

東海大学 正会員 ○星田 義治
東海大学 正会員 市川 勉

不圧帯水層から地下水を揚水するとき、井戸枠の内外で水位の不連続（これを井戸ロスと呼ぶ）が現われる。この原因として考えられる井戸枠にあるストレーナの抵抗、井戸枠の近くの帯水層内の鉛直流の2つについて、それぞれの大きさを定量的に計算する。

井戸枠にあるストレーナを地下水が通過するときの抵抗による井戸ロスの大きさを求める式は、無次元表示すると、

$$Z_0 = \alpha \sqrt{g_s - g_w} \frac{2g_s + g_w}{3} \quad (1)$$

となる。定常状態では、 $Z_s = Z_0$ である。

ここに、 $Z_s = Q_s / (2\pi R H^2)$ 、 $Z_0 = Q_0 / (2\pi R H^2)$ 、 $Q_s = Q_1 + Q_2$ 、 $g_s = h_s / H$ 、 $g_w = h_w / H$ 、 $\alpha = \tau_w K / (R/H)$ 、 $K = \sqrt{G/f}$ 、 G ；重力の加速度、 f ；ストレーナの抵抗係数、 R ；透水係数、 Q_0 ；一定揚水量、 H 、 h_s 、 h_w 、 Q_1 、 Q_2 は、図1の不圧帯水層モデルの記号による。

井戸枠の近くの帯水層内の鉛直流による井戸ロスは、鉛直流を考慮したE²オーダーの近似解と鉛直流を考慮していないThiemの解を比べることで得られる。

E²オーダーの近似解は、無次元表示すると、

$$g_s = 1 + (EC) \log \frac{r}{R_m} + (EC)^2 \frac{r}{\delta^2} \left[\frac{Z^2}{2} + C_1 \left(\frac{Z^2}{2} - \frac{Z^2}{3} \right) + C_2 \left(\frac{Z^3}{3} - \frac{Z^4}{4} \right) \right] \quad (2)$$

$$EC = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4(2A/\delta^2 + \log R_m)Z_0}}{2(2A/\delta^2 + \log R_m)} \quad (3)$$

となる。ここに、

$$A = \frac{1}{6} + \frac{1}{12} C_1 + \frac{1}{30} C_2$$

であり、 C_1 および C_2 は、

$$\frac{4}{5\delta^2} \left(1 - \frac{1}{R_m^2} \right) \left(\frac{1}{45} + \frac{13}{1260} C_1 + \frac{1}{224} C_2 \right) + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{R_m^3} \right) \left(\frac{1}{12} - \frac{1}{30} C_1 + \frac{1}{60} C_2 \right) = 0$$

$$\frac{4}{5\delta^2} \left(1 - \frac{1}{R_m^2} \right) \left(\frac{5}{504} + \frac{1}{224} C_1 + \frac{1}{504} C_2 \right) + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{R_m^3} \right) \left(\frac{1}{30} - \frac{1}{60} C_1 + \frac{1}{105} C_2 \right) = 0$$

の連立方程式を解いて得られる。また、 $\delta = \tau_w / H$ 、 $\chi = r / \tau_w$ 、 $R_m = R / \tau_w$ であり、 r は、鉛直軸座標、他の記号は、前述したものと同一である。式(2)の $\chi = 1$ における解が、井戸枠のすぐ外側の水位を示す。一方、不圧帯水層におけるThiemの式は、無次元表示すると、

$$g_w = 1 - 2Z_0 \log R_m \quad (4)$$

式(4)は、根号内が負になると、意味を持たなくなるが、特別の場合として、水位が井底より低くなることを考えられる。

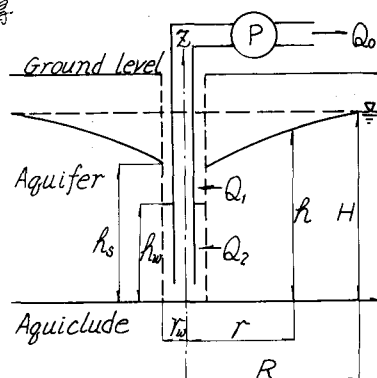


図1 不圧帯水層モデル

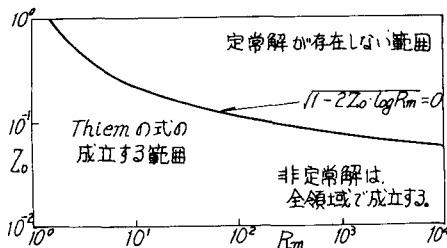
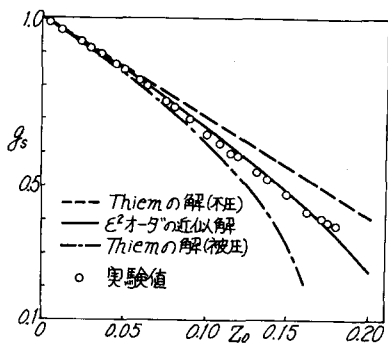


