

放射流式透水試験器の試作実験について

正員 酒井左武郎*
正員 川北米良**

ON THE TRIAL PRODUCTION OF RADIAL FLOW
PERMEAMETER AND ITS TEST

By Saburo Sakai, C.E. Member and Yoneo Kawakita, C.E. Member.

Synopsis : The radial flow permeameter is used to define the coefficient of permeability of soil, by means of two dimensional seepage flow occurring horizontally throughout the soil sample, caused by making a suitable water pressure act on the porous pipe that is set in the middle of the cylindrical sample (See Fig. 1 and Photos 1 and 2).

From the testing results of this newly-built apparatus, the writers are convinced to have been able to correct some of the common faults and errors of the conventional testers that have hitherto been in use.

要旨 放射流式透水試験器は、円柱試料土の中心に立てられた多孔管に適度の水圧を作用させ、試料を通して水平な2次元放射浸透流を生ぜしめることにより、透水係数を求める試験器である（図-1および写真-1, 2参照）。

筆者等はこの試験器の試作実験により、従来の透水試験器が共通に持つ欠陥の幾つかを是正し、かつ信頼性のある測定結果を得ることができた***。

1. 緒言

圧密試験の結果から透水係数を求める場合を除けば、従来使用されて来た室内実験用の透水試験器は、一般に試験器の内側の壁面と試料土との境界面からの漏水量がかなり多く、これを防止することがはなはだ困難であり、試料の上面が試験中に攪乱されたり、あるいは試験時間が長びくと試料の自由表面が膨張したりする恐れがあった。更に boring により採集された不攪乱試料の透水試験に適しないという欠陥があった。しかしながら筆者は放射流式透水試験器の考案により、これ等の欠陥を除去し、室内実験による土の透水係数の測定に一層信頼性を増すことができた。また従来透水係数が 10^{-6} cm/sec 程度以下の土の場合には、透水係数の測定に長時間を要したのであるが、この不便を解消するため放射流式透水試験器の使用に際し、Boyleの法則を導入した新しい変水頭測定法（本文、変水頭測定法-Ⅱ）を案出し、これが高い精度を得ることができることを確認した。

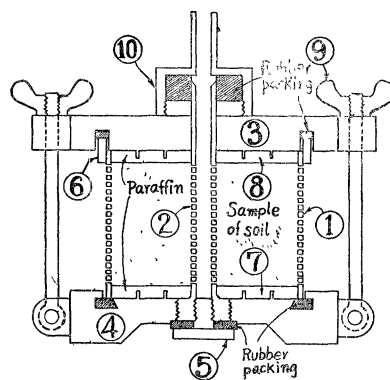
なお放射流式透水試験器なる名は筆者の命名せるものである。

2. 試験装置

放射流式透水試験器は図-1および写真-1, 2に示すような装置で、その構造の主要部分は①多孔円筒、②多孔管、③蓋板、④底板、よりなる。多孔円筒の内径は boring により採集される core の直径に合わせて作り、不攪乱試料の透水試験を行う場合の便をはかることにする。

試験に際しては蓋板③と底ネジ⑤をはずし、core tube をツバ⑥に連結し、tube 内の不攪乱試料を静かに多孔円筒①の内部に移す。次に試料土の上面を所定の寸法に削りならした後、上下面⑦⑧の空間部分に溶融した paraffin を注入し凝固し始めないうちに蓋板③を取り付け、ネジ⑨を締める。多孔管②の中に入った土は棒で押し出し中を brush でよく掃除してからネジ⑤をはめる。最後に連結金

図-1 放射流式透水試験器の構造



* 日本大学講師，理工学部土木工学教室 ** 日本大学助手，理工学部土木工学教室
*** 1958年5月24日，第13回年土木学会次学術講演会にて発表

写真-1 放射流式透水試験器の試作品

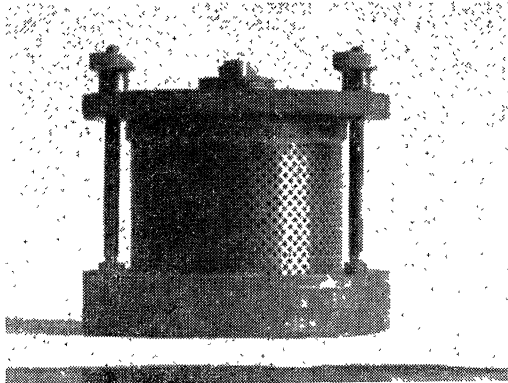
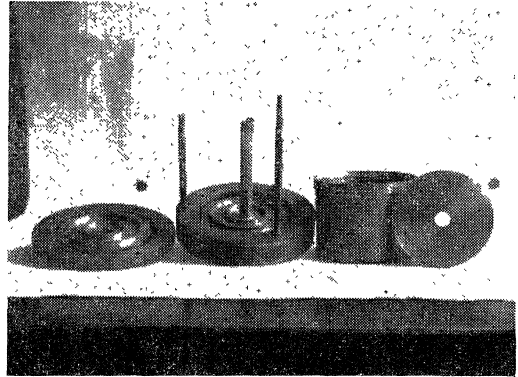


