

(75) 異方性を持つ軟岩基礎における原位置透水試験方法

建設省土木研究所 正会員 ○ 山 口 嘉 一
建設省土木研究所 正会員 松 本 徳 久

1. はじめに

ダム、特にフィルダムの設計において、基礎の透水性を把握することは非常に重要な問題の一つである。ダム基礎の透水性を把握する方法としては、従来からボーリング孔内に圧力水を注入して行うルジオンテストが良く用いられており、透水性はルジオン値によって評価される。

一方、我が国のダム基礎に良く見られるようになった軟岩は、硬岩に比べて限界圧力が非常に小さいという特徴を持つ。そのため、軟岩では圧力水が岩盤を破壊した後の透水性を評価してしまう可能性がある。そこで、軟岩基礎の透水性を把握する際には、ルジオンテストとともにダルシー則に基づく原位置透水試験を併せて実施されることがある。こうした状況を鑑み、筆者らは、ダム基礎の透水性を把握する際に用いられている原位置透水試験を調査するとともに、これらの試験を均質等方な地盤において実施した場合の精度についても検討してきた¹⁾。試験の精度を均質等方な地盤に対してのみ検討したのは、軟岩の透水性は基質の間に支配されているため設計上問題になるような顕著な異方性を示すことは稀であるという判断によっている²⁾。しかし、一見均質と考えられる砂岩においても堆積過程で細粒部と粗粒部が成層を成したり、部分的に薄いシームが介在することによって透水性に異方性が生じることが多い³⁾。よって今回は、前回の報告¹⁾で、等方性地盤においてはかなり精度良く地盤の透水性が把握できることがわかったU.S.B.R. アースマニュアルE-19（注水定水位法）（以後E-19法と称す）について、地盤の透水性の異方性が試験精度にどの程度の影響を与えるかを数値解析によって検討する。さらにその結果を踏まえて、水平・鉛直方向の透水係数を求めることができる試験方法（注水定水位法）を提案し、実施例も示すものである。

なお、E-19法は、フィルダムコアの透水性管理試験方法としても採用されることが多いので、水平・鉛直方向の透水係数を求める試験は、コアの透水性の異方性を知る際にも使用できることになる。

2. E-19法

今回、地盤の透水性の異方性が試験精度に与える影響を検討するE-19法の透水係数算定式を以下に示す（図-1参照）。

地下水条件

① $Tu > 3h$

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{h} \right)^2} + \frac{r}{h} \right\} \quad (1)$$

② $3h \geq Tu \geq h$

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(h/r)}{1/6 + 1/3 (h/Tu)^{-1}} \quad (2)$$

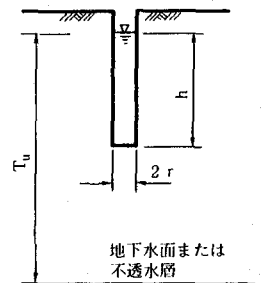
③ $Tu < h$

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(h/r)}{(h/Tu)^{-1} - 1/2 (h/Tu)^{-2}} \quad (3)$$

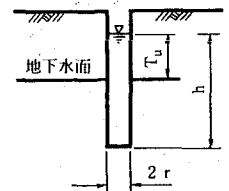
ここに、 k ：透水係数、 Q ：流入流量。

3. 浸透流解析による異方性の影響の検討

3.1 計算モデルと計算条件



(a) 地下水条件①・②



(b) 地下水条件③

図-1 E-19法

地盤の透水性の異方性がE-19法の精度に与える影響を浸透流解析を用いて検討する。浸透流解析に用いた計算モデルの概略図を図-2に示すとともに、モデル寸法と計算条件を表-1にまとめて示す。なお、モデルは、各試験条件(h/r)に対して半無限の透水性媒体とみなせる程度の半径を持つ円筒形とした。また、計算は3つの地下水条件(2.参照)で、地盤の透水性の異方性を示すファクター k_{ho}/k_{vo} を $10^1, 10^0, 10^1, 10^2$ と変化させて行った。

