

(12) ルジオンテストの結果の解釈

建設省土木研究所 正会員 ○山 口 嘉 一

建設省土木研究所 正会員 弘 末 文 紀

建設省土木研究所 正会員 松 本 徳 久

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、その透水性はルジオン値により評価されている。このルジオン値は、透水試験孔へ注入する圧力水の圧力 P と注入流量 Q より作成した $P-Q$ 曲線の直線部をもとに求めた圧力 10 kgf/cm^2 時の注入区間 1 m あたりの注入流量(L/min/m)として表現される¹⁾。しかし、実際に現場で行われた試験の結果得られる $P-Q$ 曲線には、直線部をもたないものや、昇圧段階と降圧段階で異なった経路を通るものなどがかなり含まれており、結果の解釈、つまりルジオン値の決定が困難になることがしばしば見受けられる。そこで筆者らは、ルジオンテストの結果として得られる $P-Q$ 曲線をパターン分けし、それぞれの発生原因をとりまとめ、さらに、各種パターンの $P-Q$ 曲線から地盤のルジオン値を正確に求めるための対策についても検討したので以下に報告する。

2. 試験対象地盤の分類

ダムサイトとして選定される地域の地盤の様相は多種多様である。そこで、ルジオンテストの結果の解釈についてまとめる前に、多種多様な様相をもつ地盤を地盤内の水の流れ様式に従って以下の3つに分類しておく。

(1) 地盤Ⅰ

ダム基礎として考えた場合、岩自体の透水性は無視できるほど小さい($k \ll 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, k :透水係数)ため、地盤内の水の流れは亀裂内のそれとして表現できる地盤である。

(2) 地盤Ⅱ

ダム基礎として考えた場合、岩自体の透水性はさほど大きくないものの無視できるほどではなく($k \approx 1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)、かつ亀裂も存在するため、地盤内の水の流れは岩間隙中の流れと亀裂内の流れの2つの流れで表現しなければならない地盤である。

(3) 地盤Ⅲ

地盤の透水性に大きな影響を与える亀裂を有さず、その透水性は岩自体の透水性に左右される地盤である。ただし、地盤の透水性の大小は、地盤を構成する岩や土砂の種類により大きく異なる。

3. ルジオンテストの結果の解釈

3.1 直線型 $P-Q$ 曲線

図-1のように昇圧段階と降圧段階(以後、それぞれを往路、復路と呼ぶ)で同路をたどる直線であったり、図-2のように限界圧力が認められたものの、限界圧力以下の部分が直線である $P-Q$ 曲線がこれにあたる。これらの直線部は地盤内の水の流れが層流であることにより得られるもので、ルジオン値はこれらの直線部をもとに求めればよく、まず結果の解釈に問題が生じることのない $P-Q$ 曲線である。

限界圧力が認められた試験には、往復同路のものと往復異路のもの(通常、同圧力でも復路の流量の方が大)とがある(図-2参照)。前者は、岩盤内亀裂がある値以上の水圧により開いたり、砂礫層の間隙が水圧により拡がったりするものの地盤の破壊には至っていない場合に発生する(弾性的挙動)。後者は、岩自体が水圧破壊されたり、岩盤内亀裂中の挟在物や砂礫自体が洗い流されるような場合に発生する(非弾性的挙動)。また、このように限界圧力が発生した試験結果の解釈に際して、「貯水圧に相当する水圧を載荷して試験を行い、その結果限界圧力が認められたのであれば、限界圧力認知後の試験結果も考慮してルジオン値を求めるべきではないか」という考えがある。しかし、下線部の考え方には大きな問題点が存

在する。これは、ダムの湛水により基礎地盤中に発生する動水勾配に比べて、ルジオンテストの注水により試験孔周辺に発生するそれが極端に大きいこと、また、ダム築造に伴い基礎岩盤中に発生する鉛直方向土圧が湛水に伴い発生する間隙水圧よりも大きい²⁾という事実を知ることによって容易に理解できるはずである。

ところで、以下に示すような試験法上の問題点により、地盤の真の透水性や限界圧力が得られない場合があるので注意を要す。

- ① 亀裂密度の高い岩盤において、亀裂により試験区間とパッカーより上の試験孔が連絡している場合。この場合は、亀裂間隔等を勘案したうえで、できる限り長いパッカーを用いることが望ましい。
- ② パッカー長が十分でないために、パッカー直上部の孔内への注入水浸出の動水勾配が大きくなりパイピングが発生しやすくなった場合。この場合も十分長いパッカーを使用することが望ましい。
- ③ 軟岩や砂礫で構成される地盤での試験で、パッカーと地盤のなじみが悪く、パッカーと孔壁の接触部分からの漏水が発生する場合。この場合は、パッカー設置部をセメンテーション等により補強したり、地盤とのなじみを良くするためにエアパッカーを使用することが望ましい。