写真-2 試作の放射流式透水試験器の各部品



具①により透水試験器と水頭負荷装置とを連結し、溢流口のある容器の中に、多孔管が鉛直になるように試験器を据え置き、容器の中に水を満たす。このようにして試験準備が完了すれば、水頭負荷装置に Darcy の法則が成立する範囲の適度の水頭を試料に応じて作用させ、試験器の中央すなわち試料の中心軸に直立する多孔管の側壁を透して多孔円筒の外周に向かう水平方向の2次元放射状浸透流を生ぜしめ、次に述べる定水頭測定法あるいは変水頭測定法—I, II のいずれかの測定法により透水係数を求める。

3. 定水頭測定法

定水頭測定法は一般に試料が砂質系で、透水係数が 10^{-4} cm/sec 程度以上の場合に適用される。図-2 に示すように、試験器の中央の多孔管に作用する水頭 H を一定に確保し、ある時間内に試料中を浸透して流出した水の流量 Q_0 をメスシリンダーで測定することにより、その試料の透水係数を求める。この場合に試料中に生ずるの放射状浸透流は定常運動をなす。ゆえに動水勾配および透水係数は次のようにして求められる。

図-2 定水頭測定法

(a) 動水勾配 極座標 (r, θ) を図-2 のように定めれば、浸透流に対する連続の条件と Darcy の法則から、試料中の任意の点 (r, θ) の水頭 h は Laplace の方程式

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 h}{\partial \theta^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる¹⁾。この試験器においては、浸透流は多孔管を中心とする一様な放射流と考えられるから $\partial h / \partial \theta = 0$ 、また $H = \text{const.}$ であるから h は r のみの関数となる。従つて (1) は

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dh}{dr} \right) = 0. \dots\dots\dots (2)$$

図-2 において明らかなごとく、境界条件は

$$\left. \begin{aligned} (h)_{r=r_1} &= H, \\ (h)_{r=r_2} &= 0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $2r_1$ は多孔管の外径、 $2r_2$ は多孔円筒の内径を示す。(3) を満足するように (2) を解けば、動水勾配線の方程式

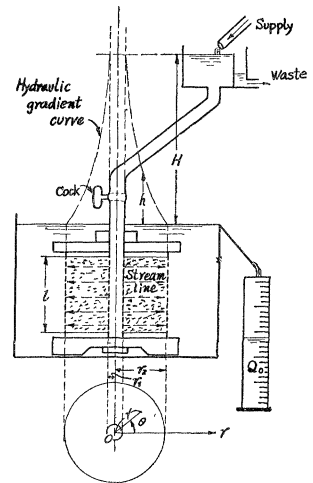
$$h = \frac{H \log(r_2/r)}{\log(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。(4) を r について微分すれば試料中各点の動水勾配 i が次式で与えられる。

$$i = - \frac{dh}{dr} = \frac{H}{r \log(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (5)$$

(b) 透水係数 長さ l の円柱試料土の中心線より半径 r の距離にある一透水断面 $2\pi rl$ を透して、時刻 t_1 から t_2 までの間に流れる流量 Q_0 は Darcy の法則 $v = -k dh/dr$ に (5) を代入して

$$Q_0 = 2\pi rlv(t_2 - t_1) = \frac{2\pi lkH(t_2 - t_1)}{\log(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (6)$$



ここに、 v は試料中の半径 r の点の浸透流速、 t_1 は測定開始時刻、 t_2 は測定終了時刻、 k は試料の透水係数とする。

ゆえに、選定した一定水頭 H について時刻 t_1, t_2 とその間の流量 Q_0 を測定すれば、(6) より透水係数は

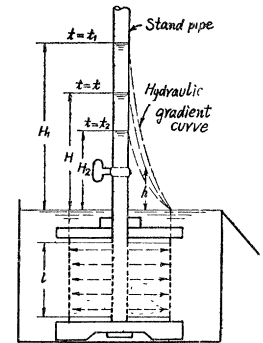
$$k = \frac{e Q_0}{l H (t_2 - t_1)}, \dots\dots\dots (7)$$

ただし
$$\lambda = \frac{\log(r_2/r_1)}{2\pi} = 0.36647 \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \dots\dots\dots (8)$$

により求められる。 λ は無次元定数で、試験器の寸法のみにより定まる試験器定数である。

4. 変水頭測定法—I

変水頭測定法—I は透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-7}$ cm/sec 程度となるような silt あるいは粘土質の土の場合に適用される。図-3 に示すように、垂直に立てた stand pipe を多孔管に連結し、これに水をを入れて円柱試料の中央に適度の水頭を作用させ、時間の経過とともに降下する stand pipe 内の水頭を観測し、次の計算により透水係数および動水勾配を求める。



