

圃場透水性の測定法

田地野 直 哉

圃場の透水性をあらわすには実用上から考えて、水田では用排水量の決定要素となる透水係数と、畑におけるかんがい強度や水文における地表流去量決定の要素となる浸透能がある。

ここでは前者の透水係数の測定法についてのべる。自然土壌中の水の動きについてはまだ完全に解明されていない。非正常問題にいたつては未解明な点が大部分である。しかし実用上は土壌条件、地下水条件を単純化して考えて一般に土壌の透水性を Darcy 法則における比例定数(k)であらわしている。

Darcy 法則は単位時間内に砂層を通過する水量がその通水断面積および水頭差に比例し且つ砂層の厚さに反比例することを示している。この場合の水の粘性流における動水勾配と流速度との比が透水係数(k)である。

動水勾配は 1 以下であることが必要条件とされているが実際には 5 (砂質) ~ 15 (粘土質) でも大差ないといわれている。

k は測定法によつて値が一定でなく、また実用の場合の取扱いについての問題が残されている。現場測定では試料を乱さないという利点があり、特に粘土分の多い試料はキレッツや水みちを含めた測定値が得られる。測定の際には現場の土質、土層、地下水位の状態も同時に調査しておくことが必要である。

現場測定には一般につきの Single cavity method が使われる。

1. Piezometer method
2. Tube method
3. Auger-hole method
4. Dry Auger-hole method

測定の場合にはその目的によつて最良の方法を採用すべきで、現場の土質、土層、地下水位に適した測定、または透水係数の使用目的に合った測定をおこなえばよい。

前者については土質、土層、地下水位によつて湛水状態では Tube method、地下水状態では Auger-hole method、地下水位の深い場合は Dry Auger-hole method がおこなはれる。

後者の透水係数の使用目的については大別して縦浸透か横浸透かをたしかめて、地下水の流線に合った測定法でおこなう。例えば暗キヨ排水計画に使はれる透水係数は縦浸透が主であつて平均的測定値をあらわす Auger-hole method が適し、井底からのみ湧水する掘井な

どは鉛直成分を主とする Piezometer method が適している。また堤体浸透とか傾斜地浸透などは横浸透が主であつて Trench method が適している。

以上のほかに揚水計画など広域の透水性を求める現場透水試験にはつぎのようなものがある。

1. Single-well method
2. Two-well method
3. Four-well method

現場測定は単一におこなわずに組合せ、あるいは何らかの方法で補助テストを行なうことが必要である。

現場測定法の説明に入る前に農業土木関係で実際に透水係数(k)をどのように使つているかについて、二の例を述べる。

1. 水田の暗キヨ排水についての計画例

藤沢市山田地区水田 0.5 ha においておこなつたものである。

(1) 現場透水試験

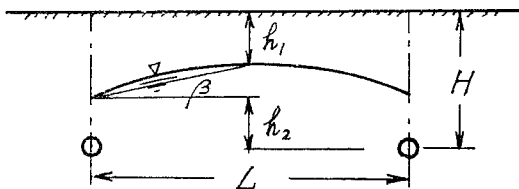
表土 20~40cm はシルト質ロームで、以下レキ混り砂である。不透水層は深さ 2 m 以上と思はれる。田面は湛水状態であつて地下水位は湛水面と考えてよい。

Auger-hole method によつて 3ヶ所 6点測定した結果 $k = 0.56 \sim 1.9 \times 10^{-5} m/s$ (平均値 $k = 1.2 \times 10^{-5} m/s$ であつた)。

(2) 暗キヨの間隔

暗キヨの深さは既設排水路と田面との関係から 1.0 m とする。

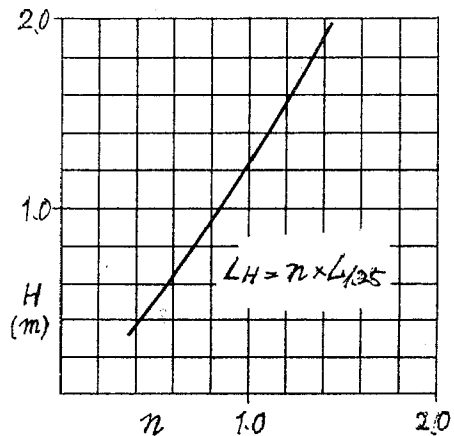
一般につぎの De la Craix 式が使はれる。



※ 1 図

$$L = 2(H - h_1 - h_2) / \tan \beta$$

$$h_1 = \frac{0.5 + 1.01 \times 10^5 k}{1 + 1.2 \times 10^5 k} \quad \left. \right\}^{(1)} \text{ (m 単位)}$$



