

地下水の揚水に関する研究

(第1報) 自由面地下水の場合、砂礫の透水係数算出方法

磯 島 義 一

Studies of Pumping Ground Water for Irrigation

1. A method of finding permeability through gravel in the case of free surface ground water

Yoshikazu ISOJIMA

はじめに

この研究を始めるきっかけになったのは、平成2年伊勢市郊外に圃場整備のかんがい用井戸が完成したことである。完成に伴い井戸の揚水試験が実施され、その記録が報告書としてまとまっている。

著者は実測のデータから、地下水が賦存されている砂礫の透水係数を求めてみた。この透水係数は井戸の設計に必要な数値である。

一般に透水係数は試験用の井戸を掘削して、揚水試験より求める。揚水試験をするときは、揚水井戸の他に地下水位を観測する井戸が必要である。

今回完成した井戸は、かんがい規模が小さいので、直接本井戸を掘削して、計画揚水量を汲みあげたものである。水位観測井戸は掘削していないので、透水係数を求めることができない。

そこで著者は観測井戸の水位記録の不足を次のようにして補うことにした。ポンプで揚水した水は砂礫の空隙に入っていたものである。揚水前後の地下水位と砂礫の空隙率や、汲みあげられた水の体積の関係を方程式に表わして、未知数の透水係数を解くことができた。

実験材料及研究方法

1. 実験材料

井戸を掘削するとき削井工法で掘り出された砂礫は、見本を残して処分されていたので、井戸に隣接する宮川河川敷に堆積した砂礫を実験材料とした。

2. 実験方法

空隙率の試験

採取した試料はバケツ2杯である。砂礫の入ったバケツに水を注入して、空隙を水で満たした。空隙率は砂礫の中に入った水の体積を、水を含んだ砂礫の体積で割ったものである。

室内透水試験

試験方法は次の通りである。直径30cm、高さ30cmの空きかんを準備した。底に5cmの厚さに礫を敷き並べ、その上に直径20cm、高さ50cmの硬質塩ビ管を立てる。実験材料を硬質塩ビ管の中へ入れた後、水道水をホースで塩ビ管の中へ入れる。

試験材料の長さL、上下流の水位差 Δh 、を測定する。

流量の測定はバケツ（底の直径24cm、上の直径28cm、高さ18cm）に一杯になる時間をストップウォッチで読み、算出する。

3. 研究方法

揚水井戸で汲みあげ流量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$ と、井戸の水位低下 hm の実測より、砂礫の透水係数 km/s を求める関係式を作成する。

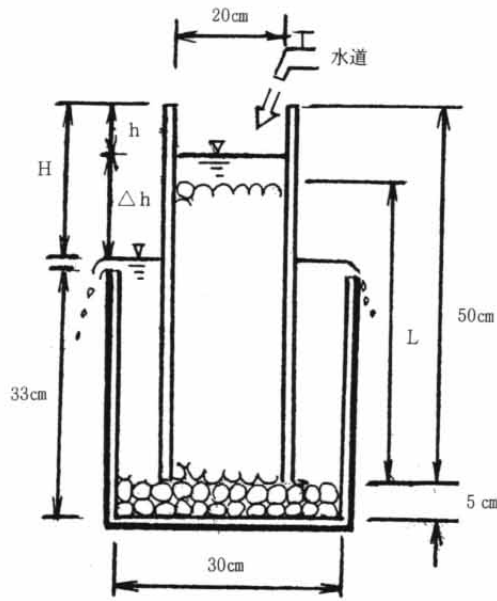
かんがい用井戸で実測を行なった既存の記録を使って、作成した関係式より影響圏半径及び透水係数を算出する。

この計算を行うとき、室内試験で得た砂礫の空隙率の数値を使用する。

実験結果

1. 砂礫の空隙率

試験の結果、砂礫の空隙率は33%から42%までばらつ



第1図 透水試験装置

きがあり平均値は38%である。

2. 砂礫の室内透水試験

測定値は第2表のとおりである。透水係数は第3表より $k = 2.73 \text{ cm/s}$ を得た。

3. 既存の揚水試験記録

現地は、伊勢湾から一級河川宮川を約20km遡上った所にある。

宮川の右岸で、当津地内にあり、河川敷の高水敷となる。平素は茶や水田などの耕作が営まれている。

井戸は第3図Pで示された位置に新設したものである。直径350mm、長さ22mの削井を施工した後、内径200mm、長さ22mの鋼管を挿入した。地下水の流入位置は上から11.30mから16.30mの間、長さ5mである。開口率は33%、縦方向に直径5mmのロッドを40本、横方向には直径3mmのワイヤを溶接したものである。

第1表 空隙率の算定

試料名	砂礫を満たしたバケツの容積 V_1	砂礫の空隙 V_2	空隙率 $\frac{V_2}{V_1} \times 100$
ポリバケツ	$\frac{3.14}{4} \times (25^2 + 21^2) \times \frac{1}{2} \times 17 = 7.112 \text{ cm}^3$	3,000 cm^3	42%
亜鉛メッキバケツ	$\frac{3.14}{4} \times (26^2 + 18^2) \times \frac{1}{2} \times 13 = 5.102$	1,685	33

第2表 透水試験の測定値と計算値

h cm	H cm	Δh cm	L cm	$i = \frac{\Delta h}{L}$	T sec	$Q \text{ cm}^3/\text{s}$	$V = \frac{Q}{A}$	$k = \frac{V}{i} \text{ cm/s}$
8.5	20.5	12.0	40.0	0.300	46	208.8	0.660	2.20
1.5	20.0	18.5	40.0	0.460	25	384.3	1.220	2.65
11.5	21.5	10.0	37.0	0.270	40	240.2	0.764	2.83
6.5	20.5	14.0	37.0	0.378	28	343.0	1.090	2.88
2.5	20.0	17.5	37.0	0.472	23	417.0	1.330	2.81
14.5	20.5	6.0	34.0	0.176	48	200.1	0.637	3.62
8.3	20.3	12.0	34.0	0.352	31	309.9	0.987	2.80
5.0	20.5	15.5	34.0	0.455	26	369.5	1.170	2.58
2.5	20.0	17.5	34.0	0.514	24	400.3	1.270	2.48
18.0	20.5	2.0	30.5	0.065	90	106.7	0.330	5.22
8.0	20.5	12.0	30.5	0.393	28	343.1	1.090	2.78
4.5	20.5	16.0	30.5	0.524	22	436.7	1.390	2.65
16.0	20.0	4.0	28.0	0.142	55	174.6	0.550	3.91
9.5	20.3	11.0	28.0	0.392	27	355.8	1.130	2.88
6.0	20.2	14.0	28.0	0.500	21	457.5	1.450	2.91

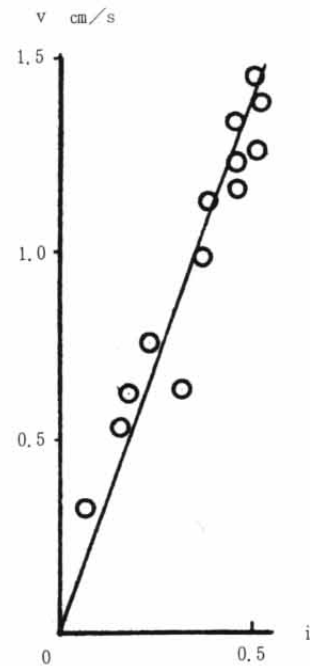
注1. バケツの体積 9,608 cm^3

注2. 塩ビ管の面積 314 cm^2

第3表 最小自乗法による透水係数の平均値

v	i	v i	i ²
0.66	0.300	0.198	0.090
1.22	0.460	0.561	0.211
0.764	0.270	0.205	0.072
1.09	0.378	0.412	0.142
1.33	0.472	0.627	0.222
0.637	0.176	0.112	0.030
0.987	0.352	0.347	0.123
1.17	0.455	0.532	0.207
1.27	0.514	0.652	0.264
0.33	0.065	0.027	0.004
1.09	0.393	0.428	0.154
1.39	0.524	0.728	0.274
0.55	0.142	0.078	0.200
1.13	0.392	0.442	0.153
1.45	0.500	0.725	0.250
計		6.068	2.216