(a) 透水係数 ある時刻における stand pipe 内の水頭を H 、stand pipe の内部断面積を a 、長さ l の円柱試料の中心線より半径 r の点の時刻 t の浸透流速および水頭をそれぞれ v および h とすれば、stand pipe 内を単位時間に降下する水量と試料中の一透水断面 $2\pi rl$ を単位時間に透過する流量とが等しくなければならぬから、次の等式が成立する。

$$2\pi rlv = -a \frac{dH}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

浸透流速 v に Darcy の法則 $v = -k \partial h / \partial r$ を適用すれば

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{a}{2\pi lk} \frac{dH}{dt} \frac{1}{r} \dots\dots\dots (10)$$

(10) において h は r および t の関数、 H は t のみの関数である。この場合の初期条件並びに境界条件は

$$(h)_{r=r_2} = 0, \dots\dots\dots (11) \quad (h)_{r=r_1} = H(t), \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} (H)_{t=t_1} &= H_1, \\ (H)_{t=t_2} &= H_2. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 H_1 は測定開始時刻 t_1 における stand pipe 内の水頭、 H_2 は測定終了時刻 t_2 の水頭である。(10) を r について積分し、(11) を満足させれば

$$h = \frac{a \log(r/r_2)}{2\pi lk} \frac{dH}{dt}, \dots\dots\dots (14)$$

さらに (14) に (12) の条件を用いれば

$$-\frac{2\pi lk}{a \log(r_2/r_1)} di = \frac{dH}{H}, \dots\dots\dots (15)$$

(15) を積分すれば

$$CH = e^{-\frac{2\pi lkt}{a \log(r_2/r_1)}} \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 C は積分定数である。(16) に境界条件 (13) を与えて C を消去すれば

$$k = \frac{\lambda a}{l(t_2 - t_1)} \log \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 λ は (8) で与えられる無次元の試験器定数である。従つて、測定初期に t_1, H_1 を観測し測定終了時刻に t_2, H_2 を観測すれば、(17) より透水係数が求められる。

(b) 動水勾配 (16) に (13) の最初の条件式を用いて積分定数 C を定めれば

$$C = \frac{1}{H_1} e^{-\frac{2\pi lkt_1}{a \log(r_2/r_1)}},$$

これを (16) に代入すれば stand pipe 内の水頭降下の状態が次式によつて表わされる。

$$H = H_1 e^{-\frac{lk(t-t_1)}{a\lambda}} \dots\dots\dots (18)$$

また stand pipe 内の水頭降下速度を u とすれば

$$u = -\frac{dH}{dt} = \frac{lkH_1}{a\lambda} e^{-\frac{lk(t-t_1)}{a\lambda}} \dots\dots\dots (19)$$

ゆえに動水勾配線は(14)に(19)を代入して

$$h = \frac{H_1 \log(r_2/r)}{2\pi\lambda} e^{-\frac{lk(t-t_1)}{a\lambda}} \dots\dots\dots (20)$$

従つて試料中各点の任意時刻における動水勾配 i は(20)を r について偏微分することにより

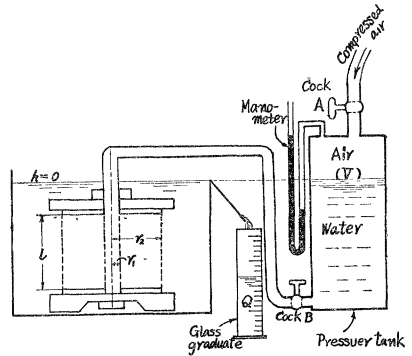
$$i = -\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{1}{2\pi\lambda r} H_1 e^{-\frac{lk(t-t_1)}{a\lambda}} \dots\dots\dots (21)$$

で与えられる。

5. 変水頭測定法—II

透水係数が 10^{-6} cm/sec 以下の試料になると、前述の測定法では高水頭を作用させるに不便な場合があり、また測定に長時間を要する。このような試料の場合に変水頭測定法—IIを用いれば比較的短時間に信頼性のある透水係数を測定することができ便利である。変水頭測定法—IIは、図—4に示すごとく70~80%まで水を満たした pressure tank と試験器とを、高压に対して断面の変形しない pipe で連結し、tank に圧搾空気を送りその圧力を manometer で測定する。Pressure tank 内の圧力が適当の値になったとき cock A を閉じる。この時 cock B は閉ざされているものとする。次に cock B を開き測定を開始する。測定開始時刻の pressure tank 内の圧力とある時間経過した後のその tank 内の圧力とを manometer で測定すると同時に、その時間中の浸透流量をメスシリンダーで測定することにより透水係数が求められる。ただし測定中の温度は一定に確保されるものとする。次にこの測定法における透水係数および動水勾配の計算式を誘導する。

