

建設工事における地下水対策工に有効な最適取水モデルの開発

DEVELOPMENT OF A COMBINED SIMULATION AND OPTIMIZATION MODEL FOR CONSTRUCTION DEWATERING PLANNING

高橋 秀*

Shu TAKAHASHI

*工博 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発部 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

A combined simulation and optimization model, which is helpful for planning of construction dewatering, was developed. The objective of construction dewatering is to control the subsurface hydrological condition so that the structure can be constructed in the dry. Deep wells are often used for lowering groundwater levels. The model embeds a three-dimensional groundwater equation as a constraint and computes the best well configuration (such as pumping rates and well positions) that results in least dewatering cost without causing adverse side effects (i.e., land subsidence) due to pumping. A case study for construction dewatering under a hypothetical aquifer system is presented to demonstrate the usefulness and validity of the model.

Key Words : Construction dewatering, Optimization, Groundwater simulation

1. はじめに

地下水低下工法は、地下水面下の構造物の建設工事において止水壁とディープウェルを用いて掘削工事区間の地下水を排水する地下水対策工である(図-1)。さらに、掘削工事区間の周辺で地下水位低下の影響が大きい場合は、リチャージウェルを用いて排水した地下水を注入し地下水位を回復する。この工法は、経済的かつ効果的であるが、周辺の地下水位低下は避けられないため、井戸枯れ、あるいは地盤沈下による既設構造物への悪影響の配慮が必要となる。そこで、工事費の削減と地下水位低下の影響を最小限にするために、過度の揚水を避け、地下水位低下期間もできるだけ短くする工事計画を立案する必要がある。

2. 地下水管理モデル

開発中の地下水管理モデルは、工事区間とその周辺の地下水流動を3次元的に再現し、ディープウェルの最適揚水規模、最適配置および運転計画(揚水量の時系列)を算定する(図-2)。なお、モデルは①地盤変位量の算定と許容量を設定する機能、②透水係数のばらつきを統計的に処理する機能を有する。

