

(72) 節理性岩盤における乱流状況と透水性評価

建設省九州地方建設局立野ダム工事事務所 末吉 治彦

(株) アイ・エヌ・エー新土木研究所 ○大村富士夫

同 上 加藤 克行

早稲田大学理工学研究科

上野 勇武

1. はじめに

従来、ダム基礎の浸透量や流速あるいはグラウチングなどの止水処理範囲を検討するために、ボーリング孔でのルジオン値をダルシーの法則（層流）に従うものとしてそのまま 1 Lu を $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ と換算して、連続体モデルによって浸透流解析が行われている例が多い。しかし、火山岩等で代表される節理性岩盤を基礎岩盤とするダムに、このような方法を用いると浸透量や止水効果が実状と合わないという問題があった。

これらの原因としては、ルジオンテスト時およびダム湛水時の節理内の水理挙動が層流か乱流か充分把握されていないことも大きな一因としてあげられる。

本報告では、実測の節理モデルを用いて、ルジオンテスト時およびダム湛水時の水理挙動をシミュレーションによって把握するとともに、グラウチングによる止水効果への影響について検討することとした。

2. 解析手法

(1) 単一節理の水理特性

単一節理の水理挙動が層流か乱流かは、開口幅、粗度などと、発生する動水勾配に支配される。ここでは、Louisらが平行板間の一次元流れに対して、理論的、実験的検討から示している次式を用いる。

$$\text{層流: } v = -K_r i \quad \left(K_r = \kappa \frac{gW^2}{12\nu} \cdot \frac{1}{\lambda_A} \right) \quad (1)$$

$$\text{乱流: } v = -K_r' i^\alpha \quad (\text{完全乱流のとき } K_r' = 2\kappa \sqrt{gW} \cdot \lambda_B) \quad (2)$$

ここに、 v は流速、 K_r, K_r' は単一節理の透水係数、 i は動水勾配、 α は乱流の程度を表す係数で、レイノルズ数が100 から2000と変化するに従い、1

(層流) から0.5(完全乱流)へと変化する(図-1)。また、 κ は開口率、 w は有効開口幅、 λ_A, λ_B は節理面の粗度にもとづく抵抗係数である。

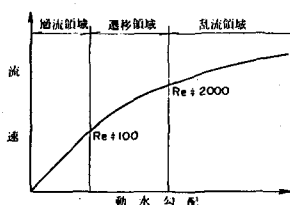


図-1 単一節理の流速と動水勾配の関係

(2) 不連続体モデルによる解析

まず、ルジオンテスト時のボーリング孔からの節理内の浸透挙動を明らかにするために、節理は軸対称に分布するものと仮定し、放射流であることを考慮して、

節理を浸透経路（ネットワーク）とする単位角の軸対称不連続体モデル（ボーリング孔モデル）を、有限要素法によって解析する(図-2(a))。今、ネットワーク中の1つの要素を取り出し、座標系を図-2(b)のようにとると、要素内で成り立つ連続式と運動方程式から、次の支配方程式が得られる。

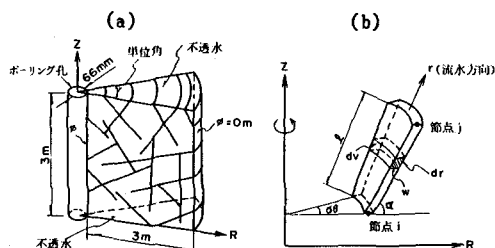


図-2 軸対称不連続体モデル

$$K_r R \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + K_r \cos \alpha \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

ここに、 ϕ はポテンシャル、 R は回転軸から節点 i までの距離、 α は回転軸に垂直な面と要素がなす角である。
また、要素内の内挿関数をつぎのようにおく。

$$[N] = \begin{bmatrix} \log R / R_2 & \log R_1 / R \\ \log R_1 / R_2 & \log R_1 / R_1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

(3) 式を与えられた境界条件のもとで解くための定式化を、ガラーキン法を用いて行くと、次式となる。

$$[K]^e \{\phi\}^e + \{Q\}^e = 0 \tag{5}$$

ここに、 $[K]^e$ は透水マトリックスである。

$$[K]^e = \frac{2 \pi w K_r}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{\log(R_2 / R_1)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