図—4 変水頭測定法—II



(a) 透水係数 測定開始時刻を t_1 、その時刻の pressure tank 内の圧力および空気容積をそれぞれ p_1 および V 、測定終了時刻を t_2 、その時刻の pressure tank 内の圧力を p_2 、 t_1 から t_2 までの時間中の流量を Q_0 、 t_1 から任意時刻 t までの時間中の流量を Q とすれば、ある時刻 t における単位時間流量 dQ/dt と長さ l の円柱試料の中心線より半径 r の距離にある一透水断面を浸透する単位時間流量 $2\pi rlv$ との間に次の等式が成立する。

$$\frac{dQ}{dt} = 2\pi rlv \dots\dots\dots (22)$$

浸透流速 v に Darcy の法則を適用すれば

$$\frac{dQ}{dt} = -2\pi rlk \frac{\partial h}{\partial r} \dots\dots\dots (23)$$

他方、測定中任意の時刻 t における pressure tank 内の圧力を p で表わせば、Boyle の法則により

$$p_1 V = p(V+Q), \quad \therefore Q = V \left(\frac{p_1}{p} - 1 \right) \dots\dots\dots (24)$$

なる関係式を得る。ただし測定中の温度は一定に確保されるものとする。(24)を t で微分すれば

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Vp_1}{p^2} \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots (25)$$

(23) と (25) より dQ/dt を消去すれば

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{Vp_1}{2\pi lk} \frac{1}{p^2} \frac{dp}{dt} \frac{1}{r} \dots\dots\dots (26)$$

初期条件および境界条件は

$$\left. \begin{aligned} (h)_{r=r_2} &= 0, \\ (h)_{r=r_1} &= \frac{1}{\rho} p(t), \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$$\left. \begin{aligned} (P)_{t=t_1} &= p_1, \\ (p)_{t=t_2} &= p_2, \\ Q_0 &= V \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

ただし、 ρ は水の単位重量である。(26)を r について積分し、(27)を満足させれば

$$h = \frac{V p_1 \log(r/r_2)}{2\pi l k} \frac{1}{p^2} \frac{dp}{dt}, \dots\dots\dots (29) \quad dt = -\frac{\rho V p_1 \log(r_2/r_1)}{2\pi l k} \frac{1}{p^3} dp. \dots\dots\dots (30)$$

さらに条件 (28) を用い、(30) の左辺を t_1 から t_2 まで、右辺を p_1 から p_2 まで積分すれば

$$t_2 - t_1 = \frac{\lambda}{2} \frac{\rho Q_0 p_1 p_2}{l k (p_1 - p_2)} \left(\frac{1}{p_2^2} - \frac{1}{p_1^2} \right),$$

ゆえに

$$k = \frac{\lambda \rho Q_0 (p_1 + p_2)}{2 l (t_2 - t_1) p_1 p_2} \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 λ は (8) で与えられる試験器定数である。従つて、時刻 t_1, t_2 の pressure tank 内の圧力 p_1, p_2 とその時間中の浸透流量 Q_0 を測定すれば、透水係数は (31) により求められる。

(b) 動水勾配 (30) を積分し、(28) の初期条件 $(p)_{t=t_1} = p_1$ を満足するように積分定数を定め、(28) の第 3 式を用いて V を消去すれば

$$t = \frac{\lambda \rho V p_1}{2 l k p^2} + t_1 - \frac{\lambda \rho V}{2 l k p_1}, \quad p = \sqrt{\frac{\lambda \rho Q_0 p_1 p_2}{2 l k (p_1 - p_2) (t - t_1) + \lambda \rho Q_0 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}} \dots\dots\dots (32)$$

(32) は pressure tank 内の圧力の時間的に減少する状態を表わす式である。ゆえに試料中央の多孔管の側壁に作用する水頭 H の時間的变化は p/ρ によつて示される。また動水勾配線は (29) と (30) を用いて dp/dt を消去したのち、 p に (32) を代入すれば

$$h = \frac{\log\left(\frac{r_2}{r}\right)}{2\pi\lambda} \sqrt{\frac{\lambda Q_0 p_1 p_2}{2 \rho l k (p_1 - p_2) (t - t_1) + \lambda \rho^2 Q_0 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}} \dots\dots\dots (33)$$

動水勾配 i は (33) を r について偏微分することにより次式で与えられる。

$$i = -\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{1}{2\pi\lambda r} \sqrt{\frac{\lambda Q_0 p_1 p_2}{2 \rho l k (p_1 - p_2) (t - t_1) + \lambda \rho^2 Q_0 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}} \dots\dots\dots (34)$$

