

投稿論文 (和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

岩盤のルジオン値と透水係数の関係

山口嘉一*・松本徳久**

ダム基礎岩盤に対する最も一般的な原位置透水試験法であるルジオンテストの結果を解析する際、層流および乱流という水流状況に注意を払う必要がある。本文では、乱流現象の影響を受けた試験結果から適切なルジオン値を算定する方法を示した。また、岩盤のルジオン値とダム湛水時の地山からの漏水量を推定するのに必要な透水係数の関係を、原位置および室内試験結果に基づいて示した。

Keywords : Lugeon water test, coefficient of permeability, turbulent flow, dam

1. はじめに

ダム基礎岩盤に対する原位置透水試験法としては、ボーリング孔を利用した定圧注水式試験であるルジオンテストが一般的に採用され、その透水性はルジオン値により評価されている。しかし、岩盤、特に亀裂性岩盤のルジオン値は、その透水現象がDarcy則に支配されることが一般的な多孔質媒体の透水係数のように定量的な透水性指標だとは考えられていない。Ewert¹⁾は、この原因が、以下のようなルジオンテストの規模にあると指摘している。ルジオンテストにおいて透水性の把握対象となる岩盤の規模が、実際に透水現象を解明したいダム貯水池から堤体下流までの基礎岩盤の規模に比べてかなり小さい。さらに、土などの多孔質媒体では数十%程度の間隙があるため、間隙分布の不規則性がDarcy則の成立に大きな悪影響を与えないのに対して、岩盤の場合は数%の間隙が亀裂や節理の卓越した水みちにより構成されているため、間隙分布の不規則性が岩盤内の透水場の不均質性につながる。これらがDarcy則の成立を困難にしているという指摘である。しかし、この試験規模の問題は、ボーリングコアの入念な観察によりルジオンテストの試験区間を何本の亀裂や節理が切るのかを把握したうえ、同一岩種の岩盤での試験数を多くすることで、十分解決できるものと考えられる。

逆に筆者らは、ルジオンテストにおける試験孔からの水流がDarcy則が成立する層流状態のみならず、乱流状態でもあるという可能性が十分認識されていなかったことが、ルジオン値が定量的な指標とならなかった主要原因と考える。つまり、試験孔からの水流は放射状である

ため、孔周辺では非常に大きな動水勾配が発生する。加えて、岩盤内の水みちである亀裂の開口幅が多孔質媒体の間隙径よりも大きいため、試験孔からの水流が乱流になり易いのである。このような現状に鑑み、筆者らは、ルジオンテストの結果として得られる注入圧力 p と流量 q の関係を示す曲線(以下、 p - q 曲線と呼ぶ)の形状から乱流状態の発生を判定する方法を示し²⁾、さらに岩盤の層流および乱流状態での流水抵抗則を原位置試験により算定する方法を提案した^{3),4)}。しかし、乱流現象の影響を受けた試験結果を解析する際、特にルジオン値を求めるという立場からの問題点および適切な対応等については詳しく触れていなかった。加えて、従来のルジオン値と定量的な透水性指標である上記の流水抵抗則、特に層流時の透水係数の関係についても言及していなかった。そこで本文では、これらについて報告する。

2. ルジオンテスト結果における乱流の影響と解析時の対応

まず、岩盤で実施されるルジオンテストの結果における乱流の影響と、結果の解析時の問題点および適切な対応について述べる。

Fig.1は、冷却節理の発達した安山岩のサイト(以下、サイトAと称す)で実施したルジオンテスト結果の一例である。後述のその他の試験も含めて、試験孔半径 r_0 と試験区間長 l は、それぞれ標準の3.3 cm, 5 mとした⁵⁾。また、試験区間を切る亀裂の本数等の地質情報や試験仕様は文献6)を参照されたい。岩盤の透水性が大きく、かつ注水用ポンプの容量に限界があるため、注入圧力が極めて小さい範囲での試験となった。しかし、本試験においては、Fig.2に示すように、試験区間内に高精度の水圧計を設置して有効注入圧力を直接測定しているため、圧力値の精度は十分なものであると考える。

