

(72) 軟岩の透水特性および透水に伴う変形に関する基礎的研究

建設省土木研究所 正会員 ○ 田中 靖
建設省土木研究所 村岡 基晴
建設省土木研究所 正会員 大藪 勝美

1. はじめに

ダム建設に際して基礎岩盤の透水性を把握し、その透水性を経済的に減じることができるかどうかは重要な問題である。基礎岩盤の止水処理に当たって、通常まずダム基礎岩盤の透水性を把握するためにボーリング孔を用いたルジオンテストが行われ、その時に得られた限界圧力とルジオン値とからグラウチングの仕様が決定されている。この一連の手法は、クラックは発達しているが岩そのものの透水性が低い硬岩に対して考え出されたものであり、クラックをセメントミルクで充てんすることを主目的としている。

一方、最近良好なダムサイトが少なくなってきたり、新第三紀や第四紀の堆積岩のような固結度の低い岩盤にもコンクリートダムが建設されるようになってきている。これらの岩盤は一般にいわゆる軟岩と呼ばれているものであり、この岩盤の特徴は、変形性が大きく強度が小さいことである。この岩盤は一般にはクラックが発達しておらず、岩盤の透水性は岩そのものの透水性に支配されており、問題になるのは岩そのものがポーラスで透水性が大きな場合である。このポーラスな軟岩の止水処理に対して、硬岩の手法を用いた止水処理が試みられているが、その手法は必ずしも効果的ではない。

本研究の最終目的は、ポーラスな軟岩への効果的なグラウト注入工法の開発にあるが、そのためにはまず軟岩の透水特性と透水による岩盤の破壊機構を知る必要がある。そこで本報文では、浸透圧によって弾性体岩盤内に発生する有効応力に関する理論式と、その理論の軟岩への適用の是非を検討するための実験手法に関する検討結果について述べる。

2. 軟岩の透水特性及びそれに伴って発生する応力

2.1 浸透圧によって透水性岩盤内に発生する応力に関する理論式

ルジオンテスト及びグラウチングは、通常、46mmまたは66mmのビットを用いたボーリング孔で5mを1ステージとして行われているが、問題を明確にするために水平2次元の放射流として以下理論を展開する。

微小辺ABCDに対して図-1のように全応力表示で応力を定義し、 r 方向の物体力の体積密度を F 、 θ 方向のそれを G とすれば、放射流の水平2次元モデルは任意の θ に対する r 軸に対して軸対称であるから

$$r \text{ 方向の釣合方程式: } \sigma_r - \sigma_\theta + r \cdot \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr + F \cdot r = 0 \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$\theta \text{ 方向の釣合方程式: } 2 \cdot \tau_{r\theta} + G \cdot r = 0 \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

が成立する。この式で物体力を0とし、①式で下線を施した項は他に比べて微小なのでそれを無視すれば、①、②式は各々

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

となる。(③式は全応力表示での釣合であるから、放射流によって発生する浸透圧の影響は各応力の中にとりこまれており、物体力の体積密度 F 、 G は、放射流以外の重力等によるものである。)

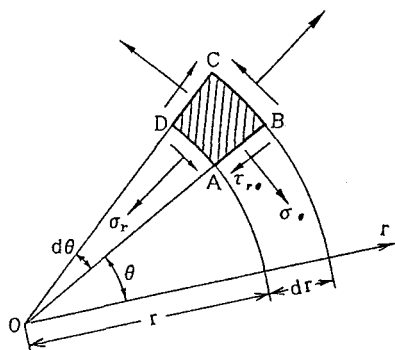


図-1 応力の定義

さらに図-1の微小辺ABCD内における間隙圧をPとすれば、全応力 σ_r に対する有効応力 σ'_r は応力の方を考慮して $\sigma'_r = \sigma_r + P$ であり、③式の有効応力表示は、

$$\frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} - \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad \dots \dots \dots ⑤$$

となる。

一方水平2次元の放射流では、透水係数kが場所と応力によらず一定であるとして図-2のように半径および境界の圧力分布を定義すれば、動水勾配iはrのみの関数であるから、半径r上で