6. 動水勾配および浸透流速の最大最小値の関係

以上に述べた放射流式透水試験器による透水係数の三つの測定法（定水頭測定法、変水頭測定法—I, II）においては、動水勾配はそれぞれ (5), (21), (34) の各式で求められるが、これ等はすべて共通に

$$i = \frac{1}{2\pi\lambda} \frac{H}{r} \dots\dots\dots (35)$$

なる形式で表わされる。すなわち、動水勾配 i は中央水頭 H に比例し、半径 r に逆比例する。ゆえに放射流式透水試験器においては、動水勾配の最大 (i_{\max}) および最小 (i_{\min}) となる点はそれぞれ試料中央部 $r=r_1$ および試料の外周 $r=r_2$ の点であつて、それ等の値は (35) より

$$\left. \begin{aligned} i_{\max} &= \frac{1}{2\pi\lambda} \frac{H}{r_1}, \\ i_{\min} &= \frac{1}{2\pi\lambda} \frac{H}{r_2}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

また浸透流速 v は Darcy の法則により $v=ki$ であるから、(36) を用いて次の関係式を得る。

$$\frac{i_{\max}}{i_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \frac{r_2}{r_1} \dots\dots\dots (37)$$

すなわち、放射流式透水試験器における動水勾配および浸透流速の最大値と最小値の比は多孔円筒の内径と多孔管の外径の比に等しい。

7. 実験結果

試作実験において使用した放射流式透水試験器は、boring により採集される core の直径 3 in. の不攪乱試料を対象とし、多孔管の外径 $2r_1=1.0$ cm, 多孔円筒の内径 $2r_2=7.4$ cm, 試料の長さ $l=5$ cm とした。もちろん攪乱試料の試験にもこの試験器を用いた。写真—1 はこの試作試験器の全貌を示し、写真—2 はその構造を分解して各部品を示したものである。

(a) 試作試験器に対する透水係数の計算式および動水勾配・浸透流速の最大最小値の関係 試作の試験器においては試験器定数は (8) より $\lambda=0.3185$, 各測定値の単位を $H(\text{cm})$, $p_1, p_2(\text{g/cm}^2)$, $Q_0(\text{cm}^3)$, $(t_2-t_1)(\text{sec})$

とすれば透水係数 k (cm/sec) は各測定法によりそれぞれ (7), (17), (31) より

定水頭測定法: $k = \frac{0.0637 Q_0}{H(t_2 - t_1)} \dots\dots\dots (38)$ 変水頭測定法-I: $k = \frac{0.2422}{t_2 - t_1} \log_{10} \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \dots\dots\dots (39)$

ただし, 使用した stand pipe の内径 1.45 cm, $a = 1.65 \text{ cm}^2$ である。

変水頭測定法-II: $k = \frac{0.0319 Q_0 (p_1 + p_2)}{(t_2 - t_1) p_1 p_2} \dots\dots\dots (40)$

ただし, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ とする。

動水勾配および浸透流速の最大最小値は各測定法に共通に (36), (37) より次のごとく計算される。

$$i_{\max} = \frac{1}{2 \times 3.14159 \times 0.3185} \times \frac{H}{0.5} = 0.9994 H$$

$$\therefore i_{\max} H, \quad v_{\max} = kH, \quad \frac{i_{\max}}{i_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} = 7.4$$

すなわち, 試作の放射流式透水試験器においては, 試料中央部 ($r = r_1$) に生ずる最大動水勾配は, その時の cm 単位の中央水頭の読みの無次元数値にほぼ等しい。

(b) 新旧透水試験器の比較実験 次に, 従来使用されて来た定水頭型および変水頭型透水試験器²⁾と, 新しく考案した放射流式透水試験器との比較実験を標準砂と関東ロームについて, 種々間げき比を変えて行つた。これ等の試料の粒度分析の結果は 図-9 に示す。従来の透水試験器は, 試料土と側壁との接触面からの漏水を防ぐために, そこに paraffin をほどこすことになつてゐるが, その実行ははなはだめんどうで, かつ漏水の完全な防止は不可能なため, この比較実験の場合は, 従来の透水試験器に対して paraffin による漏水防止はしなかつた。次に新旧試験器を用いた場合の比較実験の結果を示す。

1) 標準砂の透水試験結果: 放射流式透水試験器に対しては前述の定水頭測定法を用い, 従来の定水頭型透水試験器に対しては, 試験器の内面と試料土との接触面からの漏水があるから, この漏水量を測定するために透水断面 (A) を 図-5 のように中心部 (A_1) と側壁に接触する周辺部 (A_2) とに区分し, それぞれの部分からの流量 Q_1 および Q_2 を測定し, 漏水率および透水係数を次式で求めた。

Q' = 漏水量を含む全浸透流量, Q = 補正浸透流量, q = 漏水量, H = 水頭, l = 試料の高さ

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{Q_1}{A_1} A, & Q' &= Q_1 + Q_2, & q &= Q' - Q, \\ \text{漏水率} &= \frac{q}{Q'}, & k &= \frac{Ql}{HA} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (41)$$

