

III-A 295

止水壁を含む領域での揚水及び注水による地下水位最適制御

○ 佐藤工業（株） 正会員 北野 祐介
 佐藤工業（株） 正会員 金子 典由
 中央大学 正会員 川原 陸人

1. はじめに

近年、大深度地下構造物の施工が盛んに行われている。それらの掘削工事を進めるにあたっては地下水対策が必要不可欠となってきている。大深度の施工においては、ディープウェルを併用して地下水位を低下させる場合もある。しかし、ディープウェルにより地下水位を低下させる操作は周辺地盤の地下水位にも影響を与えるので、細心の注意を要する。そこで本研究では浸透流 FEM 解析を基にした最適制御理論を適用することによって地下水位を制御する。この制御では該当地域は所定の水位に低下させ、周辺は現状水位を維持できるようなディープウェルでの揚水量あるいは注水量を求める。最適制御手法としては、Sakawa-Shindo 法、Flecher-Reeves 法、Gradient 法、Dynamic Programming 法など多くの手法が適用されてきている。本研究では、アルゴリズムが比較的簡単であり、更に収束性が高いとされている Sakawa-Shindo 法を適用して計算を行う。また、一部の止水壁に開口部がある場合の最適制御も行う。

2. 基礎方程式

地下水の流れは本来三次元的な流れではあるが、水平方向の流れが卓越していると仮定して、本研究では鉛直方向の流れを無視し、二次元平面問題として取り扱う。本解析に用いた非定常浸透流の支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q + S_t \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここで h 、 k 、 S_t はそれぞれ全水頭、透水係数、貯留係数を表す。また Q は流入・流出量であり、 $+$ は揚水、 $-$ は注水を表す。 x 、 y 、 t はそれぞれ空間関数、時間関数とする。

3. 止水壁のモデル化

解析領域内において、止水壁の部分では動水距離が長くなるため水位が不連続となる。この流れを止水壁の長さだけ迂回させるように一次元要素でモデル化し、更に平面二次元モデルに重ね合わせることで止水効果を表現する。一次元の浸透流の支配方程式を以下に示す。

$$T_p \frac{\partial}{\partial s} \left(k \frac{\partial h}{\partial s} \right) = S_t \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 T_p は止水壁の長さに関係があると思われる係数で、以後これを止水効果係数と呼ぶこととする。また s は

空間関数である。

4. 最適制御理論

ここでの最適制御理論とは、ある場所（目的点）の地下水位を目標の状態（目標水位）にするための操作点（ディープウェル）における最適な操作量（揚水あるいは注水量）を求める方法論である。評価関数は、設定した目的点の状態量と目標量との残差二乗和で示される以下の様な汎関数で定義され、この評価関数が最小となるような操作量を求めるものである。このような状態を最適状態とする。

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\{h(t)\} - \{h^*(t)\}]^T [Q] \{h(t) - h^*(t)\} + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\} dt \quad (3)$$

ここで、 u 、 h 、 h^* はそれぞれ操作点における操作量ベクトル、目的点における水位の状態量ベクトル、目標量を表す。つまり、 h が h^* になった場合が最適状態であり、評価関数の第 1 項が最小値を示す様に設定される。また、 t_0 、 t_f はそれぞれ制御始端時間、制御終端時間を表す。また $[Q]$ 、 $[R]$ はこの二つの項に対する重みづけを表す量である。 $[R]$ をゼロとすれば制御のために必要なコストを全く考えない最適な制御量が求まることとなる。本研究では、最適制御手法として Sakawa-Shindo 法を適用する。

5 数値計算例

本解析において用いた透水係数は $k = 2.5 \times 10^{-3} [m/s]$ 、止水効果係数は $T_p = 0.02$ 、また一部の開口部の止水効果係数は $T_p = 0.20$ として計算を行った。

CASE 1

止水壁内で掘削工事を行うことを想定した図-1 に示すような止水壁を含む領域において、止水壁の内側（X 印部）の目的水位を現状の地下水位より -2.0 m とする最適な揚水量を最適制御理論（Sakawa-Shindo 法）に従って求める。

