

## ボーリング孔を利用せる非定常流透水試験法について

正員 小田 英 一\*

ON THE PERMEABILITY TEST OF UNSTEADY FLOW  
UTILIZING THE BORING HOLE

By Eiichi Oda, C.E. Member

**Synopsis :** In this paper, the author introduces the calculating formulas for the coefficient of permeability by the permeability test of unsteady flow utilizing the boring hole. From the observed data of the rise and fall of water level with time in the boring casing pipe pouring water into this pipe and stopping this pouring after steady flow of aquifer respectively, the coefficient of permeability is determined by the graphical and theoretical analysis introduced by heat conductive formula.

**要 旨** 透水性地盤の地質調査のため ボーリングをして透水係数を知りたい場合、このボーリング孔にケーシングパイプを打込み、これに注水したりまたは定常流状態のとき注水を停止してケーシングパイプ内の水位の時間的変化の観測より透水係数を求める理論を研究した。また実験によりこの理論のうらづけを行つた結果につき述べる。

## 1. 緒 言

ボーリング孔にケーシングパイプを打込み、これを利用してこの管に一定水量で注水して、このときの注水量、水位上昇の時間的関係すなわち非定常流状態の水位変動を測定する。また一定水位になつたとき、すなわち定常流状態より急に注水を停止したときの 水位降下の非定常流状態の水位変動の測定より 地盤の透水係数を測定しようとする。

ただし、この試験法はボーリング底が地下水面より下にある場合に適用できるものである。この注水のときの水位の時間的変動の様相は井戸の揚水試験の様相と逆になり、揚水の非定常流状態はこの場合注水の非定常流状態にあたり、また井戸試験の回復法がこの場合の注水停止の非定常流状態にあるとみなされる。ゆえに用いる理論式は井戸の非定常流理論を用いる。井戸の汲下量がこの場合では水位上昇量になり、井戸の回復法における水位回復量は この場合では定常流状態の水位より注水停止後の降下量にあてはまると考えれば同じことである。そこでいま半球形多孔底面を有する井戸で側壁にストレーナのない井戸の非定常流理論について述べる。ボーリングするときボーリング底の土砂は攪乱をうけ近似的に 底は半球形をなしていると考えても 誤差は小と考えられるゆえに、半球形多孔底面を有する井戸を考えたわけである。ストレーナのある井戸の非定常流理論において、ある点の水位降下量と井戸中心よりその点までの距離 および時間との関係は円錐座標による熱伝導の式となり、これについては C.E. Jacob<sup>1)</sup>および Russell H. Broun<sup>2)</sup>の研究がある。半球形多孔底面を有する井戸の非定常流理論は球座標による熱伝導の式となり、この解より直線解法と典型曲線解法とを導き出し透水係数を求める理論につき説明し、室内の模型実験によりこの理論の妥当性につき検討する。

## 2. 半球形多孔底面を有する井戸の非定常流理論

被圧地下水でその帯水層が地表面よりある深さより以下無限の下方に拡がつてあるとき、その上の不透水層を井戸が貫き、図-1 に示すごとくこの不透水層の下端に半球形多孔底面を有する構造とすると、井戸の揚水時の帯水層中の地下水の非定常流の問題を取りあつかう。Forchheimer によれば不透水層なき浅井の場合でも近似的に被圧地下水の井戸の理論を適用できる。

原圧力線を OA, 井戸中における汲下量  $s_0$  に対する湧出量を  $Q$ , 揚水時の降下せる圧力線を CD, 井戸の半径を  $r_0$ , 井戸の底は  $O'$  を中心とする半径  $r_0$  の半球形多孔底面とする。

また  $O'$  より  $r$  なる距離にある地点の水位降下量を  $s$  とする。井戸底中心

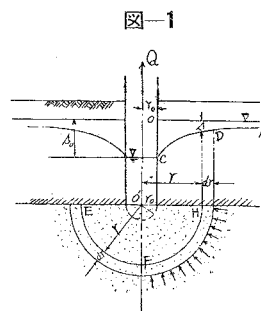


図-1

\* 徳島大学教授, 工学部土木工学教室

O' を共有する半球形球殻の内側の半径を  $r$ , 外側の半径を  $r+dr$  とする。連続の条件よりこの球殻より流れ出る水量は球殻の中の水の容積の一定時間中の減少量に等しい。球殻の中の水の容積を  $V_w$ , 帯水層の空ゲキ率を  $n$ , 水の圧縮率を  $\beta$ , 水の単位容積当りの重量を  $\gamma$ , 時間を  $t$  とすれば

$$V_w = 2\pi r^2 n dr$$

この容積の時間的減少は次式となる。

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = 2\pi r^2 n \beta dr \cdot \frac{\partial(rs)}{\partial t}$$

圧力が減少して水が膨脹すると弾性的に圧縮される帯水層の圧縮性を考えて  $\beta$  の代りに見掛圧縮率  $\beta'$  を用いる。しからば上式は次式となる。

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = 2\pi r^2 n \beta' \gamma dr \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

水の見掛圧縮率  $\beta'$  は水と土との圧縮率に関係し

$$\beta' = \beta + \frac{\alpha}{n} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし  $\alpha$  は帯水層の圧縮率である。すなわち帯水層の土の中の圧縮力の鉛直成分の単位増加に対する帯水層の厚さの相対的な減少量である。

半球形球殻の内面よりの流出量は  $-2\pi r^2 k \left(\frac{\partial s}{\partial r}\right)$  である。ただし  $k$  は帯水層の透水係数である。また半球形球殻の外側の面より共戸底中心に向い流出する水量は

$$2\pi(r+dr)^2 k \left(\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr\right)$$

である。この両者の和は水の半球形球殻の容積の時間的減少に等しい。高次の微係数を無視して計算すれば

$$2\pi k \left(r^2 \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} dr + 2r \frac{\partial s}{\partial r} dr\right) = 2\pi r^2 n \beta' \gamma dr \cdot \frac{\partial s}{\partial t}$$

上式を  $2\pi r^2 dr$  で割り

$$n \beta' \gamma = U \dots\dots\dots (3)$$

とおけば次式をうる。

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{U}{k} \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$\kappa^2 = \frac{k}{U} \quad \text{すなわち} \quad \kappa = \sqrt{\frac{k}{U}} \dots\dots\dots (4)$$