$$k = \frac{\sum vi}{\sum i^2} = \frac{6.068}{2.216} = 2.73 \text{ cm/s}$$

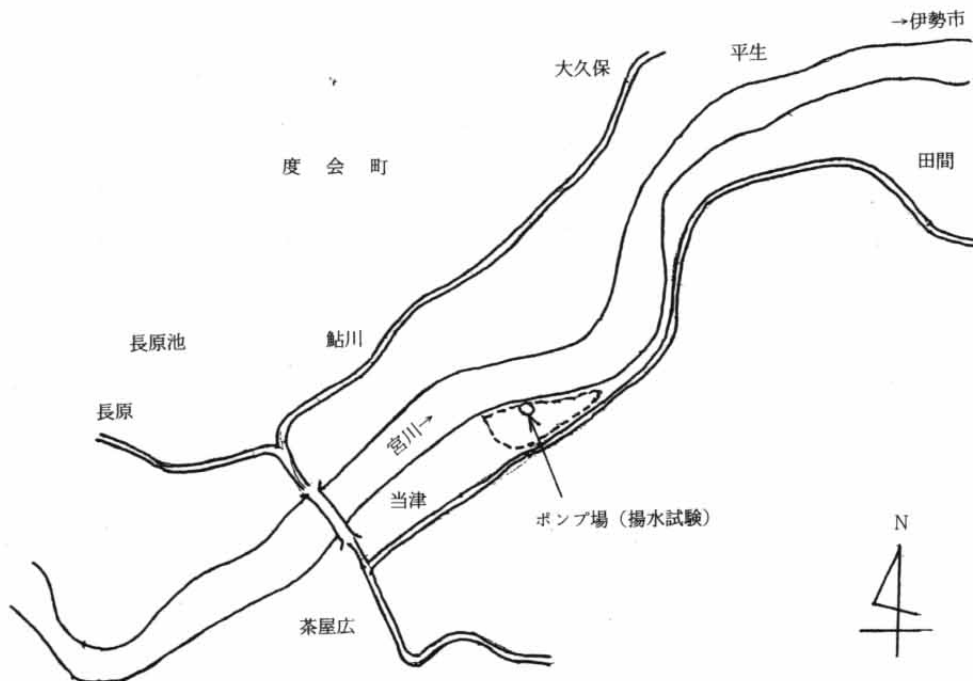


第2図 透水速度と動水勾配

揚水試験は平成2年8月18日から8月23日の間に行なった。ポンプはφ100mm×15kw 水中ポンプ、流量は三角堰を使って測定した。井戸の天端は地面の高さと同一に設置し、井戸の水位は井戸の鋼管の天端からの下りを表す。

揚水試験は3回行なった。8月18日は流量Q=1,503

ℓ/min (0.025 m³/s) を一定にして8時間、8月22日は流量Q=901 ℓ/min (0.015 m³/s) を一定にして8時間、8月23日は流量Q=502 ℓ/min (0.0084 m³/s) を1時間揚水し、次いでQ=757 ℓ/min (0.0126 m³/s) を1時間、次にQ=1,002 ℓ/min (0.0167 m³/s) を1時間、最後にQ=1,503 ℓ/min (0.025 m³/s) を5時



第3図 揚水試験位置図

間揚水した。

考 察

1. 現場透水係数を求める方法

揚水するとき地下水の流れを二つに分ける。一つは遠方から井戸の外側までの水平方向の流れ、もう一つは井戸の外側から内側へ入る流れである。二つの流れが生ずるためには、それぞれの水位差が必要である。それぞれの水位差を合計したものが、井戸の水面低下となる。

自由面地下水を揚水すると、砂礫の空隙に入っていた地下水は、揚水されて空隙を生ずる。揚水前の地下水位と、揚水後の地下水面曲線で囲まれた体積の中に入っていた地下水は、ポンプで揚水された揚水量と同一である。

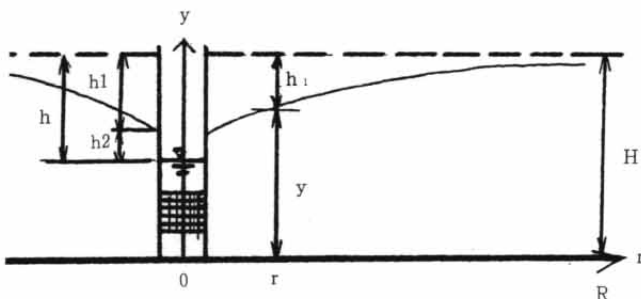
第4表 揚水試験記録

月 日	水位測定 時間(分)	井戸内水位 管天よりm	水位降下 m	揚 水 量	
				三角堰cm	流量ℓ/min
8月18日	0	7.30	0	20.0	1,503
"	1	8.11	0.81	"	"
"	2	8.13	0.83	"	"
"	3	8.15	0.85	"	"
"	4	8.16	0.86	"	"
"	5	8.17	0.87	"	"
"	10	8.17	0.87	"	"
"	15	8.18	0.88	"	"
"	20	8.20	0.90	"	"
"	25	8.21	0.91	"	"
"	30	8.21	0.91	"	"
"	40	8.21	0.91	"	"
"	50	8.22	0.92	"	"
"	60	8.23	0.93	"	"
"	90	8.26	0.96	"	"
"	120	8.29	0.99	"	"
"	150	8.30	1.00	"	"
"	180	8.31	1.01	"	"
"	240	8.32	1.02	"	"
"	300	8.32	1.02	"	"
"	360	8.32	1.02	"	"
"	420	8.32	1.02	"	"
"	480	8.32	1.02	"	"
8月22日	0	7.03	0	16.3	901
"	1	7.12	0.09	"	"
"	2	7.14	0.11	"	"
"	3	7.15	0.12	"	"
"	4	7.16	0.13	"	"
"	5	7.17	0.14	"	"
"	10	7.30	0.27	"	"
"	15	7.44	0.41	"	"
8月23日	0	6.80	0	12.9	502
"	1	6.95	0.15	"	"
"	2	6.95	0.15	"	"
"	3	6.95	0.15	"	"
"	4	6.95	0.15	"	"
"	5	6.95	0.15	"	"
"	10	6.95	0.15	"	"
"	15	6.95	0.15	"	"
"	20	6.95	0.15	"	"
"	25	6.95	0.15	"	"
"	30	6.95	0.15	"	"
"	40	6.95	0.15	"	"
"	50	6.95	0.15	"	"
"	60	6.95	0.15	"	"
"	61	7.06	0.26	15.2	757
"	62	7.06	0.26	"	"
"	63	7.06	0.26	"	"
"	64	7.06	0.26	"	"
"	65	7.06	0.26	"	"
"	70	7.06	0.26	"	"
"	75	7.06	0.26	"	"
"	80	7.06	0.26	"	"
"	85	7.06	0.26	"	"
"	90	7.06	0.26	"	"
"	100	7.06	0.26	"	"
"	110	7.06	0.26	"	"
"	120	7.06	0.26	"	"
"	121	7.13	0.33	17.0	1,002
"	122	7.13	0.33	"	"
"	123	7.13	0.33	"	"
"	124	7.13	0.33	"	"
"	125	7.13	0.33	"	"

第4表 揚水試験記録

月 日	水位測定 時間(分)	井戸内水位 管天よりm	水位降下 m	揚水量	
				三角堰cm	流量ℓ/min
8月23日	130	7.13	0.33	17.0	1,002
"	135	7.13	0.33	"	"
"	140	7.13	0.33	"	"
"	145	7.13	0.33	"	"
"	150	7.13	0.33	"	"
"	160	7.13	0.33	"	"
"	170	7.13	0.33	"	"
"	180	7.13	0.33	"	"
"	181	7.47	0.67	20.0	1,503
"	182	7.48	0.68	"	"
"	183	7.49	0.69	"	"
"	184	7.49	0.69	"	"
"	185	7.49	0.69	"	"
"	190	7.50	0.70	"	"
"	195	7.50	0.70	"	"
"	200	7.51	0.71	"	"
"	205	7.52	0.72	"	"
"	210	7.52	0.72	"	"
"	220	7.53	0.73	"	"
"	230	7.54	0.74	"	"
"	240	7.54	0.74	"	"
"	270	7.55	0.74	"	"
"	300	7.55	0.75	"	"
"	360	7.55	0.75	"	"
"	420	7.55	0.75	"	"
"	480	7.55	0.75	"	"

1-1 遠方から井戸の外側までの流れ



第4図 井戸に向う水平な流れ

以上のことから二つの関係式を作成することができる。一つは水位差に関する関係式であり、もう一つは揚水量に関する関係式である。未知数は透水係数と地下水の影響圏半径である。上記の二つの方程式より、二つの未知数を解くことができた。