※ 2 図

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= \frac{0.35 + 0.16 \times 10^5 k}{1 + 1.47 \times 10^5 k} \\ \tan \beta &= \frac{0.09 + 0.0175 \times 10^5 k}{1 + 10^5 k} \end{aligned} \right\} (1) \quad (m \text{ 単位})$$

前記 k の値を使つて求める。

$$h_1 = 0.72 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.20 \text{ m}$$

$$\tan \beta = 0.05$$

$$L = 2(1.25 - 0.72 - 0.20) / 0.05 \doteq 14 \text{ m}$$

ただし上式は $H = 1.25 \text{ m}$ を基準にしているからそれ以外の場合は第2図から n を求めて、つぎの式から暗キヨ間隔が求められる。

$$L_H = n \times L$$

$H = 1.0 \text{ m}$ のときの n は第2図から 0.85 であつて

$$L_H = 0.85 \times 14 \doteq 12 \text{ m}$$

なお暗キヨの間隔を求める式はこのほかに多くの方法がある。例えばアメリカでは土壌の水分当量から求める Neals の方法や、最近では我国で地下水の排水低下速度から求める方法が幾つかある。

2. 宅地造成地の暗キヨ排水についての計画例

神奈川県百合が丘住宅団地、流域面積 29.3 ha、暗キヨ排水施工ずみの地区においておこなつたものである。

(1) 現場透水試験

軟質粘土岩、砂岩などが不透水層をなし、その上に 5~10 m のロームまたは砂質ローム層からなる山林である。この地山で深さ 1.5 m について Dry Auger-hole method で 3ヶ所 3点測定した結果 $k = 3.4 \sim 6.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ であつた。

(2) 地区縦方向地下水流去量

地区流域は第3図であつて、地区縦断勾配 $I = 1/65$ (横断Ⅱの上下流 100 m の高低差から求めた)、透水断面積 $A = 2650 \sim 2960 \text{ m}^2$

$$Q = A k I = 0.139 \sim 0.310 \text{ l/s}$$

(3) 地区横断方向(谷に向つて
両側よりの)地下水流出量

地区の横断 I-IV について不透水層, 地下水位がわかれば求められる。

横断面図の一つを示すと第 4 図である。前項と同様に計算して求めると地区全体で

$$Q = 3.3 \sim 6.6 \text{ } l/s$$

このとき(1963年11月9日)

の M 点における地下水量実測値は, $8.3 \text{ } l/s$ であつた。このことから同地区全体について考えれば透水係数は $10^{-5} m/s$ と考えられる。

(4) 最大地下排水量

$k = 10^{-5} m/s$ とし地区地下水位最高のときの排水量を求めると

$$Q = 77.4 \text{ } l/s$$

(5) 現況と理論排水量の比較

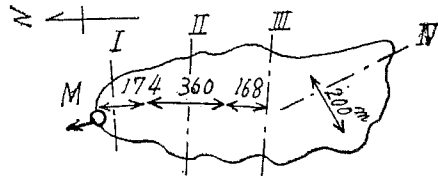
$$b = 342.1 \text{ } m, \quad 2r = 0.26 \text{ } m$$

$$H = 0.2 \text{ } m, \quad d = 1.4 \text{ } m,$$

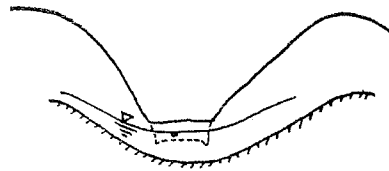
$$k = 10^{-5} m/s, \quad L = 40 \text{ } m$$

$$Q = 8.3 \text{ } l/s \text{ (実測値)}$$

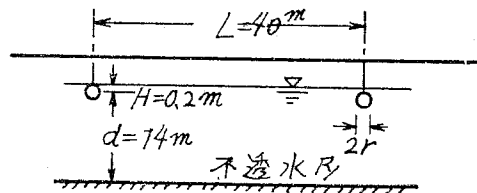
以上現況(1963年11月9日)