とおけば

$$\kappa^2 \left\{ \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial s}{\partial r} \right\} = \frac{\partial s}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

となる。これは球座標による熱伝導の式である。

この場合上の微分方程式を解くのに必要な条件は次のようになる。

初期条件  $t=0$  のとき  $s=0$

境界条件  $r=\infty$  のとき  $s=0$

$$t>0 \text{ のとき } L_{r \rightarrow 0} \left( r^2 \frac{\partial s}{\partial r} \right) = -\frac{Q}{2\pi k} \quad *)$$

(5) 式において

$$s = \frac{v}{r} \quad \text{すなわち} \quad v = rs \dots\dots\dots (6)$$

とすれば

$$\kappa^2 \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{\partial v}{\partial t} \dots\dots\dots (7)$$

となる。これに関連して前の初期条件、境界条件は次のようになる。

(i) 初期条件  $t=0$  のとき  $v=0$

(ii) 境界条件  $r=\infty$  のとき  $L_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial v}{\partial r} = 0$  および  $L_{r \rightarrow \infty} v = 0$

(iii) 境界条件  $t>0$  のとき  $L_{r \rightarrow 0} v = \frac{Q}{2\pi k}$

いま

$$V(\xi, t) := \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty v(r, t) \sin(\xi r) dr \dots\dots\dots (8)$$

とする。これは  $v(r, t)$  の Fourier sine transform である。次の演算において境界条件 (ii) および (iii) を用いて計算すれば

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \sin(\xi r) dr = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \xi \frac{Q}{2\pi k} - \xi^2 V(\xi, t)$$

となることを利用して (7) 式に次の演算をなす。

$$\kappa^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \sin(\xi r) dr = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty v \sin(\xi r) dr \right\}$$

これより

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \xi^2 \kappa^2 V = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \xi \kappa^2 \frac{Q}{2\pi k} \dots\dots\dots (9)$$

がえられる。(9) 式を解けば

$$V = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q}{2\pi k} \left\{ \frac{1}{\xi} + C e^{-\xi^2 \kappa^2 t} \right\}$$

となる。ただし  $C$  は積分定数である。初期条件 (i) より (8) 式を用いて

$$V(\xi, 0) = 0 \text{ より } C = -\frac{1}{\xi} \text{ となり}$$

$$V(\xi, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q}{2\pi k} \left\{ \frac{1 - e^{-\xi^2 \kappa^2 t}}{\xi} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

なる解がえられる。Fourier sine transform の定理より

$$v(r, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty V(\xi, t) \sin(\xi r) d\xi = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{Q}{2\pi k} \int_0^\infty \left\{ \frac{1 - e^{-\xi^2 \kappa^2 t}}{\xi} \right\} \sin(\xi r) d\xi \right]$$

これより

$$v(r, t) = \frac{Q}{2\pi k} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{Q}{2\pi k} \int_0^{\frac{r}{\sqrt{2\kappa t^{1/2}}}} e^{-u^2} du \right] \dots\dots\dots (11)$$

(6) 式に (11) 式を代入して

$$s(r, t) = \frac{Q}{2\pi k r} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{r}{\sqrt{2\kappa t^{1/2}}}} e^{-u^2} du \right\} \dots\dots\dots (12)$$

となり、(5) 式の解がえられた。

### 3. 直線解法

(12) 式において

$$\frac{r}{2\pi k t^{1/2}} = \alpha \dots\dots\dots (13)$$

として、 $\int_0^\alpha e^{-u^2} du$  を無限級数の項に展開すれば、(12) 式は

$$s(r, t) = \frac{Q}{2\pi k r} - \frac{Q}{\pi \sqrt{\pi} k r} \left[ \alpha - \frac{\alpha^3}{3} + \frac{\alpha^5}{5 \cdot 2!} - \frac{\alpha^7}{7 \cdot 3!} + \dots \right]$$

となり、 $t$  が大になるとき、 $\alpha^3, \alpha^5, \alpha^7, \dots$  は  $\alpha$  に比し僅少なるゆえ無視できて、上式は (13) 式を用いて次式となる。

$$s(r, t) = \frac{Q}{2\pi k} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\kappa t^{1/2}} \right) \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式の両辺に  $t^{1/2}$  を乗じて

$$s t^{1/2} = Y \text{ および } \frac{t^{1/2}}{r} = X \text{ として}$$

$$Y = \frac{Q}{2\pi k} \left( X - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\kappa} \right) \dots\dots\dots (15)$$

となる。 $X$  軸を横軸に  $Y$  軸を縦軸にとり、この座標軸により  $s$  と  $t$  との測定値より計算して、 $X$  と  $Y$  との関係を示す曲線を引くとき、この曲線が  $t$  が大になるにつれて直線となる部分に注目して、この直線の勾配  $\left( \frac{dY}{dX} \right)_{s,t}$

を求め (15) 式の形よりして

$$k = \frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dY}{dX}\right)_{st}} \dots\dots\dots (16)$$

によつて透水係数  $k$  の値を求めることができる。なおこの直線が  $X$  軸と交わる点の  $X$  の値を  $X_0$  とすれば

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{\pi X_0}} \dots\dots\dots (17)$$

によつて  $\kappa$  の値を求めることができる。

4. 典型曲線解法

いま error function を次のようにおく

$$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$$

ただし、上式において

$$u = \frac{r}{2\kappa t^{1/2}} \dots\dots\dots (18)$$

とおくとき、(12) 式は次のようになる。

$$1 - \Phi(u) = \frac{2\pi k}{Q} \cdot sr \dots\dots\dots (19)$$

(18) 式と (19) 式との両辺の対数をとれば

$$\log u = \log\left(\frac{1}{2\kappa}\right) + \log\left(\frac{r}{t^{1/2}}\right) \dots\dots\dots (20)$$

$$\log\{1 - \Phi(u)\} = \log\left(\frac{2\pi k}{Q}\right) + \log(sr) \dots\dots\dots (21)$$