第4図に示すように、井戸の中心を原点として、水平方向に r 軸、鉛直方向に y 軸とする。揚水流量を Q m^3/s 、透水係数を k m/s 、動水勾配を $\frac{dy}{dr}$ とすると、

$$Q = k \frac{dy}{dr} 2\pi r y \quad (1)$$

r の範囲を影響圏半径 R から、任意の半径 r まで、 y の範囲を滞水層の深さ H から任意の半径 r における深さ y までとすると

$$\int_r^R \frac{dr}{r} = \frac{2\pi k}{Q} \int_y^H y dy$$

$$\ln \frac{R}{r} = \frac{\pi k}{Q} (H^2 - y^2)$$

$$y = \left(H^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx H \left(1 - \frac{Q}{2\pi k H^2} \ln \frac{R}{r} \right)$$

$$h_1 = H - y$$

$$= \frac{Q}{2\pi k H} \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

揚水前の水位より、揚水後の水位差を h_1 とすると、任意の半径 r における水位差 h_1 は (2) 式で表すことができる。

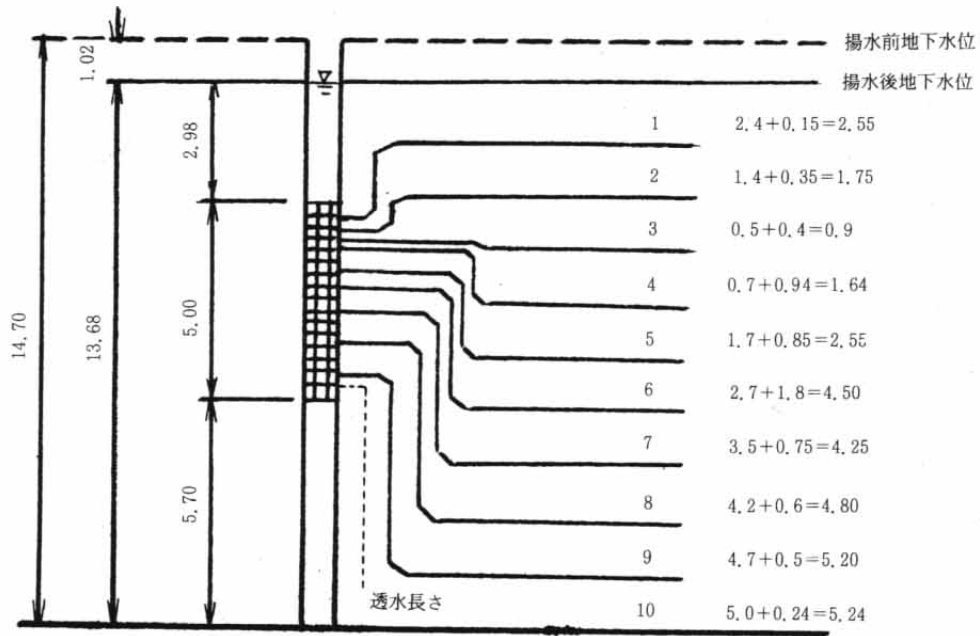
1-2 井戸の外側から内側へ入る流れ

井戸の外側まで水平方向に流れた地下水は、向きを鉛直方向に変え、もう一度向きを水平方向にかえてスクリーンから井戸の中へ流入する。この流れを第5図に示した。縦の方向は $1/200$ 、横の方向は $1/50$ に縮尺してある。

地下水の流れは、 n 等分する。地下水の流速は動水勾配に比例する。1 から n までの流管を流れる透水速度は等しい。はるか遠方から井戸附近まで流れる地下水の流量は各流管とも等しくする。

井戸の外側から内側へ流入する流れは、各流管とも等しい流量で流れなければならない。各流管について、透水延長を ℓ 、透水断面を a とすると、 $\frac{a}{\ell}$ の値が等しくなるような流管となる。

井戸の外側から内側へ入るとき、 h_2 の水位差が生ずるものとすれば、



第5図 1の場合における流線（縮尺 縦1/200 横1/50）

$$Q = k \times \left(\frac{a_1}{l_1} + \frac{a_2}{l_2} + \dots + \frac{a_n}{l_n} \right) \times h_2$$

$$= k \times h_2 \times \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}$$

$$h_2 = \frac{Q}{k \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}} \quad (3)$$

各流管とも等しい流量が流れるためには、スクリーンへ入るとき流管の断面は、透水長さに比例して配分すればよい。

井戸の水面低下をhとすると、

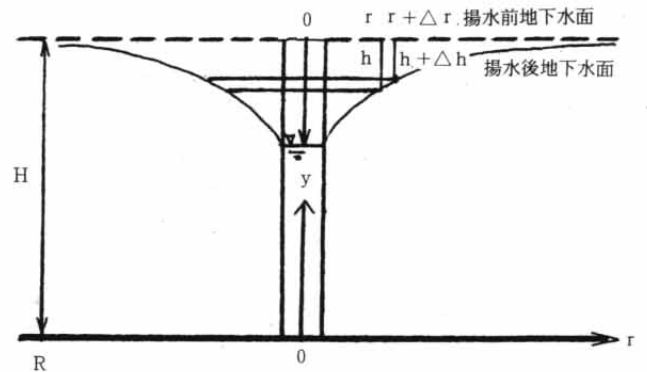
$$h = h_1 + h_2$$

$$= \frac{Q}{2\pi k H} \ln \frac{R}{r} + \frac{Q}{k \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}}$$

$$k = \frac{Q}{h} \times \left(\frac{1}{2\pi H} \ln \frac{R}{r} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}} \right) \quad (4)$$

1-3 揚水量と砂礫の空隙

滞水層の砂礫の中に地下水が入っている。揚水により井戸の周りから外側に向かって、砂礫に空隙が生ずる。揚



第6図 揚水前後の地下水面

水前後の地下水面形に囲まれた図形の体積をVとすると、Vに砂礫の空隙率λを掛けたものが揚水量（Q m³/s × t秒）に等しい。

$$V \times \lambda = Q \times t$$

$$V = \frac{Qt}{\lambda} \quad (5)$$

第6図には揚水前後の地下水面の形状を示す。井戸の内水面を原点とし、鉛直方向は揚水前後の水位差h、水平方向は半径rを表す。揚水前後の地下水面形に囲まれた図形の体積Vは

$$\Delta V = -\pi r^2 dh$$

$$= -\pi r^2 d \left(\frac{Q}{2\pi kH} \ln \frac{R}{r} \right)$$

$$= -\frac{Qr^2}{2kH} \times d \ln \frac{R}{r}$$

$$= \frac{Qr^2}{2kH} \times \frac{dr}{r}$$

$$V = \int_r^R \frac{Q}{2kH} r dr = \frac{Q}{2kH} \times \frac{1}{2} (R^2 - r^2)$$

$$= \frac{Q}{4kH} (R^2 - r^2) \quad (6)$$

(6) 式を (5) 式に代入すると

$$\frac{1}{4kH} (R^2 - r^2) = \frac{t}{\lambda}$$

$$k = \frac{\lambda}{t} \times \frac{1}{4H} (R^2 - r^2) \quad (7)$$

(4) 式と (7) 式は等しい

$$\frac{Q}{h} \times \left(\frac{1}{2\pi H} \ln \frac{R}{r} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}} \right) = \frac{\lambda}{t} \times \frac{1}{4H} (R^2 - r^2)$$

r の値は R に比べて小さい。r = 1 m 程度のものであるから $R^2 - r^2 \approx R^2$ としてよいので

$$\frac{\lambda}{4tH} R^2 - \frac{Q}{2\pi Hh} \ln \frac{R}{r} - \frac{Q}{h} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}} = 0 \quad (8)$$

(8) 式より R を求め、R の数値を (4) 式か又は (7) 式に代入して k を求めることができる。

2. 透水係数及び影響圏半径

透水試験より得た数値を使って、(8) 及び (7) 式

より透水係数及び影響圏半径を計算した。その結果は第 5 表のとおりである。

井戸の掘削の深さは 22m である。深さ 7.30m に地下水があった。全長にわたって玉石交りの砂礫であった。礫は直径 50mm から 100mm が主体である。所々に 200 から 300 mm の玉石が混入していた。深さ 18m 附近より若干粘土が混入していた。

