

## 20. 飽和 - 不飽和浸透流解析による改良型バキュームディープウェル工法の 水位低下に関する検討

○細川土佐男 (九州産業大学)・高橋茂吉 (アサヒテクノ)・神野健二 (九州大学)・  
中山比佐雄 (シエスタクラブ)・朴崎 鎮 (慶東情報大学)

### 1. はじめに

地下水低下工法の代表的なものとしてディープウェル工法、ウェルポイント工法、バキュームディープウェル工法が挙げられるがそれぞれに長所と短所がある<sup>1)</sup>。これらの工法の短所を解決し長所を取り入れた工法としてバキュームディープウェル工法を改良した工法がある。改良は、ストレーナー部を地下水位がスクリーンまで低下しても真空効果が減少しないように行なわれ、しかも井戸の深度を目的に応じて深く或いは短くすることができる。これまでにこの工法の水位低下現象に関する研究は行なわれている<sup>2)</sup>。本研究では、不完全貫入の矢板で囲まれた領域内の水位低下に改良型バキュームディープウェル工法とディープウェル工法を採用した場合の水位低下量の比較を円筒 3 次元の飽和 - 不飽和浸透流の数値解析により行なった。

### 2. 基礎方程式

円筒 3 次元の飽和 - 不飽和領域における圧力水頭に関する基礎方程式は、水平方向に  $r$  軸、鉛直下向き方向に  $z$  軸をとると、次式で表わされる。

$$(C_w + \alpha_0 S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) - \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (1), \quad v_r = -k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (2), \quad v_z = -k \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \quad (3)$$

ここに、 $C_w$  は比水分容量、 $\alpha_0$  は飽和領域では 1、不飽和領域では 0 を取るダミー変数、 $S_s$  は比貯留係数、 $v_r$ 、 $v_z$  は  $r$ 、 $z$  方向の Darcy 流速、 $h$  は圧力水頭、 $k$  は透水係数、 $t$  は時間である。

### 3. 数値計算の方法

数値計算は、次式に示す陰形式の差分方を用いて行なった。

$$(C_w + \alpha_0 S_s) \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{(i-1)\Delta r} \left\{ \frac{(i-1/2)\Delta r v_{r,i+1/2,j}^{n+1} - (i-3/2)\Delta r v_{r,i-1/2,j}^{n+1}}{\Delta r} \right\} - \frac{v_{z,i,j+1/2}^{n+1} - v_{z,i,j-1/2}^{n+1}}{\Delta z} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta t$  は差分時間間隔、 $\Delta r$ 、 $\Delta z$  は  $r$ 、 $z$  方向の差分格子間隔、 $i$ 、 $j$  は  $r$ 、 $z$  方向の差分格子点、 $n$  は時間ステップである。式(4)の差分式を圧力水頭  $h_{i,j}^{n+1}$  について整理すると次式のようなになる。

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{(A_1 + A_2 - A_3)\Delta t + A_4 h_{i,j}^n}{A_4 + A_5 \Delta t} \quad (5)$$

ここに、

$$A_1 = \frac{1}{r_0} \frac{1}{\Delta r^2} (r_1 k_{i+1/2,j}^{n+1} h_{i+1,j}^{n+1} + r_2 k_{i-1/2,j}^{n+1} h_{i-1,j}^{n+1}) \quad , \quad A_2 = \frac{1}{\Delta z^2} (k_{i,j+1/2}^{n+1} h_{i,j+1}^{n+1} + k_{i,j-1/2}^{n+1} h_{i,j-1}^{n+1})$$

$$A_3 = \frac{1}{\Delta z} (k_{i,j+1/2}^{n+1} - k_{i,j-1/2}^{n+1}) \quad , \quad A_4 = \left\{ \frac{(C_{wi,j}^{n+1} + C_{wi,j}^n)}{2} + \alpha_0 S_s \right\}$$

$$A_5 = \frac{1}{r_0} \frac{1}{\Delta r^2} (r_1 k_{i+1/2,j}^{n+1} + r_2 k_{i-1/2,j}^{n+1}) + \frac{1}{\Delta z^2} (k_{i,j+1/2}^{n+1} + k_{i,j-1/2}^{n+1})$$

$$r_0 = (i-1)\Delta r \quad , \quad r_1 = (i-1)\Delta r + \frac{\Delta r}{2} \quad , \quad r_2 = (i-1)\Delta r - \frac{\Delta r}{2} \quad (6)$$

であり、格子点  $i+1/2$  あるいは  $j+1/2$  のにおける物理量は、 $i$  と  $i+1$  あるいは  $j$  と  $j+1$  の物理量の平均値として与える。透水係数は、不飽和領域においては体積含水率の関数であり、非常常解析では含水率が時間とともに変化することから、差分式(6)の  $k$  に添字  $n$  を付けている。差分式(5)は陰形式であるため、反復計算が必要となる。ここでは、次式に示す加速緩和法により行なう。

$${}^{v+1}h_{i,j}^{n+1} = \nu h_{i,j}^{n+1} + \omega (h_{i,j}^{n+1} - \nu h_{i,j}^{n+1}) \quad (7)$$