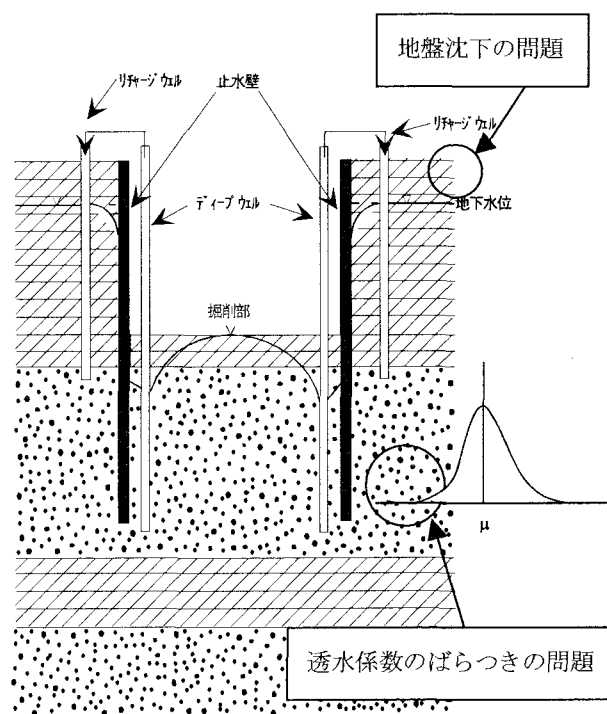
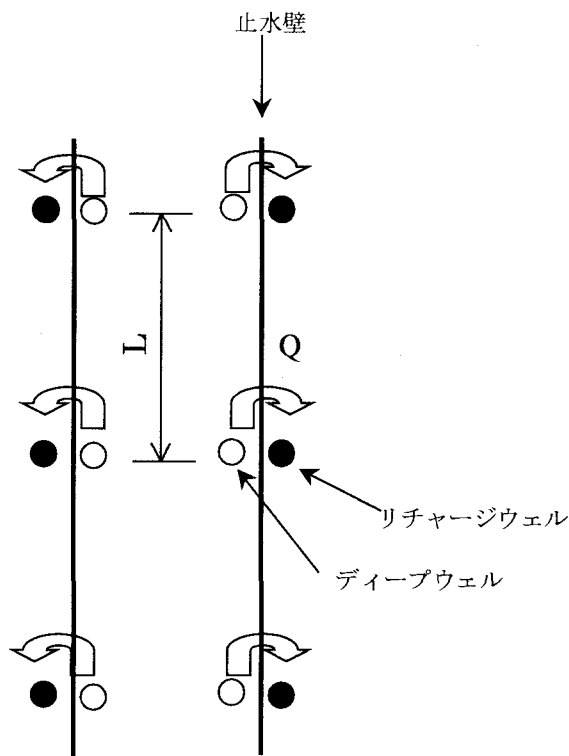
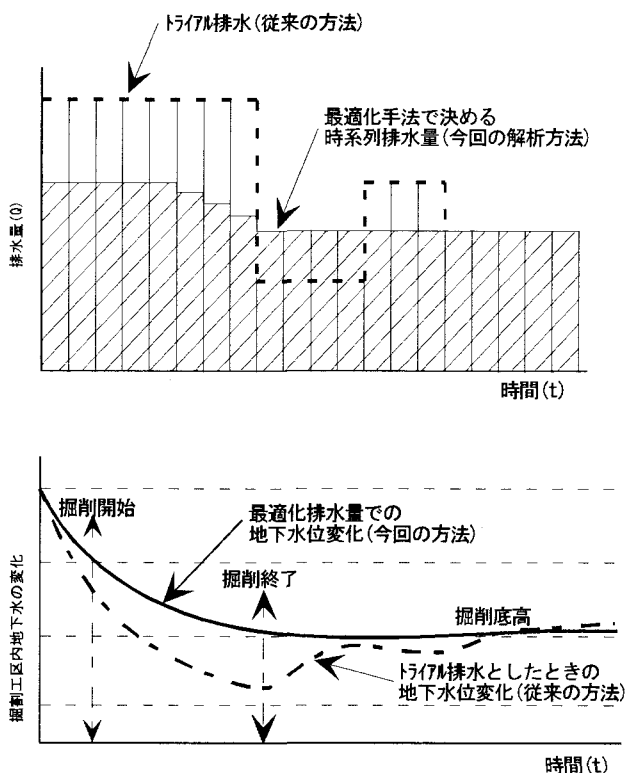


図-1 地下水低下工法(掘削部断面図) ¹⁾



Q : 排水・注水量 L : ディープウェルの間隔

① 井戸群の最適配置



② 排水量の最適な時系列

図-2 ディープウェルの最適配置、排水量/の決定

3. 地下水管理モデル

モデルの構成は通常の線形計画モデルと同様に目的関数と制約条件からなる²⁾。なお、モデルは最適化プログラミング言語である GAMS (General Algebraic Modeling System) によって書かれ、線形/非線形計画問題用のソルバーである MINOS によって解かれる。以下にモデルの主要機能を説明する。

(1) 非定常地下水流動の計算 (基本機能)

地下水流動は、以下の 3 次元非定常地下水流動式 (差分式) によりシミュレートされる³⁾。

$$\begin{aligned} & CR_{l,ij+1/2,t}(h_{l,ij+1,t}-h_{l,ij,t})+CR_{l,ij-1/2,t}(h_{l,ij,t}-h_{l,ij-1,t}) \\ & +CC_{l,i+1/2,j,t}(h_{l,i+1,j,t}-h_{l,ij,t})+CC_{l,i-1/2,j,t}(h_{l,ij,t}-h_{l,i-1,j,t}) \\ & +CV_{l+1/2,i,j,t}(h_{l+1,i,j,t}-h_{l,ij,t})+CV_{l-1/2,i,j,t}(h_{l,ij,t}-h_{l-1,i,j,t}) \\ & =\sum_{n=1}^N q_{l,ij,t}^n \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $h_{l,ij,t}$: ポテンシャル水頭、 l, i, j : 層、行、列の位置、 t : タイムステップ、 CR, CC, CV : 透水量係数の調和平均、 $q_{l,ij,t}^n$: 単位面積当たりの揚水量、涵養量、排水量等

