

九州電力 〇正員 長野 益徳
九州大学 “ 神野 健二
“ “ 上田 年比古

1. まえがき 土木構造物の基礎工事における地下水位低下のための揚水は近接井戸の井戸枯水や海岸付近での塩水化などの被害と反ぼすことがあり、揚水量も最小にして所要の地下水位低下の目的を果たすことが望ましい。本報ではこのような最適揚水問題に、さきに求めた最適化手法を用いて解析したものである。

2. 基礎式

(2-1) 流水の場の基礎式および適用地の境界条件

基礎工事等では多くの場合、不圧地下水が対象となり流水の場は準一様流の非線形方程式で表わされるが、この場合には最適化が非線形となり取り扱いが複雑になることから、ここでは水平不透水層上の不圧地下水層について近似的に地下水の流動断面厚さに平均地下水深 b (一定とする)を用いて、次のような線形化した式を用いる。

$$b \left\{ \partial(R \partial h / \partial x) / \partial x + \partial(R \partial h / \partial y) / \partial y \right\} + R(x, y, t) - \sum_{m=1}^M Q_m \delta(x - \xi_m) \delta(y - \eta_m) = \lambda \partial h / \partial t \quad \cdots (1)$$

R : 地下水深, Q_m : 井戸 m の揚水量(揚水量 $\pm$), $\delta(x), \delta(y)$: デルタ関数, (ξ_m, η_m) : 井戸 m の座標, $R(x, y, t)$: 浸透追加量。図-1に適用地の概略図、図-2に掘削部(横220m, 縦180m, 深さ8.4m)の土質柱状図を示す。境界 $a \sim b$, $c \sim d$ 間は計算領域設定のための境界線であって、ここでは図-2の10.3m厚さのシルト層(不透水層)から上に割った水位8.4mを一定水位として与えた。また海岸線 $b \sim c$, $d \sim e \sim f$ は塩水楔の侵入も観測されてい、掘削にともないさらに塩水楔の進行も考えらるが、ここでは簡単のためこれらの境界でも一定水位8.4m(平均海水位)を与えた。透水係数 R を領域内で一定値 $R = 0.03 \text{ cm/sec}$, 空げき率 $\lambda \leq 0.3$, また $b = 8.4 \text{ m}$ とした。揚水はウェルポイント工法で行なわれているが、ここでは簡単のため図-1に示すような・印の揚水井($M=16$)に代表させた。

図-1 計算領域(・印は揚水井)

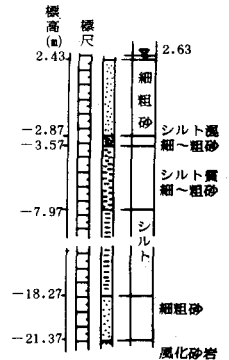


図-2 掘削部土質柱状図

(2-2) 有限要素法による基礎式の離散化 (1)式は有限要素法により, $Sh + Q - R + Th = 0 \quad \cdots (2)$ の連立常微分方程式となる。ここに S, T : 係数行列, $h, \dot{h}$: 不透水層上面から上に割った節点の水深およびその時間微分ベクトル, Q : 揚水量列ベクトル, R : 浸透追加量列ベクトルである。定常状態の場合には(2)式より,

$$Sh + Q - R = 0 \quad \cdots (3)$$

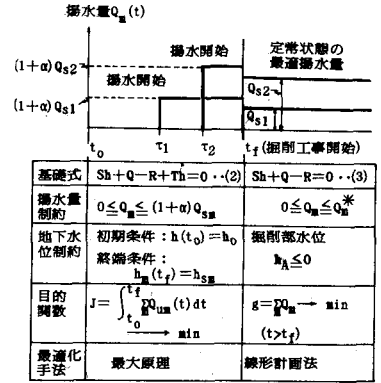
3. 最適問題の定式化 実際の作業にあたっては現場の実状あるいは工期等に合わせ種々の地下水位低下工法が考えられるが、ここでは次の場合を考えて最適揚水問題を解析した。すなわち、周辺地下水と同じ水位を維持している掘削予定部分の地下水位を、その周辺に配列された井戸により掘削開始時刻(t_0)に所定の水位 h_0 (ここでは0mとする)まで低下させる非定常の地下水状態の場合、およびこれに続いて行なわれる掘削開始および掘削部内での工事期間中に所定の地下水位 $h_0 = 0$ を維持するように揚水井で揚水を継続する定常状態の場合について各井戸の最適揚水の問題を考える。まず①掘削開始時刻 t_0 以後の地下水の定常状態での各井戸の最適揚水量については、著者がさきに求めた最適取水に関する線形計画法を参考にし、各井戸の揚水量の総和:

$$Q = \sum_{m=1}^M Q_m \quad \cdots (4)$$

を最小にする各井戸の揚水量 Q_{sm} を求めた。次に②掘削開始時刻 t_0 以前の非定常の地下水状態についての最適揚水問題では、各井戸の揚水量はそれぞれ与えられた一定の値 Q_{um} をととし、各井戸の揚水開始時刻を t_m として、各井戸の t_m までの揚水総量の総和: $J = \sum_{m=1}^M \int_{t_m}^{t_f} Q_{um} dt$ or $J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{m=1}^M Q_{um} dt \quad \cdots (5)$