図-5 従来の定水頭型透水試験器の漏水量測定装置

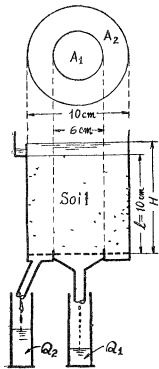


図-6 従来の定水頭型透水試験器の漏水率

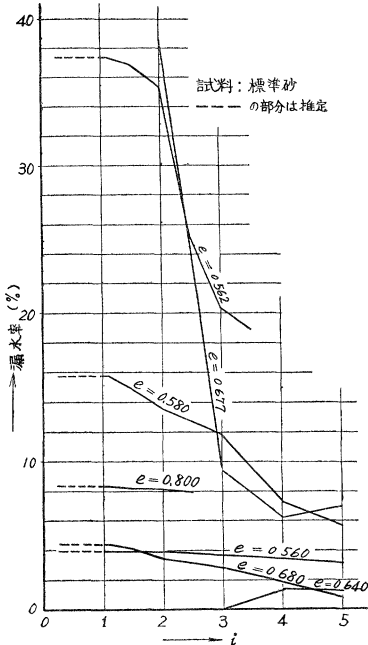
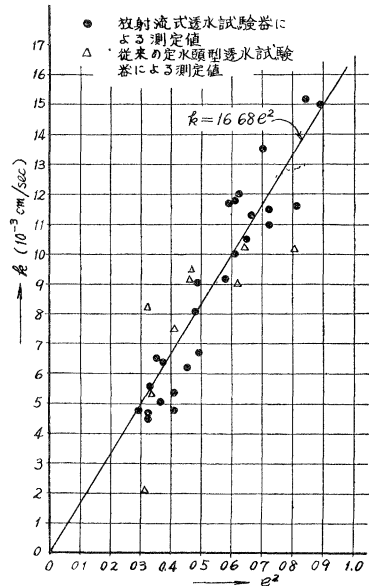


図-7 標準砂の透水試験結果



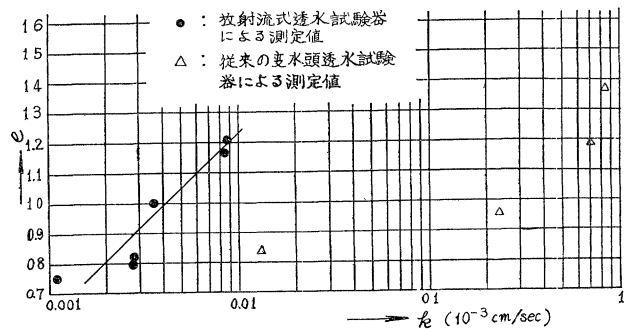
従来の定水頭型透水試験器を使用する場合は、漏水率を(41)より求め動水勾配(i)と漏水率との関係を示せば 図-6 のようである。すなわち、漏水率は試験器への試料の詰めぐあいにより異なるが、一試料についていえば、一般に動水勾配が大きくなるに従つて減少する傾向があり、その値は4~40%程度である。ただし、この実験においては、 Q_1, Q_2 の測定のため、試料の上面より水を流さねばならなかつたので $i < 1$ の部分を実験することができなかつた。しかしこの部分は Darcy の法則の成立範囲内^{3), 4)}にあるから、試料と試験器の内面との接触部の流れも Darcy の法則に従がうものとみなされるゆえ、 $i < 1$ の部分では漏水率はほぼ一定値をとるものと考えることができる。

しかし放射流式透水試験器はこのような漏水は全くなく試料の攪乱や吸水膨張の恐れなく、作用させる水頭の大きさを変えるにも自由で便利である。従つて、従来の透水試験器より、一層信頼性のある試験をなすことができた。

次に、定水頭型透水試験器を使用した場合の透水係数値は、 Q' を補正して漏水量を含まない補正浸透量を用いて(41)で計算し、放射流式透水試験器を用いた場合の透水係数値は(38)で求め、両者の実験結果について、透水係数(k)と試料の間げき比(e)の自乗との関係を示せば、図-7 のようである。この結果によると k と e^2 との間に比例関係 $k = 16.68 e^2$ があり D.W. Taylor の示した関係³⁾が認められた。ただし、測定値は定水頭型試験器を用いて補正流量から計算した値よりも、放射流式透水試験器を用いた場合の方がはるかにばらつきが少ない。

ii) 関東ロームの透水試験結果：従来の変水頭型透水試験器を用いた場合と放射流式透水試験器に変水頭測定法-Iを適用した場合との比較実験を関東ロームについて行つた結果は 図-8 のごとくである。試験器へ試料を詰め込む時の含水比は40~50%飽和度は70~80%である。変水頭型試験器の試験結果は、いずれの場合も24時間に試験器壁からの漏水率が70~90%もあり、これを防止する paraffin jacket の実施は技術的にむづかしく、この実験では成功しなかつたので、信頼性のある k の値を測定することができなかつた。一般に、これまで $k = 10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm/sec の土は透水性が不安定で、正確な測定値を得ることが困難でかなりの経験を要した⁵⁾のであるが、関東ロームの k はこの範囲に属する。しかし放射流式透水試験器においては試験器の漏水は全くなく、容易に信頼性の高い測定値を得ることができ、ほぼ D.W. Taylor の示した結果と同様な傾向が認められた⁷⁾。