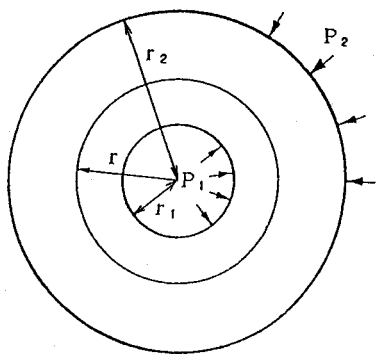


図-2 2次元放射流の境界条件

連続式： $2\pi \cdot r \cdot k \cdot i(r) = \text{一定}$

動水勾配： $i(r) = -\frac{\partial (P/P_0)}{\partial r}$ ただし $r_1 \leq r \leq r_2$

という関係が成立する。これを半径rでの間隙圧P(r)について解けば

$$P(r) = P_1 - (P_1 - P_2) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad \dots \dots \dots ⑥$$

となる。

つぎに、⑥式を変位に関する基礎式に変形する。r方向のひずみ及び変位を ϵ_r 、 u_r 、 θ 方向のそれらを ϵ_θ 、 u_θ として θ 方向に関する偏微分項が0であることを考えれば、ひずみと変位との間には、

$$\epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad \dots \dots \dots ⑦$$

が成立する。また弾性2次元モデルのうち

$$\left. \begin{aligned} \text{平面ひずみ状態では: } \sigma_r &= \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\epsilon_r + \frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_\theta \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\epsilon_\theta + \frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_r \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots ⑧$$

$$\left. \begin{aligned} \text{平面応力状態では: } \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_\theta + \nu \epsilon_r) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots ⑨$$

が成立するから(E:弾性係数、 ν :ポアソン比)、⑧式~⑨式を用いて⑤式を変位に関する式に変形すれば、平面ひずみ状態か、平面応力状態かの仮定に関係なく

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \cdot u_r + A \cdot \frac{1}{r} = 0 \quad \dots \dots \dots ⑩$$

となる。ただし

平面ひずみ状態では： $A = \frac{P_1 - P_2}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E}$

平面応力状態では： $A = \frac{P_1 - P_2}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{1-\nu^2}{E}$

である。さらに、 u_r はrのみの関数であるから $\partial u_r / \partial r \rightarrow du_r / dr$ と置き換えることができ、⑩式は

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du_r}{dr} - \frac{1}{r^2} u_r + A \cdot \frac{1}{r} = 0 \quad \dots \dots \dots ⑪$$

と書ける。この式を、 $r = r_1$ および $r = r_2$ で有効応力 $\sigma'_r = 0$ を境界条件として解けば

$$\text{平面ひずみ状態では: } \sigma'_r(r) = \frac{P_1 - P_2}{2(1 - \nu)} \left\{ \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \right\} \quad \dots\dots\dots ②$$

$$\sigma'_\theta(r) = \frac{P_1 - P_2}{2(1 - \nu)} \left\{ \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_1^2} \right) - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{1 - 2\nu}{\ln(r_2/r_1)} \right\} \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\text{平面応力状態では: } \sigma'_r(r) = \frac{1 + \nu}{2} (P_1 - P_2) \left\{ \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \right\} \quad \dots\dots\dots ④$$

$$\sigma'_\theta(r) = \frac{1 + \nu}{2} (P_1 - P_2) \left\{ \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_1^2} \right) - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \ln(r_2/r_1)} \right\} \quad \dots\dots\dots ⑤$$

という応力分布式が求まる。

2.2 室内実験

2.2.1 室内実験の目的

ボーリング孔から岩盤内への液体の注入を2次元放射流とし、透水係数は一定で、岩盤を弾性体と仮定した場合の浸透圧によって発生する岩盤内応力分布は2.1のようである。しかし、いま対象にしている軟岩は荷重によるクリープ変形が大きく、弾性体とは考えにくい。さらに、浸透圧による変形で岩盤内の間隙が変化し、その結果透水係数が変化する可能性もある。そこで、上記弾性理論がどの程度の精度で実際の岩盤に適用できるかを把握し、その理論解の軟岩への適用の可能性及び限界を検討することが必要となるが、そのためにはまず、適切な岩盤および透水実験装置等の実験手法に関する検討が必要となる。以下にその検討結果について述べる。

2.2.2 実験手法の検討

1) 岩盤について： 現地から岩盤を切り出す方法と、人工岩盤を作製する方法とが考えられるが、手法の検討が目的であるので、透水係数、強度等の設定が可能な人工岩盤を採用した。さらに人工岩盤の材料としては種々考えられるが、扱いなれた砂、セメントおよびベントナイトを用いた、いわゆるソイルセメントを人工岩盤とした。