つぎに、節理を有するダム基礎岩盤のダム湛水時の浸透現象が層流か乱流かを明らかにし、ことのき生じる動水勾配の範囲での透水性を評価するために、単位厚さの平面二次元不連続体モデル（等厚モデル）を、軸対称不連続体モデルと同様に、有限要素法によって解析する（図-3(a),(b)）。

なお、両モデルとも、乱流領域を考慮するために K_r を非線形として扱った。

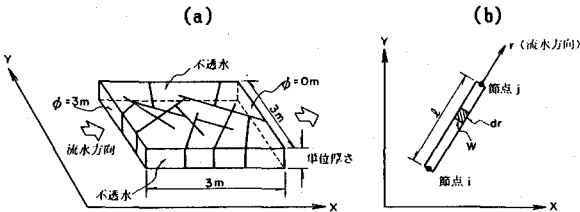


図-3 平面二次元不連続体モデル

3. ルジオンテスト時の浸透挙動

解析に用いるネットワークの系路および開口幅は、安山岩中の横坑天端の実測節理に基づいて、図-4に示すようにモデル化した。また、開口幅の頻度分布は図-5に示すとおりである。なお、この横坑付近のルジオン値はほぼ70Lu程度である。このネットワークを図-2に示した軸対称モデルに適用して検討する。

ボーリング孔と反対側の境界では $\phi = 0$ m とし、ルジオンテストを再現するためボーリング孔内の注水圧は $0.1 \sim 10.0$ kgf/cm² まで変化させた。また、開口幅の影響を検討するため、オリジナルモデルの開口幅を一律 0.75 倍、0.5 倍と小さくした場合、およびオリジナルモデルのパス A の部分を開口幅 3 mm とし、一律 0.5 倍、0.3 倍とした場合について計算した。

各ケースの P-Q 曲線を図-6に示す。これによると、注水圧 $1 \sim 10$ kgf/cm² の範囲では P-Q 曲線はほぼ直

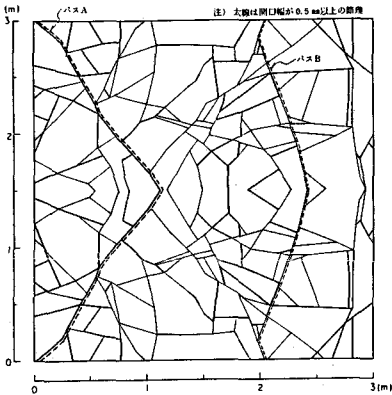


図-4 ネットワークモデル図

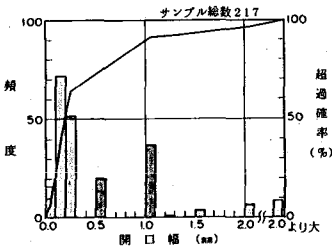


図-5 実測開口幅頻度分布図

線となっているが、いずれのケースとも乱流が発生している。

注水圧 10 kgf/cm^2 の時のネットワークにおける等ポテンシャル線、動水勾配および乱流発生状況の1例は図-7に示すとおりである。開口幅の分布によってポテンシャル分布が不規則となり、また、放射流の影響によってボーリング孔に近い節理では動水勾配が最大300程度と大きく、乱流が発生しやすくなっていることがわかる。なお、同図において、開口幅が大きいものと小さいものが直列に連続しているパスAと比較的開口幅の小さいものが連続しているパスBのポテンシャル分布を図-8に示す。