となる。(20) 式の  $\log\left(\frac{1}{2\kappa}\right)$  と  $\log\left(\frac{2\pi k}{Q}\right)$  とは恒量であるから、 $u$  と  $1 - \Phi(u)$  との関係を示す典型曲線と  $\frac{r}{t^{1/2}}$  と  $sr$  との関係を示す曲線とを両対数紙上に画くと、これ等の曲線はその形が同一となるはずである。別に発表されている  $\Phi(u)$  の数値表より  $1 - \Phi(u)$  を求め、この値と試験井戸で集められる水位変動の資料とを利用し、これ等の曲線を両対数紙上に求める。この二つの両対数紙上の曲線を良好な一致点 (match point) がえられるまで座標軸を平行に保つて重ね合わせる。一致点が見つかったらそれに対応する  $1 - \Phi(u)$ 、 $u$ 、 $sr$ 、 $\frac{r}{t^{1/2}}$  の値を読みとり、これ等の値を (18) 式と (19) 式とに代入して、それぞれより  $\kappa$  と  $k$  を求めることができる。すなわち、

$$k = \{1 - \Phi(u)\} \frac{Q}{2\pi sr} \dots\dots\dots (22)$$

$$\kappa = \frac{r}{2ut^{1/2}} \dots\dots\dots (23)$$

となる。なお  $1 - \Phi(u)$  の値を 表-1 に示す。

5. 実験への適用および実験資料の解析

実験装置としては 写真-1 および 図-2 に示すように高さ 100 cm、直径 55 cm のドラム缶の下底より 40 cm 上に鉄製有孔上底をとりつけ、この上底に粗目の布をしき、この上に吉野川砂を 50 cm の厚さに均一につめる。ドラム缶の上縁に一定水位を保たしめるため溢流用ノッチをつける。この砂の中央にガラス主管を挿入し、つめた砂を攪乱しないようにガラス主管内の砂を排除しながら所定の根入深さまで挿入したならば、底を半球形になるように砂を取る。しかる後 図-2 の A の孔のゴム栓をとり水道水を入れ、除々に水位を砂の中にあげ溢流用ノッチより溢流さし数日間放置して A の孔の栓をなす。次に注水用調節水槽よりサイフォンによりガラス主管に注入し、溢流水面お

写真-1 実験装置



表-1 1-φ(u) の値

u	1-φ(u)	u	1-φ(u)	u	1-φ(u)	u	1-φ(u)	u	1-φ(u)
0.000	1.0000	0.040	0.9549	0.450	0.5245	1.100	0.1198	2.000	0.0047
0.001	0.9989	0.050	0.9436	0.500	0.4795	1.150	0.1039	2.100	0.0030
0.002	0.9977	0.060	0.9324	0.550	0.4367	1.200	0.0897	2.200	0.0019
0.003	0.9966	0.070	0.9211	0.600	0.3961	1.250	0.0771	2.300	0.0011
0.004	0.9955	0.080	0.9099	0.650	0.3560	1.300	0.0660	2.400	0.0007
0.005	0.9944	0.090	0.8987	0.700	0.3222	1.350	0.0562	2.500	0.0004
0.006	0.9932	0.100	0.8875	0.750	0.2888	1.400	0.0477	2.600	0.0002
0.007	0.9921	0.150	0.8320	0.800	0.2579	1.450	0.0403	2.700	0.0001
0.008	0.9910	0.200	0.7773	0.850	0.2293	1.500	0.0339	2.800	0.0001
0.009	0.9898	0.250	0.7237	0.900	0.2030	1.600	0.0236	2.900	0.0000
0.010	0.9887	0.300	0.6714	0.950	0.1791	1.700	0.0172	3.000	0.0000
0.020	0.9774	0.350	0.6206	1.000	0.1573	1.800	0.0109		
0.030	0.9662	0.400	0.5716	1.050	0.1376	1.900	0.0072		

図-2 ガラス主管による非常流透水実験装置

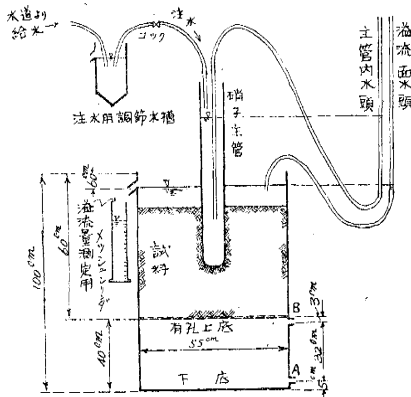


図-3 定水頭透水実験装置

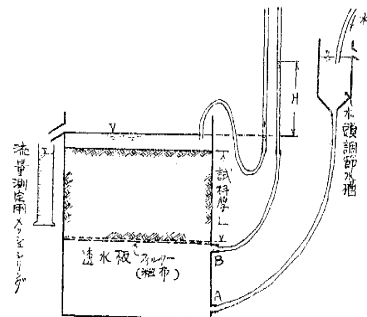
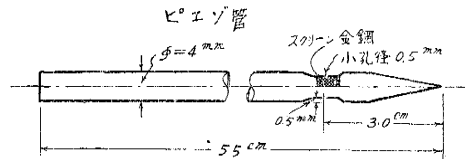


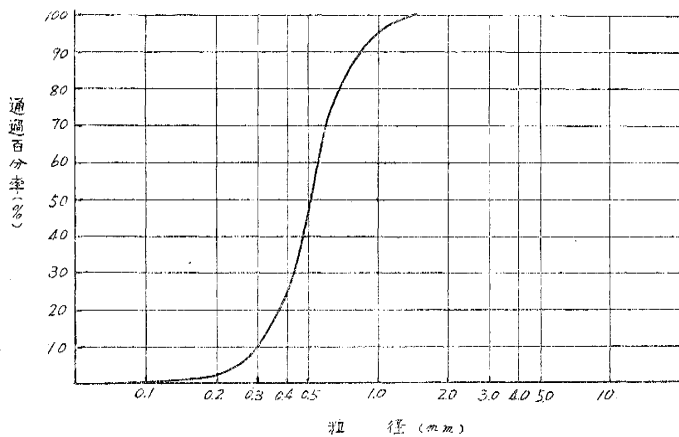
図-4 ピエゾ管



よびガラス主管内の水をサイフォンによりピエゾメータに導き水位を測定し、溢流用ノッチより流出する水量を測り注水量とする。このような装置により一定注水量のとき定常流状態となりガラス主管内の水頭が一定高さとなつてから注水停止すると、ガラス主管内の水位が時間の経つに従つて降下する。またこの水位が溢流水面と同じになつたとき一定水量で注水すれば時間的に水位が上昇する。このような水位の時間的変動を測定し非常流透水実験をなして透水係数を求めるが、他の方法でこの砂の透水係数を測定するために 図-3 に示すようにドラム缶自体が定水頭透水試験器となる構造とする。なお砂の各層の水頭を測定するため 図-4 に示すような直径 4 mm のピエゾ管を所定の深さまで挿入しサイフォンによりピエゾメータに連結して定水頭透水試験における水頭を測定して各層の透水係数を求める。