第 3 図 地区流域図



第 4 図 I-横断面図



第 5 図

つぎの式を使つて計算値を求める。〔地下水排除過程で H が暗キヨ深の $2/3$ 以下に低下したときは今までの経験から暗キヨ最大排水量の値の $1/2$ である。〕⁽¹⁾

$$Q = l \times \pi \times k (r-H) \left[\log_e \frac{r(L^2+r^2)(r+2d)\{L^2+(r+2d)^2\}(4H+2d-r)}{(2H-r)\{L^2+(2H-r)^2\}(2H+2d+r)\{L^2+(2H+2d+r)^2\}} \right]$$

$$\frac{\{L^2+(4H+2d-r)^2\}}{(2H+2d-r)\{L^2+(2H+2d-r)^2\}} \Bigg]^{-1}$$

$$= 10.3 \frac{l}{S}$$

実測値 $Q = 8.3 \frac{l}{S}$ には近い値を示す。

以上のほかに地下水の積極的コントロールとして畑地や樹園地の暗キヨ排水、貯水池土堰堤や干拓堤防などの堤体および基礎の浸透の問題、地すべり地の排水などにも透水係数が使はれる。つぎに透水係数の現場測定法について述べる。

地点測定

1. Piezometer method (2)

土堰堤基礎など深い位置の測定に適し、第9図に示す器具を使う。管の内径5~10cmより小さいオーガで内部の土を静かに掘り出し、管の先端より10cm深く達したとき、管を押し込み、これを繰り返して地下水位以下の必要な深さまで押し込んだ後さらにその下に10cmの孔ゲキをうがう。したがって土壌が圧縮されないで測定ができる。測定結果は第6図の符号に記がつて同図の式から透水係数が求められる。

Piezometer Method⁽²⁾

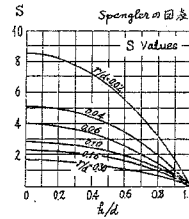
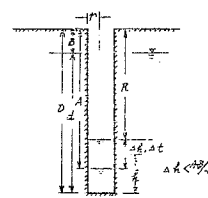
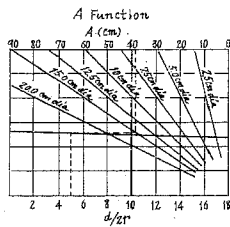
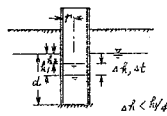
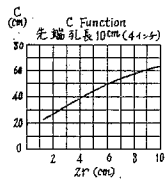
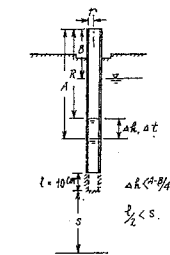
$$k_e = 628 \cdot \frac{r^2}{C} \cdot \frac{\Delta h}{2t} \cdot \frac{1}{A+R-2B} \quad (\text{cm/sec})$$

Tube Method⁽²⁾

$$k_e = \frac{\pi r^2 \log_e(k_e/k_s)}{A \cdot \Delta t} \quad (\text{cm/sec})$$

Auger-hole Method - 1⁽²⁾

$$k_e = 0.617 \cdot \frac{r}{Sd} \cdot \frac{\Delta h}{2t} \quad (\text{cm/sec})$$



第6図

なお第9図に示す Portable piezometer は垂直浸透のある水田において、N型減水深測定器と組合せて測定すれば k が求められる。(3)

2. Tube method (4)

水田のように全く湛水状態においても測定でき、成層土壌の鉛直方向透水係数を求めるのによい。第9図に示す器具を使い、内径20cmの管を10kgのランマーで打ち込み、管内の土壌をくずし掘り出しながら所定の位置に設定する。測定の場合に管の下端付近の土をなるべく乱さずにこねかきさないこと。また数回水を汲みだすとよい。