Fig.1の p - q 曲線は、注入圧力の上昇に対する注入

*正会員 建設省土木研究所フィルダム研究室研究員
(〒305 つくば市大字旭1番地)

**正会員 工博(財)ダム技術センター首席研究員(元・建設省土木研究所フィルダム研究室室長)

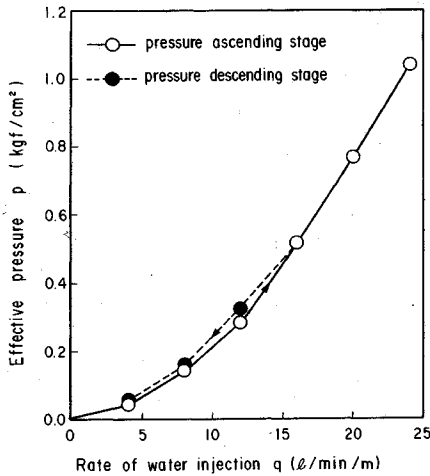


Fig.1 An example of $p-q$ curve (Site A, No.31, 1st stage)

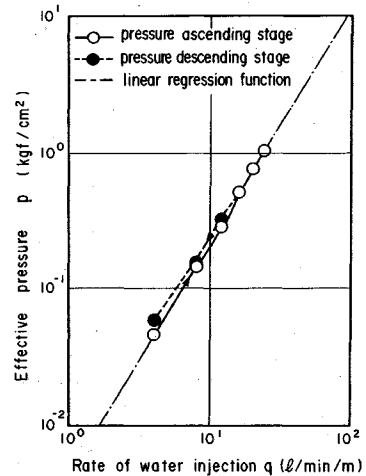


Fig.3 An example of $p-q$ curve drawn in logarithmic scales (Site A, No.31, 1st stage)

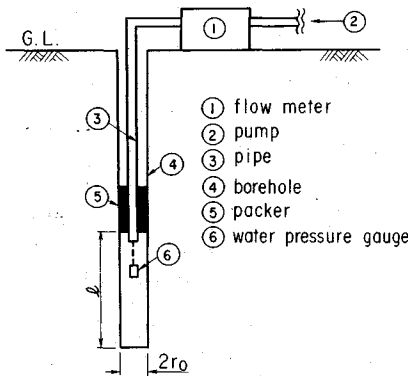


Fig.2 A schematic view of Lugeon water test

量の増加率が漸減する逐次流量減少型²⁾の形状を示す。この型の $p-q$ 曲線が発生する原因としては、①水流が岩盤内で乱流になること、②注入管の水頭損失に関する圧力補正の誤差、③スライム等による孔周辺地盤の目詰まりの助長、等が考えられるが、対象岩盤の状況および試験装置の精度を考慮するに、主原因は乱流現象にあるといえる。

Fig.1 の $p-q$ 曲線からルジオン値を算定する際には、以下に示す対応が考えられる⁷⁾。なお、透水性の高い岩盤における試験で良く見られるように、この試験においても最大注入圧力が 10 kgf/cm^2 に達していないため、ルジオン値としては、 $p-q$ 曲線を外挿し、注入圧力 10 kgf/cm^2 時の流量として換算ルジオン値を求めることになる。

まず、高ルジオン値については、グラウチングに代表されるダム基礎岩盤の浸透流制御の要否が判定できればよいという判断から、換算ルジオン値を取って算定せず、「透水性が極端に大きい (例えば、 $50 Lu$ 以上)」とだけ

判定する対応がある。

次に、透水性の大小をより定量的に把握するためにルジオン値を算定する場合には次のような対応がある。一般には、「ルジオンテスト技術指針」⁹⁾の「 $p-q$ 曲線に直線関係があることを確認したうえでルジオン値を計算する」という規定に従い、高圧部の直線性の良いデータを外挿して注入圧力 10 kgf/cm^2 時の流量である換算ルジオン値 Lu_1 を求める。

