

(34) 高透水性岩盤の流水抵抗則

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 徳久
日特建設(株)	正会員	波市 秀雄

Resistance Laws of Highly Permeable Rock Masses

Yoshikazu YAMAGUCHI, Tsutomu ANIYA, Norihisa MATSUMOTO
Public Works Research Institute, Ministry of Construction
Hideo SHIBUICHI
NITTOC Construction Co., LTD

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 many open joints. It costs much money to control the seepage in underground completely on these sites. If we could predict amount of leakage from reservoir, rational grouting would be accomplished. Therefore, we have developed new field permeability tests with high viscous fluid and carried out that test at T Dam site in addition to Lugeon water test. We reported the testing method and resistance laws (in both laminar and turbulent flow condition) of rock foundation as results of tests. Furthermore, we have developed seepage analysis program with which we can take laminar and turbulent flow condition into consideration. By using this program, we also predicted amount of leakage from T Dam reservoir and reported the results.

1. はじめに

近年、良好なダムサイトの減少に伴い、地下水位が低く、かつ高透水性節理性岩盤上にもダムの建設に対する要求が高まりつつある。このようなダムサイトにおいても、ダムの湛水に伴い発生する基礎浸透流の動水勾配が小さいことを考えると、高透水性岩盤の層流時の透水係数を求め、浸透流解析により得られる貯水池からの漏水量をパラメータに合理的な止水処理範囲を決定できるのではないかと考えた。そこで実際に、ダムサイトにおいて高粘性の流体を用いた透水試験を実施し、高透水性岩盤の層流時の透水係数を求めることに成功し、既にその結果については報告している^{1)~3)}。しかし、同時にダムの湛水により基礎岩盤に発生する程度の小さい動水勾配の浸透流でも既に乱流状況にあることも判明した。そのため、層流時の透水性を把握してダムからの漏水量を算定することの精度に疑問が生じた⁴⁾。そこで今回は、同一の試験地点で実施した高粘性流体を用いた透水試験とルジオンテストの結果から高透水性岩盤の層流および乱流時の流水抵抗則を求める方法を提案するとともに、実測データに適用した結果についても報告する。また、乱流の抵抗則も考慮できる浸透流解析プログラムも開発し、実際に上記で求めた抵抗則を用いて漏水量の算定を試みた。この際、層流時の抵抗則だけを用いた場合の漏水量算定精度についても検討を加えた。

2. 高透水性岩盤の流水抵抗則

2. 1 高粘性流体を用いた透水試験方法

試験方法につ

いては既に報告
している^{1)~3)}

が、ここでもう
一度簡単に記す。

試験はTダム
建設予定サイト
のうち、六角柱
状節理が発達し
た右岸地山に設
けられた横坑R
-1内で実施し
た(図-1参照

)。試験は同一

のボーリング孔に水から順次粘性の高い流体を10種類程度一定圧で
注入し、各流体の粘性と流量を測定するというものである。

試験結果の一例を図-2に示す。図中の q 、 μ は流入量と粘性を、
添え字H、Wは高粘性流体と水を表している。この試験では、注入
圧力 0.567kgf/cm^2 での水の流量は 18.5 l/min/m であり、ルジオン値
 μ' をこの一点から求めると328 となる。流体の粘性を段階的に上げ
ていくと水の数十倍以上の粘性の流体から、粘性と流量が反比例し、
図面上で傾き1の直線になり、層流が確認できる。層流領域のデー
タから最小2乗法により傾き1の近似直線を求めると、粘性比1で
の流量比が0.056 になることがわかる。つまり、上記の圧力で水を
注入した際は、乱流の影響を受けているため透水量は層流で流れた
場合の0.056 倍しかないことがわかる。よって層流時のルジオン値
 $\text{Lu}'1$ は約5800 ($=328/0.056$) と推定できる。