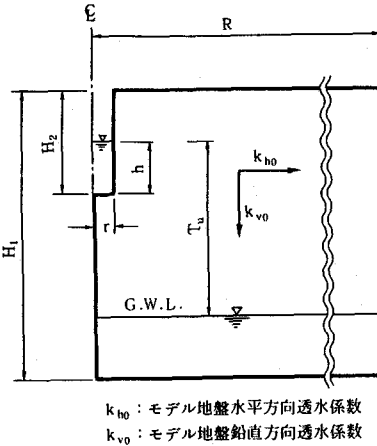


表-1 モデル寸法と計算条件

モデルNo.	1	2	3
h/r	10	5	2
h (cm)	50	50	50
r (cm)	5	10	25
H_1 (m)	3	3	3
H_2 (m)	1	1	1
R (m)	5	6	10
k_{ho}/k_{vo} (*)	$10^{-1}, 10^0, 10^1, 10^2$		
T_u (cm)	① $T_u > 3h \dots\dots T_u = 160$ ② $3h \geq T_u \geq h \dots\dots T_u = 100$ ③ $T_u < h \dots\dots T_u = 30$		

*) $k_{vo} = 1.0 \times 10^{-4}$ cm/s で一定。

3. 2 計算結果

図-2 計算モデル概略図

3. 2. 1 h/r の影響(等方性地盤)

E-19法では、試験孔からの水の流が点湧源からのポテンシャルフローであるとして透水係数 k の算定式が誘導されているため、 $h \gg r$ の試験条件下において精度が高いとされている³⁾。しかし、手掘りのピット孔を用いて行うことが多いE-19法において、 $h \gg r$ の試験孔を手で掘ることは非常に困難である。

図-3には、 $k_{ho} = k_{vo}$ 、つまりモデル地盤が等方である場合の浸透流解析の結果より求めた k を示す。図-3を見ると、 h/r の値によって得られる k はさほど大きく変化しないうえ、モデル地盤の透水係数($= k_{ho} = k_{vo}$)にかなり近い値を示していることがわかる。つまり、等方性地盤においては、 $h \gg r$ でない試験孔を用いてもE-19法の試験精度はかなり高いことを証明したことになる。

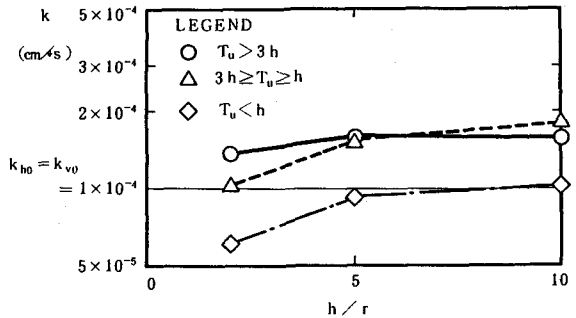


図-3 h/r の影響(等方性地盤の場合)

3. 2. 2 異方性の影響

浸透流解析の結果を h/r の値ごとに整理したものを図-4~6に示す。なお、図中には、 $k = k_{ho}$ および $k = \sqrt{k_{ho} \cdot k_{vo}}$ の曲線も図示してある。これらの図から以下のことが言える。

① $k_{ho}/k_{vo} \geq 1$ の解析結果を h/r の値ごとに比べると、 h/r が大きいくれば k_{ho} に近い値を示していることがわかる。これは、 r に比べて h が大きければ、試験孔の水はほとんど孔壁から流出するうえ、孔壁からの水の流出方向がほぼ水平であることを考え合せれば理解できる結果である。

一方、 $k_{ho}/k_{vo} < 1$ になると、鉛直方向の透水性が卓越してくるため、孔底からの流出流量が大きくなり k は k_{ho} よりも大きくなる傾向を示している。

