

干拓による地下水位低下について(II)

松原 茂*・武政 剛弘**
薦田 広章**

Drawdown of Groundwater Table due to Poldering (II)

by

Shigeru MATSUBARA

(Kyushu Kyoritsu University)

Takehiro TAKEMASA

(Department of Civil Engineering)

Hiroaki KOMODA

(Department of Civil Engineering)

Abstract

When an inland lake is reclaimed, the phreatic water table in the unconfined aquifer above the semi-pervious layer is lowered over the area of the newly formed polder. The lowering has a large influence on the artesian water level. This water table will drop, with the result that outside the polder water from the unconfined aquifer percolates downward through the semi-pervious layer, while inside the polder artesian water percolates upwards through this layer, appreciably increasing the amount of drainage water to be pumped out. This results in lowering of the phreatic water table outside the polder.

After due consideration of the groundwater flow, the authors devise the artificial means to prevent the lowering of the phreatic water table outside the polder with a two-layered leaky artesian aquifer.

1. まえがき

干拓地造成の際、背後地の地下水位は承水路の水位によってみずから決まってくるように考えられている。しかし、大きな湖水の干拓に際しては、湖水ができるにはそれなりの地質構造が存在することを念頭におく

必要がある。設計基準通りの承水路を設けるだけでは、背後地地下水の水位低下や枯渇をきたし、農業面だけではなく、日常生活の面においても影響が大きく、社会問題化することがある。この際、地下水位低下の原因を明らかにしない限り、その対策は困難である。

昭和57年5月6日受理

*九州共立大学

**土木工学科

こうした現象の生ずる原因を地下構造に求め、ごく簡単な地下構造の場合についてはすでに報告した¹⁾。

大きな湖水の場合、その地質構造は幾重もの被圧帯水層が半不透水層に挟まれて存在すると考えられる。本報文では、このような場合の水理状況を解明し、背後地地下水位低下の防止策について考察した。

2. 干拓地および背後地の地質構造と定常地下水流

Fig. 1 は干拓地 (湖内) および背後地 (湖外) の地質構造、上下二層の被圧水頭および定常地下水流の状況を示した図である。湖底直下の半不透水層の厚さは周辺の半不透水層の厚さより小さいのが普通である。逆に言えば、このような場所こそ湖水ができるのである。

被圧帯水層の厚さは湖の内外を問わず一様で、層内では水平方向の流動のみを考える。半不透水層では垂直方向の流れのみを考え、その鉛直流動抵抗を c で表わす。ここに、半不透水層の厚さを d 、鉛直方向の透水係数を k とすると $c = d/k$ となる。

湖面が干拓によって h だけ下げられると、周辺の自由地下水位は影響を受けるが、仮に干拓以前と同じ水位に人為的に保たれたとしたときの定常地下水流について考察する。この時の水理状況を克明にすることにより、逆にこのような状態を維持するための方策について考える。

3. 基礎方程式とその解

Fig. 1 のような半径 R の円形干拓地に対する連続方程式は、 r を円形干拓地の中心からの距離とすると、干拓地の内部と外部とに分けて、それぞれ次のように示される。

(a) 干拓地内部 ($0 < r < R$) に対して、

上層被圧帯水層に関して、

$$\frac{d^2 S_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS_1}{dr} - S_1(a_1' + \beta_1) + S_2\beta_1 + ha_1' = 0 \quad (1)$$

下層被圧帯水層に関して、

$$\frac{d^2 S_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS_2}{dr} + (S_1 - S_2)a_2 = 0 \quad (2)$$

となる。境界条件は次のようになる。

$$r=0 \text{ で } \frac{dS_1}{dr} = \frac{dS_2}{dr} = 0 \quad (3)$$

(b) 干拓地外部 ($R < r < \infty$) に対して、

上層被圧帯水層に関して、

$$\frac{d^2 S_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS_1}{dr} - S_1(a_1 + \beta_1) + S_2\beta_1 = 0 \quad (4)$$

