試験結果から、抵抗則を表現する係数 k (あるいは $Lu' l$)、 c 、 n を求める解析方法として既に3種類提案している⁴⁾が、以下では、同一地点で実施した定圧注水式試験と高粘性流体試験の両結果から3係数を求める場合は第1法よりも優れている第2法を、定圧注水式試験結果のみから求める場合は第3法を採用している。第1法から第3法の具体的内容、得失については、参考文献⁴⁾を参照されたい。また、ここで採用した、第2、3法は、室内試験により非常に精度の良い試験・解析法であることを実証している⁴⁾。

3. ダムサイトにおける適用例

試験は、九州地方の2つのダム(Tダム、Oダム)建設予定地で実施した。

Tダム建設予定サイトは、前報³⁾でも紹介したとおり右岸リム部に開口した冷却節理が発達した第四紀の安山岩質溶岩が分布し、高透水ゾーンを形成している。この試験サイトでは、右岸地山に設けられた横坑R-1内で定圧注水式試験と高粘性流体試験を実施し、その結果に前述の第2法と第3法を適用して岩盤の流水抵抗則を求めた。なお、横坑周辺の地質および試験位置は、前報³⁾を参照されたい。

Oダム建設予定サイトには、主として透水性の小さい中性代白亜紀の花崗岩が基盤として分布しているが、河床部ではその上位に透水性の大きい新世代第四紀の火砕流堆積物が分布している。この試験サイトでは、河床部の2本のボーリング孔内で実施した定圧注水式試験結果に第3法を適用して流水抵抗則を求めた。なお、2本のボーリング孔で採取したコアから描いたボーリング柱状図を図-1に示す。

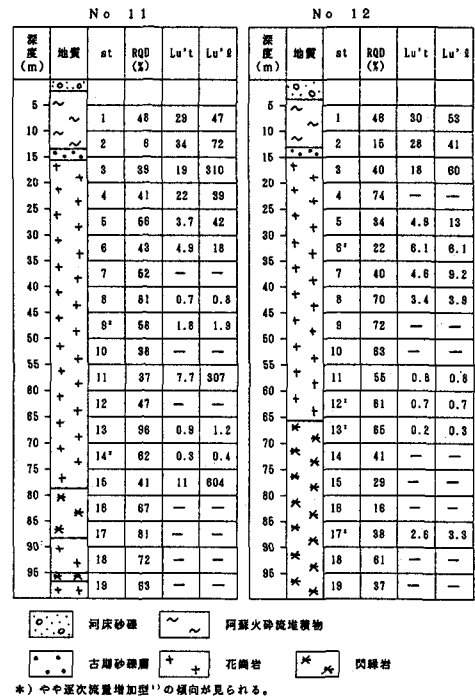


図-1 ボーリング柱状図

4. 試験結果

4.1 Tダムの場合

第3法により、ある程度の精度で岩盤の流水抵抗則を求めることができれば、作業がやや煩雑である高粘性流体試験を実施する必要がなく、試験の合理化が図れる。室内試験により、第3法の精度は十分実用範囲にあることを実証している⁴⁾が、今回は、Tダムでの試験結果をもとに、原位置試験レベルでの精度の検討を行う。

第2、3法から求めた、層流抵抗則の指標である層流ルジオン値 $Lu' l$ 、乱流抵抗則の係数である c (cm, s 単位)、 n および定圧で注水した場合に層流状態で水が流れる最大の注入圧力である層流限界圧力 p_{1c} (kgf/cm²)を、それぞれ図-2~5に示す。これらの図面から以下のことがいえる。

① 第3法から求めた $Lu' l$ 高粘性流体試験よりかなり高い精度で求めた第2法の $Lu' l$ 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、Tダム溶岩の透水性がかなり大きいいため、 p_{1c} が定圧注水式試験の最小注入圧力よりもかなり小さく、実際に得られた圧力・流量データからかなり離れた外挿部分で層流の抵抗則を求めなければならないことに起因しているものと考ええる。

② 第2、3法から求めた c (cm, s単位) は、 $Lu' l$ に比して、比較的良く一致している。これは、 $Lu' l$

とは逆に、得られた圧力・流量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。

④ p_{1c} は、 $Lu' l$ のところで示したのと同様の理由から第2、3法でかなりの差がある。

Tダムで実施した定圧注水式試験から得た圧力・流量関係と、第2、3法より求めた諸係数より算出した圧力・流量の理論曲線の比較例を図-6に示す。第2、3法にかかわらず、理論曲線は実測値を非常に良く再現していることがわかる。これは、例示しなかった試験ステージの結果についても同様であった。