測定結果は第6図の符号にしたがつて同図の式から透水係数が求められる。

Auger-hole Method - 2

$$k = C \times \frac{\Delta Y}{\Delta t}$$

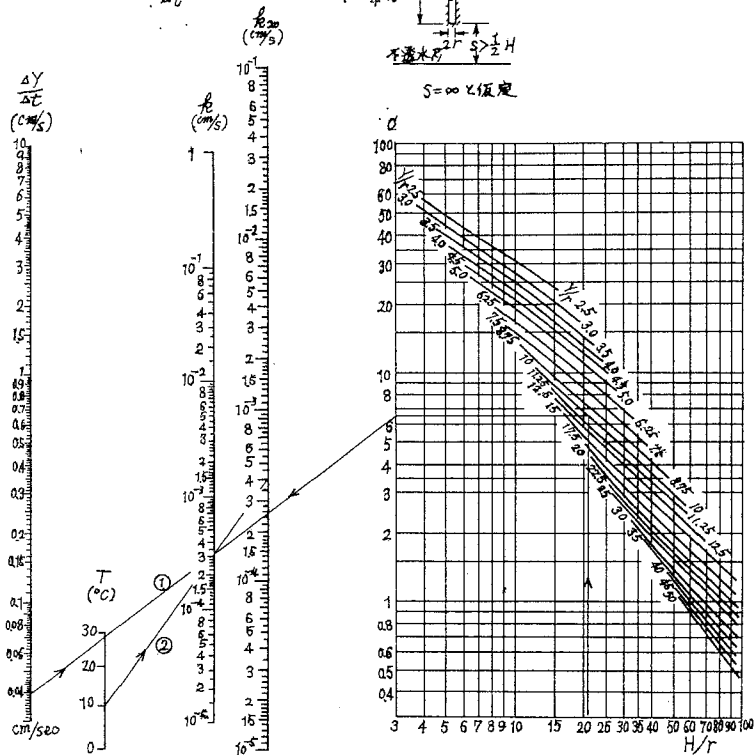
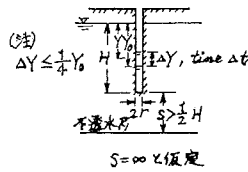


表 7 図 Sadik TOKSÖZ の Beers の式 ($3 \leq H/r \leq 45$) および Hassekew の式 ($45 \leq H/r \leq 100$) から求めた C の値

3. Auger-hole method⁽²⁾

表層の透水係数を測定するのに簡便な方法である。第9図に示す器具を使い、 $2r = 10 \sim 15 \text{ cm}$ 、 $d = 1 \text{ m}$ 程度がよい。測定前に孔内の水を数回汲み出して孔の内面を清掃する。

測定結果は第6図の符号にしたがつて同図の式から透水係数が求められる。ただし同式は孔底が不透水層に一致している場合であるから孔径は小さいほどよい。

不透水層が孔底から $\frac{d}{2}$ 以上の場合には第7図の符号にしたがつて同図の図表から透水係数が求められる。

第7図において例題を示すと、今 $H = 105 \text{ cm}$ 、 $Y = 50 \text{ cm}$ 、 $\frac{\Delta Y}{\Delta t} = 0.04 \text{ cm/s}$ 、 $r = 5 \text{ cm}$ とすれば、 $H/r = 21$ 、 $Y/r = 10$ となり図表から $C = 6.6$ が得られ $k = 3.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となる。また測定時水温 $T = 10^\circ \text{C}$ とすれば同図表から 20°C の場合の透水係数 $k_{20} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ が得られる。

4. Dry Auger-hole method⁽⁵⁾

前記1～3までの測定方法は地下水面以下に孔を設けておこなうが、地下水面が孔底より下にある場合にDry Auger-hole method を使う。

Well permermeter test といい孔の直径 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、深さ 1 m 以上が適当である。第9図に示す器具を使い。試験孔の崩れる心配があるときはケーシングパイプを入れ砂レキを詰めてからパイプを抜きとる。この方法は注水方式であるから給水温が土壌温度より $2 \sim 3^\circ \text{C}$ 高めの方がよい。