② 地下水条件に着目すると、 h/r の値にかかわらず、 $T_u > 3h$ と $3h \geq T_u \geq h$ の場合に得られる k はほぼ等しい値を示しているのに対して、 $T_u < h$ の場合の k は前者二つの値よりも少し小さめの値を示していることがわかる。しかし、この原因ははっきりしない。

4. 異方性地盤に対する原位置透水試験

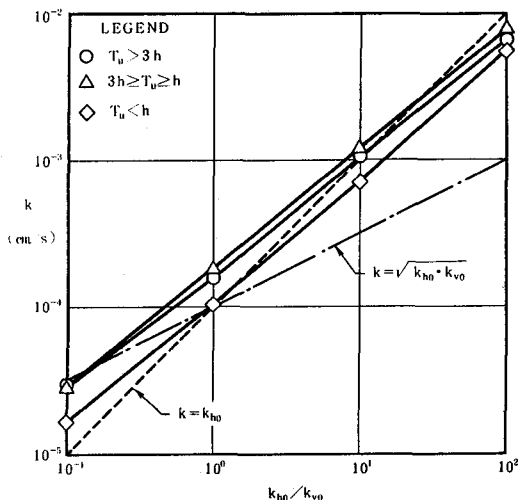


図-4 異方性の影響 ($h/r=10$ の場合)

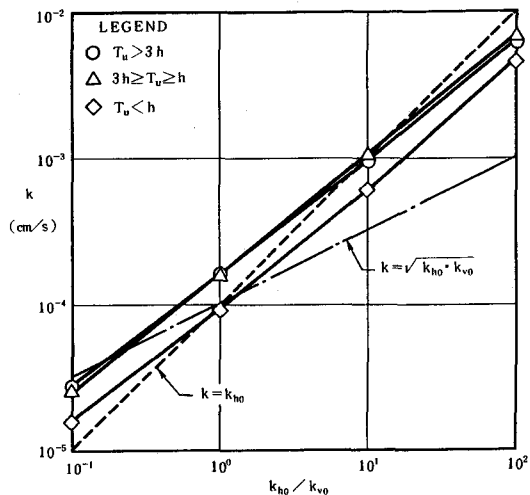


図-5 異方性の影響 ($h/r=5$ の場合)

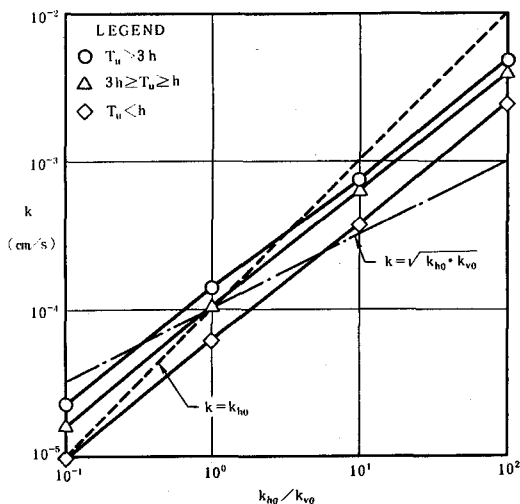


図-6 異方性の影響 ($h/r=2$ の場合)