下層被圧帯水層に関して、

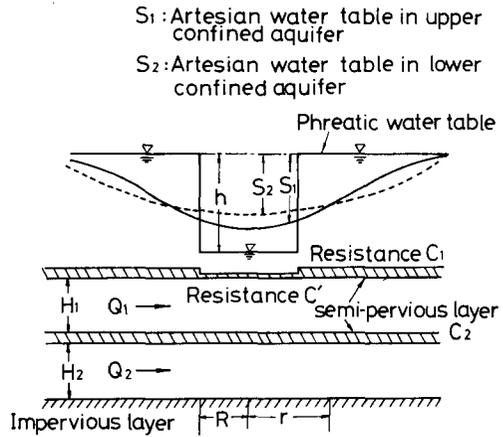


Fig. 1 Steady flow to a polder in a two-layered leaky artesian aquifer.

$$\frac{d^2 S_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS_2}{dr} + (S_1 - S_2)a_2 = 0 \quad (5)$$

となる。境界条件は次のようになる。

$$r = \infty \text{ で } S_1 = S_2 = 0 \quad (6)$$

ここに、 S_1, S_2 はそれぞれ上層および下層の被圧地下水頭の低下 (drawdown) である。定数 a_1', a_1, a_2 および β_1 は次式で示される。

$$a_1' = \frac{1}{k_1 H_1 c_1} \quad (7 \cdot 1)$$

$$a_1 = \frac{1}{k_1 H_1 c_1} \quad (7 \cdot 2)$$

$$a_2 = \frac{1}{k_2 H_2 c_2} \quad (7 \cdot 3)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{k_1 H_1 c_2} \quad (7 \cdot 4)$$

ここに、 H_1, H_2, k_1, k_2 はそれぞれ上層および下層の被圧帯水層の厚さならびに透水係数である。 c_1, c_2, c_1' はそれぞれ上層、下層、湖底直下の半不透水層の鉛直流動に対する抵抗である。

与えられた境界条件(3)および(6)のもとで、連立微分方程式を解き、解 S_1, S_2 を求める²⁾。上層および下層の被圧地下水頭の低下 S_1, S_2 より、中心方向に向うこれらの層の流量 Q_1, Q_2 を求めることができる。

(a) 干拓地内部 ($0 < r < R$) に対して、

$$S_1 = h + a_1 I_0(\sqrt{\lambda_1} r) - a_2 I_0(\sqrt{\lambda_2} r) \quad (8)$$

$$S_2 = h - a_1 \frac{a_2}{\lambda_1 - a_2} I_0(\sqrt{\lambda_1} r) - a_2 \frac{a_1}{a_2 - \lambda_2} I_0(\sqrt{\lambda_2} r) \quad (9)$$

$$Q_1 = -2\pi k_1 H_1 \{ a_1 \sqrt{\lambda_1} r I_1(\sqrt{\lambda_1} r) - a_2 \sqrt{\lambda_2} r I_1(\sqrt{\lambda_2} r) \} \quad (10)$$

$$Q_2 = 2\pi k_2 H_2 \left\{ a_1 \frac{a_2}{\lambda_1 - a_2} \sqrt{\lambda_1} r I_1(\sqrt{\lambda_1} r) \right\}$$

$$+ a_2 \frac{a_2}{a_2 - \lambda_2} \sqrt{\lambda_2} r I_1(\sqrt{\lambda_2} r) \} \quad (11)$$

で示される。

(b) 干拓地外部 ($R < r < \infty$) に対して、

$$S_1 = b_1 K_0(\sqrt{\lambda_1} r) - b_2 K_0(\sqrt{\lambda_2} r) \quad (12)$$

$$S_2 = -b_1 \frac{a_2}{\lambda_1 - a_2} K_0(\sqrt{\lambda_1} r) - b_2 \frac{a_2}{a_2 - \lambda_2} K_0(\sqrt{\lambda_2} r) \quad (13)$$

$$Q_1 = 2\pi k_1 H_1 \{ b_1 \sqrt{\lambda_1} r K_1(\sqrt{\lambda_1} r) - b_2 \sqrt{\lambda_2} r K_1(\sqrt{\lambda_2} r) \} \quad (14)$$

$$Q_2 = -2\pi k_2 H_2 \left\{ b_1 \frac{a_2}{\lambda_1 - a_2} \sqrt{\lambda_1} r K_1(\sqrt{\lambda_1} r) + b_2 \frac{a_2}{a_2 - \lambda_2} \sqrt{\lambda_2} r K_1(\sqrt{\lambda_2} r) \right\} \quad (15)$$