測定結果は第8図の符号にしたがつて同図の図表から透水係数が求められる。

注水位平衡になるまでの時間は一般に8時間以上の場合には第8図から給水最小時間が求められる。

第8図において Y_s は動水量を飽和土塊容積で割った値で細土の場合 0.1 、粗土の場合 0.35 に変化し、不明なときは 0.35 をとる。測定は一般に $4 \sim 10$ 時間おこない、直線部分をたしかめて給水量平衡後初期2時間程度の値をとる。

第8図において例題を示すと、今 $h = 30 \text{ cm}$ 、 $2r = 10 \text{ cm}$ 、 $Q = 1 \text{ cc/s}$ とすれば、 $h/r = 6$ となり図表から最小時間8時間が得られる。同条件で8時間後給水量平衡時に、 $Q = 0.8 \text{ cc/s}$ 、 $T = 20^\circ \text{C}$ 、 $Tu > 3h$ なら $k_{20} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ が求められる。また同条件で $Tu < 3h$ なら $k_{20} = 2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ が求められる。

なお現場の任意水温における k は $T(^\circ \text{C})$ 尺の 20°C で求めればよい、すなわち第7図の k 尺は第8図の補助尺に相当する。

また k を 20°C 以外の水温における透水係数に換算するには第10図を使つて求められる。

Dry Auger-hole Method (B)

最小給水量を以て最小給水時間計算図

透水性係数計算図 A, (Tu > 2.5L)

透水性係数計算図 B, (Tu < 2.5L & Tu < 2.5A)

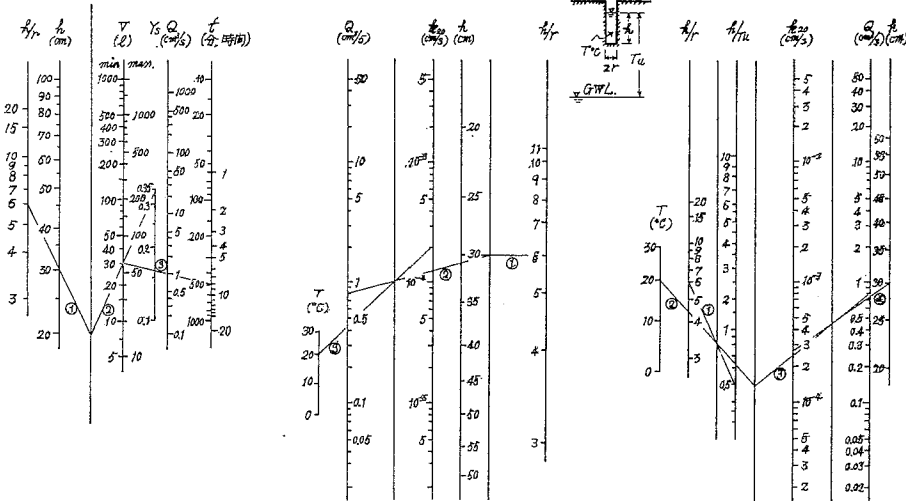
$$V_{min} = 2.07 \sqrt{\frac{Q}{k}} \sqrt{\frac{2}{(H/r)-1}}^3$$

$$V_{max} = 2.05 \cdot V_{min}$$

$$k_{20} = \frac{[sink^2(L/r)-1] \frac{Q}{2Lr}}{r^2} (\mu T / \mu_{20})$$

$$k_{20} = \frac{Q_{20} k_f \cdot (Q_{20} k_f^2)}{1/8 + 1/8 (k_f/r)} (\mu T / \mu_{20})$$

$$k_{20} = \frac{Q_{20} k_f \cdot (Q_{20} k_f^2)}{(R/r)^2 - 1/8 (k_f/r)} (\mu T / \mu_{20})$$