不透水層の深さは調査していないが、深さ 22m 以降は不透水層とみなした。

地下水は半径 1 m までは (2) 式の法則によって流れ、半径 1 m から井戸の内部へ流入する区間は (3) 式の法則によって流れる。(3) 式は、 $\sum \frac{a}{l}$ が関係するので、この計算方法を次に示す。

地下水の流れ図を第 5 図に示した。水平方向に流れる流管を 10 等分する。(3) 式の法則に従う区間は、10 等分された流管の中を流れる、それぞれ等しい流量が、井戸の外からスクリーンを通して中へ入ることができるように、流管の断面を決定する。

次に各流管の透水長さを図測する。その長さは流管の中心で測る。透水長さは水平な流れから、流れが断面縮小して流入口のスクリーンに入る区間である。

透水長さを合計して、それぞれの流管との割合を算出する。

次に井戸の流入口 (スクリーン、本事例では直径 20cm、長さ 5 m) を透水長さの割合に比例配分する。

各流管の流入口 (スクリーン) で円環のまわりの面積を計算する。スクリーンの周りの面積を a とし、スクリーンの長さを h とすれば

$$a = 2\pi rh = 0.628h \quad (r = 0.10m)$$

次に鉛直方向に流れる流管の断面を計算する。スクリーンへ入るそれぞれの面積を累計して、流管の鉛直方向の半径を計算する。計算は上から下に行うものと、下から上に行うものがある。

最後に $\frac{a}{l}$ を求める。 $\frac{a}{l}$ が等しくなるよう、各流管のスクリーンの長さ及び半径を作図して、上記の作業を繰り返す。

第 5 表 計算条件及び結果

場 合	揚 水 流 量	井戸の水面低下	滞 水 深	影 響 圏 半 径	透 水 係 数
1	0.025 m ³ /s	1.02m	14.70m	380m	0.028m/s
2	0.015	0.41	14.97	460	0.040
3-1	0.084	0.15	15.20	202	0.061
3-2	0.0126	0.26	15.20	243	0.053
3-3	0.0167	0.33	15.20	288	0.055
3-4	0.025	0.75	15.20	404	0.037



第7図 井戸の上から見た断面図

鉛直方向の流管の半径を求める計算式は次の通りである。半径 r は該当の流管（上から下の該当の流管，又は下から上の該当の流管）までの流量が鉛直方向に流れる断面の半径を表す。 a' は各流管の累計断面積とすると

$$\pi r^2 = a' + \pi \times 0.1^2$$

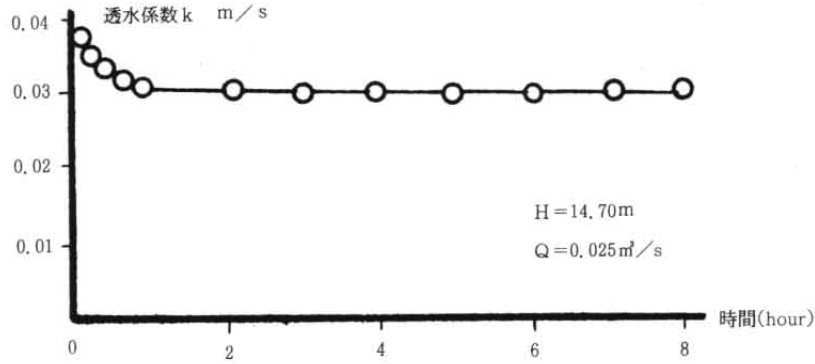
$$r = \sqrt{\frac{a'}{3.14} + 0.01}$$

第6表 a/ℓ 計算表

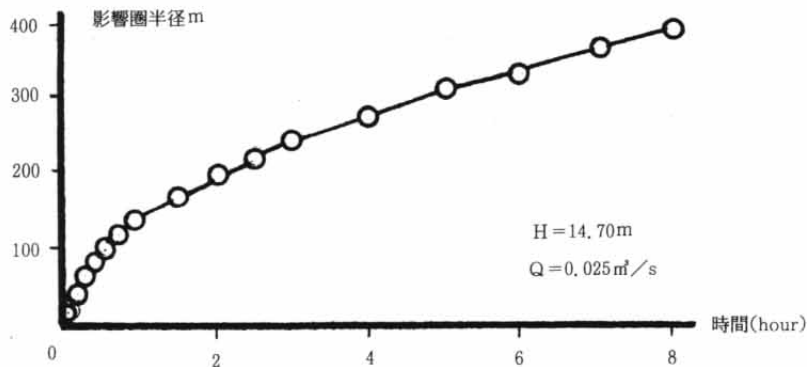
流線	透水長さ ℓ (m)	同差割合	開口部長さ (m)	同面積 a (㎡)	同累計 a' (㎡)	半径 r (m)	累計 a' (㎡)	半径 r (m)	$\frac{a}{\ell}$
1	2.55	0.076	0.380	0.239	0.239	0.293			0.093
2	1.75	0.052	0.260	0.163	0.402	0.371			0.093
3	0.90	0.026	0.130	0.082			2.738	0.939	0.091
4	1.64	0.049	0.245	0.154			2.656	0.925	0.093
5	2.55	0.076	0.380	0.239			2.502	0.898	0.093
6	4.50	0.135	0.675	0.424			2.263	0.854	0.094
7	4.25	0.127	0.635	0.399			1.839	0.771	0.093
8	4.80	0.144	0.720	0.452			1.440	0.684	0.094
9	5.20	0.156	0.780	0.490			0.988	0.569	0.094
10	5.24	0.159	0.795	0.498			0.498	0.410	0.095
計	33.38	1.000	5.000	3.140					0.933
揚水量	1,503 ℓ/min = 0.025 m³/s			空隙率	0.33				
揚水時間	8h × 3,600秒			$\sum \frac{a}{\ell}$	0.933				
滞水深	14.70 m			r	0.9 m				

第7表 R, k 計算表

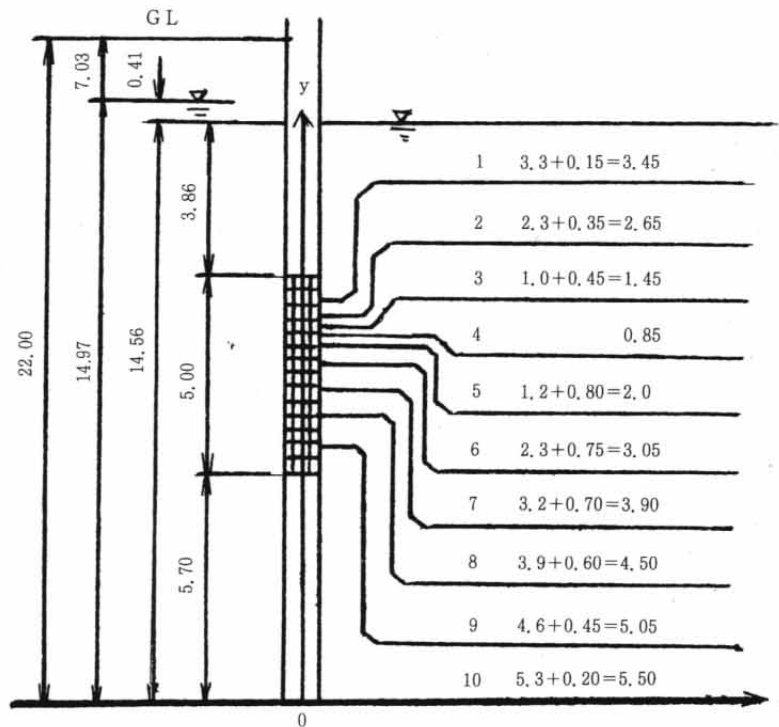
時間	同左	水面低下	$\frac{\lambda}{4Ht}$	$\frac{Q}{2\pi Hh}$	$\frac{Q}{h \sum a/\ell}$	R	k
1分	60秒	0.81m	9.35×10^{-5}	3.34×10^{-4}	0.0331	20m	0.0374m/s
2	120	0.83	4.67×10^{-5}	3.26×10^{-4}	0.0323	27	0.0341
3	180	0.85	3.12×10^{-5}	3.18×10^{-4}	0.0315	33	0.0340
4	240	0.86	2.34×10^{-5}	3.15×10^{-4}	0.0312	38	0.0337
5	300	0.87	1.87×10^{-5}	3.11×10^{-4}	0.0308	42	0.0330
10	600	0.87	9.35×10^{-6}	3.11×10^{-4}	"	59	0.0325
15	900	0.88	6.23×10^{-6}	3.07×10^{-4}	0.0304	72	0.0323
20	1,200	0.90	4.67×10^{-6}	3.01×10^{-4}	0.0297	82	0.0314
25	1,500	0.91	3.74×10^{-6}	2.98×10^{-4}	0.0294	91	0.0310
30	1,800	0.91	3.11×10^{-6}	"	"	100	0.0312
40	2,400	0.91	2.34×10^{-6}	"	"	115	0.0309
50	3,000	0.92	1.87×10^{-6}	2.94×10^{-4}	0.0291	128	0.0306
60	3,600	0.93	1.56×10^{-6}	2.91×10^{-4}	0.0288	140	0.0305
90	5,400	0.96	1.04×10^{-6}	2.82×10^{-4}	0.0279	169	0.0297
120	7,200	0.99	7.79×10^{-7}	2.74×10^{-4}	0.0271	192	0.0287
150	9,000	1.00	6.24×10^{-7}	2.71×10^{-4}	0.0268	213	0.0283
180	10,800	1.01	5.19×10^{-7}	2.68×10^{-4}	0.0265	233	0.0282
240	14,400	1.02	3.89×10^{-7}	2.65×10^{-4}	0.0262	267	0.0277
300	18,800	1.02	3.11×10^{-7}	"	"	299	0.0266
360	21,600	1.02	2.59×10^{-7}	"	"	328	0.0279
420	25,200	1.02	2.22×10^{-7}	"	"	354	0.0279
480	28,800	1.02	1.94×10^{-7}	"	"	379	0.0279