また、乱流状況が発生した場合の $p-q$ 曲線がべき数が 1 から 2 程度のべき関数で比較的良く近似できる^{3), 4), 8)}ことを考え、常に算術目盛での $p-q$ 曲線の直線関係のみに着目するのではなく、Fig.3 に示すように両対数紙上に $p-q$ 曲線を描き、その直線関係から注入圧力 10 kgf/cm^2 時の流量を求めて換算ルジオン値 Lu_2 とする方法も考えられる。この方法の方が外挿方法としてはより適切で、かつルジオン値としての値の一義性がある。さらに、ルジオンテストのように、試験孔から放射状に注入されると、試験孔周辺では乱流状態にある水流も、試験孔からある程度離れた地点で遠では層流となる。これを考慮して岩盤の層流および乱流抵抗則を求め^{3), 4)}、その抵抗則を用いて理論的に注入圧力 10 kgf/cm^2 時の流量を算出して求めたルジオン値 Lu_1 (以下、乱流換算ルジオン値と称す。文献6)等では、本文 Lu_2 を乱流換算ルジオン値と称していたがここで改めて再定義しておく。)の方がより正確に水流状況を考慮したルジオン値といえる。しかし、サイト A での試験結果より描いた Fig.4 によると、 Lu_1 と Lu_2 は非常によく一致しており、簡便に求められる Lu_2 の方が実用的といえる。

いま、サイト A での試験結果から求めた Lu_1 と Lu_2 の比と試験時の最高注入圧力 p_{max} の関係を Fig.5 に示す。この図において、 p_{max} が広範囲に渡っているのは、

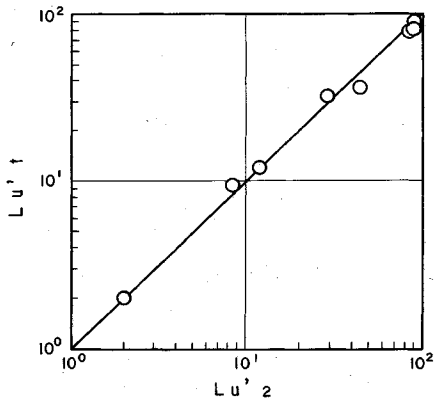


Fig.4 Relationship between Lu'_2 and $Lu't$ (Site A)

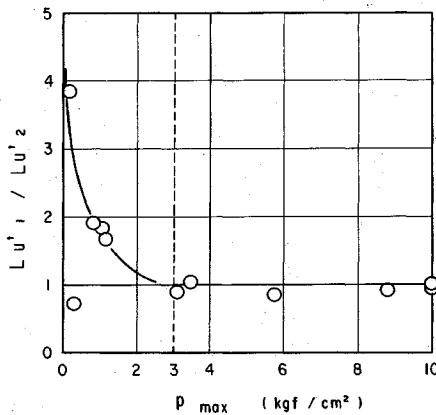


Fig.5 Relationship between p_{max} and Lu'_1/Lu'_2 (Site A)

使用ポンプの容量に限界があるため、岩盤の透水性に応じて p_{max} の変更を余儀なくされたことによる。また、 Lu'_1 は最高圧力 2 点を直線で結ぶことにより求めた。 Lu'_2 を求めるための両対数紙上の $p-q$ 曲線は、全てのケースについて非常に良い直線関係を示していた。この図より、 p_{max} を 3 kgf/cm^2 以上で試験を実施した場合は乱流状態を特に意識していない Lu'_1 と意識している Lu'_2 はほぼ一致するが、 p_{max} が 3 kgf/cm^2 よりも小さくなると徐々に Lu'_1 は Lu'_2 よりも大きくなる傾向にある。よって、 p_{max} を 3 kgf/cm^2 以上で試験を実施すれば、従来どおり Lu'_1 をルジオン値とすることに大きな問題はないと考えるが、より値の一義性に重点を置いて Lu'_2 、 $Lu't$ も併せて求めておくことが望まれる。