使用した砂は吉野川砂を網フルイを通して比較的粒徑をそろえたものを用い、これをドラム缶につめるには 20 cm の高さより網フルイを通して自由落下せしめて均一につまるようにした。この砂の真比重は 2.69、間ゲキ比は 0.710、乾燥密度は 1.56 g/cm<sup>3</sup> であつた。粒度分布は 図-5 に示すごとくで  $D_{10}=0.30$ 、 $D_{30}=0.57$ 、均等係数  $u=\frac{D_{60}}{D_{10}}=1.90$  で

図-5 実験用砂の粒徑加積曲線



あつた。

直径 4.3 cm のガラス主管の根入れ 15.0 cm にして非定常流透水実験を行つた  $s \sim t$  の測定結果を図-6 に示す。この実験に於て注水量  $Q = 12.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、ガラス主管の半径は 2.15 cm なるゆえ  $r = 2.15 \text{ cm}$  ととり、 $s$  はガラス主管の水位であり、注水試験のときは溢流水面より測つた水頭高さであり、注水停止試験のときは定常流状態のときのガラス主管内の水頭高よりの降下量である。注水停止試験のとき計算に用いる  $Q$  の値としては定常流状態のときの注水量を用いることは井戸の回復法の場合と同じ考え方によるゆえに、 $Q = 12.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$  とすることができ、測定時の水温  $T = 9.0^\circ\text{C}$  であつた。

図-6  $Q = 12.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、ガラス主管半径  $r = 2.15 \text{ cm}$ 、根入れ 15.0 cm のときの非定常流透水試験の  $s \sim t$  実測値および理論値

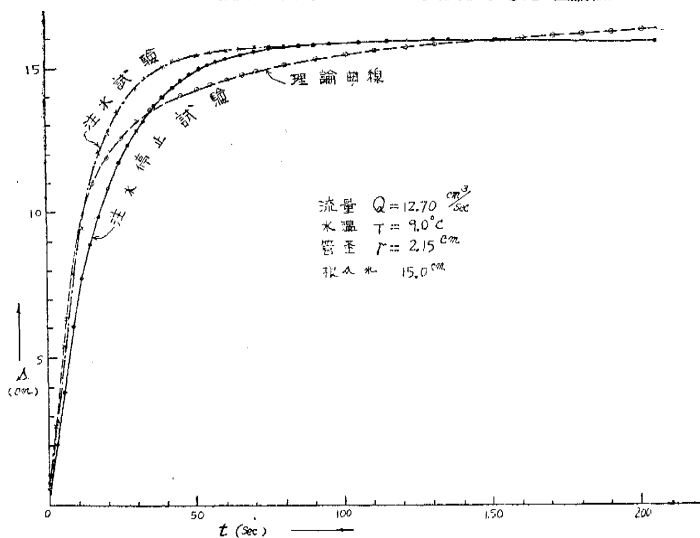


図-6 の測定値より直線解法のための  $X, Y$  値を計算して図示したものが図-7 であり、この  $X, Y$  曲線が  $t$  の大となるに従つて直線となることを示している。この直線の傾斜は  $\left(\frac{dY}{dX}\right)_{st} = 41 \text{ cm}^2$  となり、(16) 式より  $k = 0.0493 \text{ cm}/\text{sec}$  となる。この直線の  $X$  軸との交点の  $X_0 = 0.63 \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{1/2}$  の値より (17) 式を用いて  $\kappa = 0.898 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  となる。井戸の揚水試験より透水係数を求める場合回復法を用いて計算することがあるように、この場合の  $s \sim t$  の値としては注水停止試験のときの測定値を用いる。次の典型曲線解法においても同じことである。図-6 の測定値より典型曲線解法のため  $sr, r/t^{1/2}$  の値を計算して両対数紙上に画いた実験曲線と表-1 より  $1 - \theta(u)$  と  $u$  の値を両対数紙上に画いた典型曲線を図-8 に示すように座標軸平行になるように重ね合わせる。

図-7  $Q = 12.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、ガラス主管半径  $r = 2.15 \text{ cm}$ 、根入れ 15 cm のときの直線解法

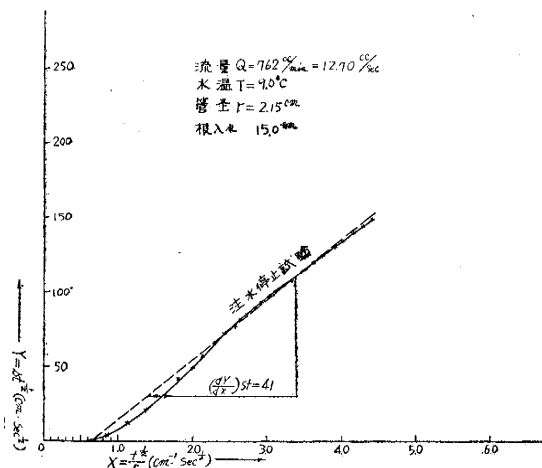


図-8  $Q = 12.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、ガラス主管半径  $r = 2.15 \text{ cm}$ 、根入れ 15 cm のときの典型曲線解法

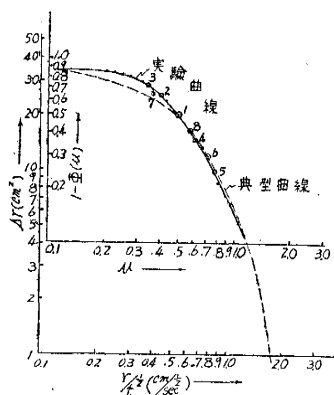


図-8 の match point 1 の座標の値として  $1 - \theta(u) = 0.50$ 、 $u = 0.48$ 、 $sr = 19.6 \text{ cm}^2$ 、 $r/t^{1/2} = 0.54 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  をとつて、(22) 式より  $k = 0.0516 \text{ cm}/\text{sec}$  となり、(23) 式より  $\kappa = 0.563 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  となる。直線解法の値と典型曲線解法の値との平均値をとつて  $k = 0.0505 \text{ cm}/\text{sec}$ 、 $\kappa = 0.731 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  として (19) 式において表-1 を用いて  $s$  を求めれば  $s \sim t$  の関係を示す理論値がえられ、これは図-6 に理論曲線として示すと、実測曲線と近似的にあつている。