2) 実験装置について： 2.1の理論式と比較するための実験であるため、平面2次元の放射流が再現できる図-3の概略図のような形式とした。供試体岩盤の半径は対象岩盤の透水係数、ポンプ能力等から外境界が注入孔から離れている方が実験に好都合であるので、注入孔の径（半径0.4cmとした）も考慮して半径を25cmとした。また、供試体の高さは、上下端面の影響程度との関係で決まるが、端面の影響をなるべく減じる工夫をして、差し当たって60cmとした。

2.2.3 予備実験結果

上載荷重を固定し、昇圧ステップ0.2kgf/cm²、降圧ステップ0.4kgf/cm²、各ステップの注入時間を5分として、くり返し注入試験を実施した。そのP-Q曲線を図-4に示す。なお1回目および2回目注入試験時の上載圧は1kgf/cm²、3回目および4回目の上載圧は2kgf/cm²である。この図によれば、注入回数が増すに従って注入流量は増加しているが、昇圧時

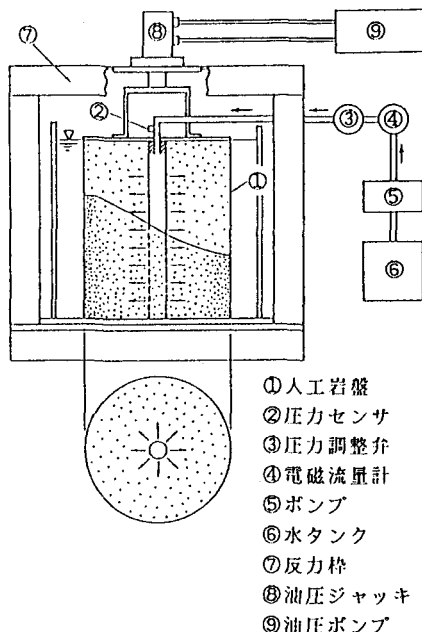


図-3 実験装置概要

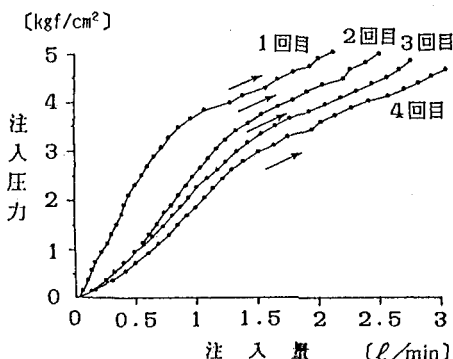


図-4(a) P-Q曲線(昇圧)

のカーブの折れ曲り開始はいずれも 3 kgf/cm^2 程度であり、大きな変化はない。また、このP-Q曲線から、流れをダルシーフローとして2次元放射流の透水係数を求めた結果は図-5のようであり、前回の降圧時の透水係数が次の昇圧時の透水係数とほぼ同じになっていることがわかる。

この現象の原因として 1) ある特定の水みちの発生 2) 浸透圧による空隙の変化 が考えられる。そこで原因がいずれであるかを確認するため、ある一定の注入压力下で上載圧を変化させ、強制的に供試体にひずみを与えることによって空隙を変化させてみた。その結果が図-6である。この図から明らかのように上載圧を大きく増やすと流量は増加し上載圧を減じると流量も減少しており、岩盤のひずみ量と流量との間には相関がみられる。このことより P-Q曲線の折れ曲り現象はある特定の水みちが原因ではなく、浸透圧による空隙の変化が原因ではないかと考えられる。そのように考えれば、図-4の現象は以下のように解釈できる。つまり、半径方向への浸透圧で生じる円周方向の伸びひずみによって岩盤の透水係数が変化し、ある領域の透水係数が変化した段階でP-Q曲線に限界圧としてその現象が現われる。その後降圧しても、岩盤が弾性体でないため元の状態にはもどらず、この予備実験のような結果が生じたと考えられる。