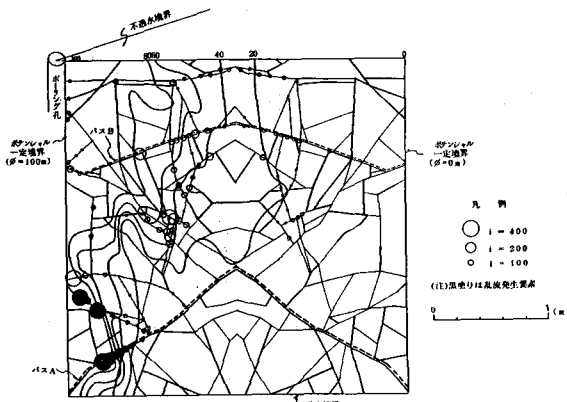


図-7 ルジオンテスト時の動水勾配およびポテンシャル分布図

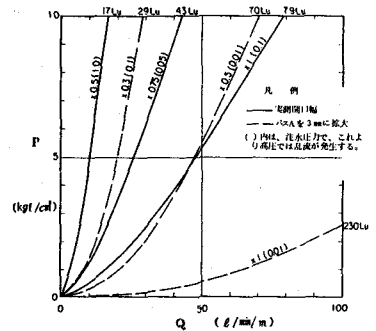


図-8 開口幅を変化させた場合のP-Q曲線

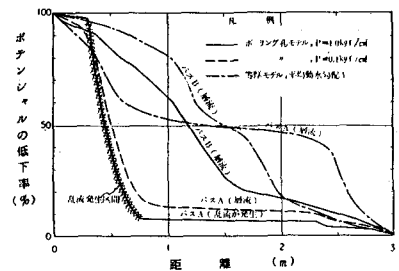


図-9 ポテンシャルの低下状況

4. ダム湛水時の透水特性

前述のルジオンテスト時検討結果（図-6）において、開口幅の組合せが異なるが、ルジオン値が70Lu, 79Luとほぼ同じP-Q特性を示すモデルがあることがわかる。

これら2つのネットワークモデルの岩盤がダム基礎となった場合を想定し、2. (2) で述べた等厚モデルにおいて、平均動水勾配2以下としてその透水特性を計算し、図-9に示す。

これによると、開口幅がほぼ一様に分布する79Luのオリジナルモデルでは全て層流で、連続体としての等価透水係数は $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ である。これに対し、1.5mmの大きい開口幅の節理が一本連続する（パスA）70Luモデルでは、平均動水勾配が約0.2以下では層流となっているが（等価透水係数 $1.6 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ）、これ以上の動水勾配では乱流が発生している。

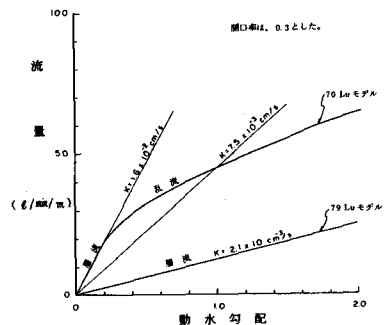


図-9 等厚不連続体モデルによる透水特性

5. ダム止水処理範囲の検討例

ダムサイト右岸部に、柱状節理が発達した高透水性の安山岩溶岩が、厚さ約100m、奥行き約400mと広範囲に亘って分布している場合を想定し、これを迂回する浸透流に対する平面的な止水処理範囲を検討した例を示す。浸透流解析に用いるモデルは、図-10に示す解析領域全域で不連続体モデルを作成することは電算処理上不

可能なので、連続体として扱うものとし、次の3ケースについて検討する。

ケース1は、従来通りルジオン値を層流として 7.0×10^{-4} cm/sと換算($1Lu=1 \times 10^{-5}$ cm/sとした)した場合、ケース2は、ルジオンテスト時に乱流が発生するがダム湛水時を想定した等厚モデルで動水勾配2以下では層流となっていて等価透水係数が 2.1×10^{-3} cm/sの場合(79Luモデル)、さらに、ケース3は3 mに1本1.5mmの節理が連続していて動水勾配が2以下でも乱流が発生していて透水係数を非線形として扱った場合(70Luモデル)である。

この結果、従来通りに透水係数を換算したケースでは、モデル境界まで止水処理を行っても浸透量は無処理時の61%にしかないが(ケース1)、ダム湛水時に層流となるモデルの場合は39%(ケース2)まで低減している。これに対し、小さい動水勾配でも乱流が発生している場合(ケース3)には、10%にまで低減し著しく止水効果が高くなっており、施工範囲が100~200 mまでで浸透量が大きく低減している(図-11)。また、このときの浸透量の絶対値は、火山岩地帯の他ダムの想定浸透量に近い値を示している。

6. むすび

本研究でわかったことをまとめると、以下のとおりである。

- ① 一般的に高透水と言われる節理性岩盤では、ルジオンテスト時に孔周辺で放射流の影響により動水勾配が非常に大きくなり、注水圧 $1 \sim 10$ kgf/cm²で乱流が発生しており、注水圧 10 kgf/cm²で動水勾配は最大数百となる。また、開口幅により、乱流の度合も大きく異なる。
- ② 一方、ダム湛水時の基礎岩盤内の平均動水勾配は2~3以下なので、浸透流解析に用いる透水特性は、かなり低い注水圧に対するルジオンテスト結果に着目しなければならない。
- ③ ほぼ同じP-Q曲線(同じルジオン値)となる場合でも、節理の開口幅などの組合せによっては、平均動水勾配2~3以下の透水特性は層流となったり、乱流となったり大きく異なるので、節理性岩盤ではルジオン値のみから浸透流解析に用いる透水性を評価することは問題がある。