次に注入水が層流状態で流れる限界の注入圧力である層流限界圧力 P_{1c} の推定方法を示す。これは高粘性
流体透水試験において、注入圧力と層流に遷移する限界での粘性から次式で求めることができる。なお、水
と高粘性流体の密度は近似的に等しい。

$$P_{1c} = (\nu_w \mu_w / \nu_{HCR} \mu_{HCR}) \cdot P_0 \div (\mu_w / \mu_{HCR})^2 \cdot P_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 μ_w : 水の粘性係数、 ν_w : 水の動粘性係数、 μ_{HCR} : 乱流から層流への遷移時の粘性係数、
 ν_{HCR} : 乱流から層流への遷移時の動粘性係数、 P_0 : 試験圧力。

図-2を例にとると $\mu_{HCR} / \mu_w = 46$ 、 $P_0 = 0.567\text{kgf/cm}^2$ である事から、層流限界圧力 P_{1c} は $0.27 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^2$ と推定できる。

2. 2 乱・層流抵抗則の求め方

同一ステージで、前節で示した高粘性流体を用いた透水試験のほかにはルジオンテストを実施し、層流時の
抵抗則($i = v/k \dots\dots (2)$)のほかには乱流時の抵抗則($i = c v^n \dots\dots (3)$)を求める。ここに、 i
は動水勾配、 v は流速、 k は透水係数で c 、 n は乱流の抵抗則を示す定数である。

乱・層流時の抵抗則、つまり k 、 c 、 n を求めるに際しては、①対象岩盤はマクロに見て均質な多孔質媒

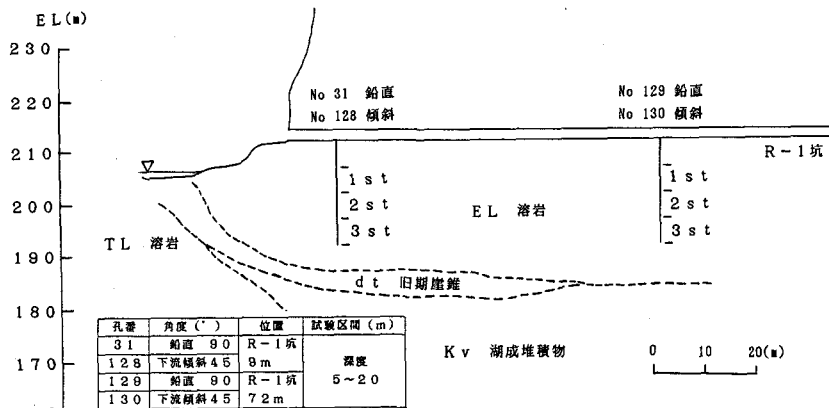


図-1 試験サイトの地質模式断面図と試験位置

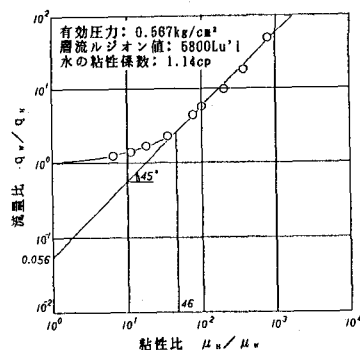


図-2 高粘性流体試験結果例
(No31 2st)

体と考える、②異方性については考慮しない、③試験孔からの水の流れは孔軸に垂直である等の仮定を設ける。

これらの仮定のもとで、透水係数を次式から求める。

$$k = (Q / 2 \pi h l) \ln (r_1 / r_0) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h ：注入圧力の水頭表示 (10000cm)、 l ：試験区間長 (500cm)、

r_1 ：仮想した影響半径 (500cm)、 r_0 ：試験孔の半径 (3.3cm)、

Q ： h 、 l 、 r_0 のもとでのボーリング孔への注入量 (層流ルジオン値から算定)。

定数 c と n には次式が成立するため、 k が既知であれば乱流時の抵抗則としては n だけ求めればよいことになる。

$$c = v_{cr} n^{-1} / k \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $v_{cr} = k h_0 r_0 \ln (r_1 / r_0)$ は層流から乱流へ移行する限界での流速で、 h_0 は層流限界圧力 P_1 の水頭表示である。