3. おわりに

本報文中導いた平面2次元放射流の浸透圧によって生じる岩盤応力分布の理論式に関して、軟岩への適用の可能性を検討するため、室内予備実験を行った。その結果、軟岩でのルジオンテストで生じる限界圧力の物理的な意味が推論できた。さらに、浸透圧の大きさによっては岩盤の透水係数が変化することが明確になった。そこで今後、予備実験で得られた推論を立証するため、入口岩盤内の間隙圧分布及びひずみ分布の測定ができるように実験装置を改良し、推論の検証を進めると共に、理論式の適用の限界に関する検討を進めていく予定である。

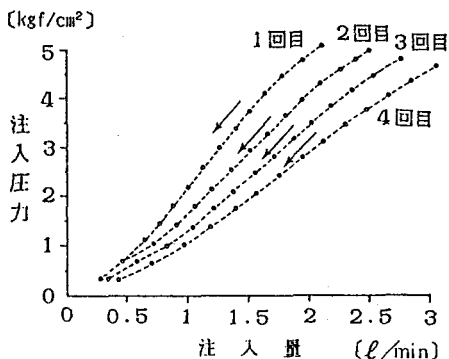


図-4(b) P-Q曲線 (降圧)

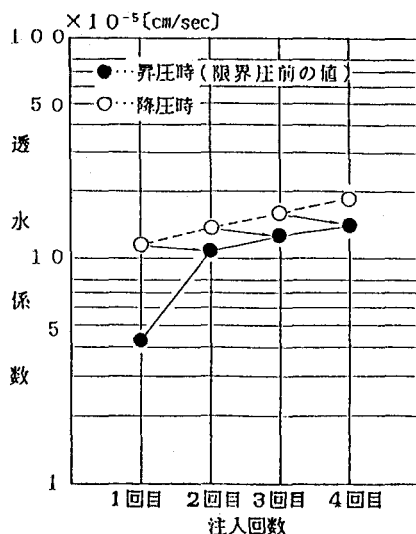


図-5 注入回数と透水係数

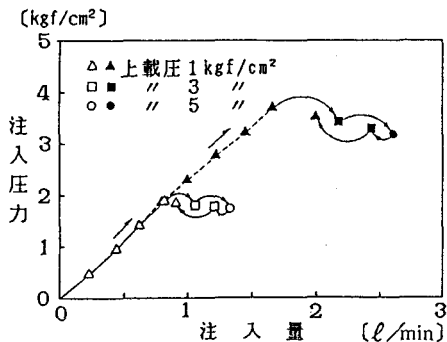


図-6(a) 上載圧と注入量

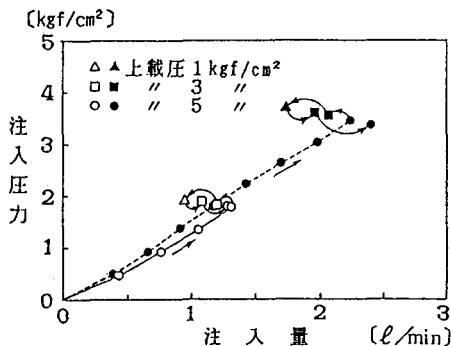


図-6(b) 上載圧と注入量

(72) Study on The Flow Characteristic and The Deformation of The Soft Rock Caused by The Pore Pressure

Yasushi TANAKA

Motoharu MURAOKA

Katsumi OHYABU

Public Works Research Institute

Ministry of Construction

The study on the effective water cut-off method against the permeable soft rock is one of the most important matters for dam construction. It is the first step to know the water flow characteristic in the soft rock, and also we have to know about the effective stress caused by the pore pressure if the rock failure by the pore pressure is feared.

In this paper, firstly the theoretical equations are drawn which are for effective stress that is caused by the 2-dimensional radial flow in the permeable material. In these equations, soft rock is considered as an elastic material, and the coefficient of permeability is uniform and constant. Secondly the usage ability of these equations to the actual soft rock is examined by the laboratory tests.

The results of tests are as follows.

The permeability of soft rock isn't constant against the stress. The coefficient of permeability becomes larger than the value that the soft rock had before the hydraulic gradient rose. Once the value gets larger, the value doesn't return to the origin even if the pore pressure decreases. It is thought that this behavior is caused by the non-linear characteristic of the soft rock.

From these facts, it can be inferred that what is the physical meaning of the critical pressure on the soft rock, and it is found that the usage of the equations must be restricted. But the usage ability and limitation of the equations must be relied on the further studies.