第8図 透水係数の時間的推移



第9図 影響圏半径の時間的推移



第10図 2の場合の流線図 (縮尺 縦1/200 横1/50)

2-1 1の場合

透水係数は比較的ばらつきが少なかったが、これはスクリーンの開口率(33%)が砂礫の空隙率(33~42%)に近かったことによるものと思われる。

第8図は透水係数の時間的推移を第9図には影響圏半径の時間的推移を示した。影響圏半径は揚水時間の経過と共に拡大する。

2-2 2の場合

揚水量 $9011/\text{min}=0.015 \ell/\text{s}$ 空隙率 0.33
 揚水時間 $8 \text{ h} \times 3,600 \text{ 秒}$ $\Sigma \frac{a}{\ell}$ 0.964
 水位低下 0.41m r 0.9m
 滞水深 14.97m

透水係数は0.04m/s、影響圏半径は480mまで及んだ。

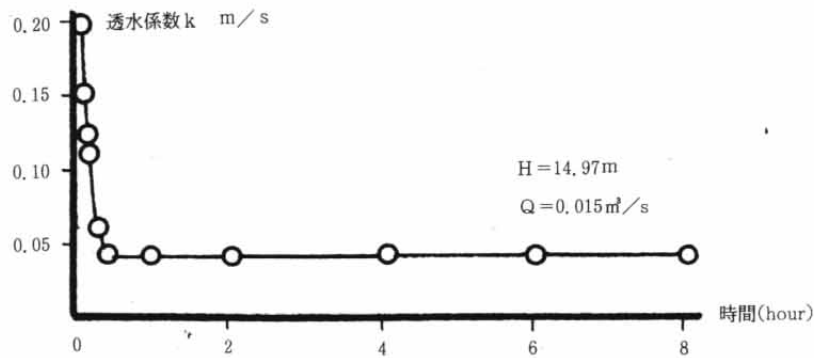
透水係数は揚水後15分ではぼ一定の値となった。

2-3 3の1の場合

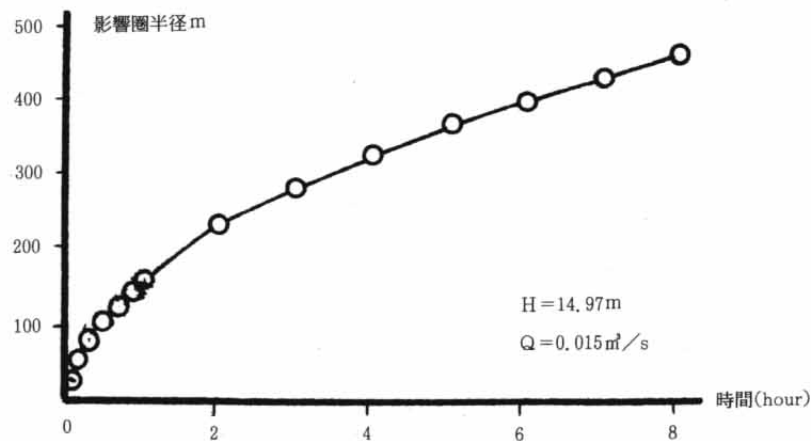
揚水量 $0.502 \text{ m}^3/\text{min}=0.0084 \text{ m}^3/\text{s}$
 空隙率 0.33 揚水時間 3,600秒
 $\Sigma \frac{a}{\ell}$ 0.923 水位低下 0.15m
 r 0.90m 滞水深 15.20m

第8表 a/ℓ 計算表

流線	透水長さ ℓ (m)	同左割合	開口部長さ (m)	同面積 a (m ²)	同累計 (m ²)	半径 (m)	累計 (m ²)	半径 (m)	$\frac{a}{\ell}$
1	3.45	0.106	0.530	0.333	0.333	0.340			0.096
2	2.65	0.082	0.410	0.257	0.590	0.444			0.096
3	1.45	0.045	0.225	0.141	0.731	0.492			0.097
4	0.85	0.026	0.130	0.082			2.469	0.881	0.096
5	2.00	0.062	0.310	0.195			2.327	0.866	0.097
6	3.05	0.094	0.470	0.295			2.132	0.830	0.096
7	3.90	0.120	0.600	0.377			1.837	0.771	0.096
8	4.50	0.139	0.695	0.436			1.460	0.689	0.096
9	5.05	0.156	0.780	0.490			1.024	0.579	0.097
10	5.50	0.170	0.850	0.534			0.534	0.424	0.097
計	32.40	1.000	5.000	3.140					0.964