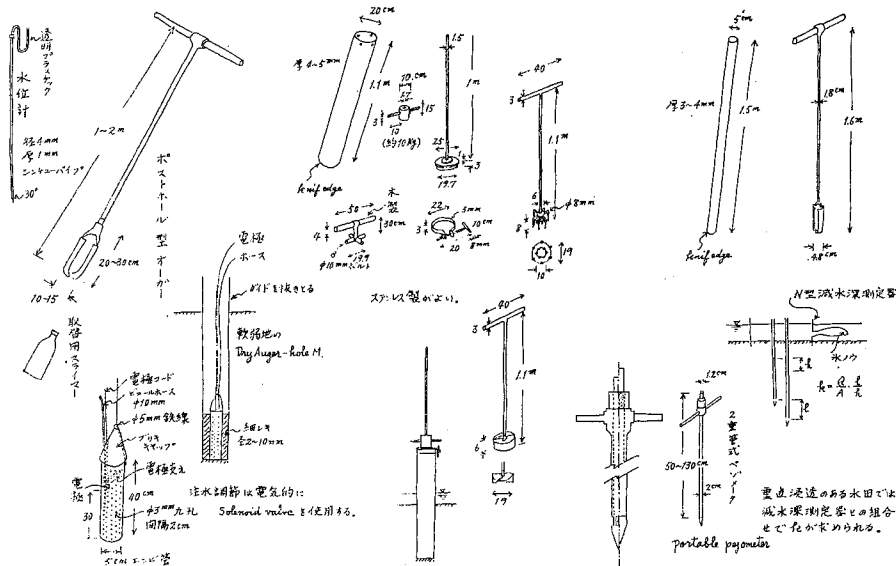


才 8 図

Auger-hole Method

Tube Method

Pegometer Method



才 9 図

広域測定

最後に広域の透水係数を測定する場合とか用水井戸などの揚水量を求めるために必要な k の測定法を述べる。

1. Single-well method

井戸の汲上量と水位差および井内水位の変化と時間の関係から k を求める。

第11図の符号にしたがつてつぎの式から k を求める。

$$Q = \frac{2\pi k \{h^2 - (h - \Delta h)^2\}}{\log_e r_e / r}$$

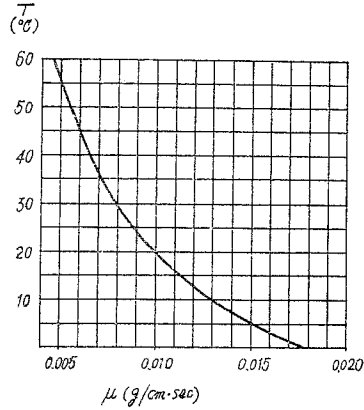
h が Δh より充分大きいとき

$$Q = \frac{2\pi k h \Delta h}{\log_e r_e / r}$$

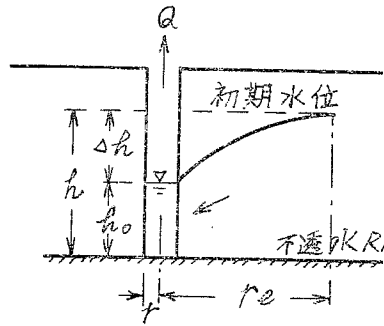
r_e は普通粗い砂かレキでないときは300mにとる。 r_e の値が問題であるが、非定常流の Theis の式を使う場合がある。

$$r_{11} = \frac{r_{12} \times \mu_{12}}{\mu_{11}}$$

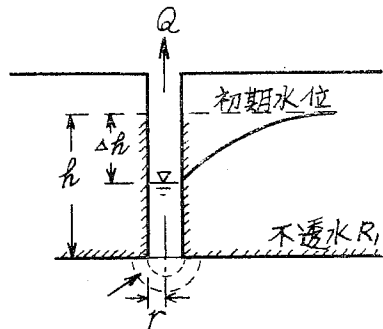
$$\therefore r_{20} = \frac{r_{11} \times \mu_{11}}{0.0101}$$