一方、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る。よって、浸透流制御の要否のみならず漏水量を見積もり、適切な浸透流制御範囲を決定する際には、層流抵抗則の係数である透水係数の推定精度が重要となる。そこで、層流状態により近い低圧部のデータから換算ルジオン値 Lu'_3 を求めて透水係数に変換するという

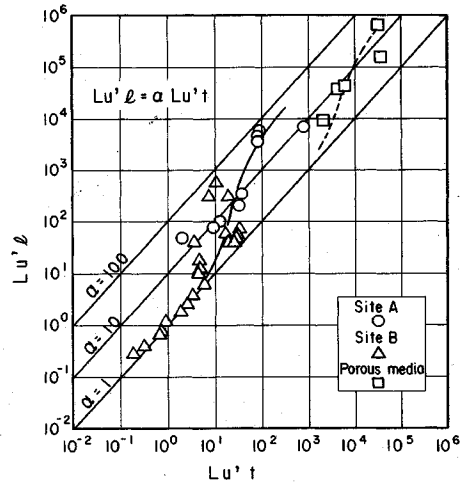


Fig.6 Relationship between $Lu't$ and $Lu'1$

対応もある。筆者らも文献 2) ではこの方法を推奨していた。しかし、実際の試験においては、サイトごとに設定圧力段階および値が異なるため、 Lu'_3 の値としての一義性が乏しい。

3. ルジオン値と透水係数の関係

2章では、特に、ルジオンテストの結果に乱流の影響が確認された場合（乱流現象が確認されない場合も含めて）、 Lu'_2 あるいは $Lu't$ をルジオン値として採用することが値の一義性という観点から優れていることを示した。その一方で、ダム基礎の浸透を支配し、漏水量の算定に必要な岩盤の流水抵抗則、特に透水係数 k を求めることの重要性も述べた。そこで本章では、亀裂性岩盤サイトにおける原位置試験と高透水の多孔質媒体を模した透水性コンクリートおよびガラスビーズ供試体に対する室内試験の結果から求めた乱流換算ルジオン値 $Lu't$ と透水係数 k に変換可能な層流換算ルジオン値 $Lu'1$ の関係を Fig.6 に示す。 $Lu't$ は、ルジオンテスト時に注入圧力 10 kgf/cm^2 時においても層流で水が流れるとして推定したルジオン値である。よって、 $Lu'1$ は適切な単位変換および境界条件の考慮により容易に k に換算することができる⁹⁾。なお、亀裂性岩盤サイトの試験結果としては、非常に高透水性であったサイト A での結果の他に、それとは対照をなす比較的 low 透水のサイト B での結果も含んでいる。サイト B は花崗岩と閃緑岩で構成されているが、その他の地質、試験情報は文献 10) を参照されたい。また、室内試験については、文献 3)、4) を参照されたい。

図中の実曲線は亀裂性岩盤サイトの、点曲線は多孔質媒体の $Lu't$ と $Lu'1$ の関係の傾向を示したものである。

Fig.6 から以下のことがわかる。

- ① 亀裂性岩盤の場合、 $Lu't$ が 5~6 以下の範囲では

$Lu't$ は $Lu'l$ にほぼ等しく、ルジオンテスト時の水流状況が層流であることがわかる。

② $Lu't$ が 5~6 よりも大きくなると、 $Lu'l$ は $Lu't$ に対して徐々に大きくなり、 $Lu't$ が 100 程度になると $Lu'l$ が $Lu't$ より約 2 オーダ大きくなってきている。これは、ルジオンテスト時の水流に乱流の影響が強く現れてきたためである。

③ ①, ②の結果から、Houlsby¹¹⁾ がルジオンテストの精度が対数的であると指摘したことが理解できる。つまり、ルジオン値(本論文の $Lu't$ にあたると考えてよい)が 1~5 までは ± 0.5 , 5~15 までは ± 1 , 15~50 では ± 10 , 50~100 では ± 30 の誤差があるという指摘である。