図-8 関東ロームの透水試験結果



(c) 圧密試験器および放射流式透水試験器より求めた透水係数値の比較 この比較実験に用いた試料は、地下水面下より採集した silt ないし粘土質の不攪乱試料で、その結果は表-1 のようである。すなわち圧密試験器および放射流式透水試験器の両者より求めた k の値は相当近似し、信頼度の高いことを示す。なお放射流式透水試験器はこのような透水係数のきわめて小さい試料に高い水頭を作用させても漏水の恐れが全くないことを確認した。

圧密試験器を用いた場合は、最初の載荷段階の荷重強度 0.2 kg/cm^2 に対する透水係数を \sqrt{t} -法により次式から求めた。

$$k = \frac{a_v C_v r_w}{1 + e}$$

ここに a_v = 一次圧密部分のみについての圧縮係数、 C_v = 圧密係数、 e = 試料土の間げき比、 r_w = 間げき水の密度。放射流式透水試験器を用いた場合は、変水頭測定法-I および II を適用し、(39) あるいは (40) より透水係数を求めた。

(d) 放射流式透水試験器による各種の土の透水実験例 最後に試作試験器を用いて 図-9 に示すような各種の土について行つた透水試験例を、表-2 および 図-10, 11 に示す。

8. 結 言

以上の実験結果により、新しく考案せる放射流式透水試験器は、従来使用されて来た定水頭型および変水頭型

表一 圧密試験器および放射流式透水試験器より求めた透水係数の比較

粒度による土の分類	粒土配合 (%)			D_{60} (mm)	D_{10} (mm)	試験時の飽和度 (%)	間引き比 e	透水係数 k (cm/sec)		
	砂	シルト	粘土					放射流式透水試験器*	圧密試験器	
									k^{**}	e^{**}
シルト質ローム	18	74	8	0.03	0.008	100	1.36	7.83×10^{-7}	4.87×10^{-7}	1.31
シルト質ローム	25	68	7	0.05	0.01	100	1.32	2.90×10^{-7}	1.82×10^{-7}	1.28
シルト質粘土	6	61	33	0.02	0.001以下	95	1.43	3.70×10^{-7} (3.78×10^{-7})	2.41×10^{-7}	1.39
シルト質ローム	15	76	9	0.02	0.006	99	1.63	8.86×10^{-8} (7.01×10^{-8})	6.87×10^{-7}	1.61
粘土	3	47	50	0.008	0.001以下	95	1.67	2.92×10^{-7}	1.64×10^{-7}	1.64
粘土	2	48	50	0.008	"	92	1.82	4.23×10^{-7}	3.22×10^{-7}	1.78
粘土	8	42	50	0.01	"	100	2.02	1.05×10^{-7}	2.27×10^{-7}	1.99
シルト質粘土ローム	17	55	28	0.02	"	98	2.24	2.45×10^{-7}	3.37×10^{-7}	2.19
粘土	9	41	50	0.009	"	99	2.46	2.38×10^{-8} (2.19×10^{-8})	2.00×10^{-8}	2.45
シルト質ローム	15	77	8	0.02	0.003	99	1.89	6.90×10^{-7}	8.03×10^{-7}	1.83
シルト質粘土ローム	3	27	70	0.003	0.001以下	96	1.56	6.45×10^{-8} (7.70×10^{-8})	9.17×10^{-8}	1.48
シルト質粘土	9	56	35	0.01	"	100	0.86	1.01×10^{-8} (1.20×10^{-8})	1.34×10^{-8}	0.85

* の欄で、() 内の数値は変水頭測定法-IIにより求めた値、その他は変水頭測定法-Iにより求めた値を示す。

** は圧密試験に際する荷重強度が 0.2 kg/cm^2 の時の値を示す。

表二 放射流式透水試験器による各種の土の透水実験例

No.	試料名	粒土配合 (%)				D_{16} (mm)	D_{10} (mm)	飽和度 (%)	間引き比 e	測定法*	透水係数 (cm/sec)
		砂	シルト	粘土	粘土						
1	荒砂	7	91	2	0	0.90	0.24	71	0.60	定	9.20×10^{-2}
2	砂	0	94	6	0	0.50	0.12	92	0.66	定	7.30×10^{-3}
3	標準砂	0	100	0	0	0.22	0.15	80	0.58	定	8.20×10^{-3}
4	砂質ローム	0	69	21	10	0.10	0.005	76	0.70	定	7.37×10^{-5}
5	ローム	0	46	48	6	0.062	0.011	95	1.47	変-I	6.70×10^{-6}
6	シルト質ローム	0	16	72	12	0.022	0.0055	86	1.37	変-I	3.76×10^{-6}
7	シルト質粘土ローム	0	27	51	22	0.036	0.002	88	1.72	変-I	2.69×10^{-6}
8	粘土	0	42	22	36	0.0095	0.001以下	100	1.61	変-I 変-II	6.07×10^{-7} 6.48×10^{-7}