※10図 水の粘性係数(μ)と水温の関係



※11図



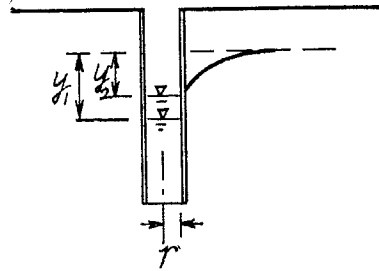
※12図

第12図のように半球状に地下水が流入するような場合に同図の符号にしたがつてつぎの式から k を求める。

$$Q = 2\pi kr \Delta h$$

第13図のように井水位回復と時間(t)の関係から同図の符号にしたがつてつぎの式から k を求める。

$$k = \frac{\pi r}{4t} \log e \frac{y_1}{y_2} \quad (\text{田町博士})$$

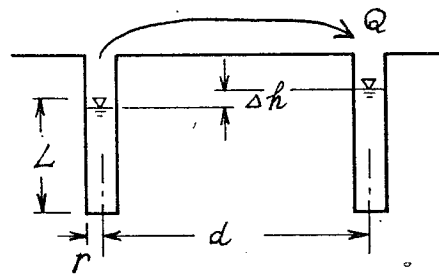


第13図

2. Two-well method

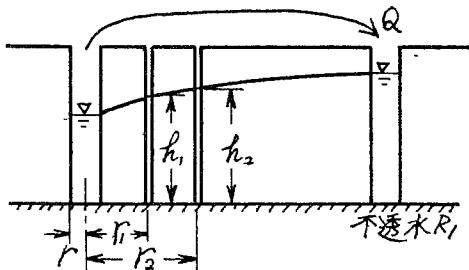
同一条件の井戸を掘り、汲み揚げた水を他の井戸に入れ、両者の水位差を知つて k を求める。(childの方法)

第14図の符号にしたがつてつぎの式から k を求める。ただし $Q, L, \Delta h, d, r$ は cm 単位。



第14図

$$k = 1.6 \times 10^{-7} \frac{Q}{\pi L \Delta h} \cosh^{-1} \frac{d}{2r}$$



第15図

3. Four-well method

前記Two-wellの内側に Piezometer 2つを設け外側2つの井戸間の水の動きと小井戸2つの水位差から k を求める。

(Thiemの方法)

第15図において汲出井戸水位が定常状態になつたとき同図の符号にしたがつてつぎの式から k を

求める。

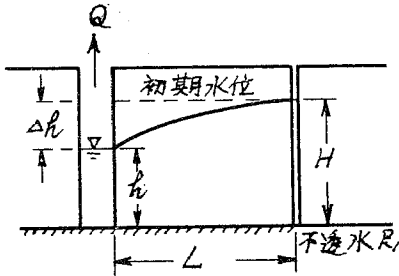
$$k = \left[\frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} \right] \log_e (r_2 / r_1)$$

4. Trench method

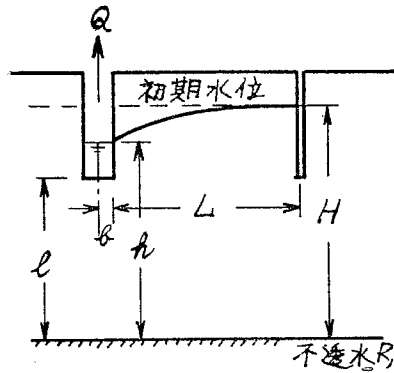
Trench とこれの側壁から直角方向に L の点に小井戸を掘り、それぞれの底が不透水層に達している場合は汲出量 Q で定常状態になればつぎの Dupuit-Forchheimer の式から k を求める。

$$k = \frac{Q \times L}{(H^2 - h^2)}$$

不透水層まで底が達していないときはつぎの Hooghoudt の式から k を求める。



※16 図



※17 図

$$k = \frac{Q \times L'}{(H^2 - h^2)}$$

ただし

$$L' = L + \frac{l(l+b)}{2h}$$

なお、両式とも両側壁からの浸透を考慮している。

文 献

- (1) 田地野直哉 : 暗キヨ排水の施工改良に関する研究(2)
農研報告F13, P146, P173, 1961
- (2) U. S. Dep. of Agr. Soil conservation Service: National
Engineering Hand Book, Section16 Drainage chapter 2.
p 227~236
- (3) 中川昭一郎 : 湿田の乾田化に伴なり透水条件の変化について
農土試報告2号, P19~86, 1964
- (4) R. K. Frevert and D. Kirkham: A Field Method For
Measuring The Permeability of Soil Below A Water
Table, Proce. of Highway Reseach Board vol. 28, 1948
- (5) U.S. Bureau of Reclamation: Earth Mamual P253, 1958