

(98) 亀裂性岩盤における透水試験結果の評価について

東京電力㈱ 角江 俊昭
東京電力㈱ 久保田克寿
東京電力㈱ ○萩原 義孝

Evaluation of Permeability Test on Jointed Rock Mass

Toshiaki KAKUE, The Tokyo Electric Power Co., Inc.
Katutoshi KUBOTA, The Tokyo Electric Power Co., Inc.
Yoshitaka HAGIWARA, The Tokyo Electric Power Co., Inc.

Abstract

Lugeon test is one of the general evaluation methods of permeability of rock mass. The method of converting Lugeon value into the permeability presupposes that the hydraulic regime is laminar flow at testing. It has been thought that the hydraulic regime become turbulent if Lugeon test is effected in highly permeable rock mass having many open cracks and the Lugeon values don't indicate the permeability correctly. From these points of view we studied the relationship of Lugeon value with the permeability. We simplified the crack in the joint type rock mass as the horizontal plane parallel plates and obtained the P-Q curve for a variety of permeability. Next we performed the test with highly viscous fluid to have laminar flow. As a result of the theoretical and practical consideration, we had the following findings that what was recognized as 10 to 100Lu under the turbulent flow may be maximum 100 to 10,000Lu under the laminar flow.

1. はじめに

ダム基礎等の岩盤の透水性を評価する方法として、ボーリング孔をステージ（1区間は通常 5m）に区切ってこのステージ内から水を注入するルジオン試験が一般に採用されている。このルジオン試験によりルジオン値 [有効圧力10kg/cm²のとき単位長さ当たりの注入量（ℓ/分/m）] を求め、これから透水性を、1Lu = 1×10^{-5} (cm/sec) 程度と換算する従来の方法を適用する場合、いくつかの仮定条件が成立している必要がある。しかしながら、亀裂の発達した高透水性の岩盤においてはこの仮定が成立しておらず、ルジオン試験より求めたルジオン値が岩盤の透水性を正しく評価していないことが想定される。亀裂の発達した高透水性岩盤におけるルジオン試験条件と前記の仮定条件との違いを表、1に示す。これらの仮定条件の違いのうち透水性の評価に与える影響が最も大きいものとして、乱流の発生が挙げられる。以上のことから本報告は亀裂性岩盤の割れ目を単純なモデルに置き換え、ルジオン試験により得られる値と透水性の関係を理論的に考察するとともに、実岩盤を対象として高粘性流体を用いた透水試験を実施することにより、乱流の発生が亀裂性岩盤における透水試験の結果に与える影響を評価するものである。

2. 乱流の影響評価

ルジオン試験における乱流の影響を評価するために、亀裂性岩盤の割れ目モデルを単純化し、水平な平行平板とし、水はこの平行平板に直交するボーリング孔から放射状に流れると仮定して、ルジオン値と透水性の関係を定量的に把握することを試みた。

表. 1 透水係数算出における仮定と実際の相違

換算係数算出における仮定	実際の岩盤における条件
・ダルシーの法則が成立（層流状態）	・亀裂の幅、圧力、流量の条件により層流のみならず乱流が発生し、ダルシーの法則が成立しなくなる。
・均一連続体	・同じ透水性を持った亀裂でも、ボーリング孔との交差角度により水の流入面積、亀裂の出現頻度に差が生じ、透水性の評価が変わってくる。
・放射状平行流（重力の影響無視）	・地下水位以上では重力の影響が無視できず、放射状平行流とみなせない。
・影響半径 5m（ステージ長と同じ）	・影響半径を 5m としているが、実際の影響半径は種々の条件に左右不明である。

