

(42) 軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する研究

建設省土木研究所 正会員 松本徳久

建設省土木研究所 正会員 ○ 山口嘉一

1. はじめに

ダムの設計、特にフィルダムの設計において基礎岩盤の透水性を把握することは非常に重要である。基礎岩盤の透水性を知る原位置透水試験方法としては従来からルジオンテストがよく用いられてきた。この試験方法は、岩石自体が不透水とみなせ、岩盤内の流れが亀裂中の流れで代表される硬岩のように亀裂性の岩盤の透水性を把握するのに適したものである。しかし、最近、ダムサイト岩盤によく見られるようになった軟岩は、硬岩に比して亀裂が少なく、岩石自体が透水性を持つため、岩盤内の流れはダルシー則に従うものと考えられる。さらに、軟岩は一般に限界圧力が小さいため、ルジオンテストを行うと、圧力水が岩盤を破壊してしまい、結果的に岩盤の透水性を過大に評価してしまう可能性がある。よって、軟岩の透水性はダルシー則に基づく原位置透水試験方法を用いて調査することが適切であると考えられる。そこで今回は、大型の室内試験と数値解析を用いて、各種の原位置透水試験方法の精度を検討したのでその結果を報告する。

2. 原位置透水試験方法

今回精度の検討を行った原位置透水試験方法は以下に示すとおりである。

(1) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-19(ピット法)

〔定水位法(図-1参照)〕

地下水条件

①地下水面が孔底より著しく低い場合($T_u > 3h$)

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) - 1 \right] \quad \text{.....(1)}$$

②地下水面が孔底に近い場合($3h \geq T_u \geq h$)

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(h/r)}{[1/6 + 1/3(h/T_u)^{-1}]} \quad \text{.....(2)}$$

③地下水面が孔底より高い場合($h > T_u$)

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \frac{\ln(h/r)}{[(h/T_u)^{-1} - 1/2(h/T_u)^{-2}]} \quad \text{.....(3)}$$

ここに、 k :透水係数(cm/sec)、 Q :流入流量(cm^3/sec)

(2) オーガー孔内の水位変化観測による方法〔変水位法(図-2参照)〕

オーガー孔法

$$k = 0.617 \frac{r}{SD} \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{.....(4)}$$

ここに、 ΔH :回復した水位(cm)、 Δt :水位が ΔH 回復するのに要する時間(s)

k :透水係数(cm/sec)、 S :図-3より求める定数

Hooghoudtの式

$$k = \frac{5.26 r^2 D}{(2D+r)(D-H)} \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{.....(5)}$$

ここに、 k :透水係数(m/sec)、 r 、 D 、 H はm単位

(3) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-18 オープンエンド法

〔定水位法(図-4参照)〕

地下水条件 ①地下水面が孔底より高い場合

②地下水面が孔底より低い場合

$$k = \frac{Q}{5.5 r H} \quad \text{.....(6)}$$

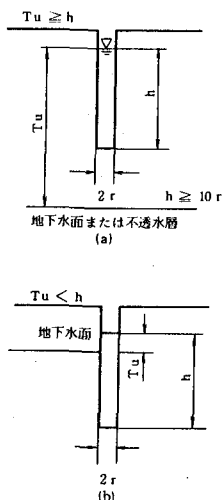


図-1. ピット法

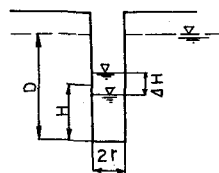


図-2. オーガー孔内の水位変化観測による方法

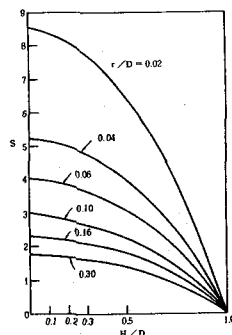


図-3. S 、 H/D 、 r/D の関係図

ここに、 k ：透水係数 (cm/sec)

Q ：流入流量 (cm³/sec)

(4) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-18パッカー法、沢田の式

(定水位法 (図-5 参照))

地下水条件

①地下水面が試験区間 パッカー法

より低い場合

$$k = \frac{Q}{2\pi LH} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \dots\dots\dots(7)$$

($L \geq 10r$)