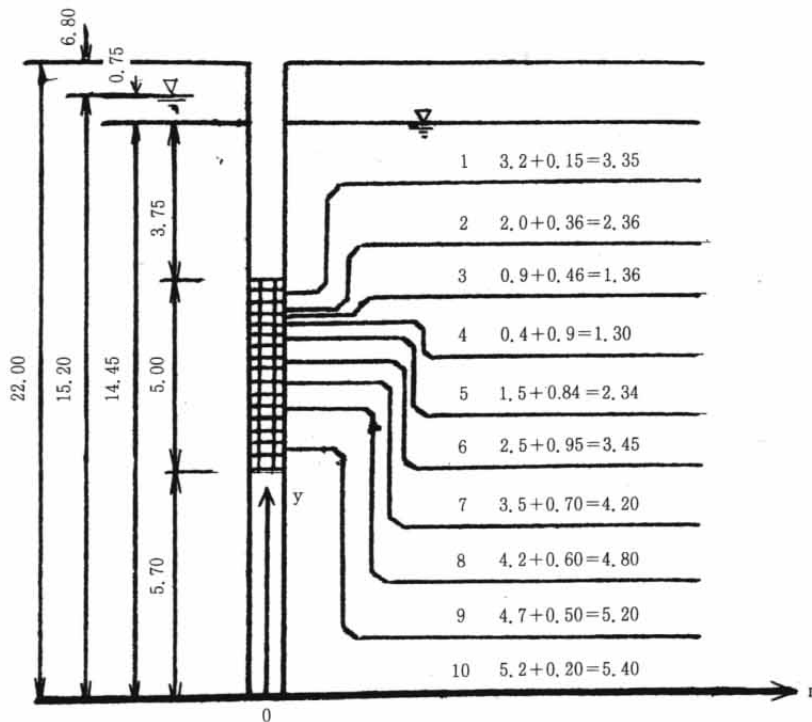
第11図 透水係数の時間的推移



第12図 影響圏半径の時間的推移

第9表 R, k 計算表

時間	同左	水面低下	$\frac{\lambda}{4Ht}$	$\frac{Q}{2\pi Hh}$	$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{l}}$	R	k
分	秒	m				m	m/s
1	60	0.09	9.19×10^{-5}	1.77×10^{-3}	0.173	45	0.185
2	120	0.11	4.59×10^{-5}	1.45×10^{-3}	0.141	57	0.149
3	180	0.12	3.06×10^{-5}	1.33×10^{-3}	0.129	67	0.137
4	240	0.13	2.30×10^{-5}	1.23×10^{-3}	0.120	74	0.125
5	300	0.14	1.84×10^{-5}	1.14×10^{-3}	0.111	80	0.117
10	600	0.27	9.19×10^{-6}	5.91×10^{-4}	0.058	82	0.061
15	900	0.41	6.12×10^{-6}	3.89×10^{-4}	0.038	81	0.0401
20	1,200	"	4.59×10^{-6}	"	"	94	0.0405
25	1,500	"	3.67×10^{-6}	"	"	105	0.0405
30	1,800	"	3.06×10^{-6}	"	"	115	0.0404
40	2,400	"	2.30×10^{-6}	"	"	132	0.0400
50	3,000	"	1.84×10^{-6}	"	"	148	0.0402
60	3,600	"	1.53×10^{-6}	"	"	162	0.0401
90	5,400	"	1.02×10^{-6}	"	"	199	0.0404
120	7,200	"	7.65×10^{-7}	"	"	230	0.0401
150	9,000	"	6.12×10^{-7}	"	"	257	0.0404
180	10,800	"	5.10×10^{-7}	"	"	281	0.0402
240	14,400	"	3.83×10^{-7}	"	"	325	0.0404
300	18,800	"	2.93×10^{-7}	"	"	372	0.0405
360	21,600	"	2.55×10^{-7}	"	"	398	0.0404
420	25,200	"	2.19×10^{-7}	"	"	430	0.0404
480	28,800	"	1.91×10^{-7}	"	"	461	0.0406



第13図 3の場合の流線

第10表 a/l 計算表

流線	透水長さ ℓ (m)	同左割合	開口部長さ (m)	同面積 a (㎡)	同累計 (㎡)	半径 (m)	累計 (㎡)	半径 (m)	$\frac{a}{\ell}$
1	3.35	0.099	0.495	0.311	0.311	0.330			0.092
2	2.36	0.070	0.350	0.220	0.531	0.423			0.093
3	1.36	0.040	0.200	0.125	0.656	0.467			0.091
4	1.30	0.039	0.195	0.122			2.484	0.895	0.093
5	2.34	0.069	0.345	0.217			2.362	0.873	0.092
6	3.45	0.102	0.510	0.320			2.145	0.832	0.092
7	4.20	0.124	0.620	0.389			1.825	0.768	0.092
8	4.80	0.142	0.710	0.446			1.436	0.683	0.092
9	5.20	0.154	0.770	0.484			0.990	0.570	0.093
10	5.40	0.161	0.805	0.506			0.506	0.413	0.093
計	33.76	1.000	5.000	3.140					0.923

$$\frac{\lambda}{4tH} = \frac{0.33}{4 \times 3600 \times 15.20} = 1.51 \times 10^{-6}$$

$$\frac{Q}{2\pi Hh} = \frac{0.0084}{2 \times 3.14 \times 0.15 \times 15.20} = 5.87 \times 10^{-4}$$

$$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}} = \frac{0.0084}{0.15 \times 0.964} = 0.058$$

$$1.51 \times 10^{-6} R^2 - 5.87 \times 10^{-4} \ln \left(\frac{R}{0.9} \right) - 0.058 = 0$$

$$R = 202 \text{ m}$$

$$k = \frac{\lambda R^2}{4Ht} = \frac{0.33 \times 202^2}{4 \times 15.20 \times 3600} = 0.0615 \text{ m/s}$$

2-4 3の2の場合

揚水量 0.757 m³/min = 0.0126 m³/s 空隙率 0.33

揚水時間 100分 $\sum \frac{a}{\ell}$ 0.964

水位低下 0.26m r 0.9m

滞水深 15.20m

$$\text{揚水時間} = \frac{0.502 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 + 0.757 \text{ m}^3/\text{min} \times 60}{0.757 \text{ m}^3/\text{min}}$$

$$= 100 \text{ 分}$$

$$\frac{\lambda}{4tH} = \frac{0.33}{4 \times 100 \times 60 \times 15.20} = 9.05 \times 10^{-7}$$

$$\frac{Q}{2\pi Hh} = \frac{0.0126}{2 \times 3.14 \times 15.20 \times 0.26} = 5.08 \times 10^{-4}$$

$$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}} = \frac{0.0126}{0.26 \times 0.964} = 0.0503$$

$$9.05 \times 10^{-7} R^2 - 5.08 \times 10^{-4} \ln \left(\frac{R}{0.9} \right) - 0.0503 = 0$$

$$R = 243 \text{ m}$$

$$k = \frac{\lambda}{t} \times \frac{R^2}{4H}$$

$$= \frac{0.33}{100 \times 60} \times \frac{243^2}{4 \times 15.20} = 0.0534 \text{ m/s}$$

2-5 3の3の場合

揚水量 1.002 m³/min = 0.0167 m³/s 空隙率 0.33

揚水時間 135分 $\sum \frac{a}{\ell}$ 0.964

水位低下 0.33m r 0.9m

滞水深 15.20m

揚水時間

$$= \frac{0.502 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 60 + 0.757 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 60 + 1.002 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 60}{1.002}$$

$$= 135 \text{ 分}$$

$$\frac{\lambda}{4tH} = \frac{0.33}{4 \times 60 \times 135 \times 15.20} = 6.70 \times 10^{-7}$$

$$\frac{Q}{2\pi Hh} = \frac{0.0167}{2 \times 3.14 \times 0.33 \times 15.20} = 5.30 \times 10^{-4}$$

$$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}} = \frac{0.0167}{0.33 \times 0.964} = 0.0524$$

$$6.7 \times 10^{-7} R^2 - 5.30 \times 10^{-4} \ln \left(\frac{R}{0.9} \right) - 0.0524 = 0$$

$$R = 288 \text{ m}$$

$$k = \frac{\lambda R^2}{t 4H}$$

$$= \frac{0.33}{60 \times 135} \times \frac{288^2}{4 \times 15.20} = 0.0555 \text{ m/s}$$

2-6 3の4の場合

揚水量 $1.503 \text{ m}^3/\text{min} = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ 空隙率 0.33

揚水時間 390分 $\sum \frac{a}{\ell}$ 0.964

水位低下 0.75m r 0.9m

滞水深 15.20m

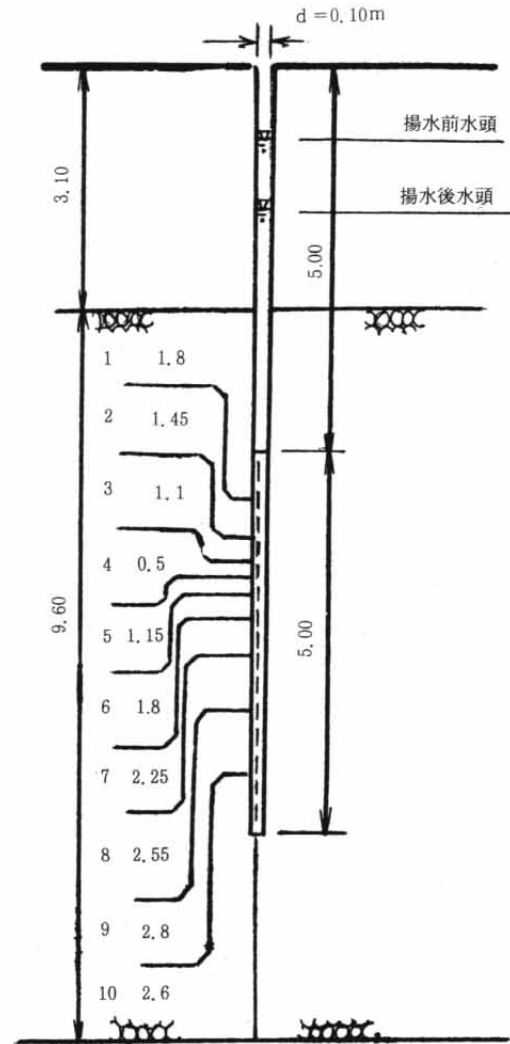
揚水時間

$$= \frac{0.502 \times 60 + 0.757 \times 60 + 1.002 \times 60 + 1.503 \times 5 \times 60}{1.503}$$

$$= 390 \text{ 分}$$

$$\frac{\lambda}{4tH} = \frac{0.33}{4 \times 60 \times 390 \times 15.20} = 2.32 \times 10^{-7}$$

$$\frac{Q}{2\pi Hh} = \frac{0.025}{2 \times 3.14 \times 0.71 \times 15.20} = 3.69 \times 10^{-4}$$