今回は種々の仮定に基づきシミュレーションを行ってきたが、今後は、水理学的に有効な開口幅と実測開口幅の定量的な関係を明らかにし、さらに節理の組み合わせやRoughness等についても透水性に与える影響を検討し、節理性岩盤のモデル化を行った上で、より正確な透水性の評価を行っていく必要がある。

<参考文献>

- 1) G.グーデフス編：地盤力学の有限要素解析，森北出版
- 2) 渡辺邦夫：岩盤割れ目系諸地質量を考慮した岩盤浸透流に関する基礎研究，学位論文
- 3) Larry J.Segerlind：応用有限要素解析，丸善
- 4) 上野勇武：節理性岩盤のモデル化とその透水性評価に関する研究，修士論文
- 5) 大西有三，西野賢治：岩盤調査による割れ目情報を利用した岩盤浸透流解析，第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集。

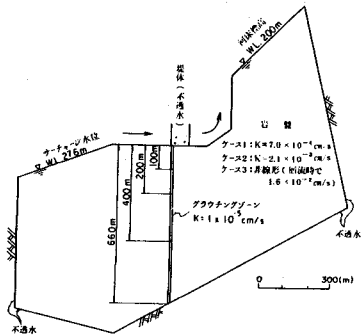


図-10 ダム基礎右岸解析モデル平面図

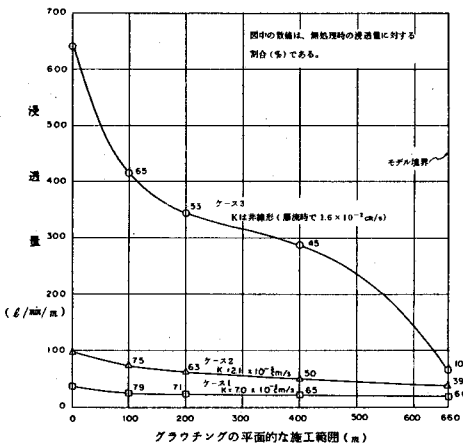


図-11 止水処理範囲と浸透量の関係

(72) Permeability Evaluation and Turbulence Behaviour in Discontinuous Rock Masses

Haruhiko SUEYOSHI *1

Fujio OHMURA *2

Katsuyuki KATO *2

Isamu UENO *3

ABSTRACT

In seepage flow analysis on dam foundations, permeability (K-value) is converted into $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ for a unit of Lugeon-Value, i.e. $1 \text{ Lu} = 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, considering the flow specification as to be laminar flow.

On the other hand, under the condition of turbulent flow, permeability must be evaluated with the similar hydraulic gradient (granted to be approximately 1.0) to that in state of H.W.L reservoir.

However, since the hydraulic behaviour when reservoir water level is at H.W.L and in Lugeon-Test has not been clarified yet, in study of foundation sealing area with K-Value converted as above, total leakage shows neither any declination with widening the sealing area nor any increment in its absolute value compared with in-situ observed value.

This paper is a summary of authors' results from a study on permeability evaluation in Discontinuous Rock Masses with hydraulic behaviour under the condition mentioned above and in Lu-Test. The evaluation is based on some results from numerical simulation with discontinuous model considering turbulent flow.

Some useful conclusions are as following:

i) In highly permeable rock masses in Lu-Test;

The hydraulic gradient around the bore hole becomes steeper as to be $i = 300$ and this steepness leads the flow to be turbulence. Moreover, the turbidity differs with the aperture.

ii) In highly permeable rock masses under H.W.L. condition;

In the similar rock masses with the Lu-value of 70 to 80 during water restoration-- the hydraulic gradient is considered to be approximately 1.0-- the flow condition can be considerably different.

In case that there exist a lot of discontinuities there may occur laminar flow. However, if only single discontinuity is distributed in each 3 meters distance, it may be a turbulent flow. If there exists turbulence, we have to consider the permeability as a nonlinear coefficient.

Finally, we have reached a conclusion that in seepage flow analysis on dam foundation, sealing effects may differ in accordance with permeability.

*1 Tateno Dam Construction Office, Ministry of Construction

*2 I.N.A. Civil Engineering Consultants Co., Ltd.

*3 Graduate School of Science and Engineering, Waseda Univ.