で示される。ここに、 I_0 、 K_0 はそれぞれ 0 階の第 1 種、第 2 種の変形 Bessel 関数、 I_1 、 K_1 はそれぞれ 1 階の第 1 種、第 2 種の変形 Bessel 関数である。定数 λ_1 、 λ_2 、 λ_1 および λ_2 は次式で示される。

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \frac{1}{2} \left\{ (a_1 + a_2 + \beta_1) \pm \sqrt{(a_1 + a_2 + \beta_1)^2 - 4a_1 a_2} \right\} \quad (16)$$

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \frac{1}{2} \left\{ (a_1 + a_2 + \beta_1) \pm \sqrt{(a_1 + a_2 + \beta_1)^2 - 4a_1 a_2} \right\} \quad (17)$$

(8)~(15)式中の a_1 、 a_2 、 b_1 および b_2 は積分定数で、干拓地内外で求めた次の値が $r=R$ で一致するという境界条件より決定される。

$r=R$ で、

$$S_1 = S_1 \quad (18 \cdot 1)$$

$$S_2 = S_2 \quad (18 \cdot 2)$$

$$Q_1 = Q_1 \quad (18 \cdot 3)$$

$$Q_2 = Q_2 \quad (18 \cdot 4)$$

次に、湖底 (干拓地域) 直下の半不透水層が消滅している特殊な場合 ($c'=0$) について考える。この場合、(1)式は存在せず、(2)式の S_1 は h で置き換えられる。(3)、(4)式はそのままである。干拓地外部 ($R < r < \infty$) に対しては、(12)~(15)式はそのまま用いることができる。干拓地内部 ($0 < r < R$) に対しては、次のような解になる。

$$S_1 = h \quad (19)$$

$$S_2 = h - a I_0(\sqrt{a_2} r) \quad (20)$$

$$Q_2 = 2\pi k_2 H_2 a \sqrt{a_2} r I_1(\sqrt{a_2} r) \quad (21)$$

(20)、(21)式中の a および(12)~(15)式中の b_1 、 b_2 は積分定数で、干拓地内外で S 、 Q が一致するという境界条件より決定される。

$r=R$ で、

$$S_1 = h \quad (22 \cdot 1)$$

$$S_2 = S_2 \quad (22 \cdot 2)$$

$$Q_2 = Q_2 \quad (22 \cdot 3)$$

4. 解より得られる諸量の算出

干拓地内部において、 $r=0$ (円形干拓地の中心) から任意の r までの全排水量 ${}_0L_r$ は(8)式より計算され、これはまた $r=r$ での Q_1+Q_2 の値に等しいことも証明できる。

$$\begin{aligned} {}_0L_r &= Q_1 + Q_2 \\ &= \int_0^r 2\pi r \frac{h - S_1}{c_1} dr \\ &= \frac{2\pi}{c_1} \left\{ -\frac{a_1 \sqrt{\lambda_1} r}{\lambda_1} I_1(\sqrt{\lambda_1} r) + \frac{a_2 \sqrt{\lambda_2} r}{\lambda_2} I_1(\sqrt{\lambda_2} r) \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

一方、干拓地外部では、任意の r から $r=\infty$ までの上層の半不透水層を通しての自由地下水の下層被圧層への漏水量は(10)式より計算され、これを ${}_rL_\infty$ で表わすと、これも $r=r$ での Q_1+Q_2 に等しいことも証明できる。

$$\begin{aligned} {}_rL_\infty &= Q_1 + Q_2 \\ &= \int_r^\infty 2\pi r \frac{S_1}{c_1} dr \\ &= \frac{2\pi}{c_1} \left\{ \frac{b_1 \sqrt{\lambda_1} r}{\lambda_1} K_1(\sqrt{\lambda_1} r) - \frac{b_2 \sqrt{\lambda_2} r}{\lambda_2} K_1(\sqrt{\lambda_2} r) \right\} \quad (24) \end{aligned}$$

