

(81) 原位置における節理性岩盤の 3次元異方性透水係数の測定法に関する一提案

岡山大学工学部 正会員 西 垣 誠
岡山大学大学院 (C.R.C. 株) ○ 中 屋 眞 司
岡山大学工学部 正会員 河 野 伊一郎

A the method of the field measurement of three dimensional anisotropic
hydraulic conductivities in jointed rock mass by using a single-hole

Makoto NISHIGAKI, Okayama Univ.
Shinji NAKAYA, Okayama Univ.(C.R.C. Co., Ltd.)
Ichiro KOHNO, Okayama Univ.

Abstract

We proposed a methodology of single-hole injection tests to determine the anisotropic hydraulic conductivity tensor of jointed rock mass. In three dimensional finite element analyses, we assume that the rock mass is anisotropically porous media. As results, suitable principal hydraulic conductivities($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$) can be obtained from combination of Louis' method and proposed methods, when principal three directions are known and Darcy's law is acceptable for flow in jointed rock mass.

1. はじめに

節理性岩盤は水理学的に3次元異方性を示す。従って、異方性が大きい場合にはルジオン試験等の原位置岩盤透水試験により得られる透水係数はいったい何を代表しているのであろうか。

そこで、節理性岩盤を水理学的な異方性多孔質媒体と考え、原位置岩盤透水試験の3次元浸透解析を実行した。本論文ではシングルホールを利用する新たな3タイプの原位置岩盤透水試験法を組み合わせた主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)の決定法について述べる。なお、最近のボアホールテレビによる亀裂の観察技術の向上とその情報から決定されるクラックテンソル等より、透水係数の主軸方向については既知とする。また、岩盤内の水の流れはダルシーの法則に従うものとする。

2. 3次元透水係数

均質で異方性を持つ岩盤の透水係数は、図1に示される3つの主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)と9つの方向余弦($l_1 \sim l_3, m_1 \sim m_3, n_1 \sim n_3$)によって(1)式の透水テンソルとして表わされる。

$$\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} k'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k'_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$l_1 = \cos \alpha_1 \quad l_2 = \cos \alpha_2 \quad l_3 = \cos \alpha_3$$

$$m_1 = \cos \gamma_1 \quad m_2 = \cos \gamma_2 \quad m_3 = \cos \gamma_3$$

$$n_1 = \cos \delta_1 \quad n_2 = \cos \delta_2 \quad n_3 = \cos \delta_3$$

(1)式より (k_{11}, k_{22}, k_{33}) を求めると(2)式となる。

$$k_{11} = l_1 l_1 k'_{11} + l_2 l_2 k'_{22} + l_3 l_3 k'_{33}$$

$$k_{22} = m_1 m_1 k'_{11} + m_2 m_2 k'_{22} + m_3 m_3 k'_{33} \quad (2)$$

$$k_{33} = n_1 n_1 k'_{11} + n_2 n_2 k'_{22} + n_3 n_3 k'_{33}$$

従って主透水係数 $(k'_{11}, k'_{22}, k'_{33})$ は、主軸の方向が既知であれば k_{11}, k_{22}, k_{33} を測定することによって決定される。

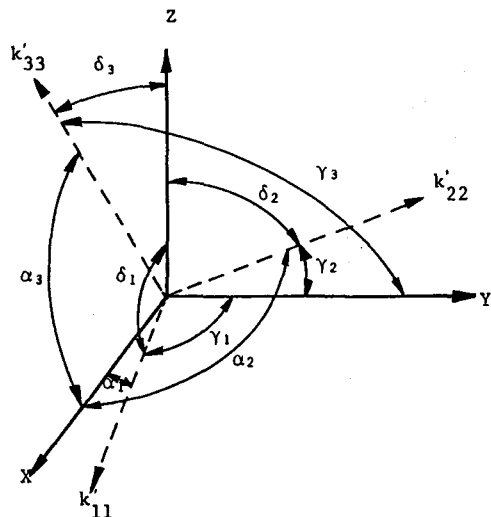


図1 透水主軸の回転

3. シングルホール透水試験法の概要

パッカー法等のシングルホールを利用する注水現象は、水理学的にみると無限地盤内の点湧源に関するポテンシャル流と考えられ¹⁾、均質等方性岩盤の透水係数 k が次式のように導かれている。