(1) ルジオン試験で乱流となる条件

すきま幅 a の平行平板の間の流れのレイノルズ数 (Re) は

$$Re = \frac{v \cdot a}{\nu} \quad \dots (1)$$

と定義される。ここで、 v は水の流速、 ν は水の動粘性係数である。また、放射状流れ故、すきま内の流量 (q) は

$$q = 2\pi r a v(r) = 4\pi r_c \nu Re_c \quad \dots (2)$$

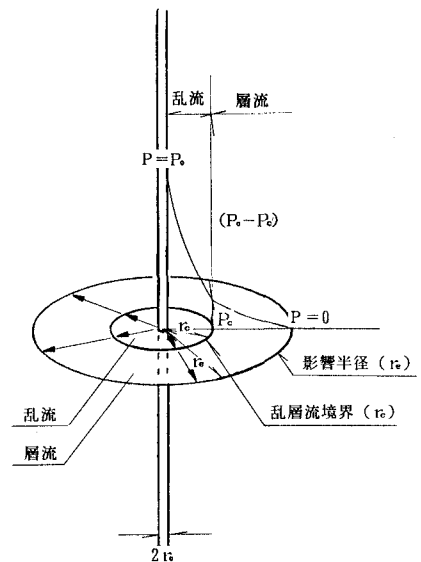
となり、乱流と層流の境界となる半径 (r_c) は

$$r_c = \frac{q}{4\pi \nu Re_c} \quad \dots (3)$$

と表せる。ここで Re_c は限界レイノルズ数である。上式から乱層流境界 (r_c) は流量 (q) のみに依存し、すきま幅 (a) に関係しないことが分かる。

ルジオン試験において亀裂内の流況が層流となる条件は乱層流境界半径 (r_c) が、ボーリング孔半径 (r_b) より小さいこと、すなわち亀裂内の流量 (q) が $q < 4\pi r_b \nu Re_c$ の時（限界レイノルズ数 $Re_c = 500$ とし、ボーリング孔径 $\phi = 66\text{mm}$ の場合、 $3.3\ell / \text{分} / \text{m}$ 以下）であることが分かる。

図. 1 亀裂内の流れのモデル



(2) 乱層流混在する場合の $P-Q$ 関係の定式化

ボーリング孔からそれに直交する平行平板に注入し、乱流が発生した場合の圧力と流量の関係を求める。平行平板の間の流れは、層流の時にはポアズイユ則にしたがい、乱流の時にはマニング則に従うものとする。ルジオン試験時に乱流が発生すると、ボーリング孔内の圧力 (P_0) は乱流域でのロスと層流域でのロスの合計に等しくなることから

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \underbrace{(P_0 - P_c)}_{\text{乱流域}} + \underbrace{(P_c - 0)}_{\text{層流域}} \\
 &= 0.63 \frac{\gamma n^2}{\pi^2 a} \frac{q^2}{10^3} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_c} \right) + \frac{6\mu q}{\pi a^3} \ln \frac{r_b}{r_c} \quad \dots (4)
 \end{aligned}$$

となる。

ここで $r_c = \frac{q}{4\pi \nu Re_c}$ 、 γ は水の単位体積重量、 μ は水の粘性係数、 n はマニングの粗度係数である。

即ち $P_0 = f(q, a)$ となり、1ステージに $a_1 \cdots a_j \cdots a_m$ の亀裂幅を有する場合

P_0, a_j に対応する q_j を上式より求め、各亀裂での q_j の総和 $\sum_{j=1}^m q_j$ がステージ当たりの流量となる。

(3) P-Q 曲線の試算に基づくルジオン値と透水性の関係

層流状態での測定区間の平均透水性 $\bar{k}$ と亀裂分布 (幅 a_j と本数 m) の関係は、

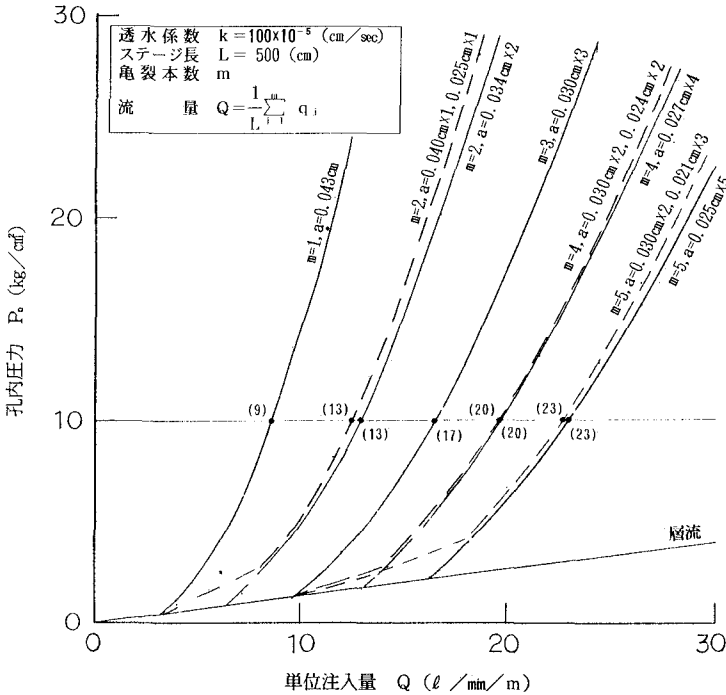
$$\bar{k} = \frac{g}{12 \nu L} \sum_{j=1}^m a_j^3 \quad \dots (5)$$

となる。ここで L はステージ長である。式(4)、(5)を用いて、 $\bar{k} = 100 \times 10^{-5} \text{ cm/sec (75Lu)}$ となるいくつかの亀裂の組合せについて、注入圧力 (P_0) と注入量 (Q) の関係を計算した結果を図. 2 に示す。(ここで、マンニングの粗度係数 $n = 0.03 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{sec)}$ 、限界レイノルズ数 $Re_c = 500$ とした。)