(23)式で $r=R$ とすると、 ${}_0L_R$ は干拓地内の全排水量を表わしている。一方、(24)式で $r=R$ とすると、 ${}_rL_\infty$ は自由地下水の全漏水量を示すことになる。干拓地内外の境界 $r=R$ では Q_1 、 Q_2 が一致することより、当然次式が成り立つことも判る。

$${}_rL_\infty = {}_0L_r \quad (25)$$

干拓のため湖面水位を下げることにより、被圧帯水層内に流動が起り、湖中心に向って被圧水頭の低下を招来し、この結果自由地下水の半不透水層を通しての鉛直流動が起る。この鉛直流動の漏水量を周囲から流れ込む自由地下水で賄うことができれば、自由地下水の水位低下は起らない。もし、この量が不足であれば、その不足量を給水によって補えば、自由地下水の水位低下を防ぐことが可能であり、上記のような定常状態を実現されることができると考えられる。

次に、上層の被圧帯水層から下層の被圧帯水層への漏水量について、干拓地内部 ($0 < r < R$) では $r=0$ から $r=r$ までの漏水量をマイナスの符号を付けて $-{}_0L_r$ で、干拓地外部 ($R < r < \infty$) では $r=r$ から $r=\infty$ までの漏水量を ${}_rL_\infty$ で表わす。 ${}_0L_r$ は(11)式の Q_2 と、 ${}_rL_\infty$ は(15)式の Q_2 と結びついていることも証明できる。

${}_0L_r$ 、 ${}_rL_\infty$ は次式で示される。

$$\begin{aligned} {}_0L_r (= Q_2) &= \int_0^r 2\pi r \frac{S_1 - S_2}{c_2} dr \\ &= \frac{2\pi}{c_2} \left\{ \frac{a_1}{\lambda_1 - a_2} \sqrt{\lambda_1} r I_1(\sqrt{\lambda_1} r) \right\} \end{aligned}$$

$$+ \frac{a_2}{\alpha_2 - \lambda_2} \sqrt{\lambda_2} r I(\sqrt{\lambda_2} r) \} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} rL_\infty (= Q_2) &= \int_r^\infty 2\pi r \frac{S_2 - S_1}{c_2} dr \\ &= -\frac{2\pi}{c_2} \left\{ \frac{b_1}{\lambda_1 - a_2} \sqrt{\lambda_1} r K_1(\sqrt{\lambda_1} r) \right. \\ &\quad \left. + \frac{b_2}{\alpha_2 - \lambda_2} \sqrt{\lambda_2} r K_1(\sqrt{\lambda_2} r) \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

5. 実例計算

Fig. 1 の場合につき数値計算例を次に示す。下記の数値を用いた。h = 8 m, H₁ = H₂ = 10 m, k₁ = k₂ = 10⁻⁵ m/sec, 半不透水層の鉛直方向の透水係数を上層、下層ともに 5 × 10⁻⁹ m/sec とし、上層の半不透水層の厚さは湖内では 1 m, 湖外では 2 m, 下層の半不透水層の厚さは湖の内を外を問わず一律に 2 m とすると、

$$c_1 = c_2 = 0.4 \times 10^{-9} \text{ sec} \quad (28)$$

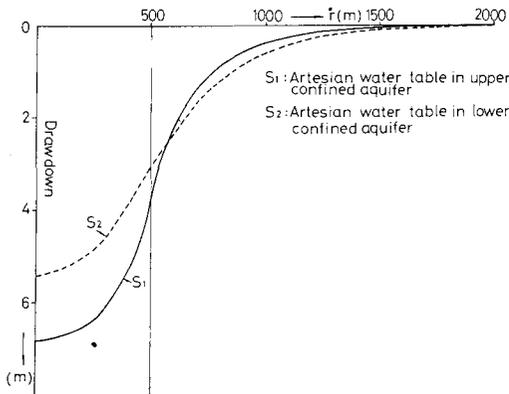


Fig. 2 Drawdown of the piezometric level in each semi-confined aquifer.