ここに、 $\nu$  は反復回数、 $\omega$  は加速緩和係数である。なお、反復計算の収束判定は、次式に示すように、絶対誤差と予め設定した判定基準  $\varepsilon_0$  との比較により行なっている。

$$|{}^{v+1}h_{i,j}^{n+1} - \nu h_{i,j}^{n+1}| \leq \varepsilon_0 \quad (8)$$

なお、 $\varepsilon_0$  の値は  $10^{-5}$  (cm) とした。

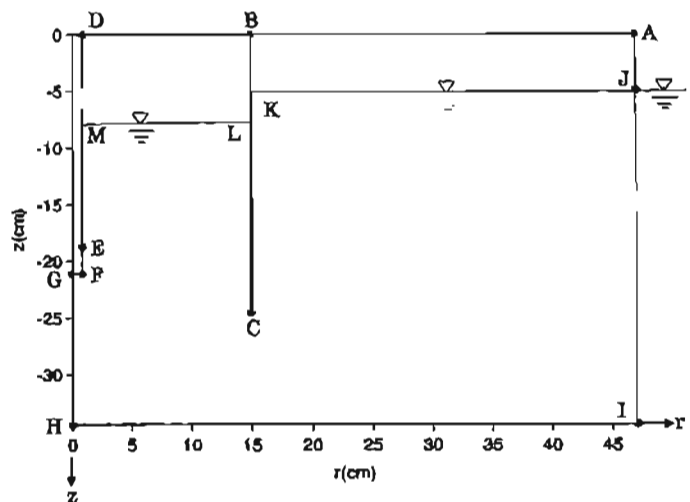


図-1 解析領域

#### 4. 解析領域と計算条件

##### 4.1 解析領域

ここでは円筒の中心に井戸を設置し、井戸から少し離れた位置に打ち込んだ不透水層まで到達しない不完全貫入の矢板で囲まれた領域内の水位低下を想定している。このことから解析の対象とする領域は、図-1に示す  $ABDFFGHIJ$  である。ここで、 $ABD$  を地表面、 $EF$  を井戸のストレーナー、 $HI$  を水平な不透水層上面、 $BC$  を矢板、 $JK$  および  $LM$  を地下水面、 $DMLB$  および  $ABKJ$  を不飽和領域、 $JKCLMFGHI$  を飽和領域とする。なお、解析領域の大きさは  $r$  方向に  $L_r = 47.0$  (cm)、 $z$  方向に  $L_z = 34.4$  (cm) である。

##### 4.2 境界条件

ここで考えられる2つの境界条件を具体的に示すと以下のようなになる。

○ 圧力水頭が既知の境界

$$\text{境界 } IJ : h = h_b - (L_z - z) \quad (9)$$

$$\text{境界 } EF : h = -h_w \quad (10)$$

ここに、 $h_b$  は貯水槽の水深、 $h_w$  は井戸のストレーナー部の圧力水頭。

○ 流体フラックスが既知の境界

$$\text{境界 } ABD, HI, GF : -k \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0 \quad (11)$$

$$\text{境界 } AJ, BKC, BLC, DME, GH : -k \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

なお、境界 ABD の地表面上では、流体フラックスとして鉛直下方への降雨による浸透量あるいは上方への蒸発量を考慮すべきであるがここでは零としている。

#### 4. 3 不飽和特性

地下水面より上層の不飽和領域の計算に必要な圧力水頭と体積含水率(水分曲線)、圧力水頭と比水分容量および圧力水頭と透水係数の関係式には、次式に示す van Genuchten モデル<sup>3)</sup>を用いている。

$$S_c = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad S_c = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m, \quad k = k_s S_c^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_c^{1/m})^m \right]^2$$

$$C_w = \frac{\alpha m (\theta_s - \theta_r) S_c^{1/m} (1 - S_c^{1/m})^m}{1 - m} \quad (13)$$

ここに、 $\theta$  は体積含水率、 $\theta_r$  : 残留体積含水率、 $\theta_s$  は飽和体積含水率、 $k_s$  は飽和透水係数、 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  は定数である。ここでは、粒径が比較的小さい標準砂からなる地盤を想定しているため、土柱法による室内実験<sup>4)</sup>から得られた標準砂の水分曲線 ( $\theta_s = 0.433$ 、 $\theta_r = 0.108$ ) に van Genuchten モデルを適用して求めた  $\alpha = 0.48 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 、 $m = 0.923$ 、 $n = 12.936$  を用いている。また、飽和透水係数は透水試験による  $k_s = 10^{-3} \text{ (cm/s)}$  を使い、比貯留係数は  $S_s = 10^{-5} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 、貯水槽の水深は  $h_0 = 29.4 \text{ (cm)}$ 、矢板の水平位置は  $r = 15 \text{ (cm)}$ 、差分格子間隔は  $\Delta r = 0.2 \text{ (cm)}$ 、 $\Delta z = 0.2 \text{ (cm)}$  に設定している。なお、井戸のストレーナー部の負圧は井戸内を真空圧にすることにより得られ、井戸内の静水圧により鉛直方向に若干変化するが、ここでは  $h_p = -20 \text{ (cm)}$  としている。