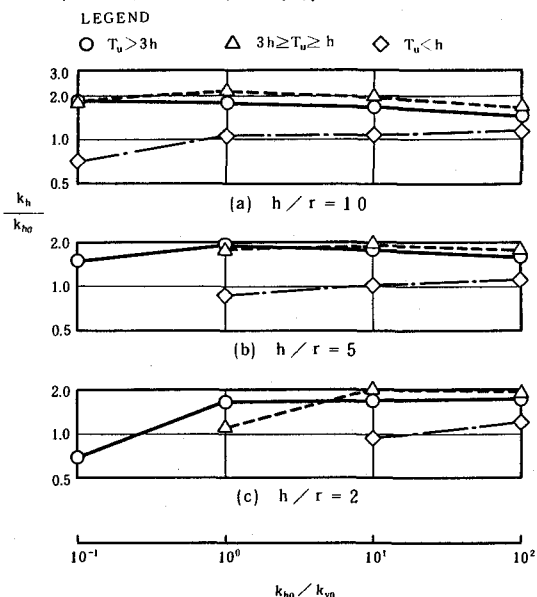


図-7 k_h/k_{h0} と k_{h0}/k_{v0} の関係

3.の浸透流解析結果からもわかるように、E-19法の精度は地盤の透水性の異方性に大きく左右される。そこで

ここでは、異方性を持つ地盤の水平・鉛直方向の透水係数を求める原位置透水試験方法を提案するものである。

まず、三次元問題において、 $\sqrt{k_v/k_h}$ ($=1/m$) (k_h : 水平方向透水係数, k_v : 鉛直方向透水係数)を水平方向次元のもの全てに乘じ、透水係数 k を平均透水係数 k_m (三次元問題では k_h に等しい)に置換すれば、異方性地盤においても等方性地盤と同様の取り扱いができる。つまり、今まで通りE-19法を実施し、以下の式を用いれば異方性地盤における k_h を求めることができる。

地下水条件

① $T_u > 3h$

$$k_h = \frac{Q}{2\pi h^2} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{mh}{r} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{mh} \right)^2} + \frac{r}{mh} \right\} \quad (4)$$

$$\textcircled{2} \quad 3h \geq T_u \geq h \quad k_h = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(mh/r)}{1/6 + 1/3(h/T_u)^{-1}} \quad (5)$$

$$\textcircled{3} \quad T_u < h \quad k_h = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(mh/r)}{(h/T_u)^{-1} - 1/2(h/T_u)^{-2}} \quad (6)$$

上記の式の精度を前述3.の計算結果をもとに検討したものを図-7に示す。なお、 m 中の k_v としては k_{v0} を採用して $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ とした。図-7を見ると、E-19法は鉛直方向の透水係数として正確な値を与えてやれば、 h/r 、 k_{h0}/k_{v0} の値にかかわらず、 $0.7 \leq k_h/k_{h0} \leq 2.1$ の範囲で k_h を求められることがわかった。そこで、鉛直方向の透水係数を求める原位置透水試験として図-8に示すエヌ・エス・ネステロフの方法を推奨する⁷⁾。この試験方法は、直径の異なる二つの鋼管を同心円状に設置し、その中に水位を一定に保ちながら水を供給する。外側円筒からの水の流れにより内側円筒からの水は鉛直方向の浸透で消費されるため、浸透流の断面積は内側円筒の断面積に等しいと見なせる。よって、 k_v は次式で算定できる。

$$k_v = \frac{Q_1 l}{A(h_1 + l + \varphi)} \quad (7)$$

ここに、 l :孔底からの浸透深さ、 $A(=\pi r^2)$:内側円筒の断面積、 φ :毛管水頭。

この試験とE-19法を併せて実施すれば、ある程度の精度で異方性地盤の水平・鉛直方向の透水係数を測定できると考える。

これら二つの試験とアースダムの現場盛立試験ヤードで実施した結果を表-2に示す。一般にタイヤ系ローラーで締固められた盛土の透水性の異方性 k_h/k_v は20~30であると言われている⁸⁾が、今回の結果はこれにほぼ一致している。

5. おわりに

最後に今回の報告をまとめてみると以下の通りである。

- ① 等方性地盤においては、E-19法を $h \gg r$ でない孔を用いて実施しても、かなりの精度で地盤の透水係数を知ることができる。
- ② E-19法の精度は地盤の透水性の異方性に大きく左右される。そこで、異方性を持つ地盤の水平・鉛直方向の透水係数を求める原位置透水試験法を提案した。この試験は、理論的には精度が高いことが数値計算結果より判断できる。
- ③ ②で提案した試験法をアースダムの現場盛立試験ヤードで実施した結果、一般に言われている程度の異方性(k_h/k_v)が得られた。よって、この試験法はある程度実用に適するものだとと言える。