④ 多孔質媒体の方が亀裂性岩盤より $Lu'l/Lu't$ が 1 より大きくなり始める透水性 $Lu't$ が大きい。これは、前者の方が後者よりも比較的高透水域まで乱流現象が発生しにくいことを示している。

上記の試験結果、特に原位置試験結果については、今回試験を実施した 2 サイトにおける定量的表示であることを記しておきたい。しかし、定性的には一般論として容認できるうえ、今後多くのサイトにおいて同様の作業を行い $Lu't$ と $Lu'l$ の関係を整理することにより、岩種ごとの一般的なルジオン値と透水係数の定量的な関係が得られると考える。

4. 結 論

本文の主たる結論は以下のとおりである。

(1) 岩盤中で実施されたルジオンテスト結果については、乱流現象の発生を確認するとともに、 $p-q$ 曲線を両対数紙上に描いて、その直線関係から求めた Lu'_2 か、岩盤の流水抵抗則を知ったうえで理論的に算定した $Lu't$ をルジオン値として採用することが、値の一義性という点で優れている。

(2) ルジオン値 $Lu't$ とダム基礎からの漏水量算定に非常に重要な透水係数 k (本文中では $Lu'l$) の関係を 2 つの亀裂性岩盤サイトにおける現場試験と多孔質媒体に対する室内試験の結果に基づいて整理した。その結果、以下の 2 点が明らかとなった。

① 亀裂性岩盤サイトでは、 $Lu't$ が 5~6 以上になる

と乱流の影響を受けはじめ、その後 $Lu't$ は徐々に $Lu'l$ に比して小さくなり、 $Lu't$ が 100 程度になると $Lu'l$ と $Lu't$ の差が約 2 オーダと開いた。

② 多孔質媒体の方が亀裂性岩盤より乱流になりにくい。

謝 辞：室内および原位置試験結果の解析には沖縄総合事務局北部ダム事務所の安仁屋勉氏(元・建設省土木研究所研究員)に多大な御協力を賜った。記して感謝の意を表す次第です。

参 考 文 献

- 1) Ewert, F.K. : Rock grouting with emphasis on dam sites, Springer-Verlag, pp.158~162, 1985.
- 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，第 412 号/Ⅲ-12, pp.51~60, 1989 年 12 月.
- 3) 松本徳久・山口嘉一・安仁屋勉：岩盤透水性の新たな評価の試み，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.
- 4) 山口嘉一・ほか：高透水性岩盤の層流および乱流抵抗則の原位置測定，土木学会論文集，第 454 号/Ⅲ-20, pp.27~36, 1992 年 9 月.
- 5) 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)国土開発技術研究センター，p.18, 1984 年 6 月.
- 6) 山口嘉一・澁市秀雄・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.
- 7) 山口嘉一・澁市秀雄・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，土木学会，pp.401~405, 1989 年 2 月.
- 8) Lancaster-Jones, P.F.F. : The interpretation of the Lugeon water-test, Journal of Engineering Geology, Vol.8, pp.151~154, 1975.
- 9) Zangar, C.N. : Theory and problems of water percolation, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monographs, No.8, pp.69~71, 1953.
- 10) 山口嘉一・安仁屋勉・松本徳久：高透水性岩盤の流水抵抗則(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，pp.202~206, 1991 年 2 月.
- 11) Houlsby, A.C. : Minutes of the Sessions of the 15th Congress, on Large Dams, pp.414~415, 1985.

(1991.7.24 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN LUGEON VALUES AND COEFFICIENT OF PERMEABILITY FOR ROCK FOUNDATIONS

Yoshikazu YAMAGUCHI and Norihisa MATSUMOTO

Analyzing the results of Lugeon water test (LWT), the most popular field permeability test for rock foundations of dams, we have to pay attention to water flow conditions, namely not only laminar flow condition but also turbulent one. In this paper we have proposed the appropriate method of calculating Lugeon values using the results of LWT which are under the influence of turbulent flow. Furthermore we have shown the relationship between Lugeon value obtained with the above-mentioned method and coefficient of permeability which would be needed in evaluating amount of leakage from reservoir through dam foundation.