4.2 Oダムの場合

図-1には、第3法で求めた層流ルジオン値 $Lu' l$ と乱流換算ルジオン値 $Lu' t$ も示してある。なお、これ

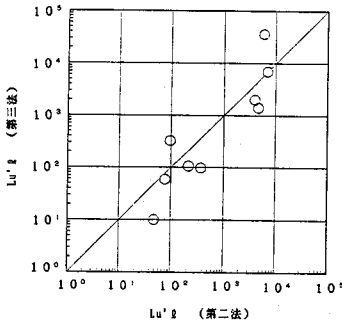


図-2 層流ルジオン値の比較

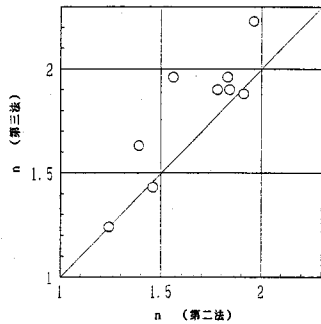


図-4 nの比較

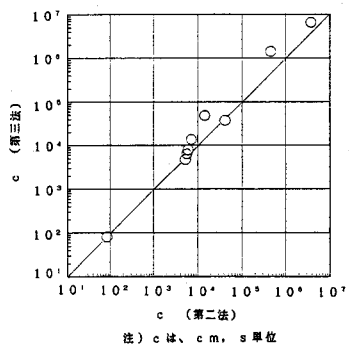


図-3 cの比較

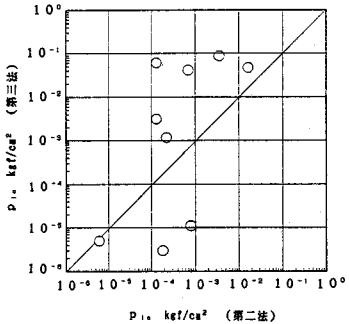


図-5 層流限界圧力の比較

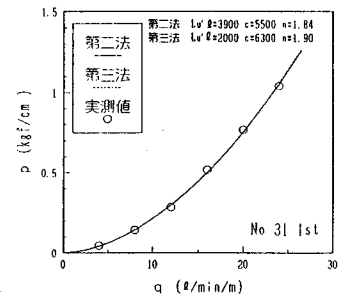
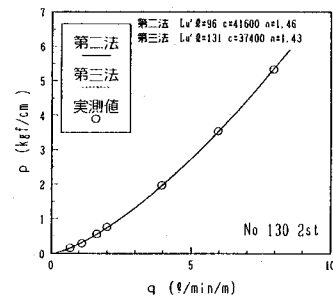
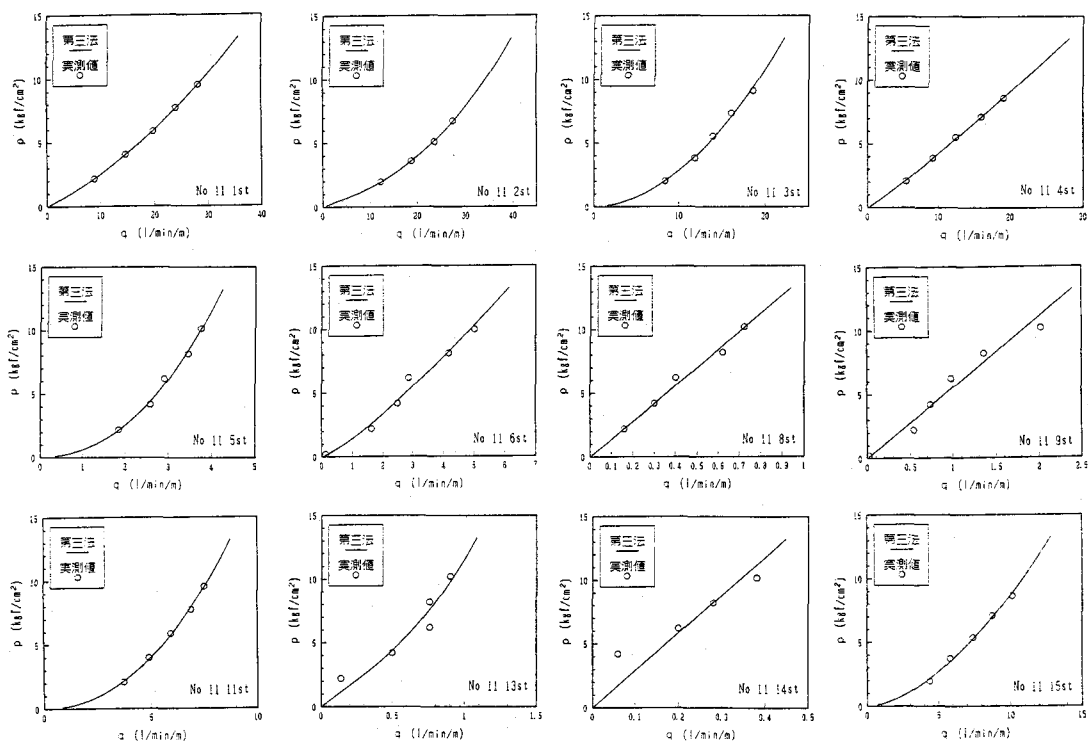