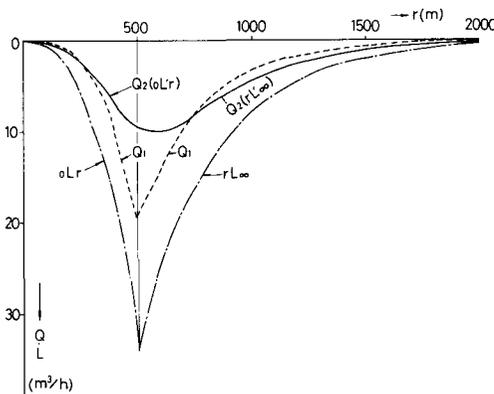


Fig. 3 Discharge and vertical leakage.

$$c'_1 = 0.2 \times 10^9 \text{ sec} \quad (29)$$

となる。円形干拓地の半径 R を 500 m とする。このときの上下層被圧帯水層内の湖中心へ向うの被圧水頭の低下 S₁, S₂ を Fig. 2 に示す。排水流量 Q₁, Q₂ (Q₂ は湖内では ${}_0L_r$ に等しく、湖外では ${}_rL_\infty$ に等しい), 自由地下水層と被圧地下水層間の漏水量 ${}_0L_r$, ${}_rL_\infty$, 上層の被圧地下水層と下層の被圧地下水層間の漏水量 ${}_rL_\infty$, ${}_rL_\infty$ を r の関数として Fig. 3 に示した。

r = R = 500 m では Q₁ = 24.47 m³/hr, Q₂ = 9.45 m³/hr となり, Q₁ = Q₂ = 33.92 m³/hr が湖内での全排水量 ${}_0L_R$ = 33.92 m³/hr に一致するとともに、湖外での自由地下水の被圧帯水層への漏水量 ${}_rL_\infty$ = 33.92 m³/hr に等しい。

湖底直下の半不透水層が消滅している場合は c' = 0 となり、諸定数を上記の値と同様とすると、(14), (15), (21)式より (Q₁ + Q₂)_{r=R=500m} = 67.37 m³/hr が得られ、ほぼ上記の 2 倍となる。湖外の自由地下水の下層への漏水量 ${}_rL_\infty$ もほぼ上記の 2 倍とみてよい値を示している。

6. 結論

背後地の自由地下水の涵養は雨水、カンガイ水、河川からの流入などによるものが種々考えられるが、いま被圧帯水層への自由地下水の流入量の目安として、Fig. 1 の場合を考慮して、r = 500 m, 1300 m の所で自由地下水深がそれぞれ 8 m, 9 m と仮定し放射流 (radial flow) を考える。自由帯水層の透水係数を 10⁻⁴ m/sec とすると、中心に向う全流入量 Q₀ は自由地下水理論により Q₀ = 20.12 m³/hr となる。前記の r = R = 500 m での Q₁ + Q₂ との差 (Q₁ + Q₂)_{r=R=500m} - Q₀ = 13.80 m³/hr だけ自由地下水層は毎時間当り水を失うことになり、その結果自由地下水位は下り定常流は実現し得ない。

Fig. 3 の ${}_rL_\infty$ 曲線より、この差 13.80 m³/hr の量は r = 500 m から r = 650 m の間の自由地下水層から被圧層への漏水量に等しいことを考えると、この間に 150 m 幅の承水路 (ここでは水を供給するという意味からむしろ給水路という方が妥当である) を設け、13.80 m³/hr の水量を給水すれば定常流の実現が可能であると、一応の目安として考えることができる。

湖底直下の半不透水層が消滅している c' = 0 の場合、同様に不足水量を求めると、67.37 - 20.12 = 47.25 m³/hr となり、Fig. 3 の ${}_rL_\infty$ 曲線より、r = 500 m から 880 m まで幅 380 m の給水路が必要であることがわかる。上記の二例より、湖底にある鉛直流に対する抵抗が大

きくなるにつれて承水路の幅が小さくてよいことも推定できる。

干拓地ならびに周辺背後地の地質構造と帯水層の水利状況を支配する定数が決定されると、干拓地内の計画水位に従って承水路の幅を適当に決めることにより、周辺地下水の水位低下を防ぐことができることをここに示した。

7. 参考文献

- 1) 松原, 武政, 薦田 “干拓による地下水位低下について” 長大工研究報告第17号 昭和56年7月
- 2) Huisman, L. “Groundwater recovery” Macmillan (1972) p. 143~145