この図から次のことが明らかとなる。

- ① 各亀裂系とともに注入圧力が低く流量が少ない段階では層流状態の流れをなすが、一定流量以上 (前述したとおり、亀裂内の流量が $q > 4\pi r_0 \nu Re_c$) になると乱流状態に移行し、流量に対する圧力上昇が大きくなる。
- ② 同じ透水性の岩盤であっても、亀裂本数が少なく即ち亀裂幅が大きいほど、早い段階で乱流状態になる。
- ③ 大小の亀裂が混在する亀裂系の方が、層流から乱流への移行が緩慢となる。

図. 2 亀裂分布による P-Q 曲線の変化



次に岩盤透水性の変化と乱流の影響度の関係について計算した結果を表. 2、図. 3 に示す。

岩盤の透水性を $10 \sim 1,000 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ と変化させ、これに対応する亀裂系として、亀裂本数 1本で代表されるモデル (最も乱流を発生しやすく、ルジオン値を見掛け、最も小さく判定することとなるモデル) を用いて、各種透水性について P-Q 曲線を求めた。

これより、ルジオン値 (圧力 10 kg/cm^2 における読み値) が $10 \sim 100 \text{ Lu}$ となるものは、層流状態での透水性としては $100 \sim 10,000 \text{ Lu}$ と 1~2 オーダー大きくなる可能

表. 2 層流、乱流でのルジオン値の違い

透水性 $\times 10^{-5} \text{ (cm/sec)}$	10	50	100	500	1,000	10,000
ルジオン値 A (Lu)	8	38	75	380	750	7,500
ルジオン値 B (Lu)	4	7	9	19	27	94
A/B	1.9	5.4	8.3	20	28	80

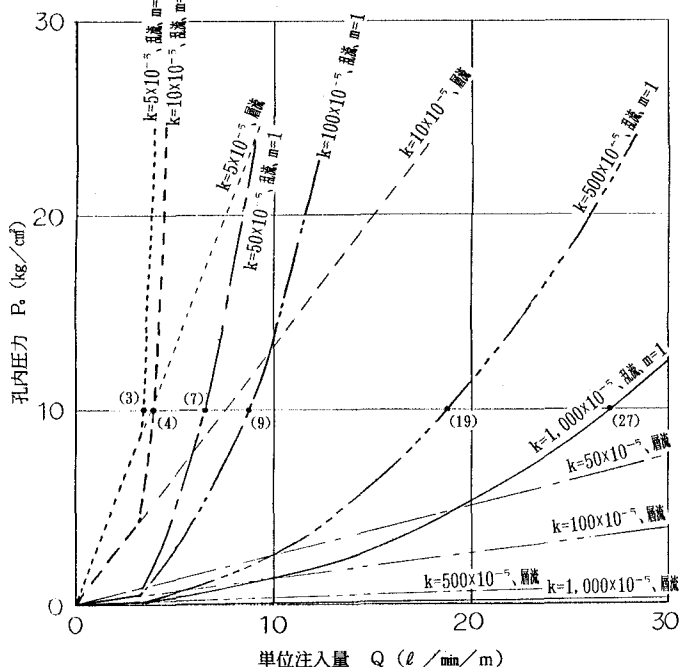
A : 層流条件下でのルジオン値
B : 乱流条件下でのルジオン値

性があることが分かる。

図. 3 透水係数によるP-Q曲線の変化

3. 高粘性流体による透水試験

前記の乱流の影響の検討結果を実験的に評価するために、亀裂の発達した高透水性の岩盤において、高粘性流体を用いたルジオン試験を実施した。層流状態のルジオン値を知る方法として高粘性流体を用いることが効果的であることは、いくつかの報告が成されている。今回は高粘性流体として水溶性セルロースエーテルを用い、実岩盤（節理の発達した安山岩）を対象に3孔、7ステージの試験を実施した。ボーリング孔径66mm、ステージ長は5mであり、注入圧力についてはパッカーにセットした間隙水圧計で、ステージ内の圧力を直接測定した。



試験はまず最初に水によるルジオン試験を実施し、その後、注入圧力を一定にして、高粘性流体を用い粘性の小さなものから大きなものへと順次変化させルジオン試験を実施した。層流状態でのルジオン値は粘性と注入量が一次の逆比例となる区間から外挿して求めた。試験結果は表. 3 のとおりである。また透水試験のP-Q曲線、高粘性流体試験結果の一例を図. 4 に示す。この結果、水により得られたルジオン値（3～1,000Lu）は乱流の影響を強く受け、層流状態でのルジオン値（13～14,000Lu）の1/4～1/66と小さく評価されることが分かった。