第14図 井戸の流線図

(伊勢市村松町A井戸)

第11表 $\sum \frac{a}{\ell}$ 計算表 (A井戸、設計のための試験用井戸)

番号	透水長さ ℓ	割合	開口部長さ	同面積 a	同累計	内半径	累計	外半径	$\frac{a}{\ell}$
1	1.8	0.100	0.500	0.157	0.157	0.249	0.150	0.707	0.087
2	1.45	0.081	0.405	0.127	0.284	0.316	1.413	0.676	0.087
3	1.1	0.061	0.305	0.096	0.380	0.361	1.286	0.640	0.087
4	0.5	0.028	0.140	0.044	0.424	0.380	1.190	0.615	0.087
5	1.15	0.064	0.320	0.100	0.524	0.420	1.146	0.604	0.087
6	1.8	0.100	1.500	0.157	0.681	0.466	1.046	0.579	0.087
7	2.25	0.125	0.625	0.196	0.847	0.528	0.889	0.541	0.087
8	2.55	0.142	0.710	0.223	1.100	0.592	0.693	0.479	0.087
9	2.80	0.155	0.775	0.243	1.343	0.654	0.470	0.399	0.087
10	2.60	0.144	0.720	0.227	1.700	0.707	0.227	0.286	0.087
計	18.00	1.000	5.000	1.570					0.870

$$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}} = \frac{0.025}{0.71 \times 0.933} = 0.0377$$

$$2.32 \times 10^{-7} R^2 - 3.69 \times 10^{-4} \ln \left(\frac{R}{0.9} \right) - 0.0377 = 0$$

$$R = 416 \text{ m}$$

$$k = \frac{\lambda R^2}{4Ht}$$

$$= \frac{0.33 \times 416^2}{4 \times 15.20 \times 60 \times 390} = 0.0401 \text{ m/s}$$

2-7 井戸設計のための揚水試験井戸
揚水井戸口径 100mm×10m

観測井戸口径 40mm×15m

場所 伊勢市村松町A井戸

調査 S59年12月～S60年1月

S60年1月21日、揚水試験の結果、揚水流量 $Q = 0.0077 \text{ m}^3/\text{s}$ のポンプを45分運転した時点で、井戸の水面低下は0.87mであった。同調査を実施したTコンサルタントは潮汐の変化より、透水係数は 0.012 m/s であると報告している。

現時点で著者の方法によると、透水係数は $0.011 \sim 0.008 \text{ m/s}$ である。現在直径4m、深さ10mの井戸が造成されている。著者は平成4年7月、本井戸の揚水試験を行なった。 $\phi 200 \text{ mm}$ のうずまきポンプ2台 ($0.0625 \text{ m}^3/\text{s} \times 2 \text{ 台} = 0.125 \text{ m}^3/\text{s}$) で運転したところ、井戸の水面低下は1.01mであった。著者の方法で透水係数を計算したところ、透水係数は 0.058 m/s である（第2報参照）。

第12表 S60.1.21揚水試験の影響圏半径、透水係数

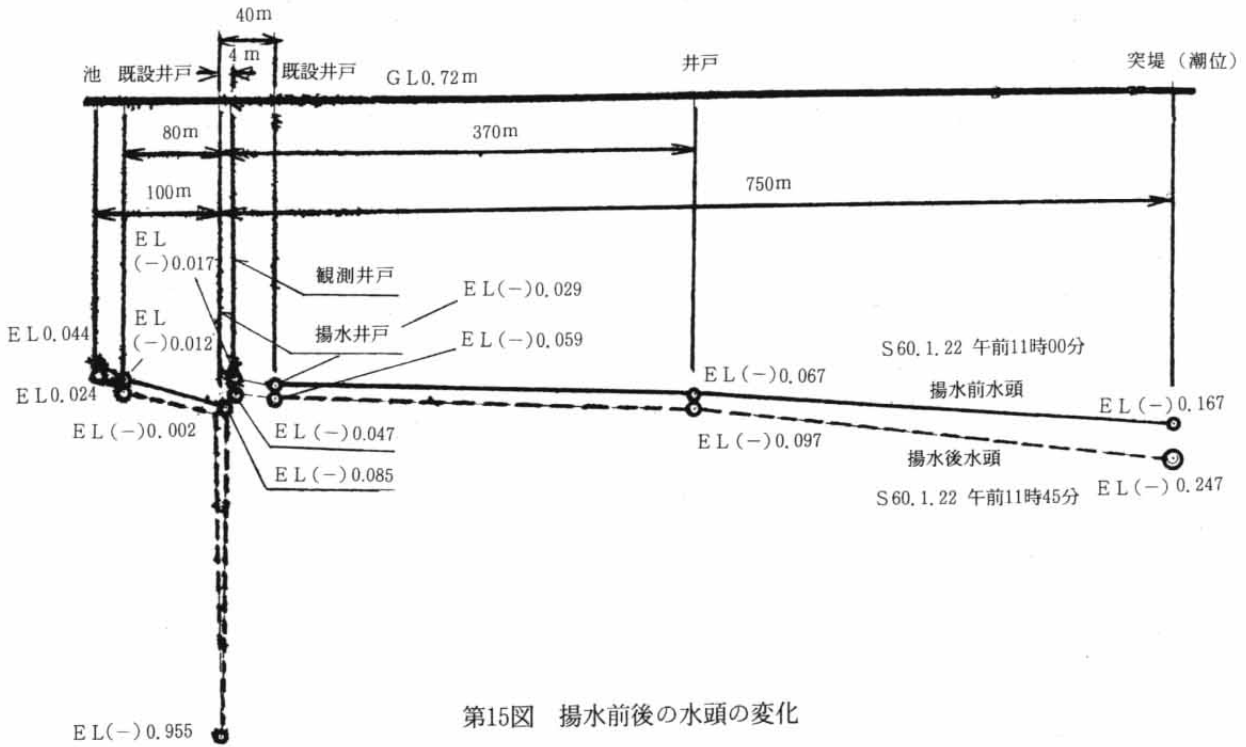
時間	井戸の水面 低下	$\frac{\lambda}{4Ht}$	$\frac{Q}{2\pi Hh}$	$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}}$	R	k
分	m				m	m/s
1	0.78	1.43×10^{-4}	1.64×10^{-4}	0.0113	10	0.0143
2	0.81	7.16×10^{-5}	1.58×10^{-4}	0.0109	13	0.0121
3	0.84	4.77×10^{-5}	1.52×10^{-4}	0.0105	16	0.0122
5	0.85	2.86×10^{-5}	1.50×10^{-4}	0.0104	20	0.0114
7	0.85	2.05×10^{-5}	1.50×10^{-4}	0.0104	24	0.0117
10	"	1.43×10^{-5}	"	"	28	0.0112
15	"	9.55×10^{-6}	"	"	34	0.0110
20	0.86	7.16×10^{-6}	1.48×10^{-4}	0.0103	40	0.0114
30	"	4.77×10^{-6}	"	"	48	0.0110
45	0.87	3.15×10^{-6}	1.47×10^{-4}	0.0102	59	0.0109

$$Q = 0.0077 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 9.6 \text{ m} \quad \lambda = 0.33 \quad \sum \frac{a}{\ell} = 0.870 \quad r = 0.70 \text{ m}$$