(2) 地盤変位の算定と許容量の設定機能

揚水による地下水位低下から生じる地盤変位量は許容量を越えないよう以下の通り設定する。

$$S_o = \sum_{i=1}^N (\Delta Z_o mv_o \gamma_w \Delta h_o) < S_o^U \quad (2)$$

ここに、 S_o : 地盤変位量 (L)、 S_o^U : 地盤変位の許容量 (L)、 $o: l, i, j$ (層、行、列)、 ΔZ : 層厚 (L)、 mv : 体積圧縮係数 (L^2/W)、 γ_w : 水の単位体積重量 (W/L^3)、 Δh : 水位変化 (L)

(3) 水理定数のばらつきの統計処理機能⁴⁾

地下水管理モデルに組み込まれる透水係数などの水理定数は、解析対象地域の揚水試験結果を代表させて、その空間分布は地下水シミュレーションの検定計算により決定する。しかし、水理定数の値は空間的ばらつきがあるため、実際には地下水管理モデルで策定した揚水量より多くとれる場合 (あるいは少量しかとれない場合) が生じる。そこで、このような水理定数の不確さに起因する問題を解くために、統計的信頼水準に基づく最適揚水量を求める。

First-Order Analysis

First-Order Analysis は確率変数を含む関数の平均と分散の算定に有効な手法であり、その関数は Taylor 展開により以下の式で表わせる。

$$f(y) = f(\mu) + \sum_{n=1}^N \left. \frac{\partial f(y)}{\partial y_n} \right|_{y=\mu} (y_n - \mu_n) + \varepsilon \quad (3)$$

ここに、 $f(y)$ = 確率変数からなる関数、 μ_n = 確率変数の平均値、 ε = Taylor 展開式の高次の項

さらに、 $f(y)$ の平均値 $E[f(y)]$ と分散 $\text{var}[f(y)]$ は以下の通り近似できる。

$$E[f(y)] \cong f(\mu) \quad (4)$$

$$\text{var}[f(y)] = \sum_{n=1}^N \left[\left. \frac{\partial f(y)}{\partial y_n} \right|_{y=\mu} \right]^2 \sigma_n^2 \quad (5)$$

ここに、 σ_n^2 = n 番目の確率変数の分散

帯水層の水理定数である透水量係数 (T)、透水係数 (k) の対数値は正規分布することが知られている。従って、3次元地下水流動の差分式において、揚水量 $g_{i,j}$ は、確率変数である透水量係数の調和平均を含む関数となる。そこで、(4)、(5)式を当てはめると、揚水量の平均 $E[g_{i,j}]$ と分散 $\text{var}(g_{i,j})$ は以下となる。

$$E[g_{i,j}] \cong g_{i,j} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{var}(g_{i,j}) = & (h_{i,j+1} - h_{i,j})^2 \sigma_{CR}^2 + (h_{i,j} - h_{i,j-1})^2 \sigma_{CR}^2 \\ & + (h_{i+1,j} - h_{i,j})^2 \sigma_{CC}^2 + (h_{i,j} - h_{i-1,j})^2 \sigma_{CC}^2 \\ & + (h_{i+1,j} - h_{i,j})^2 \sigma_{CV}^2 + (h_{i,j} - h_{i-1,j})^2 \sigma_{CV}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $g_{i,j}$ = 揚水量、CC、CR、CV = x、y、z 方向の透水量係数の調和平均、 σ_{CC}^2 、 σ_{CR}^2 、 σ_{CV}^2 = x、y、z 方向の透水量係数の調和平均の分散値、 h = 水位、 i 、 j = 層、行、列

信頼水準の設定

揚水量が揚水量の上限値を越えない確率が、信頼水準 $1-\alpha$ 以上であること、すなわち、

$\Pr[g_{i,j} < g_{i,j}^U] > 1-\alpha$ は、以下のように定義される。

$$\Pr \left[z \leq \frac{g_{i,j}^U - E(g_{i,j})}{\sqrt{\text{var}(g_{i,j})}} \right] \geq 1-\alpha \quad (8)$$

$$\sqrt{\text{var}(g_{i,j})} Z^{-1}(\alpha) + E(g_{i,j}) < g_{i,j}^U \quad (9)$$

ここに、 Z^{-1} = 正規標準偏差、 $1-\alpha$ = 信頼水準

4. 仮想帯水層システムにおける基本モデル

仮想帯水層システムを対象として、基本モデルを作成した。ここでは、モデルの基本機能（非線形帯水層システム、非定常計算時の最適化、止水壁を取り込んだ場合の地下水流動シミュレーション）を確認することが目的であり、設定した帯水層、水理定数、揚水ポンプ運転計画は、現実の工事に沿ったものではない。