* 定: 定水頭測定法, 変-I: 変水頭測定法-I, 変-II: 変水頭測定法-II

図-9 透水試験試料土の粒徑加積曲線

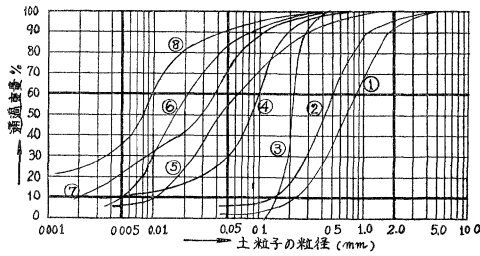


図-11 変水頭測定法-I における中央水頭降下曲線と流速-動水勾配の関係の測定例 (その2)

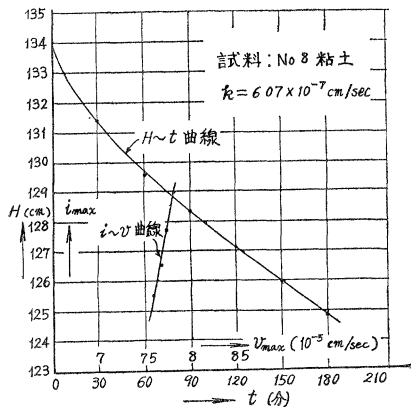
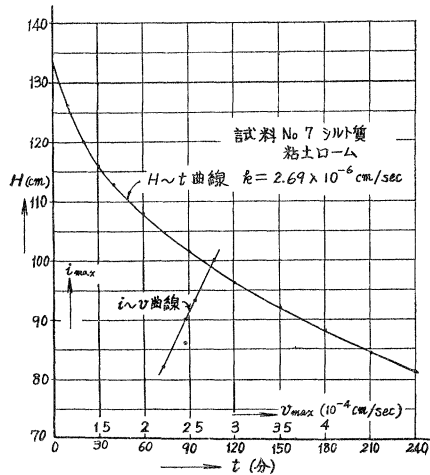


図-10 変水頭測定法-I における中央水頭降下曲線と流速-動水勾配の関係の測定例 (その1)



透水試験器にみられるような試験器の内側壁面と試料土との接触面からの漏水や、試験中の攪乱、膨張の恐れがなく、今までより一層精度の高い透水係数を測定することに成功した。特にこれまで $k=10^{-3}\sim 10^{-6}$ cm/sec の範囲の土は正確な透水係数を測定するのにかなりの経験を要し、また $k<10^{-6}$ cm/sec の試料になると、圧密試験の結果からでなければ正確な透水係数が求められず、その測定には長い時間と手数がかかったのであるが、放射流式透水試験器は同一試験器で定水頭および変水頭の両測定法を実施することができ、どのような種類の土に対しても容易に相当の精度の測定値を得ることができる。また新しく考案した変水頭測定法—IIは $k<10^{-7}$ cm/sec の試料に対し特に有効な測定法で、精度も高いことが確認できた。

なお、放射流式透水試験器は特に水平方向の透水係数を求める場合に便利である。試験器の直径を boring による採集試料の直径に合わせて作つておけば、不攪乱試料の試験に好都合である。図—1 に示す試験器の構造の⑦、⑧の部分には paraffin を注入することにしたが、実験の結果 $k>10^{-6}$ cm/sec の試料に対しては paraffin を注入しなくても漏水の心配は全くないことが確かめられた。

この研究に際しては、日本大学教授 当山道三博士の指導を受けた。また九州大学教授 松尾春雄博士は、わざわざ著者に有益なる助言と激励の詞を与えられた。記して両教授に衷心より敬意を表す。

参 考 文 献

- 1) M. Muskat: The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, 1937. p. 151.
- 2) 例えは、河上房義: 土の透水試験 (その1), 土と基礎, Vol. 4, No. 1, 1956. pp. 33~40. に見られるような透水試験器をいう。
- 3) S. Leliavsky: Irrigation and Hydraulic Design, 1955. pp. 20~25.
- 4) 河上房義 土の透水試験 (その1), 土と基礎, Vol. 4, No. 1, 1956. p. 34.
- 5) D.W. Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics, 1948. pp. 114~115.
- 6) 最上武雄: 土質力学, 1951. p.64
- 7) D.W. Taylor: 前出, pp. 115~117

(昭.33.11.8)