定数 n はルジオンテストの結果として得られる注入圧力-流量曲線と理論式から得られるその形状が最も近くなる値として推定した。なお、試験孔からの水流は、ある影響範囲 (ここでは $r_1 = 500\text{cm}$) を考えた場合、乱流の影響を受ける水流状況は図-3に示す2

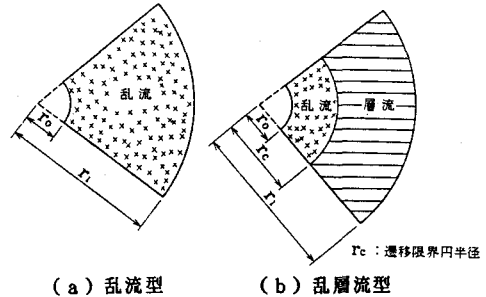


図-3 流れの分類

つがあるため、各設定圧力下での流量は、下記の (6) あるいは (8) 式より求めた。

①乱流型 (図-3 (a) 参照)

$$Q = 2 \pi l \left(\frac{h_0 k v_{cr} n^{-1} (n-1)}{r_0^{1-n} - r_1^{1-n}} \right)^{1/n} \dots\dots\dots (6)$$

②乱層流型 (図-3 (b) 参照)

$$h_0 = (r_0 v_{cr})^n \frac{(r_0^{1-n} - r_c^{1-n})}{k v_{cr} n^{-1} (n-1)} + r_c v_{cr} \frac{\ln (r_1 / r_c)}{k} \dots\dots\dots (7)$$

(7) 式をNewton法等により数値的に解く事で、未知のパラメータ r_c (図-3参照) を求めることができる。 r_c が求まれば、次式より乱層流型の注入量 Q を求めることができる。

$$Q = 2 \pi l r_c v_{cr} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 h_0 は有効注入圧力の水頭表示である。

2. 3 試験、解析結果

表-1に前記の手法で求めた試験結果の一覧を示す。この結果から31,128孔の位置する川よりでは129,130孔の位置する山よりに比べて透水性が大きいことがわかる。

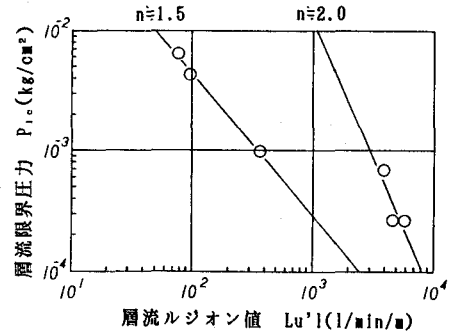
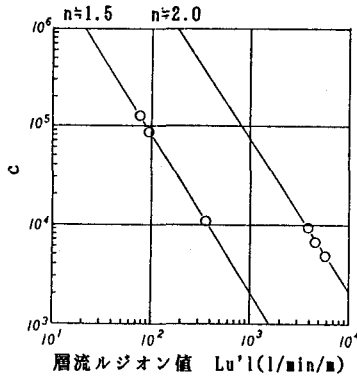
また、一般にベキ数 n は1~2の間の値をとるといわれているが、今回の結果でも透水性の大きい川よりではほぼ $n=2.0$ 、比較

表-1 試験結果一覧

孔-St	Lu'l	$P_1 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^2$	$k \text{ cm/s}$	$v_{cr} \text{ cm/s}$	n	c	備考
31-1	3900	0.70	5.19×10^{-2}	2.19×10^{-3}	2.007	9183	
31-2	5800	0.27	7.72×10^{-2}	1.28×10^{-3}	1.890	4932	
31-3	4600	0.27	6.13×10^{-2}	9.98×10^{-4}	1.872	8750	
28-1	4000	—	5.33×10^{-2}	—	—	—	注1
28-2	6900	—	9.19×10^{-2}	—	—	—	注1
28-3	—	—	—	—	—	—	注2
29-1	44	—	5.86×10^{-4}	—	—	—	注3
29-2	77	6.4	1.03×10^{-3}	3.97×10^{-4}	1.622	126682	
29-3	—	—	—	—	—	—	注4
30-1	360	0.99	4.76×10^{-2}	2.87×10^{-4}	1.484	10816	
30-2	98	4.3	1.28×10^{-3}	3.32×10^{-4}	1.587	88076	
30-3	210	—	2.80×10^{-3}	—	—	—	注1