沢田の式

$$k = \frac{Q}{\pi H(4r+L)} \dots\dots\dots(8)$$

②地下水面が試験区間 パッカー法 (7)式に同じ

より高い場合

沢田の式 $k = \frac{Q}{4\pi LH} \ln\left\{\left(\frac{H}{r}\right)^2 \frac{a+3b}{3a+b}\right\} \dots\dots\dots(9)$

ここに、 k ：透水係数 (cm/sec)、 Q ：流入流量 (cm³/sec)

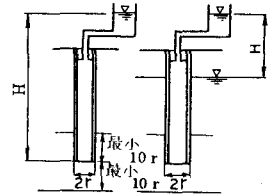


図-4. オープンエンド法

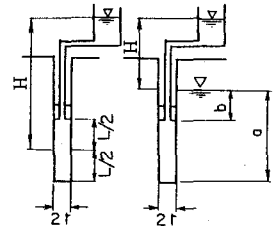


図-5. パッカー法と沢田の式

3. 大型室内試験

3.1. 供試体の境界条件

透水試験用供試体は、図-6 に示すとおり直径 1.5m、高さ 1.39m の円筒形とした。供試体をこの寸法にし、各試験孔の寸法を表-1 に示すようにすれば、供試体は全試験に対してほぼ半無限性の透水性媒体とみなせることを確認している。さらに、試験(3)については孔底の上下に、半径の10倍以上の厚さの透水層が存在するようにした。

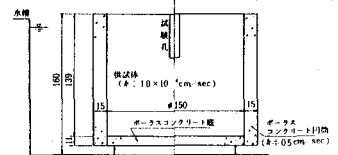


図-6. 大型室内試験用供試体

3.2. 供試体の作製

供試体材料としては、フライアッシュと砂の混合物 (砂の乾燥重量に対し15%のフライアッシュを混合) を用いた。この材料に対して行った締めめ透水試験の結果を表-2 に示す。又、供試体の締めめは、締めめ透水試験の締めめ時に用いたと同じ単位体積当りエネルギーで行った。作製した供試体の含水比・密度は表-3 に示すとおりである。

表-1. 試験孔の寸法・材質及び水槽内水位

試験番号 ()内は適用公式	孔径×深さ (cm) (試験孔)	供試体番号	孔内水位	水槽内水位 (m)
(1) ビット法 (1, 2, 3)	9×50 孔壁・孔底とも透水	1	一定	0 1.45
(2) オーガー孔内の水位 変化観測による方法 (4, 5)			水位回復	1.45
(3) オープン・エンド法 (6)	8.2×75 孔壁は不透水 孔底は透水	2	一定	0 1.45
(4) パッカー法(7)及び 沢田の式(8,9)	4.5×9.5 孔壁 上部50cm 不透水 下部45cm 透水 孔底は透水	3	一定	0 1.45

3.3 試験方法

定水位法で行う試験(1), (3), (4)では、図-7 に示す孔内水位を一定に保ちながら給水できるタンクを用いた。又、変水位法で行う試験(2)では、サーボ式の水位感知機 (測定範囲 600mm、分解能 ± 0.5mm) を用いて孔内水位の変化を読み取った。各試験における孔の寸法・材質及び水槽内水位は表-1 に示したとおりである。

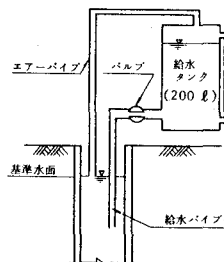


図-7. 給水タンク

定水位試験の場合、タンクからの給水は 200 ℓ 全量なくなるか、給水量が一定になってから相当時間がたつまで行うこととした。又、水槽内への注水は、徐々に行うとともに、注水後は供試体内水位が安定するまで12時間静置した。

表-2. 締めめ透水試験結果

比重	締めめ透水試験			
	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	透水係数 (cm/s)
2.727	8.0	1.990	1.842	5.6×10^{-4}
	7.3	1.959	1.826	7.2×10^{-4}

表-3. 供試体の密度・含水比

供試体 No	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	備考
1	7.0	1.999	1.869	試験(1), (2)に使用
2	6.8	1.989	1.862	試験(3)に使用
3	7.3	1.995	1.859	試験(4)に使用
4	8.2	2.103	1.944	原寸大供試体透水試験に使用