3.2 逐次流量減少型 $P-Q$ 曲線

図-3に示すように、往路において初期勾配直線と比較して流量が逐次減少傾向にある $P-Q$ 曲線のことで、往復同路と往復異路に大別できる。これらの $P-Q$ 曲線が発生する原因と正確なルジオン値を求めるための対策を以下に示す。

(往復同路)

- ① 地盤中の流れが乱流である場合³⁾。この場合には、試験を極低圧下で実施し、その初期勾配からルジオン値を決定したり、高粘性流体を用いて試験を実施する⁴⁾などの対策が考えられる。
- ② 注入管内損失水頭の補正を行っていないか、小さめに見積っている場合。注入管内損失水頭の補正が有効注入圧測定精度に最も大きな影響を与えることは、多くの研究者によって既に指摘されている。^{3), 5)} によって、管内損失水頭の補正は、正確なルジオン値を得る際の必要条件である。なお、技術指針¹⁾では種々の管に対する試験結果をもとに損失水頭係数を提案しているが、実際の試験に際しては、念のためにこの値と使用する注入管の値に大きな差がないかを事前に試験を行い検討するか、注入区間内に間隙水圧計を設置して(図-4参照)、水頭損失後の注入圧力を直接測定する^{3), 5)}等の対策を講じることが望ましい。また、空気混入により損失水頭値が大きくなるので、注入管内の空気抜きは十分に行わなければならない。
- ③ 地下水面下の試験では、試験後の地下水位が試験前のそ

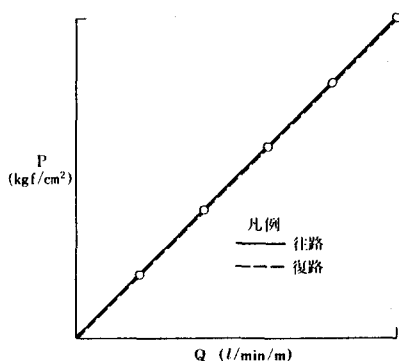


図-1 直線型 $P-Q$ 曲線 (限界圧力なし)

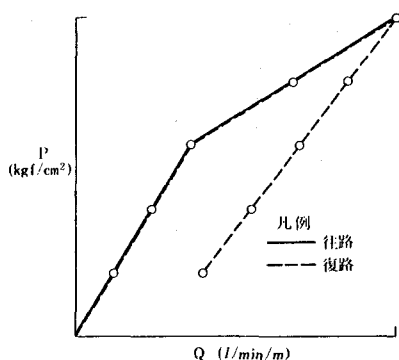


図-2 直線型 $P-Q$ 曲線 (限界圧力あり)

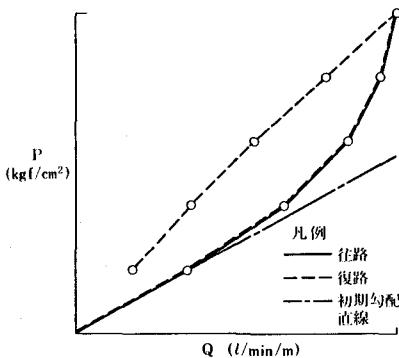


図-3 逐次流量減少型 $P-Q$ 曲線

れよりも高くなっていたという報告がある⁵⁾。注水に伴い地下水面が上昇するのであれば、有効注入圧力が減少し、 $P-Q$ 曲線は直線関係からずれるはずである。ただし、 $P-Q$ 曲線の形状が必ずしも図-3 のようになるとは限らず、図-5 のようになる可能性もある。この場合の対策としては、孔内水位を測定することにより注入圧力の補正を行うことが考えられる。しかし、その孔内水位が地下水位に等しいとは断定しにくく、まずは数値計算等で地下水位上昇の影響度合を検討することの方が肝要だと考える。

(往復異路)

- ① 試験孔掘削時に発生するスライム等の洗浄不足や試験水中の浮遊物により目づまりが助長される場合。これは、試験前の十分な孔内洗浄や極力清浄な水を使用して試験を実施することで解決できると考える。ただし、長時間の孔内洗浄を実施することは時間のロスになるうえ、試験対象地盤が軟岩や砂礫で構成されている場合は、逆に地盤浸食につながり試験精度に悪影響を与える可能性があるので注意を要す。さらに、十分な対策を講じたにもかかわらず、目づまりが原因と考えられる $P-Q$ 曲線が得られた場合は、往路の初期勾配からルジオン値を求めるべきである。