図-9 はガラス主管の直径 3.76 cm すなわち半径  $r = 1.88 \text{ cm}$  のものの根入 20 cm の場合の  $Q = 14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、 $11.23 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、 $8.72 \text{ cm}^3/\text{sec}$  のそれぞれに対する注水停止試験における  $s \sim t$  の実測値を曲線に示したもの

で、水温は 13°C であつた。  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$  のときの実測値より 図-10 に示すような直線解法によつて  $\left(\frac{dY}{dX}\right)_{st} = 39 \text{ cm}^2$ ,  $X_0 = 0.47 \text{ cm}^{-1} \text{ sec}^{1/2}$  の値よりそれぞれ  $k=0.0595 \text{ cm}/\text{sec}$ ,  $\kappa=1.200 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  となる。また 図-11 に示すような典型曲線解法によつて match point A の値より  $1-\phi(u)=0.50$ ,  $\mu=0.48$ ,  $s r = 22 \text{ cm}^2$ ,  $r/t^{1/2} = 0.60 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  をえて  $k=0.0526 \text{ cm}/\text{sec}$ ,  $\kappa=0.626 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  となる。

直線解法の値と典型曲線解法の値との平均値をとつて  $k=0.0561 \text{ cm}/\text{sec}$ ,  $\kappa=0.913 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  となり、この値を用いて (19) 式により  $s \sim t$  の理論値を計算し図示したものが 図-9 の理論曲線で  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $11.23 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $8.72$

図-9 ガラス主管半径  $r=1.88 \text{ cm}$ , 根入れ  $20 \text{ cm}$  のときの各注水量に対する非定常流透水試験における注水停止試験の  $s \sim t$  実測値および理論値

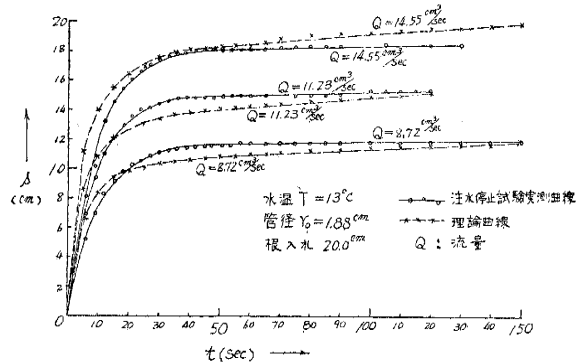


図-10  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , ガラス主管半径  $r=1.88 \text{ cm}$ , 根入れ  $20 \text{ cm}$  のときの直線解法

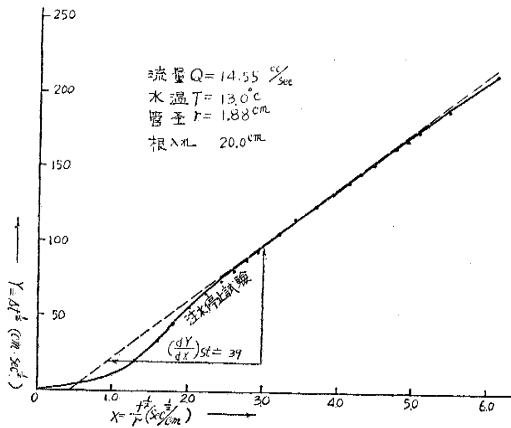


図-11  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , ガラス主管半径  $r=1.88 \text{ cm}$  根入れ  $20 \text{ cm}$  のときの典型曲線解法

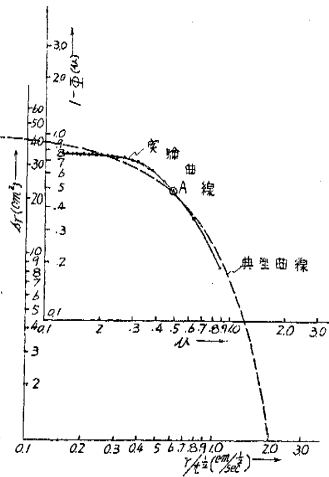
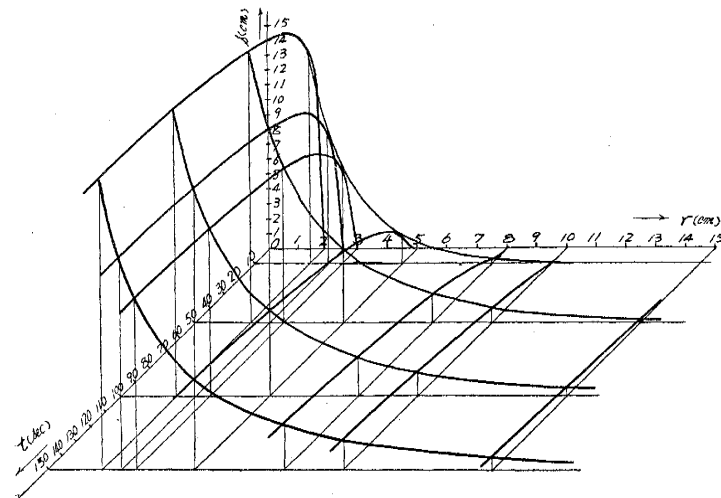


図-12  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , ガラス主管半径  $r_0=1.88 \text{ cm}$ , 根入れ  $20 \text{ cm}$  のとき  $k=0.0561 \text{ cm}/\text{sec}$ ,  $\kappa=0.913 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  として計算した  $r, s, t$  の関係を示す理論曲線