$$k = Q / (2\pi HL) \sinh^{-1}(L/2r_0) \quad (3)$$

ここに、 Q は定常注水量、 H は水頭差、 L は注入長、 r_0 はボアホール半径である。

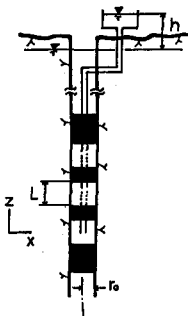


図2 ルイメナール法

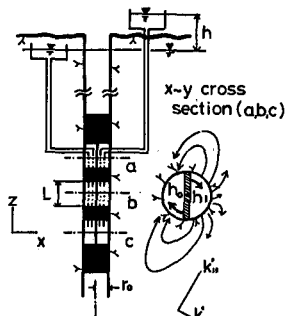


図3 水平回転パッカー法

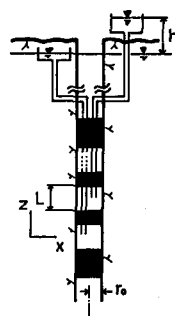


図4 鉛直パッカー法

3. 1 ルイメナール法²⁾

図2に示すように孔内に4つのパッカーにより3つのセルを構成し、各々のセルに同じ水圧を加え注水する方法をルイメナール法といい²⁾、中央のセルより注入された水は、孔軸に対して垂直な円筒状流であると考えられ(4)式が導かれている。

$$k = Q / [2\pi L(h-h_0)] \cdot \{ \ln(L/r_0) + \sinh^{-1}(1/2) \} \quad (4)$$

3. 2 水平回転パッカー法

図3のように孔内を4つのパッカーでしきり3つの注水セルを形成する。各セルは隔壁により更にサブセルに2分される。一方のサブセルより水压差 h で注水された水は、静水圧 h_0 に保たれた他方のサブセルに流れ込む。中央のサブセルから媒体中に注入された水の流れは、ほぼ孔軸に垂直な面内(普通、水平面)に限られる。隔壁を回転させ水の流れをコントロールすれば、回転に伴う注水量 Q の変化が捕らえられ、水平方向の異方性の検出が可能となる。そこで、この定常注水法を新たに水平回転パッカー法と呼ぶ。注水方向はジャイロコンパスを組み込めば知ることができる。

3. 3 鉛直パッカー法

図4のようにパッカーで仕切られた3つのセルのうち、中央のセルより圧力差 h で注水し、上下のセルは、静水圧を保つようにする。注入水の一部は、セル部分で生じた動水勾配により中央のセルから上下のセルへと流れる。そこで、この方法を新たに鉛直パッカー法と呼ぶことにし、定常注水量より後述するような方法により鉛直方向の透水係数を求める。

4. 3 次元数値解析モデル

前述の3つのタイプの定常注水試験を数値シミュレーションし、一定注入圧条件下の注入量 Q を種々の異方性多孔質媒体について求める。異方性を示す節理性岩盤内の水の流れを多孔質体のそれと考えるとダルシーの法則と連続の式より飽和-不飽和領域の浸透の支配式は次式となる²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{ij}(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j}) + q \\ = (C(\theta) + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \\ (i, j=1, 2, 3) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 k_{ij} : 透水テンソル

h : 全水頭

q : 流入量

$C(\theta)$: 比水分容量 ($=d\theta/d\psi$)

S_s : 比貯留係数

ψ : 圧力水頭

α : $\psi \geq 0$ のとき、 $\alpha = 1$

$\psi < 0$ のとき、 $\alpha = 0$

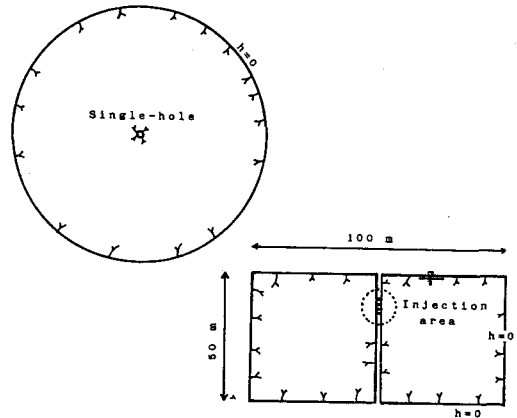


図5 数値解析モデル

(5)式は重み付き残差法によりFEM定式化され、適当な境界条件の下に未知水頭について解くことができる。数値解析に用いたモデルは、半径 $r_0=0.043\text{m}$ でZ軸に平行なボアホールを中心に半径 $R=50\text{m}$ 、深さ $Z=-50\text{m}$ の領域を対象とした(図5参照)。地下水面は、 $Z=0\text{m}$ に存在し、不飽和領域を表層の 0.1m 部分に限った。境界条件として、注水部は水頭差 $h=0.5(\text{m})$ で一定とした。水平法と鉛直法の場合は、吸水部の水頭を静水圧で一定($h=0$)とした。また、半径 R の外周面と底面も静水圧で一定とし、定常解析を行った。注入長 L は 0.6m とした。用いた不飽和特性は、砂質土のそれである。