(1) 仮想帯水層システムおよび水理定数

地下水面下の掘削工事区間を含む仮想帯水層と水理定数を図-3に示す。帯水層システムは5層構造で、上層より第1層は不圧帯水層、第2層から第4層は被圧帯水層であり、差分メッシュ総数は（16行×16列×5層＝）1,280セルである。

掘削工事区間は第1層、8、9列目の直線区間とした。セルのサイズはy方向200mの等間隔、x方向10m（止水壁の部分）から200mの不等間隔とした。初期水位は100mとして、1列および16列目を水位一定境界（100m）とした。帯水層中の水の流出入は、不圧帯水層への垂直方向の涵養（ $3.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ）、水位一定境界からの流出/流入、工事掘削区間の地下水低下/排水用のディープウェルからの揚水を想定した。

(2) 掘削区間における地下水位の制御

地下水位低下の期間は計60日で、掘削区間（32セル）における地下水位の10日間毎の設定を表-1に示す。なお、初期水位は100mとした。

表-1 掘削区間内での設定地下水位

0日	10日	20日	30日	40日	50日	60日
100m	95m	90m	85m	80m	80m	80m

(3) モデル構成

目的関数

—揚水量の合計の最小化

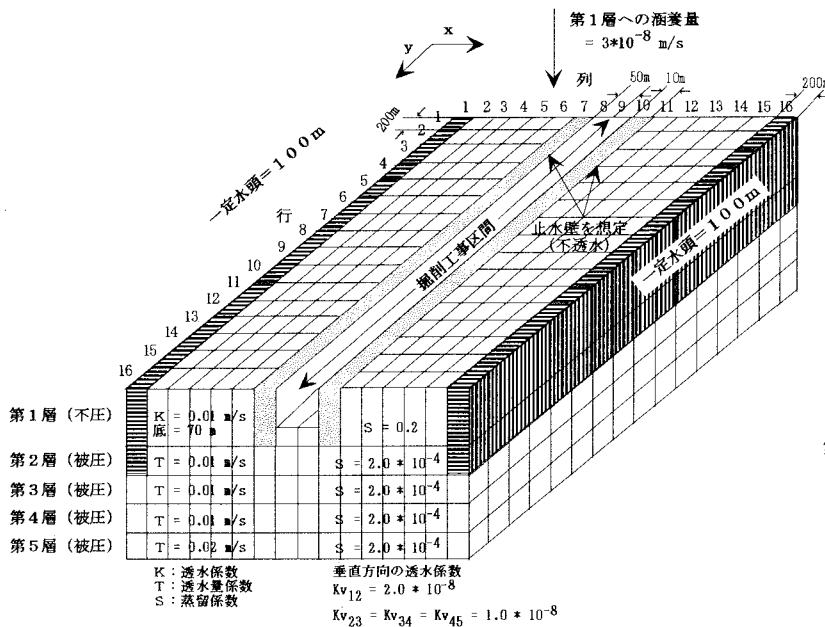
ただし、ディープウェルの設置候補位置は掘削区間内の32セルすべてとした。

制約条件

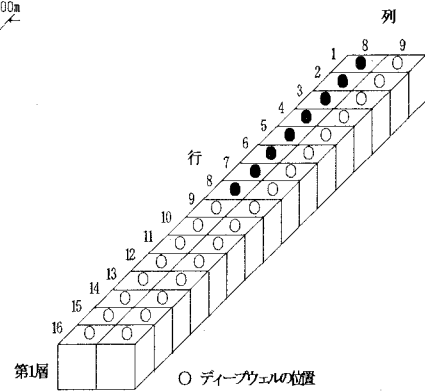
- ① 3次元非定常地下水流動式の差分形
- ② 掘削区間内の地下水位の時系列

非線形モデルの解法

帯水層システムは第一層が不圧帯水層であるため、地下水流動式は非線形となる。このような非線形の式は直接には線形計画法では解けない。そこで、線形計画法そこで、線形計画法でこの問題を解くために、サイクリング手法を取り入れた。サイクリングとは、非線形項を線形近似したモデルの最適解を繰り返し求め、最終的に非線形モデルの最適解を求める方法である。