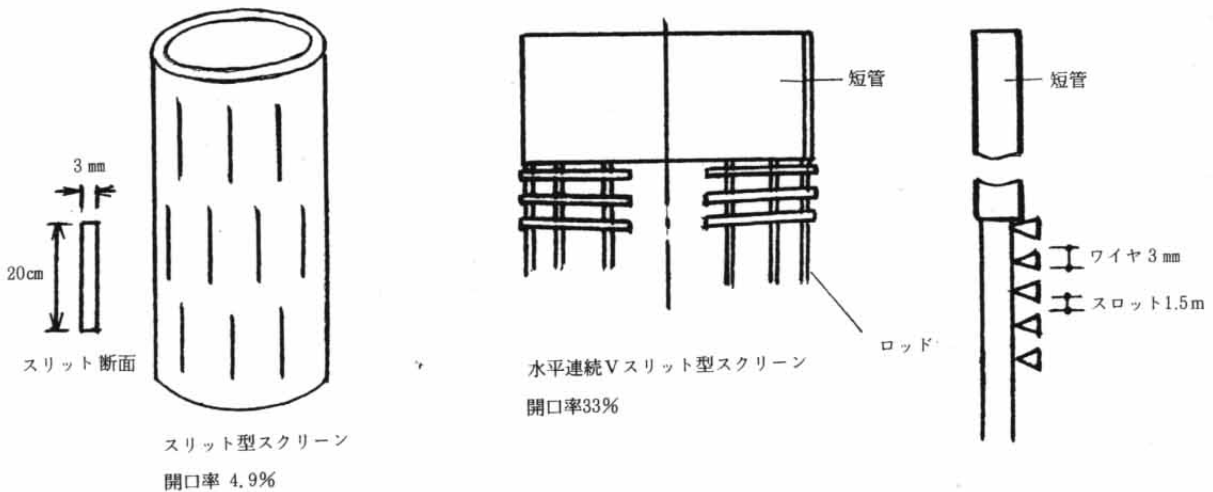
第13表 S60.1.22揚水試験の影響圏半径、透水係数

時間	井戸の水面 低下	$\frac{\lambda}{4Ht}$	$\frac{Q}{2\pi Hh}$	$\frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}}$	R	k
分	m				m	m/s
1	0.81	1.43×10^{-4}	1.20×10^{-4}	8.30×10^{-3}	8	0.0091
2	0.83	7.16×10^{-5}	1.17×10^{-4}	8.10×10^{-3}	11	0.0086
3	0.85	4.77×10^{-5}	1.14×10^{-4}	7.91×10^{-3}	14	0.0094
5	"	2.86×10^{-5}	"	"	18	0.0092
7	"	2.05×10^{-5}	"	"	21	0.0090
10	"	1.43×10^{-5}	"	"	25	0.0089
15	0.86	9.55×10^{-6}	1.13×10^{-4}	7.81×10^{-3}	30	0.0085
20	"	7.16×10^{-6}	"	"	34	0.0083
30	"	4.77×10^{-6}	"	"	42	0.0084
45	0.87	3.15×10^{-6}	1.12×10^{-4}	7.73×10^{-3}	52	0.0085

$$Q = 0.00585 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 9.6 \text{ m} \quad \lambda = 0.33 \quad \sum \frac{a}{\ell} = 0.870 \quad r = 0.70 \text{ m}$$



第15図 揚水前後の水頭の変化



第16図 スクリーンの事例

この透水係数の違いは、試験井戸の水面低下に問題があるものと思われる。試験井戸の地下水の流入口はスリットである。このスリットの開口率は報告書に書かれていないから不明であるが、5%未満のものであろう。

砂礫の空隙率は30~40%である。地下水の供給能力よりも、井戸へ入る流入能力が小さいので、井戸の水面低下は大きくなった。

水面低下が大きいと、透水係数は小さく算出される。

揚水試験をする場合は30%のような大きな開口率のスクリーンを使用することが望ましい。

井戸の場所より半径750mの円を描けば、伊勢湾に接する。観測井戸や周囲にあった井戸の水位から判断すると、海の方へ向って水頭が低下している。従って地下水は海の方へ向って流れている地域である。

このため観測井戸相互間の水位差より透水係数を求めることはできなかった。

結 論

1. 従来の井戸流量公式の補完

井戸の流量公式には前提条件がある。井戸は砂礫層の全部を貫通しており、地下水は砂礫層の全部分から自由に出入りできるという条件である。

しかしながら現実には、井戸は砂礫層の一部分に貫入するのみであり、地下水の流入も一部分に限られる。井戸の公式は前提条件が異なるので使えないのだが、実際には使っている。そのため井戸の設計には井戸の効率という係数を使って調節はしている。だがそれは過小になるか、過大になるか、係数のとり方はむずかしい。

その他にも前提条件はある。それは、砂礫層は同じ深さのものが大きな面積の広がりがあり、等方均質であるという仮定である。今回それは議論の対象から外す。

今回井戸が砂礫層の1部分貫入している場合、地下水の流量に関する関係式を補完して、現場の条件に適合できるようにした。

2. 透水係数を求める方法

普通よく行う方法は、観測井戸を2基以上設けて、水位観測より、透水係数を求める。この方法は最善である。しかしながら水位を要領よくつかめなかったり、外潮位の影響をうけて、透水係数を算出できるデータにならなかったりすることがある。今回著者は揚水井のみで、水位の低下を観測することにより、透水係数と影響圏半径を求める関係式を作成した。

この方法は次のとおりである。地下水を揚水すると井戸の水面は低下して、影響圏半径は広がる。地下水の流量に関する関係式と、もう一つの条件（揚水全量は砂礫の中に入っていた地下水と等しい）から、影響圏半径と透水係数を求めることができた。

この方法も欠点はある。地下水が井戸に流入するとき、流入口、即ちスクリーンの開口率により、井戸の水面低下は、大小が生ずる。この欠点を補うためには、スクリーンの開口率の大きなもの、砂礫の空隙率に近いものを使用することで、欠点を補うことができる。

著者の方法で揚水試験井戸の透水係数を求めることができたが、実用に供する本井戸が完成後、揚水試験を行なって透水係数を求めた。その結果、試験井戸のときの透水係数と、本井戸の透水係数を比べると、6倍程度の差異があった。

従って本井戸工事中に、実際必要とする計画流量を揚水する試験を行なって、試験と実際の差を補完することがぜひ必要である。

要 約

1. 井戸の中心、鉛直線をY軸、砂礫層の下の面との交

点を原点とし、水平方向にr軸をとる。任意の半径rにおける地下水位をy、もう一つ任意の半径Rにおける地下水位をHとすると

$$h = H - y = \frac{Q}{2\pi kH} \ln \frac{R}{r} \quad (4)$$

但しQは揚水推量、kは透水係数である。2基の観測井戸で水位観測すると、透水係数は算出できる。同時に次に示す方法で透水係数を求めることができる。

2. 揚水井戸で流量を観測すると同時に、井戸の水面低下を観測することにより

$$\frac{\lambda}{4tH} R^2 - \frac{Q}{2\pi Hh} \ln \frac{R}{r} - \frac{Q}{h} \times \frac{1}{\sum \frac{a}{\ell}} = 0 \quad (8)$$

$$k = \frac{\lambda R^2}{4Ht} \quad (7)$$

$$\text{これを变形すると } R = \sqrt{\frac{4kHt}{\lambda}} \quad (7')$$

(8)式及び(7)式より、影響圏半径及び透水係数を求めることができる。但し

λ : 砂礫の空隙率

t : 揚水時間

H : 滞水層の厚さ

R : 影響圏半径

r : 井戸の外側における半径 ($\sum \frac{a}{\ell}$ 算出する時、決定する)

$\sum \frac{a}{\ell}$: 作図によって求める数値

参考文献

1) 物部長穂：水理学 p482 丸善株式会社

2) 農業土木学会（1957）：農業土木ハンドブック p108 丸善株式会社

Studies of Pumping Ground Water for Irrigation

1. A method of finding permeability through gravel in the case of free surface ground water

Yoshikazu ISOJIMA

SUMMARY

When we pump up free surface ground water from a well, which flows from side of well, there is the following relation between optional radius and depth of ground water at two observation wells:

$$h = H_2 - y_1 = \frac{Q}{2\pi kH} \ln \frac{R_2}{r_1}$$

R_2, r_1 : optional radius.

H_2, Y_1 : depth of ground water at optional radius R_2 and r_1 .

Q : volume of pumping up ground water per second.

k : permeability of gravel.

\ln : natural logarithm based on e ($=2.718$)

h : difference of water level in two observation wells, during pumping.

In the case of surveying water levels at the pumping well, the farthest influential radius in the water level can be calculated from the following equation:

$$\frac{\lambda}{4Ht} R^2 - \frac{Q}{2\pi Hh} \ln \frac{R}{r} - \frac{Q}{h \sum \frac{a}{\ell}} = 0$$

Permeability of gravel can be calculated from the following equation:

$$k = \frac{\lambda R^2}{4Ht}$$

λ : radio of volume, between only ground water and gravel which contains ground water.

R : the farthest influential radius in the ground water level.

H : the hight of ground water at the farthest influential radius R .

t : pumping time.

r : radius of the well.

$\sum \frac{a}{\ell}$: ratio between the section and length of flowing pipe.

h : difference of water level in the pumping well before and after.