- 注1) 乱流のデータが少ないため層流限界圧力が決定できない
 注2) 他目的の試験に使用
 注3) 非定常の影響により信頼度が低いため除外
 注4) 乱流現象が認められないため除外

的透水性の小さい山よりではほぼ $n=1.5$ であった。また、層流ルジオン値 Lu' と乱流抵抗則の定数 c の関係および Lu' と層流限界圧力 P_{l0} の関係を両対数紙上にプロット



すると図-4、図-4 層流ルジオン値と c の関係 図-5 層流ルジオン値と層流限界圧力の関係 図-5 のような左上がりの傾向があることがわかる。さらに、この $Lu' l$ の減少に伴う P_{l0} 、 c の増加には、 n の違いにより異なった傾向があることも伺える。なお、図-6 には実測および上記 c 、 n を用いた理論式より求めた注入圧力-流量関係の例を示す。この図から、両者は非常によく一致しており、 c 、 n の推定精度の高さを知ることができる。

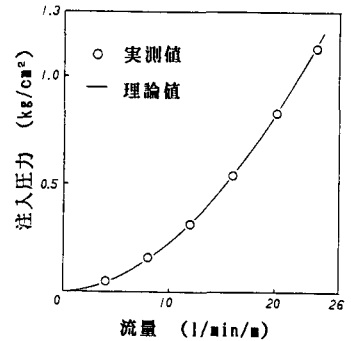


図-6 注入圧力と流量の関係

3. 乱流抵抗則を考慮した浸透流解析

Tダムのリム部のグラウチング範囲と漏水量の関係を知るため浸透流解析を行った。図-7 に浸透流解析モデルを示す。これはTダム右岸側を平面的にモデル化したものである。このモデルにおいてリムグラウト長を変化させて解析を行った。表-2 に解析に用いた入力物性値を示す。岩盤Ⅰ、Ⅱの入力物性値は今回の試験結果を、Ⅲ、Ⅳについては過去のルジオンテストの結果を参照して決定した。表中のケース1とは、高透水性の岩盤Ⅰ、Ⅱの乱流抵抗則をも考慮したもので、ケース2は層流抵抗則のみで処理したもの

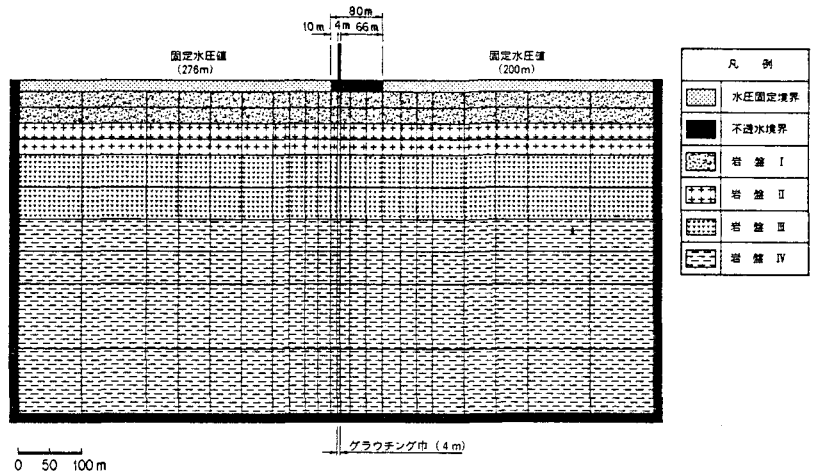


図-7 浸透流解析モデル

である。ケース1での解析結果の一例を図-8 に示す。これはリム部のグラウト長を100mとした場合のもので、図中のハッチ部分が乱流発生範囲である。また、図-9 にケース1とケース2それぞれの場合のリムグラウト長と漏水量の関係を示す。この図からリムグラウト長が短いケースでは、乱流の抵抗則をも考慮した