(α)は揚水開始前のある時刻とし、 t_0 から t_m 間は $Q_{um}=0$)を最小にするように t_m を求める最適問題として解いた。以上の揚水計画のフローを表-1に示している。

表-1 最適揚水計画のフロー



[h_{sm} : 定常時の最適揚水量 Q_{sm} で揚水するときの井戸 m 内の地下水位]

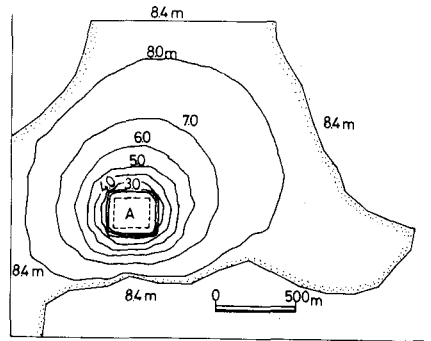


図-3 定常状態での最適揚水時の地下水位分布

表-3 揚水開始時刻と総揚水量の算定結果

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
m	$Q_{sm} (m^3/日)$	揚水開始(日)	揚水時間(日)	$\int Q_{um}(t) dt (m^3)$
1	445.82	99.0	171.0	7.624×10^4
2	241.06	135.0	135.0	3.254 "
3	279.94	99.0	171.0	4.787 "
4	526.18	267.0	3.0	0.158 "
5	543.02	267.0	3.0	0.163 "
6	371.95	174.0	96.0	3.571 "
7	357.70	132.0	138.0	4.936 "
8	531.36	144.0	126.0	6.695 "
9	528.77	267.0	3.0	0.159 "
10	281.23	144.0	126.0	3.543 "
11	226.80	90.0	180.0	4.082 "
12	410.83	99.0	171.0	7.025 "
13	348.62	93.0	177.0	6.171 "
14	221.62	84.0	186.0	4.122 "
15	226.80	135.0	135.0	3.062 "
16	368.06	90.0	180.0	6.625 "
計	—	—	—	65.977 "

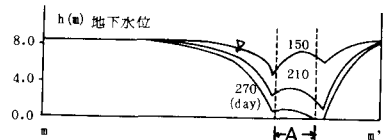


図-5 図-1中の mm' 線にそう地下水位変化

4. 計算例

(4-1)線形計画法による定常時の最適揚水量¹⁾ 表-2には掘削部Aの水位が $0m$ 以下で揚水能力(ポンプ等の制約)が Q_m^* ($m=1,2,\dots,M$)内の範囲で、揚水総量が最小になるような各井戸の揚水量を示している。また図-3はこの場合の地下水位分布の計算結果である。

(4-2) 最大原理による揚水開始時刻の計算結果²⁾ 表-3は $t_0=0$, $t_f=270$ 日とした場合の各揚水井の揚水開始時刻 t_m を求めたものである。この場合、非定常時の揚水量 Q_m は定常揚水時の最適揚水量(Q_{sm})の α 増($\alpha=0.5$)、すなわち $(1+\alpha)Q_{sm}$ としている。

表-3中、(3)欄は各揚水井の揚水開始時刻(θ)、(4)欄は揚水継続時間(θ)、(5)欄は掘削開始時刻(t_f)までの各井戸の揚水総量および全井戸からの揚水総量を示している。図-4、5は地下水位の時間変化で、各井戸で揚水開始時刻が異なるために、地下水位の低下もそれに依りて変化してゆく様子を示している。なお、 $t_f(270$ 日)に地下水位が所定の水位($h_A=0m$)に一致していない部分があるが、これは最適値問題の計算きざみとさらに小さくすれば消えてくる誤差と考えている。

5. おすび

以上の例で地下水位低下開始から掘削開始までと、掘削開始後のそれぞれ水の期間における揚水量最小の解を求める方法を示したが、このような方法により過剰揚水を防ぎながら掘削部の水位を所定の水位まで下げる事が可能であるものと考えている。

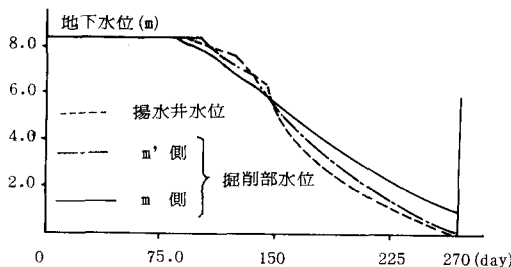


図-4 地下水位低下算定結果の例

[揚水井水位は図-1中の縦断線 mm' 上の揚水井内水位、掘削部水位は掘削部Aの境界線と mm' 線の交点位置での水位]

参考文献

- 1) 上田・神野・長野, 広領域地下水からの最適取水について, 土木学会論文集, 才283号, 1979.
- 2) 長野・神野・上田, 被圧帯水層における非定常時の最適取水の研究, 土木学会西部支部講演会前刷(昭54年2月)