<参考文献>

- 1) 松本・山口: 軟弱基礎の原位置透水試験法に関する研究, 第17回岩かんボ, 1985年2月。
- 2) 松本・山口: 軟弱基礎の原位置透水試験法に関する研究, 土技賞, 1985年10月。
- 3) 中村: ボリングに伴う情報-水の情報-, 土研資料第221号, 1985年3月。
- 4) 西垣・河野: 水平および鉛直方向の透水係数の計測方法, 土と基礎, 1984年11月。
- 5) U.S.B.R.: Earth Manual, 1974。
- 6) U.S.Army: Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, 1951。
- 7) 外尾・永井: 地下水の工学, 1967年9月。
- 8) 山口・大根: フィルダムの設計および施工, 1975年5月。

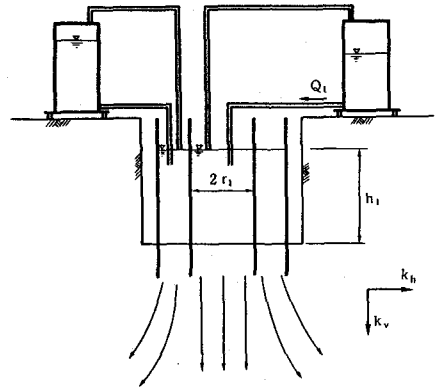


図-8 エヌ・エス・ネステロフの方法

表-2 現場試験結果

転圧仕様	$k_{h15}^{*)} (\text{cm/s})$	$k_{v15}^{*)} (\text{cm/s})$	k_{h15}/k_{v15}
20cm撤き出し 5層仕上げ タイヤローラー12回転圧	2.28×10^{-4}	9.01×10^{-6}	25.3
20cm撤き出し 5層仕上げ 振動ローラー6回転圧	5.31×10^{-5}	2.26×10^{-6}	23.5

*) 水温 15℃における透水係数を示す。

(75) Study on in-situ Permeability Tests
Conducted on Soft Rock Foundations Having Anisotropic Permeability

Yoshikazu YAMACUCHI
Norihiisa MATSUMOTO

Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Summary

Because soft rocks have few joints and cracks compared to hard rocks and the rock itself is permeable, seepage flow in soft rocks can be assumed to be governed by Darcy's law. Therefore, in-situ permeability tests based on Darcy's law are often conducted in order to grasp the permeability of soft rock foundations. Taking this condition into consideration, the authors investigated accuracy of several in-situ permeability tests conducted on soft rock foundations having isotropic permeability. At the 17th Symposium on Rock Mechanics of J.S.C.E.¹⁾, the authors reported the results of this investigation. This time the authors investigated accuracy of Designation E-19 established by U.S. Bureau of Reclamation (hereafter, this testing method is described as E-19) conducted on soft rock foundations having anisotropic permeability. If E-19 were conducted on soft rock foundations having isotropic permeability, considerably accurate permeability coefficient could be obtained. Results obtained from this investigation are summarized as follows :

- (1) Even if height of water in a testing pit h were not much larger than radius of a testing pit r , considerably accurate permeability coefficient of soft rock foundations having isotropic permeability could be obtained by means of conducting E-19.
- (2) Accuracy of E-19 is considerably influenced by anisotropic permeability of soft rock foundations. Therefore, the authors proposed in-situ permeability test for measurement of horizontal and vertical permeability of soft rock foundations.
- (3) The authors proved that the testing method proposed in (2) was accurate by means of numerical analysis and field measurement.

1) Matsumoto, N. & Yamaguchi, Y. : Study on in-situ Permeability Tests Conducted on Soft Rock Foundations, Proceedings of the 17th Symposium on Rock Mechanics, Committee on Rock Mechanics J.S.C.E., 1985 (with English summary)