- ② 昇圧時において、注入区間からの水の流れが定常にならないうちに次の圧力段階に移行すると、測定される流量が定常時のそれよりも大きくなる。一方、降圧時には前圧力段階で現圧力よりも大きい圧力でかなりの時間注水している

こともあり、定常流量が短時間中に得られるものとする。しかし、実際には数値計算等で検討する必要がある。なお、このような現象は、微細な亀裂のみを有する硬岩地盤か、地盤中の流れが岩あるいは土砂の間隙中の流れで代表される軟岩および砂礫地盤においてよくみられる。この場合の対策としては、長時間の注水を実施するか、限界圧力以上の圧力を幟荷しないように丁寧に試験を実施し、復路の $P-Q$ 曲線（復路では短時間で定常状態になることが実証できたと仮定して）からルジオン値を求めることなどが挙げられる。

3.3 逐次流量増加型 $P-Q$ 曲線

図-5 に示すように往路が初期勾配直線に比較して流量が逐次増加する $P-Q$ 曲線である。この型の曲線の発生原因と正確なルジオン値を求めるための対策は以下のとおりである。

- ① 注入管内損失水頭を実際よりも大きめに見積った場合。ただし、実際は、管内損失水頭に係る不確定要素は損失水頭を大きくする方向に作用するものがほとんどであることを考慮すれば、このような現象が起こる可能性は少ないと考える。ただし、対策としては、本試験前に管内損失係数を求める試験を行うか、試験区間内に間隙水圧計を設置して（図-4 参照）直接注入圧力を測定すること等が考えられる。
- ② 水圧幟荷に伴い地盤中の亀裂が開いたり、地盤構成粒子に浮力が作用して浮き上がるか、亀裂中の挟在物や地盤構成粒子が徐々に洗い流される場合。前者の場合には往復同路になる場合と異路になる場合の2通りの可能性があるが、後者の場合は往復異路となる。この型の $P-Q$ 曲線からのルジオン値の決定は困難であるので、実際には安全側ということも考慮して、原点と最高圧力点を結んでルジオン値を求めている場合が多い。しかし、この方法の是非については今後も検討を継続しなければなら

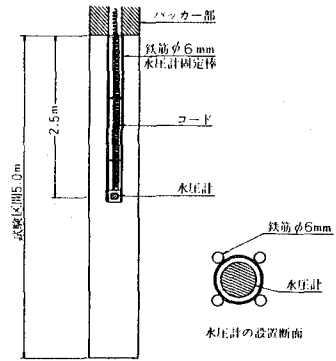


図-4 間隙水圧計設置例⁵⁾

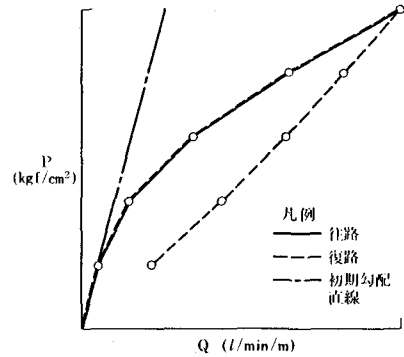


図-5 逐次流量増加型 $P-Q$ 曲線

らない。

③ 3.2の往復同路の③参照。

3.4 その他の $P-Q$ 曲線

図-6のように測定値は直線関係にあるが、その直線が原点を通らない場合がある。このような現象は、試験開始日の朝の孔内水位を地下水位とみなすことによる誤差による。つまり、この方法では、宙水などの地質的問題や^{1),6)} 水平でない浸透流が存在する状況下での測定といった水理的問題⁶⁾ による誤差を補正できないのである。よって、対策としては、試験結果数がある程度そろったところで、地下水位分布の洗い直しを行うか、地下水位を地下水圧としてとらえる努力を払うことが考えられる。

図-7に示す $P-Q$ 曲線の発生原因としては、孔内の水洗い不足や潜在的亀裂の開口等が考えられる。しかし、発生原因により初期勾配からルジオン値を求めるべきか、折れ曲り後の部分から求めるべきかが異なるので、試験時の水洗い状況や地盤状況を総合的に判断してルジオン値を決定すべきである。

図-8のように緩勾配の $P-Q$ 曲線が得られる場合がある。亀裂性岩盤では、地盤の透水性に対するポンプの容量不足や亀裂内に水が入る際の摩擦損失が現状では考慮できていない等の理由により発生する。この場合、試験区間長を短くして試験を行うことも1つの対策である。また、亀裂の少ない軟岩や砂礫地盤では、初期圧力が限界圧力以上であるため、透水性を実際よりも大きめに評価する場合がこれにあたる。この場合、ビット孔等を利用した他の原位置透水試験を併せて実施してルジオンテストの結果を検討することが望ましい。⁷⁾