図-6 注入圧力と流量の関係 (Tダム)
p : 有効注入圧力 q : 流量



p : 有効注入圧力 q : 流量
図-7 注入圧力と流量の関係 (Oダム)

まで $Lu't$ は、圧力・流量データをベキ乗回帰して求めた圧力が 10kgf/cm^2 での流量 (l/min/m) と定義してきた²⁾が、この定義には物理的な根拠がないため、ここでは第3法より求めた抵抗則の諸係数より算出した理論曲線から圧力が 10kgf/cm^2 の時の流量値 (l/min/m) として定義した。この $Lu't$ は、ルジオン (M. Lugeon)⁸⁾が定義したルジオン値により近いものであると考えられる。ただし、両者から得られる値には、ほとんど差がなかった。また、図中で $Lu't$ 、 $Lu'q$ を記していないステージが存在するが、これは低透水性のため測定流量値の精度が低く、解析を行えなかったことによる。

Oダムで実施した定圧注水式試験から得た圧力・流量関係と、第3法で求めた諸係数より算出した No. 11 孔の理論曲線を図-7に示す。ここでも理論曲線は実測値を非常によく再現していることがわかる。ただし、9stや14stのように若干逐次流量増加型¹⁾の圧力・流量関係の傾向を有するものについては、本手法では、ベキ数 n を1.0以上として解析しているため層流型として再現される。

5. 考察

5.1 $Lu't$ と $Lu'q$ の関係

図-8にTダムについては第2法より、Oダムについては第3法より求めた $Lu't$ と $Lu'q$ の関係を示す。なお、Tダムについて第2法の結果を用いたのは、第2法では高粘性流体試験を併用し

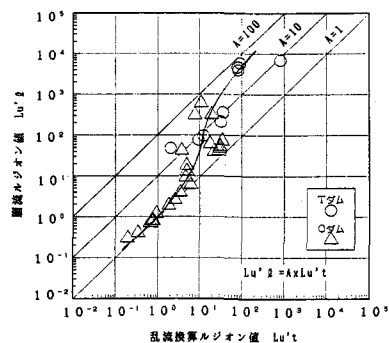


図-8 $Lu't$ と $Lu'q$ の関係

ているため精度の高いデータが得られていると考えたことによる。この図より、Lugeonの定義したルジオン値に非常に近い $Lu't$ が数ルジオン程度までは $Lu'l/Lu't=1.0$ 程度であるがそれ以降 $Lu't$ が大きくなる程 $Lu'l/Lu't$ は大きくなる傾向が認められ、 $Lu't$ が数十ルジオン程度になると、 $Lu'l$ は $Lu't$ よりも1~2オーダー大きな値となることがわかる。

5.2 第3法の改良案

第3法の高透水性岩盤サイトにおける原位置試験レベルでの適用性を、より精度が高いと考えられる第2法との比較により検討した結果、 $Lu'l$ 、 p_{1c} の推定精度に問題があることがわかった。これは4.1①に記した理由によるものと考えられる。そこで、高透水性の岩盤に第3法を適用する場合は、定圧注水式試験を極力低圧に重点をおいて多段階で行うとともに、孔内挿入式の水圧計を用いることにより圧力測定精度を上げることが望まれる。しかし、定水位法により低圧力の注水を行うには、孔内水位を調整しながらの静水圧載荷が必要となる場合がある。この作業が煩雑であると思われる場合には変水位法の適用も考えられる。

6. おわりに

今回は、筆者らが提案している高透水性岩盤の流水抵抗則（乱流および層流）の原位置測定法の現場適用例について報告した。その結果、定圧注水式試験のみから算定する場合は、低圧域のデータをいかに多くとるかが精度に大きな影響を及ぼすことが判明した。また、一般に言われるルジオン値と岩盤の層流の抵抗則を表わすパラメータ k あるいは $Lu'l$ の関係を示すことができた。

今後は、ダム貯水池からの漏水量の推定という最終目標に向けて、透水試験法については、異方性、地下水面上での実施等の精度に与える影響の検討を行う予定である。

試験の遂行にあたり、建設省九州地方建設局の関係各位には多大なる御協力を賜った。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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/Ⅲ-12，pp.51~60，1989年12月。
- 2) 山口嘉一・渋谷秀雄・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。
- 3) 山口嘉一，他：高透水性岩盤の流水抵抗則，第22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.161~165，1990年2月。
- 4) 松本徳久・山口嘉一・安仁屋勉：岩盤透水性の新たな評価法，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。
- 5) 山口嘉一・松本徳久：ダム基礎岩盤内の地下水圧分布測定，第22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.81~85，1990年2月。
- 6) 大西崇夫・松本徳久・山口嘉一：ダム基礎岩盤内の地下水圧分布測定（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，1991年2月。
- 7) 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）国土開発技術センター，1984年6月。
- 8) Lugeon, M.: Barrages et Géologie, Dunod, Paris, 1933.