3.4. 不攪乱試料に対する室内試験と原寸大供試体定水位試験

原位置透水試験後、ポーラスコンクリート内の試料からシンウォールチューブ（真鍮製：外径 76.2mm、肉厚 1.5mm、長さ 250mm）によって不攪乱試料を採取し、それに対して定水位試験を行った。不攪乱試料は 1 供試体あたり、水平・鉛直各 10 本ずつ程度採取した。

又、不攪乱試料より得られた透水係数が大型供試体の透水係数と言えるか否かを確認するために以下のことを行った。つまり、図-8 に示す原寸大供試体定水位試験を行った後不攪乱試料を採取して室内透水試験を行い、両者から得られた透水係数がほぼ同様な値を示すかどうかを検討した。

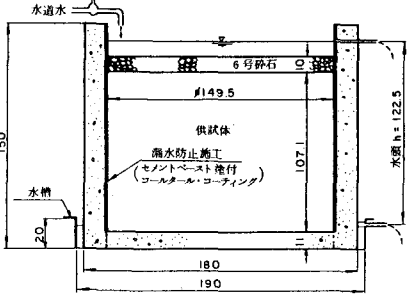


図-8. 原寸大供試体定水位透水試験

3.5. 試験結果

表-4. 透水試験結果一覧

原寸大供試体定水位試験より得た透水係数は 1.1×10^{-4} cm/sec。不攪乱試料に対する室内試験より得た透水係数は、水平方向が 2.0×10^{-4} cm/sec、鉛直方向も 2.0×10^{-4} cm/sec で異方性はなかった。以上より不攪乱試料に対する室内試験から得た透水係数は、ほぼ大型供試体の透水係数とみなしても問題はない。

原位置透水試験の結果と、各供試体から採取した不攪乱試料に対して行った室内透水試験の結果を表-4 に示す。この結果より以下のことが言える。

供試体No.	室内透水試験結果	原位置透水試験名	地下水条件	透水係数 ($T=15^{\circ}\text{C}$ での値)(cm/s)	備考
1	水平方向 3.6×10^{-4} cm/s	試験(1) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-19 (ビット法)	地下水面が孔底より著しく低い場合	8.1×10^{-4}	$Q=4.167 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=7.6^{\circ}\text{C}$ $h=45 \text{ cm}$, $r=4.5 \text{ cm}$
			地下水面が孔底に近い場合	1.2×10^{-3}	$Q=2.917 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=6.5^{\circ}\text{C}$ $h=45 \text{ cm}$, $r=4.5 \text{ cm}$, $Tu=55 \text{ cm}$
			地下水面が孔底より高い場合	1.1×10^{-3}	$Q=0.917 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=7.0^{\circ}\text{C}$ $h=45 \text{ cm}$, $r=4.5 \text{ cm}$, $Tu=10 \text{ cm}$
	鉛直方向 3.5×10^{-4} cm/s	試験(2) オーガー孔内の水位変化観測による方法 オーガー孔法 Hooghoudt の式	オーガー孔法 Hooghoudt の式	2.5×10^{-3} 1.5×10^{-3}	$dH=1.8 \sim 13.8 \text{ cm}$, $d t=180 \text{ s}$ $D=35 \text{ cm}$, $H=7.8 \text{ cm}$, $T=7.4^{\circ}\text{C}$
			"	2.0×10^{-3} 1.5×10^{-3}	$dH=13.8 \sim 21.2 \text{ cm}$, $d t=180 \text{ s}$ $D=35 \text{ cm}$, $H=17.5 \text{ cm}$, $T=7.4^{\circ}\text{C}$
			"	1.4×10^{-3} 1.2×10^{-3}	$dH=21.2 \sim 30.6 \text{ cm}$, $d t=550 \text{ s}$ $D=35 \text{ cm}$, $H=25.9 \text{ cm}$, $T=7.4^{\circ}\text{C}$
			"	8.8×10^{-4} 1.1×10^{-3}	$dH=30.6 \sim 34.1 \text{ cm}$, $d t=780 \text{ s}$ $D=35 \text{ cm}$, $H=32.35 \text{ cm}$, $T=7.4^{\circ}\text{C}$
			"		
			"		
2	水平方向 3.4×10^{-4} cm/s	試験(3) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-18 オープンエンド法	地下水面が孔底より低い場合	2.7×10^{-3}	$Q=3.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=7.8^{\circ}\text{C}$ $r=4.1 \text{ cm}$, $H=70 \text{ cm}$
	鉛直方向 3.7×10^{-4} cm/s		地下水面が孔底より高い場合	2.1×10^{-3}	$Q=0.417 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=9.0^{\circ}\text{C}$ $r=4.1 \text{ cm}$, $H=10 \text{ cm}$
3	水平方向 4.7×10^{-4} cm/s	試験(4) 米国内務省開拓局アースマニュアルE-18 パッカー法	地下水面が試験区間より低い場合	1.3×10^{-3}	$Q=7.167 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=9.5^{\circ}\text{C}$ $H=67.5 \text{ cm}$, $L=45 \text{ cm}$, $r=2.25 \text{ cm}$
			地下水面が試験区間より高い場合	8.3×10^{-4}	$Q=0.667 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=9.6^{\circ}\text{C}$ $H=10 \text{ cm}$, $L=45 \text{ cm}$, $r=2.25 \text{ cm}$
	鉛直方向 3.3×10^{-4} cm/s	試験(4) 沢田の式	地下水面が試験区間より低い場合	7.3×10^{-4}	$Q=7.167 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=9.5^{\circ}\text{C}$ $H=67.5 \text{ cm}$, $L=45 \text{ cm}$, $r=2.25 \text{ cm}$
			地下水面が試験区間より高い場合	7.4×10^{-4}	$Q=0.667 \text{ cm}^3/\text{s}$, $T=9.6^{\circ}\text{C}$, $H=10 \text{ cm}$ $L=45 \text{ cm}$, $r=2.25 \text{ cm}$, $a=80 \text{ cm}$, $b=35 \text{ cm}$