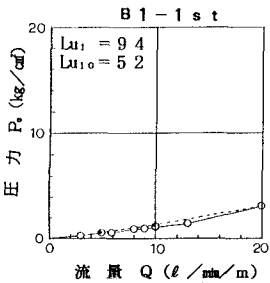
また、水と高粘性流体により得られたルジオン値の関係を図. 5 に示す。同図には参考として、山口ら²⁾、岩本ら³⁾による同様の試験結果も図示した。また2章で得られた乱流状態でのルジオン値と、層流状態でのルジオン値の関係（亀裂が1ステージに1本の場合）の計算結果を破線で同図に示した。この図から、亀裂を単純化して求めた理論計算結果と、高粘性流体を用いた試験の結果は同様な傾向を示しており、今回提案する理論の有効性を示唆するものと考えられる。

4. おわりに

本報告では、亀裂性岩盤において従来のルジオン試験により得られた透水性について、亀裂を平行平板と仮定した簡易なモデルでの理論的検討を行った結果、従来のルジオン試験により10Lu以上と評価していた透水性は、乱流の発生に伴い層流状態での透水性としては1オーダー以上過小に評価している可能性があることが分かった。また、実岩盤を対象とした高粘性流体を用いた透水試験結果からも同様の傾向が得られ、今回の簡易なモデルを用いても、ルジオン試験における乱流発生による影響度合いを説明し得るということが分かった。今後はさらに亀裂内の水および高粘性流体の流れ則、亀裂の合流、拡散の影響を実証評価することにより、高透水性岩盤における透水性評価方法の確立を目指すこととしたい。

図. 4 試験結果の一例

(1) ルジオン試験



(2) 高粘性流体試験

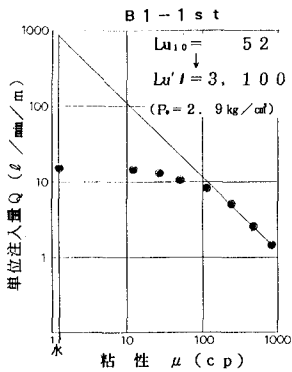
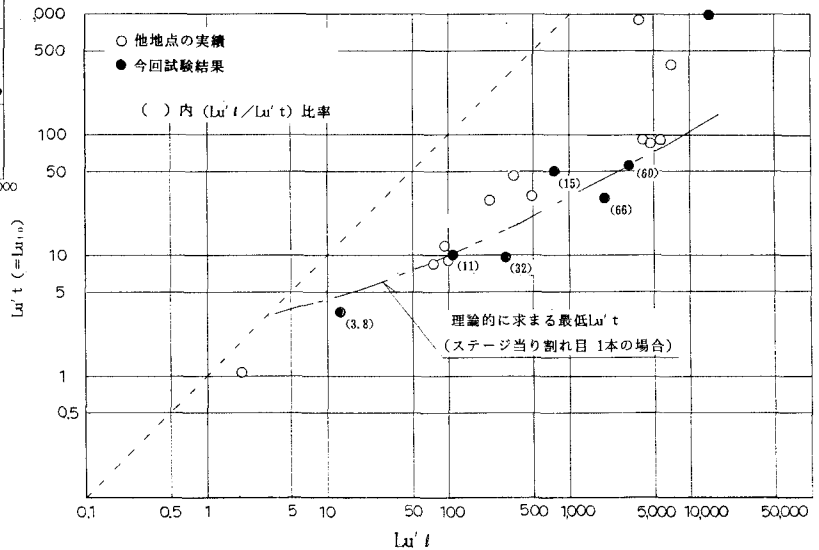


表. 3 高粘性流体試験結果

孔番	ステージ	透 水 試 験			高粘性流体試験		Lu' t / Lu' t
		圧 力 (kg / ㎠)		ルジオン値 Lu' t (Lu ₁₀)	注 入 圧 力 P ₀ (kg / ㎠)	ルジオン値 Lu' t	
		最小	最大				
B 1	1 s t	0.3	3.0	52	2.94	3,100	60
B 2	2 s t	0.5	5.0	10	3.14	110	11
	3 s t	0.6	5.1	3.4	3.14	13	3.8
B 3	1 s t	0.0	0.2	1,000	0.64	14,000	14
	2 s t	0.3	4.1	29	2.14	1,900	66
	3 s t	0.6	3.1	50	2.14	740	15
	4 s t	0.6	5.1	9.5	4.14	300	32

図. 5 水によるルジオン値 (Lu' t) と
高粘性流体試験によるルジオン値 (Lu' t) の比較



参考文献

- 1) 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回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1985年
- 2) 山口, 渋谷, 松本; 高透水性岩盤に対する透水試験, 土木研究所報告第 180号の 1, 1990年
- 3) 岩本, 園元, 有門, 上妻; 高粘性流体を用いた岩盤透水係数の測定, 応用地質31巻 2号, 1990年
- 4) 松本, 山口, 阿仁屋; 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, 1990年
- 5) 山口, 阿仁屋, 松本; 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, 1991年