場合の漏水量は層流のみを考慮した場合に比べてかなり少なく層流抵抗則のみで漏水量を正確に推定することの困難さを知ることができる。ただし、高透水域部程度（本ケースでは100m程度）の範囲をグラウチングすれば漏水量の低減は限界となっていることは、層流の抵抗則を考慮するだけでも知ることにはできる。

表-2 入力物性値

ケース1 --- 乱流も考慮

領域	k (cm/s)	c	n	v_{or} (cm/s)	i_{or}
岩盤Ⅰ	5×10^{-2}	7000	2.0	2.86×10^{-3}	5.71×10^{-2}
岩盤Ⅱ	2×10^{-3}	75000	1.5	4.44×10^{-5}	2.22×10^{-2}
岩盤Ⅲ	3×10^{-4}	—	—	—	—
岩盤Ⅳ	1×10^{-4}	—	—	—	—
グラウチング部	1×10^{-5}	—	—	—	—

ケース2 ----- 層流のみ

領域	k (cm/s)
岩盤Ⅰ	5×10^{-2}
岩盤Ⅱ	2×10^{-3}
岩盤Ⅲ	3×10^{-4}
岩盤Ⅳ	1×10^{-4}
グラウチング部	1×10^{-5}

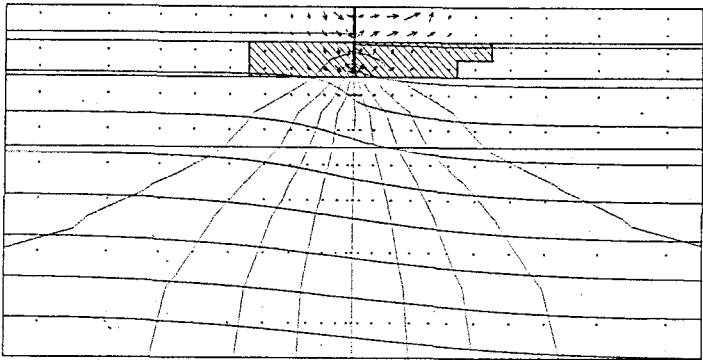


図-8 浸透流解析結果例

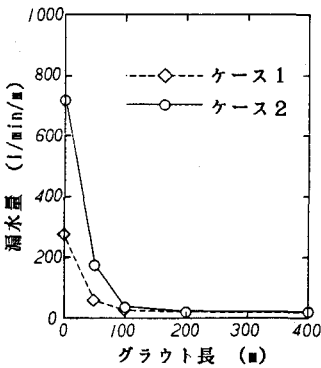


図-9 グラウト長と漏水量の関係

4. おわりに

高粘性流体を用いた透水試験とルジオンテストより高透水性岩盤の層流および乱流時の流水抵抗則を求める方法を提案するとともに、乱流の抵抗則をも考慮した地盤内浸透流解析を試みた。これらには、現実とは異なるいくつかの仮定が含まれているものの、Tダム右岸地山からの漏水量は、乱流の影響をも考慮した場合の方が層流のみを考慮した場合に比べかなり少ないことや、乱流が発生するような高透水域部程度の範囲を止水処理すれば漏水量の低減は限界となることがわかった。

ダムにおいて効率的な止水を行うには、正確な漏水量の把握による経済的な止水範囲の決定が必要である。そのような観点から本研究が役に立てばと考えている。

参考文献

- 1) 松本・山口・渋市：高粘性流体を用いた透水試験，第22回土質工学研究発表会，1988.6.
- 2) 山口・渋市・松本：ルジオンテストにおける乱流の影響と対策，第21回岩力シンポ，1989.2.
- 3) 山口・渋市・松本：高透水性岩盤に対する透水試験，土研所報，第180-1号，1989.12.
- 4) 山口・松本：高透水性岩盤の透水性評価，土木学会第44回年講，1989.10.
- 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，1984.6.
- 6) Muskat, M.: Flow of homogeneous fluids, McGraw-Hill Book Company, 1946.