$\text{cm}^3/\text{sec}$  のそれぞれに対するものを示し、各注水量に対する実験曲線と実用的には近似してこの理論の妥当性を示している。なお 図-12 において注水量  $Q=14.55 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , ガラス主管半径  $r_0=1.88 \text{ cm}$ , 根入れ  $20 \text{ cm}$  のとき  $k=0.0561 \text{ cm}/\text{sec}$ ,  $\kappa=0.913 \text{ cm}/\text{sec}^{1/2}$  を用いて  $r, t, s$  の関係を (19) 式を利用して図示する。この図より (19) 式の熱伝導の式の特性をよく示しており、 $r$  が小なるほど  $s \sim t$  曲線は  $t$  の小なる値で急に  $s$  の最大値に近づき、かつ  $s$  の最大

値は大となる。 $r$  が大となるに従つて  $s \sim t$  曲線は扁平となり、 $s \sim t$  曲線に反曲点が生じてくる。また  $t$  が小なるとき  $s \sim r$  曲線は実用的に  $s=0$  となる  $r$  が小であるが、 $t$  が大となるに従つて  $s \sim r$  曲線の実用的に  $s=0$  となる  $r$  の値が大となり、かつ各  $r$  の値に対する  $s$  の値は増大しながらゆつくりと  $s \sim r$  曲線は一定の形に近づく。

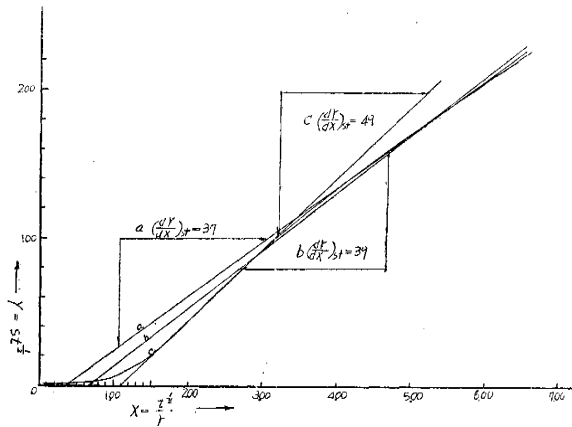
6. 実験結果の考察

図-7 の注水停止試験の曲線の  $t$  が大になるに従つて直線になるが、この直線を引くときの引き方の差異によつて、 $k, \kappa$  の値にどの位の差異をおこすかを検討してみる。図-13 に示すように ⊕-line, ⊖-line, ⊙-line の直線を引いたときの値を表-2 に示す。この場合  $Q=12.7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $r_0=2.15 \text{ cm}$  である。⊕-line は  $t$  の大なるときの直線性に注目したもの、⊖-line は  $t$  の小なるときと  $t$  の大なるときの両方にある平均的な直線を引いたもの、⊙-line は  $t$  の小なるときの直線性に注目したものであるが、⊖-line によつて計算したものが後述の定水頭透水試験による透水係数  $k=0.0527 \text{ cm/sec}$  の値に近似してよいようである。

表-2

直線の種類	$(\frac{dY}{dX})_{st} (\text{cm}^2)$	$X_0 (\text{cm}^{-1} \text{sec}^{1/2})$	$k (\text{cm/sec})$	$\kappa (\text{cm/sec}^{1/2})$
⊕-line	37	0.37	0.0547	1.527
⊖-line	39	0.68	0.0520	0.832
⊙-line	49	1.10	0.0414	0.514

図-13 直線解法における直線の引き方の差異



次に典型曲線解法における match point のとり方の差異による  $k, \kappa$  の値への影響を検討してみる。図-8 に示すように match point を 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 と種々としてそれぞれの場合の  $k, \kappa$  の値を求めると表-3 のようになる。ただし  $Q=12.70 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $r_0=2.15 \text{ cm}$  として計算する。表-3 の示すように典型曲線解法において一度実験曲線と典型曲線とを重ね合わせると、この曲線上の match point のとり方により  $k, \kappa$  の値に大した差異はないことがわかる。また典型曲線解法において実験曲線と典型曲線との重ね合わせの差異による  $k, \kappa$  の値への影響を検討してみる。

表-3

match point	$1-\Phi(u)$	$u$	$sr (\text{cm}^2)$	$r/t^{1/2} (\text{cm/sec}^{1/2})$	$k (\text{cm/sec})$	$\kappa (\text{cm/sec}^{1/2})$
1	0.50	0.48	19.6	0.54	0.0516	0.563
2	0.62	0.40	25.0	0.44	0.0502	0.550
3	0.71	0.34	28.5	0.38	0.0504	0.559
4	0.36	0.60	14.5	0.67	0.0502	0.558
5	0.24	0.78	9.6	0.86	0.0506	0.551
6	0.29	0.71	11.8	0.79	0.0497	0.556
7	0.65	0.36	25.5	0.40	0.0516	0.556
8	0.40	0.57	16.0	0.63	0.0506	0.553

表-4

$sr$ の最大値を合わせる $1-\Phi(u)$ の値	$1-\Phi(u)$	$u$	$sr (\text{cm}^2)$	$r/t^{1/2} (\text{cm/sec}^{1/2})$	$k (\text{cm/sec})$	$\kappa (\text{cm/sec}^{1/2})$
1.00	0.40	0.60	14.0	0.68	0.0578	0.566
0.85	0.50	0.48	19.6	0.54	0.0516	0.563
0.70	0.48	0.50	24.0	0.45	0.0405	0.450

実験曲線は  $r/t^{1/2}$  の減少につれて  $sr$  は増大しながら最大値に近づくが、この  $sr$  の最大値を典型曲線の縦軸の値  $1-\Phi(u)$  の種々の値に合わせながら実験曲線と典型曲線とを重ね合わせる。  $Q=12.7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $r=2.15 \text{ cm}$  の場合  $sr$  の最大値を  $1-\Phi(u)$  の値 1.00, 0.85, 0.70 に合わせたものがそれぞれ 図-14, 図-8, 図-15 であり、その図の match point を a, 1, b として典型曲線法により  $k, \kappa$  の値を求めたものを表-4 に示す。図-14 は  $t$  の小なるときの部分と  $t$  の大なるときの部分を重ね合わせたもの、図-8 は全体的にみて重ね合わせたもの、図-15 は  $t$  の小なるときの部分を重ね合わせたものであり、図-8 の場合の  $k$  の値が後述の定水頭透水試験に



図-14  $sr$  の最大値を  $1-\phi(u)=1.00$  に合わせた場合、ただし  $Q=12.70 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $r=2.15 \text{ cm}$