5. 水平方向透水係数(k_{11}, k_{22})の決定

5.1 ルイメナル法と $\sqrt{k_{11}}, \sqrt{k_{22}}$

ルイメナル法及び水平回転パッカー法（以後、水平法と呼ぶ）の結果を図6に示す。直交座標軸に透水係数の主軸を一致させた場合、ルイメナル法及び水平法の定常注水量（各々、 Q_L, Q_{max}, Q_{min} ）はほとんど k'_{33} に影響されずに一定値を示している。ここで、 Q_{max}, Q_{min} は、隔壁の回転により求めた水平法の注水量の最大値と最小値を意味する。図6にはx-z面内で主軸を30度および90度回転させた異方性媒体の結果も含まれているが、回転により注入量に変化しているのがわかる。そこで、主軸が座標軸と一致しないものも含めた種々の異方性媒体に対しルイメナル法を実施した。座標軸に関する透水テンソルのうち、 k_{11}, k_{22} に注目し、横軸をその相乗平均の最大値 $(\sqrt{k_{11}k_{22}})_{max}$ 、縦軸をルイメナル法による注入量から(4)式により求めた透水係数 k_L で整理すると図7が得られる。ばらつきはあるものの両者にはほぼ直線関係が認められる。

5.2 水平回転パッカー法と $\sqrt{k_{11}}, \sqrt{k_{22}}$

水平法の注入量の比、 Q_{max}/Q_{min} に注目し、種々の異方性媒体について $(\sqrt{k_{11}/k_{22}})_{max}$ との関係を調べた結果を図8に示す。図より、 $k_{11}/k_{22} < 10$ では両者はほぼ直線関係にあると見なせる。

6. 鉛直方向透水係数(k_{33})の決定

透水主軸を座標軸に一致させた場合について、鉛直パッカー法（以後、鉛直法と呼ぶ）で得られる注水量 Q_v と k'_{11}, k'_{33} の関係を調べると、 Q_v はほぼ k'_{11} の0.5乗、 k'_{33} の0.224乗に比例している。そこで、座標軸に関する透水テンソルの3成分(k_{11}, k_{22}, k_{33})と注水量 Q_v から(3)式に代入して求めた透水係数 k_v の関係を整理すると図9を得る。図には透水主軸が座標軸と一致しない異方性媒体の結果も多数プロットされている。両対数グラフで等方性媒体の結果を結ぶ直線上に異方性媒体の結果が集中していることから、孔軸をz軸とする直交座標系に関する透水テンソルの3成分(k_{11}, k_{22}, k_{33})から鉛直法の結果を解釈できると考える。

7. 主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)の決定

以上の結果から主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)を決定する方法を簡単に述べる。まず、図7に示したメナル法の結果から(13)式を定義する。