図3 Thiemの式の成立限界

式(4)の成
立範囲を図
2に示す。
図2は、 Z_0
が大きい時、
涵養半径 R_m
が小さくな
いと、定常
解が存在し



ないことを 図3 Thiemの式、近似解、実験値の比較($R_m=20$)
示している。式(3)も同様に、根号内が負になると、ECの意味を持
たなくなるが、Thiemの解と同様に、この正負は、 Z_0 と $\log R_m$ の関
係によって左右される。式(2)と式(4)および実験値の関係を図3
に示す。図4は、井戸内の水位 g_w と井戸ロス($g_s - g_w$)の関係を示した
ものである。図4では、実験値との整合性がやや悪いが、近似解と
野満の解とは、ほぼ一致している。式(1)の関係を図5に示す。式
(1)および図5に現われる無次元抵抗係数 α は、実験値で定められ
る。この値を図6に示す。これらの関係より、井戸ロスを構成する
井戸枠の抵抗と鉋直流のそれぞれの大きさを決定する要素は、涵養
半径 R 、抵抗係数 α と汲み出し量 Z_0 の3つであることがわかる。式
(2)と式(4)では、 $R_m > 50$ ぐらいで $g_s \approx g_w$ となり、井戸ロスは、
鉋直流の影響で存在しなくなるので、すべて井戸枠の抵抗による
ものと考えられる。 R_m が大きい時に、定常状態が発生するため
には、 Z_0 が小さいことが必要であり、 Z_0 が小さいときは、井戸内
の水位が下がっても帯水層内の水面勾配がゆるやかになっている
ので、鉋直流は発生しにくいものと思われる。このことを図7に
示す。

いま、一例として、開孔率9%、汲み出し量 $Z_0=0.12$ 、涵養半
径 $R_m=20$ の場合について、抵抗および鉋直流による井戸ロスの大
きさをそれぞれ計算する。図6より、 $Y=9\%$ 、 $Z_0=0.12$ で $\alpha=0.585$
となるので、 $Z_0\alpha=0.0702$ となる。次に、図4より、 $Z_0=0.12$ に対
応する $g_s \approx$ を求めると、図5より、 $g_w =$ が求まり、井戸
ロス $g_s - g_w =$ となる。また、式(4)と(2)より、それぞれ、
 $g_s \approx 0.53$ 、 $g_w = 0.6$ となり、井戸ロスは、 $g_s - g_w = 0.07$ となる。
この例では、鉋直流による井戸ロスは、抵抗による井戸ロスより
も小さいので、抵抗による井戸ロスの中に含まれてしまうことに
なる。

参考文献 1) 星田清野市、前原：揚水における井戸枠の抵抗の評価に関する一
(一)土木学会論文報告集、第275号、1978年7月、2) T. NOMITSU; An
Advance in the Theory of Wells, 1. Steady States; 日本天文
学協会地球物理学集報12, 1935, pp.157-171.

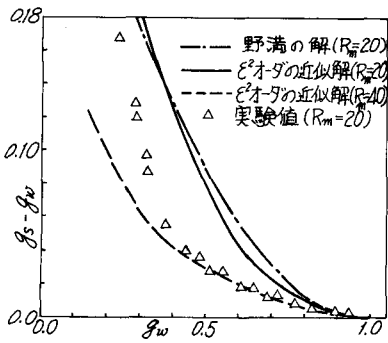


図4 井戸内の水位と井戸ロスの関係

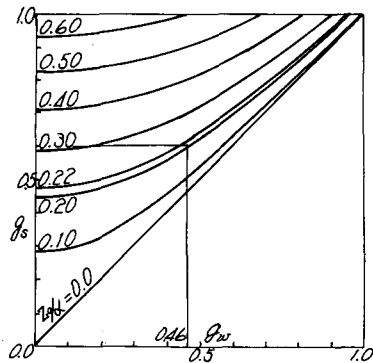


図5 g_s と g_w の関係

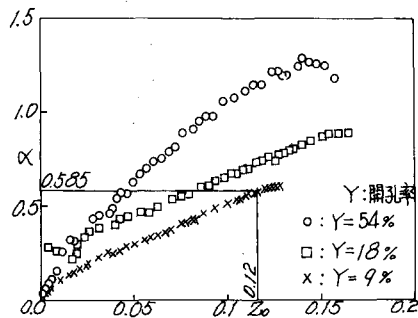


図6 無次元抵抗係数 α と無次元汲み出し量 Z_0 の関係

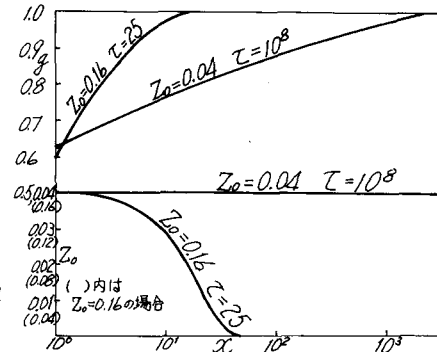


図7 g_w と Z_0 の半径方向の変化