- が孔底より著しく低い場合の精度が最も良い。
- ⑥ 試験(2)では、どちらの式を使っても、得られる透水係数は孔内水位により大きく異なる。ただし、孔内水位がある程度まで回復すると精度が良くなる傾向にある。
- ⑦ 試験(3)より得た透水係数は、不攪乱試料に対する室内試験より得た透水係数より 1 オーダー程大きな値となっており精度は良くないと言える。
- ⑧ 試験(4)では、E-18パッカー法、沢田の式とも全般的に精度が良い。

4. 浸透流解析

有限要素法を用いた浸透流解析を行い、試験区間が地下水面下にある場合の各種原位置透水試験の精度を検討した。検討対象の試験は、2.で示した(3)、(4)の試験である。具体的な検討方法は以下のとおりである。

まず地盤の透水係数 k_1 を決定したうえで、浸透流解析を行う。その結果、試験孔からの流入流量 Q が求まる。 Q を 2.に示した透水係数を求める式に代入して透水係数 k_2 を求める。そこで、 k_1 と k_2 を比較して原位置透水試験の精度を検討する。計算にあたっては、モデル外端がほぼ無限遠とみなせる程度のモデル半径を持ち、試験区間近傍には

不透水層がないとみなせるようなモデルを設定した。今回行った計算モデルと計算条件は表-5に示すとおりである。

以上の方法に従って得た k_1 、 k_2 の値を表-6に示す。これを見ると、大型室内試験と同様に地下水面下では試験(4)のE-18バックカー法及び沢田の式の精度が良いことがわかる。

次に、大型室内試験・浸透流解析の結果、かなり精度が良いことがわかった試験(4)について、試験区間近傍に存在する不透水層の求まる透水係数に与える影響を検討した。不透水層が試験区間の下部のみに存在する場合、上下部ともに存在する場合の計算結果を図-9としてまとめた。この図より以下のことが言える。

- ③ 不透水層が試験区間の下部のみに存在する場合も上下部ともに存在する場合も、透水区間が狭くなるにつれて得られる透水係数が小さくなる。しかし、不透水層の存在する位置によって得られる透水係数 k_2 は大きく変動しないうえ、 k_1 にかなり近い値を示している。
- ⑤ E-18バックカー法と沢田の式を比較すると、沢田の式の方がやや精度が高いといえる。しかし、両方法から得られる透水係数にはさほど大きな差がないうえ、その差も試験区間が地下水面より深くなるにつれて小さくなる傾向にある。

5. 結論

各種の原位置透水試験方法の精度を大型室内試験・浸透流解析によって検討した結果以下のことがわかった。

- ④ 地下水面上での試験としては、米国内務省開拓局のアースマニュアルE-19、E-18バックカー法及び沢田の式の精度が良い。
- ⑥ 地下水面下での試験としては、米国内務省開拓局のアースマニュアルE-18バックカー法及び沢田の式の精度が良い。さらに、両方法は試験区間の近傍に不透水層が存在しても、得られる透水係数の精度に対する影響は少ない。