4. おわりに

今回は、ダム基礎の透水性調査によく用いられるルジオンテストの結果得られる $P-Q$ 曲線をその形状によりパターン分けし、それらの発生原因をとりまとめ、さらに各種パターンの $P-Q$ 曲線を示す地盤のルジオン値を正確に求めるための対策を示した。ただ、実際の試験では各種要因が組み合わさる場合もあり、本文中で示した対策を講じただけでは正確なルジオン値が求められない場合や、対策そのものが不経済で実施し得ない

場合もある。そこで今後は、理論解析・数値解析・室内試験・現場試験を行い、どのパターンの $P-Q$ 曲線の発生はどの原因による影響が大きいのか、さらにそれを解決するための筆者らの対策が有効であるか否かの検討を行うつもりである。

<参考文献>

- 1) 建設省河川局開発課：ルジオンテスト技術指針・同解説、1984年6月。
- 2) 柴田：軟岩の透水性と止水設計法に関する研究、土研所報150号の1、1980年3月。
- 3) Kutzner: Considerations on Rock Permeability and Grouting Criteria, 15th ICOLD, Q58, 1985。
- 4) 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回岩カシンポ、1985年2月。
- 5) 播田・豊田：水圧計を利用したルジオンテストにおける一考察、土研資料第1570号、1980年3月。
- 6) 松本・山口：ダム基礎の浸透流制御、ダム技術研究発表会、1986年3月。
- 7) 松本・山口：軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する研究、第17回岩カシンポ、1985年2月。

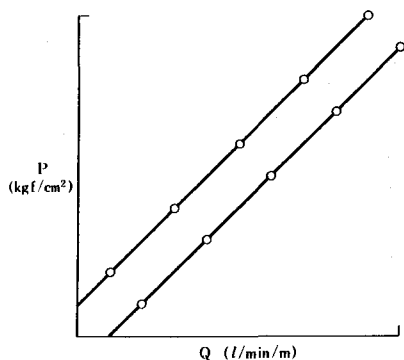


図-6 原点を通らない直線型 $P-Q$ 曲線

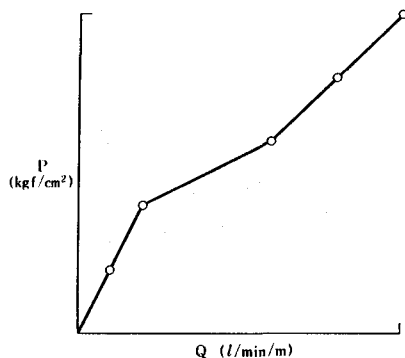


図-7 2段勾配 $P-Q$ 曲線

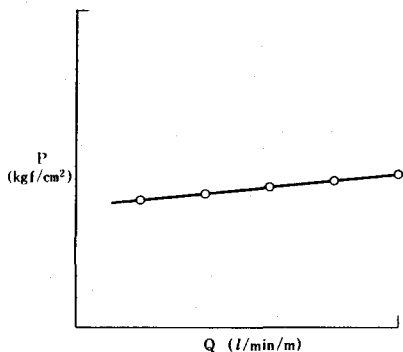


図-8 緩勾配 $P-Q$ 曲線

(12) Interpretation of Results of Lugeon Tests

Yoshikazu YAMAGUCHI

Fuminori HIROSUE

Norihisa MATSUMOTO

Public Works Research Institute

Ministry of Construction

Summary

In surveying the permeability of dam foundations, Lugeon test is usually adopted and the permeability of dam foundations is evaluated by Lugeon value (Lu). Lugeon test is water pressure injection method using boreholes. The curve between pressure and rate of water injection (hereafter, this curve is described as P-Q curve) is drawn by using the results of Lugeon test and Lugeon value is obtained from the slope of straight line part of P-Q curve as the liters of water injected per 1 m of length of borehole for 1 minute when water is injected at a pressure of 10 kgf/cm². However, quite a few P-Q curves which have various kinds of shape except the straight line, are obtained when Lugeon tests are actually performed at fields. In this case it is very difficult to interpret the results of Lugeon tests, that is, to determine Lugeon values. Therefore, in order to interpret the results of Lugeon tests accurately the authors conducted the following things:

- (1) P-Q curves obtained from Lugeon tests were classified into several types according to P-Q pattern.
- (2) Causes of several P-Q curves classified in (1) were summarized.
- (3) The methods of determining the accurate Lugeon value from each P-Q curve were illustrated.