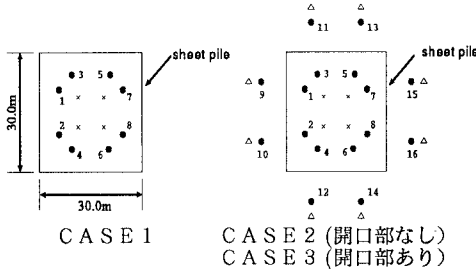
CASE 2

止水壁の内側（X 印部）の目的水位を現状の地下水位より -2.0 m、外側（△印部）を現状の地下水位と同一とする最適な揚水及び注水量を求める。

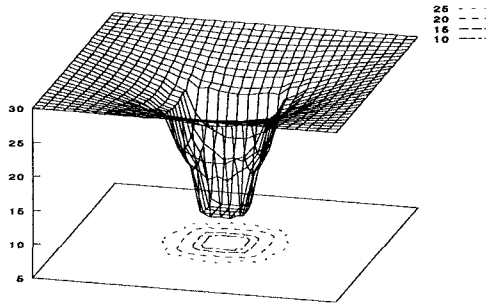
CASE 3

止水壁に一部開口部がある場合で、図-1（CASE 3）の左上の部分の止水効果係数の値が他の係数より 10

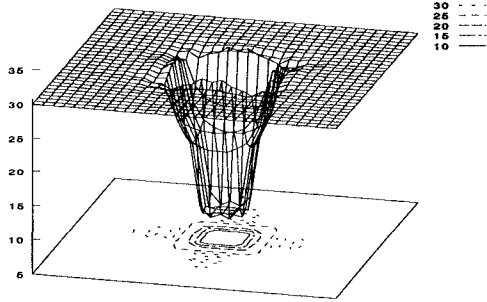
倍大きいケースについての制御を試みる。止水壁の内側の目的水位を現状の地下水位より -2.0 m 、外側を現状の地下水位と同一、とする最適な揚水及び注水量を求める。CASE 1～3のポンプの配置を以下に示す。



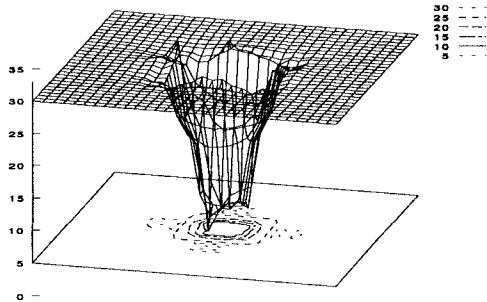
図一 1 ポンプ配置図



CASE 1（開口部なし、揚水操作）



CASE 2（開口部なし、揚水、注水操作）



CASE 3（開口部あり、揚水、注水操作）

6. 結果と考察

本研究では、解析領域内で止水壁部分を一次元の要素でモデル化し、止水壁とディープウェルにより、地下水を低下させることを目標とする最適制御を行った。CASE 1では止水壁内側の地下水位を低下させる制御で、結果は揚水のための制御量が計算された。CASE 2では止水壁内側の地下水位を低下させるだけでなく更に外側を現状の地下水位に保ち周辺への影響を小さくすることを目標とした制御を行った。その結果、止水壁内側の操作点では揚水、外側では注水する結果を得た。その時の操作量は揚水量と注水量がほぼ同量であることがわかった。更に、CASE 3では止水壁の一部が開口している場合を想定した計算である。目標を満足する各ポンプごとに異なる最適操作量が求められた。以上の各ポンプにおける操作量を表-1に示す。

表-1 最適操作量一覧表

	ポンプNo.	操作量 [m^3/s]
case 1	1～8	-0.95×10^{-2}
case 2	1～8	-1.18×10^{-2}
	9～16	1.15×10^{-2}
case 3	1	-6.88×10^{-2}
	2	0.77×10^{-2}
	3	-2.22×10^{-2}
	4	-2.19×10^{-2}
	5	-0.03×10^{-2}
	6	-1.00×10^{-2}
	7	-1.86×10^{-2}
	8	-0.85×10^{-2}
	9	4.99×10^{-2}
	10	0.88×10^{-2}
	11	2.47×10^{-2}
	12	1.31×10^{-2}
	13	0.75×10^{-2}
	14	1.08×10^{-2}
	15	1.20×10^{-2}
	16	1.11×10^{-2}

（操作量の-は揚水、+は注水を表す）

以上の結果より、最適制御理論を用いることによって、周辺への影響を小さくして所定の場所の地下水位のみを低下させることの可能性を示した。

参考文献

- 北野祐介、金子典由、川原睦人：“止水壁効果の予測解析手法について”，第23回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集（第三部門），pp.484-485
- 鈴木誠一、安重晃、川原睦人：“地中温度の最適制御に関する実験と数値解析の比較検討”，第49回土木学会年次学術講演会講演概要集（共通セッション），pp.142-143
- 根切り工事と地下水（調査・設計から施工まで）“現場技術者のための土と基礎シリーズ19”土質工学会
- 嘉納 秀明，“システムの最適理論と最適化” コロナ社