<参考文献>

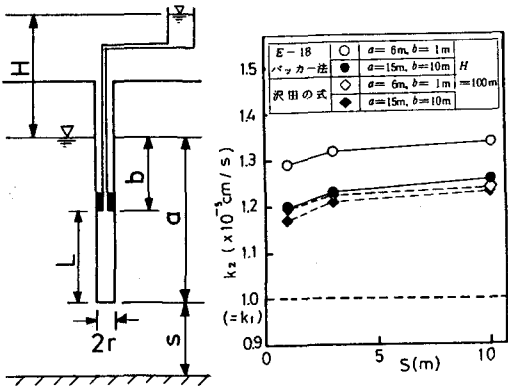
- (1) 松本・池田：軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する調査，土木研究所資料 2071号，59年3月
- (2) Earth Manual：U.S. Bureau of Reclamation
- (3) 山口・大根：フィルダムの設計及び施工，技報堂
- (4) 沢田敏男：透湿度の現場測定法-その1，その3，愛知用水公団技術資料，1956

表-5. 計算モデルと計算条件

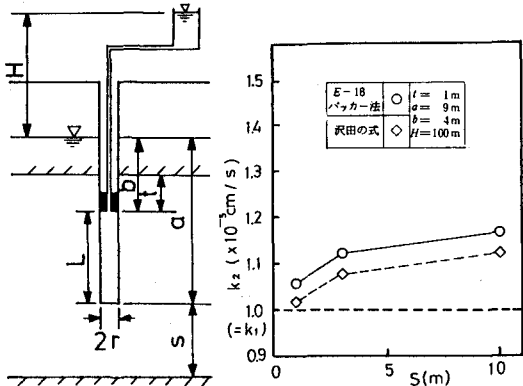
試験 No	計算モデルと計算条件
(3) E-18 オープンエンド法	モデルは、半径10mの円筒形 試験孔半径 $r=3.3$ cm 孔底から地下水面までの距離=3m 孔底からモデル下端までの距離=3m
(4) E-18 バックカー法 および 沢田の式	モデルは、半径15mの円筒形 試験孔半径 $r=3.3$ cm 孔底からモデル下端までの距離=10m ① $d=6$ m， $b=1$ m（図-5参照） ② $d=15$ m， $b=10$ m

表-6. 計算結果

原位置透水試験法	k_1 (cm/sec)	k_2 (cm/sec)
E-18 オープンエンド法		2.02×10^{-5}
E-18 バックカー法	1.0×10^{-5}	① 1.34×10^{-5} ② 1.26×10^{-5}
沢田の式		① 1.24×10^{-5} ② 1.24×10^{-5}



(a) 試験区間の下部のみに不透水層がある場合



(b) 試験区間の上下に不透水層がある場合

図-9. 計算結果

(42) Study on In-situ Permeability Tests Conducted on Soft Rock Foundations

Norihisa Matsumoto
Yoshikazu Yamaguchi

Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Summary

In designing dams, it is important to obtain the permeability of foundations. In Japan, the permeability of foundations has been usually evaluated with Lugeon test. This test procedure is primarily suitable for hard rocks in which seepage through the joints and cracks prevails.

However, not a few damsites in Japan consist of soft rocks recently. 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, the permeability of soft rock foundations should be evaluated by the permeability coefficient obtained from the in-situ permeability test.

In this paper, accuracy of several in-situ permeability tests was investigated by large scale laboratory test and numerical analysis. Results obtained from this investigation are summarized as follows :

- 1) If the permeability test is conducted above the ground water table, considerably accurate permeability coefficient is obtained from following three testing methods :
 - a) Designation E-19 established by U.S. Bureau of Reclamation
 - b) Designation E-18 packer test established by U.S. Bureau of Reclamation
 - c) Sawada's formula
- 2) If the permeability test is conducted below the ground water table :
 - a) Designation E-18 packer test established by U.S. Bureau of Reclamation
 - b) Sawada's formula

Furthermore, the accuracy of the permeability coefficient obtained from above two testing methods is not much influenced by the existence of impermeable layers around the testing area.