$$k_L = a(\sqrt{k_{11}k_{22}})_{max} \quad (6)$$

ただし、 k_L は(11)式で定義されるもので、 a は定

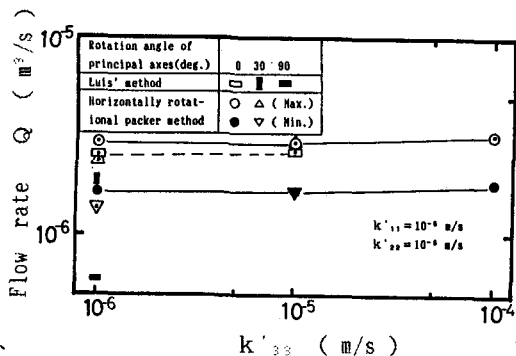


図6 ルイメナル法及び水平法の結果

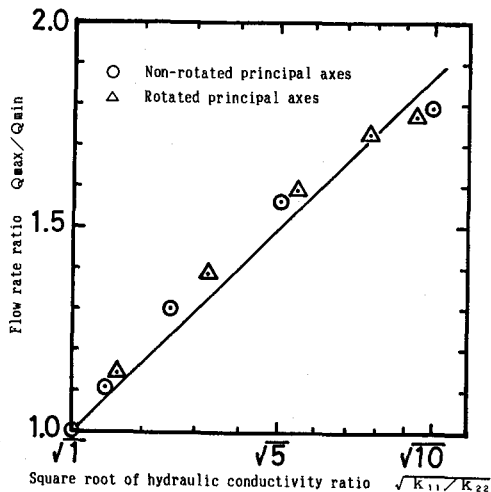


図7 ルイメナル法の透水係数と $(\sqrt{k_{11}k_{22}})_{max}$ の関係

数、(13)式の適用範囲は $k_{11}/k_{22} < 10$ とする。

つぎに、図8に示した水平法の結果から(15)式が定義される。

$$Q_{\max}/Q_{\min} = b(\sqrt{k_{11}/k_{22}})_{\max} + E \quad (7)$$

ただし、 b は定数、(15)式の適用範囲は $k_{11}/k_{22} < 10$ とする。さらに、図9に示した鉛直法の結果から(17)式が定義される。

$$kv = F(k_{33})^c \left[(\sqrt{k_{11}k_{22}})_{\max} \right]^d \quad (8)$$

ただし、 kv は(3)式で定義されるもので、 c, d, E は定数である。以上の(6)~(8)式より(9)式が得られる。

$$\begin{aligned} k_{11\max} &= kL(Q_{\max}/Q_{\min} - E)/(ab) \\ k_{22\min} &= kLb / \{a(Q_{\max}/Q_{\min} - E)\} \\ k_{33} &= \{kv/F / [kL/a]^d\}^{1/c} \end{aligned} \quad (9)$$

定数を求めると $a = 9.33 \times 10^{-7}$, $b = 0.4$, $c = 0.185$, $d = 0.414$, $E = 0.6$, $F = 1.86$ となる。従って、(19)式を(2)式に代入して連立方程式を解けば、主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)が得られる。

8. まとめ

シングルホールを利用した原位置岩盤透水試験法を提案した。以上の結果をまとめると

1. 岩盤を水理学的異方性多孔質媒体として、新しい3つのタイプの透水試験方法を3次元FEM数値解析により検討した。
2. 3つの方法で測定される定常注入量は、透水係数の異方性に対して十分な感度を持つ。
3. 3つの方法を組み合わせると主透水係数($k'_{11}, k'_{22}, k'_{33}$)が決定できる。

今回提案した試験方法は、実用化に対して若干の問題点を残している。また、3次元数値解析時に用いたFEM分割モデルに由来する精度などの問題も今後吟味する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 山口柏樹・大根義男(1973)：フィルダムの設計及び施工、技報堂、pp.261-262。
- 2) Louis, C. (1974)："Rock Hydraulics", B.G.R.M. Report, Orleans。
- 3) 西垣誠・白石知成・河野伊一郎(1987)：有限要素法による飽和-不飽和領域内の三次元浸透解析の改良、第22回土質工学研究発表会論文集、pp.1581-1582。

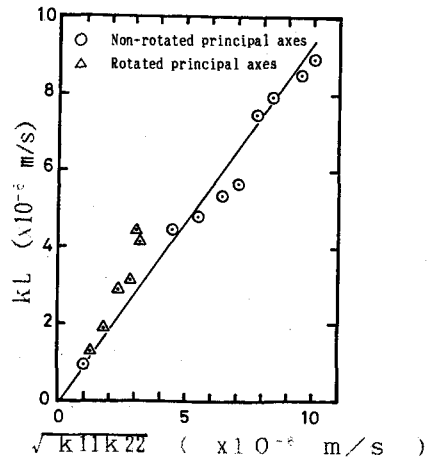


図8 $Q_{\max}/Q_{\min}$ と
 $(\sqrt{k_{11}/k_{22}})_{\max}$ の関係

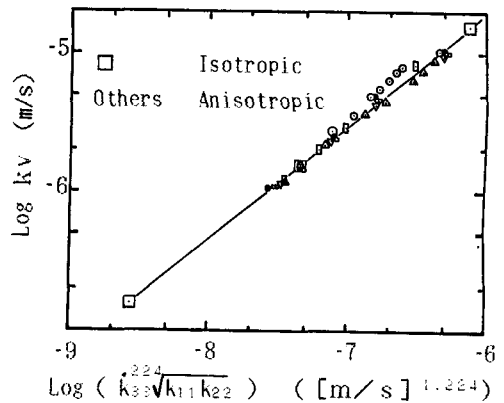


図9 鉛直パッカー法の結果