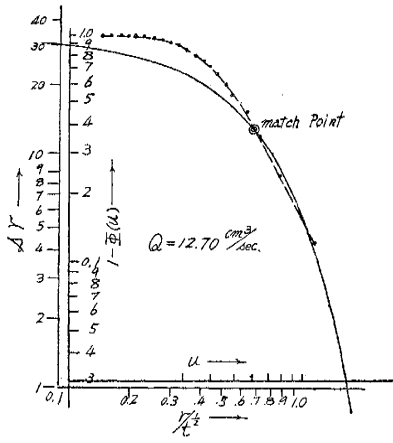
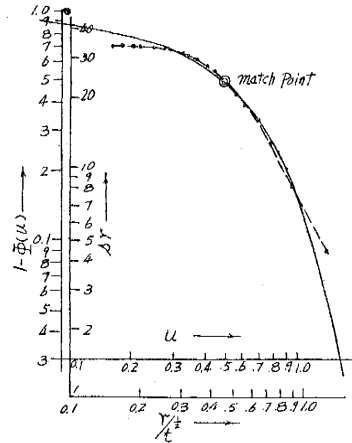


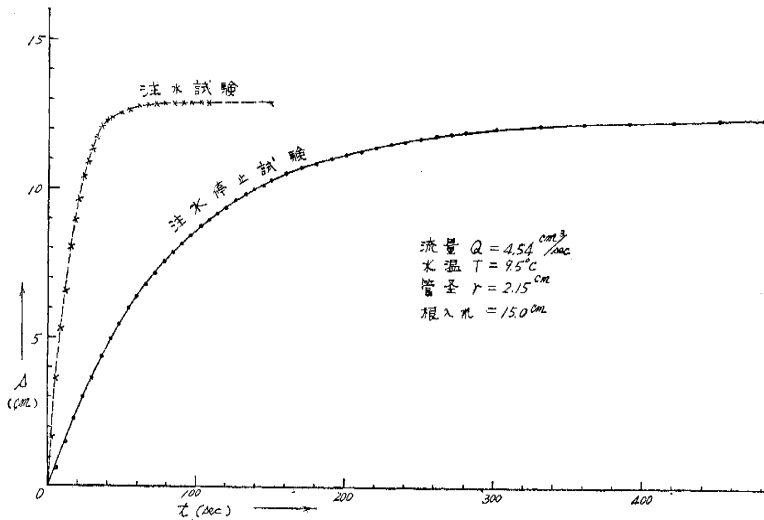
図-15  $sr$  の最大値を  $1-\phi(u)=0.70$  に合わせた場合、ただし  $Q=12.70 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $r=2.15 \text{ cm}$



よる透水係数  $k=0.0527 \text{ cm/sec}$  の値に近似している。

本実験においてガラス主管半径  $r_0=2.15 \text{ cm}$  を用い根入れ  $15 \text{ cm}$  のとき非定常流透水試験を注水量を種々変えてなしていたが、時間の経過にしたがい 図-16 に示すように注水量  $Q=4.54 \text{ cm}^3/\text{sec}$  にして注水停止試験と注水試験とをなしたときの  $s \sim t$  実測値に大なる開きを生ずるようになった。この原因を調べたところ、使用した水道水に鉄管の錆が非常に多く含まれ、これがガラス主管の底に沈澱して、これを取りのぞいて実験をなしたところ、また 図-6 のように両試験における  $s \sim t$  実測値にあまり開きが生じないようになったので、図-16 のようになる原因は水道水の中の錆がガラス主管の底に沈澱したことによると考えられる。このことは実際のボーリング孔を利用するとき、水の中の懸濁物が沈澱して蜂巢綿毛構造をボーリング底に形成しないように取りのぞかねばならないことを教えるものである。図-16 の  $s \sim t$  実測値より直線解法で透水係数を求めると  $k=0.0206 \text{ cm/sec}$  となり図-6 より求めたものより小となっている。

図-16 ガラス主管内の水道水の錆の沈澱による注水試験と注水停止試験の  $s \sim t$  実測値の開き



上述の非定常流透水試験により求めた透水係数を検証するために、図-3 に示す定水頭透水実験装置にきりかえて砂表面より深さ  $15 \text{ cm}$ ,  $25 \text{ cm}$  の点までピエゾ管を挿入して各層の透水係数を測定した。このときの流量を  $Q(\text{cm}^3/\text{sec})$ , 砂層の上下における水頭差を  $H(\text{cm})$ , 砂層の厚さを  $L(\text{cm})$  とする。

砂の透水方向に直角な断面積は  $A=2260 \text{ cm}^2$  であつた。表-5 には  $k=QL/AH$  によつて求めた透水係数と非

定常流透水試験によつて求めた透水係数の値を示す。表-5 によれば非定常流透水試験による  $k$  の値と定水頭透水試験による  $k$  の値は近似しており上述の理論の妥当なることがわかる。

表-5

砂表面よりの深さ (cm)	L (cm)	定水頭透水試験								$k$ の平均値	非定常流透水試験 $k$ (cm/sec)
		Q=29.21 cm <sup>3</sup> /sec		Q=23.43 cm <sup>3</sup> /sec		Q=18.42 cm <sup>3</sup> /sec		Q=13.46 cm <sup>3</sup> /sec			
		H(cm)	k(cm/sec)	H(cm)	k(cm/sec)	H(cm)	k(cm/sec)	H(cm)	k(cm/sec)		
15~20	5	1.27	0.0508	1.04	0.0498	0.78	0.0530	0.52	0.0573	0.0527	0.0505
20~25	5	1.04	0.0621	0.78	0.0650	0.78	0.0530	0.44	0.0607	0.0602	0.0561

次に(1)式を導くときに、井戸底近傍の帯水層中の等ポテンシャル面が半球形をなすとしたが、これを確かめるために図-2においてガラス主管の周辺にピエゾ管を5本放射線上に種々の深さに挿入し、ガラス主管に注水量  $Q=13.50 \text{ cm}^3/\text{sec}$  で水を注ぎ定常流状態になったとき、ガラス主管内の水頭は溢流水面より  $s_0=16 \text{ cm}$  となり、このときのピエゾ管の水頭をピエゾメータにて測定する。ガラス主管の半径は  $r_0=1.88 \text{ cm}$  のものを用い、根入れは  $20 \text{ cm}$  にした。このときの水頭の分布状態を図-17 に示す。ただしこの図においてガラス主管内の水頭  $s_0=16 \text{ cm}$  を1としたときの各ピエゾ管の水頭の割合でポテンシャルを示す。曲線に数字のあるのが等ポテンシャル線を示す。この実験において

$$k = \frac{Q}{2\pi r_0 s_0} = \frac{13.50}{2 \times 3.14 \times 1.88 \times 16} = 0.0715 \text{ cm/sec}$$