①全体システム



②掘削工事区間における井戸の位置

図-3 仮想帯水層システム

(4) 計算結果

モデルは、7 サイクルでほぼ収束し、地下水位の制約条件を満たすような、ディープウェルの位置とその揚水量の時系列を算定した。図-4 に 10 日間毎の排水量を示す。また、ディープウェルは掘削工事区間のすべてのセル (1 層、8 列及び 9 列の 32 セル) に設置する結果となった。図-5 に 1 層、8 列、1~8 行の 8 セルからの揚水パターンを示す (仮想帯水層はその中心から見て、上下左右とも対称なので、他の 8 セル × 3 の揚水パターンも同様である)。

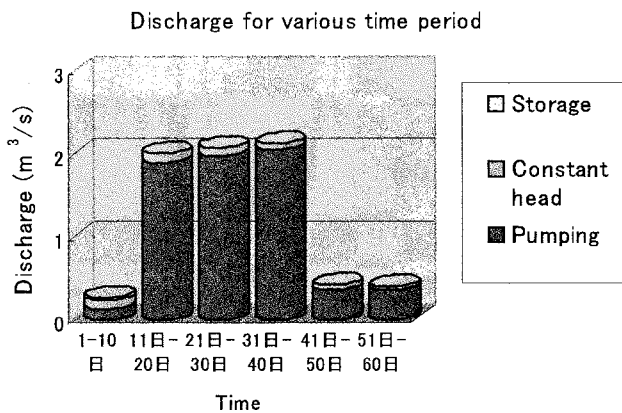


図-4 排水量

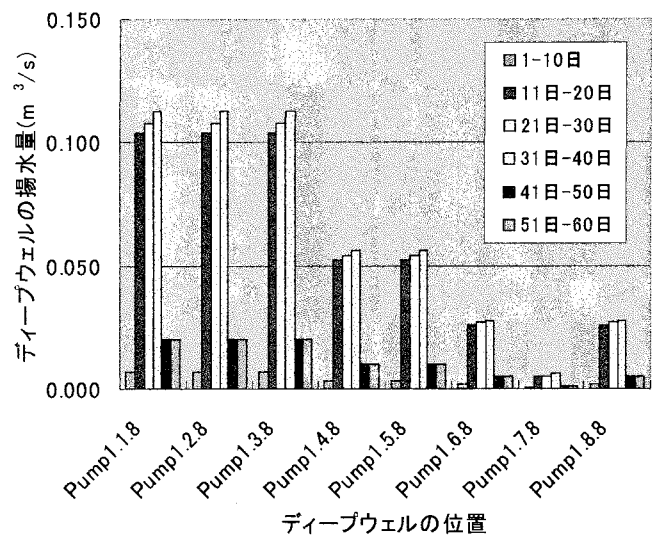


図-5 最適揚水量 (10 日毎の時系列)

参考文献

- 1)根切工事と地下水編集委員会：現場技術者のための土と基礎シリーズ 19 根切り工事と地下水 一調査・設計から施工まで，社団法人 地盤工学会，1991.
- 2)Takahashi, S. and R.C. Peralta : Optimal perennial yield planning complex nonlinear aquifer: Methods and examples, Advanced in Water Resources, Vol.18, pp.49-62, 1995.
- 3)McDonald, M.G. and A. W. Harbaugh : A modular three-dimensional finite-difference groundwater model, U.S. Geological Survey, Open-File Report, pp.83-875, 1988.
- 4)Tung, Y. K. : Groundwater Management by Chance-Constrained Model, Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers, Vol. 112, No.1, pp.1-19, 1986.1.

5. まとめ

掘削区間を含む仮想帯水層に、地下水管理モデルを適用し、非常計算時の最適化、止水壁を取り入れたシミュレーションが正常に機能することを確認した。さらに、①地盤変位量の算定と許容量を設定する機能、②帯水層の水理定数のばらつきを統計処理する機能を付加した。今後は、モデルを実際の建設現場の地下水対策への利用を図る。