となり、非定常流透水試験のときの  $k$  の値より大となつてゐるが、これはピエゾ管挿入によりガラス主管の底周辺の砂を多少ゆるめた結果と考えられ、 $k=0.0715 \text{ cm/sec}$  を用いて

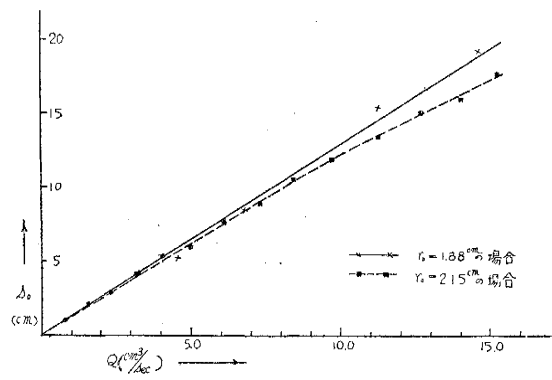
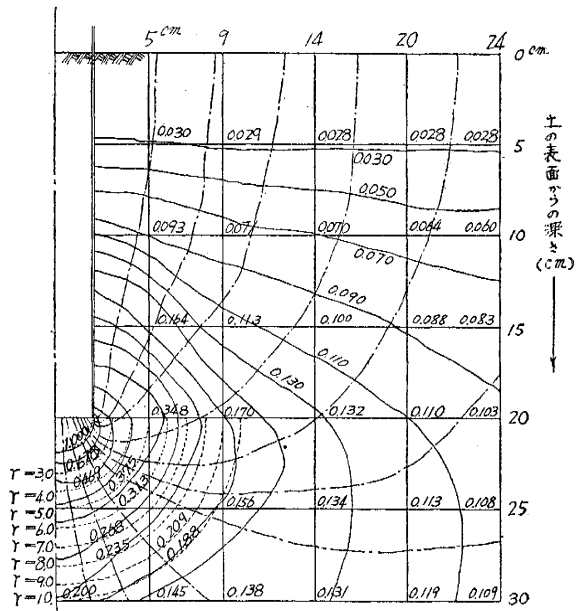
$$\frac{s}{s_0} = \frac{Q}{2\pi k r s_0}$$

の式により、 $r$  を変化さして  $s/s_0$  を求めた理論等ポテンシャル線を図-17 に点線で示す。これによつて実測値と理論値が比較的近似していることにより、井戸底近傍の帯水層中の等ポテンシャル面が半球形をなすという仮定が実用的によいことが証明された。

図-18  $s_0 \sim Q$  の関係

上述の理論は laminar flow なることを前提としており、いままでの実験も laminar flow の状態にあつたか否かを確かめねばならない。そこで図-2の実験装置によつてガラス主管に注入する水量  $Q$  を少量にして定常流状態になったときのガラス主管の水頭  $s_0$  を測定し、段階的に  $Q$  を増しそれぞれの場合定常流状態の  $s_0$  を測定し、 $Q \sim s_0$  の関係を図示したものが図-18 である。図示のようにこの関係はガラス主管半径  $r_0=2.15 \text{ cm}$ ,  $1.88 \text{ cm}$  それぞれの根入れ  $15 \text{ cm}$ ,  $20 \text{ cm}$  の二つの場合いづれも直線的である。Jacob<sup>1)</sup>によれば  $B, C$  を常数として  $s_0=BQ+CQ^2$  の関係があるとしているが、この式の右辺の

図-17 ガラス主管半径  $r_0=1.88 \text{ cm}$ 、根入れ  $20 \text{ cm}$ 、 $Q=13.50 \text{ cm}^3/\text{sec}$  で定常流状態のときの帯水層内の水頭分布図、ただしガラス主管内の水頭を1としたときの割合を示す



第二項は turbulent flow がある場合を示しているが、図-18 は  $s_0=BQ$  であることを示し、この実験においてはすべて laminar flow の状態にあることがいえる。図-18 に示した試験は井戸の揚水試験における step-draw-down test を逆にしたもので段階的注水試験と称することにする。

### 7. 結 語

透水性地盤上に堤防や土堰堤を造るとき、地盤の地質を調べたり、透水係数を知るためにボーリングをなすが、透水係数測定のために砂質土、礫質土では不攪乱土を採取することが不可能で、現状のままで透水係数を測定できればよいわけで、このためにボーリング孔にケーシングパイプを打込み、これに注水して定常流状態になるのをまつて測定し透水係数を求める方法があるが、この方法だけでなく非定常流透水試験法によつて透水係数を求めて検証するのも意義のあることである。

比較的透水性の砂、砂利の地盤の場合は井戸の揚水試験における非平衡試験や回復法によつて透水係数を求めるが、この逆としてはボーリング孔を利用せる非定常流透水試験法において注水試験でも注水停止試験でも適用できるが、透水性の小なるシルト質の土質では注水試験の  $s \sim t$  実測値と注水停止試験の  $s \sim t$  実測値との開きが大きくなるようである。井戸の揚水試験より透水係数を求める場合水位回復法によつて計算するのと同じように、この場合は注水停止試験によるのがよいと考えられるが、これに関しては今後種々な土について実験研究するつもりである。

### 参 考 文 献

- 1) C.E. Jacob: Effective Radius of Drawdown Test to Determine Artesian Well, Proc. A.S.C.E. Vol. 72 I 1946
- 2) R.H. Brown: Selected Procedures for Analyzing Aquifer Test Data, Jour. Amer. Water Works Association Vol. 45, No. 8 1953
- 3) 1) の論文の pp. 634 (8c) 式参照
- 4) M.I. Rorabaugh: Graphical and Theoretical Analysis of Stepdrawdown Test of Artesian Well, Proc. A.S.C.E. vol. 79, December, 1953, pp. 1-3.

(昭.32.9.28)