#### 5. 数値解析結果と考察

数値計算は、領域内の初期水位を深度 5cm、ストレーナーの下端の深度を  $z = 26.4 \text{ (cm)}$ 、ストレーナーの長さを 3.0 (cm) に設定した改良型バキュームディープウェル工法で低下させた場合の case-1、これと水位の低下を比較するためストレーナーの下端の深度と長さは case-1 と同じにして井戸内水位をストレーナーの上端に設定したディープウェル工法で低下させた場合の case-2 について行なった。

まず、図-2 には case-1 の場合の地表面から深度方向に進んで最初の圧力水頭が零の点を結んだ等圧力水頭線を地下水面とみなし、この地下水面の時間変化と作動開始後  $t = 600 \text{ s}$  におけるストレーナー周辺の等圧力水頭線を示している。矢板で囲まれた領域内の地下水面は、時間の経過とともに低下している様子が分かる。しかし、時間の経過とともに低下に時間を要している。また、ストレーナーに近いほど圧力の伝播が早いため水位の低下量が大きくしかも低下が早くなっている。地下水面の変化過程は、飽和領域における比貯留係数  $S_s$  と不飽和領域における水分の貯留を支配する比水分容量  $C_w$  に依存しているため、両者の特性を十分把握しておく必要がある。矢板の外側の領域の地下水面は、矢板に近づくほど低下量が大きくなっているが矢板の内側の領域に比べればほんの僅かである。

図-3 には、case-1 の場合の作動開始後  $t = 600 \text{ s}$  の地下水面、値が零の等圧力水頭線と計算で得られた流況を示している。矢板の外側の領域では、右端の圧力水頭が既知の境界から中心軸方向に水

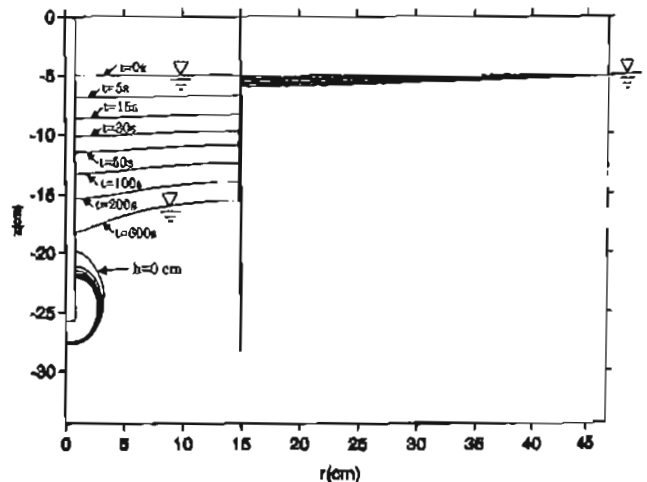


図-2 case-1 の地下水面の時間変化

平に流入した後、矢板の先端より上部では矢板に近づくほど流れを下向に変え、矢板の先端より下部ではほぼ水平な流れを示している。矢板の内側の領域では、地下水面に向かって上昇した後ストレナーに向かう流れと、そのままストレナーに向かう流れとを示している。地下水面上では上部から下に向かう流れと下部から上に向かう流れとが合流した後、ストレナーに向かう流れを示している。

図-4には、case-2の地下水面の時間変化を示している。矢板の内側の領域の地下水面は、時間が経過しても深度約10cmからほとんど低下しない。したがって、流れがほぼ平衡状態になっていることがうかがえる。また、case-1と比べると低下量が小さく、低下が遅いことがわかる。

図-5には、作動開始後 $t=32400s$ の地下水面と数値計算で得られた流況を示している。矢板の外側の領域の流れはcase-1とほぼ同じ流れを示しているが、内側の領域では外側から流入した流れが地下水面まで上昇しないで水面より約6.0cm下で向きを変えてストレナーに向かっている。

本研究では、改良型バキュームディープウェル工法とディープウェル工法による水位の低下を数値解析により求め、改良型バキュームディープウェル工法がより深く低下することを示した。しかし、解析領域に地下水面を現す圧力水頭の零とストレナー一部の負圧が伝播してできる圧力水頭の零とが現れ、これらが交差すると地下水面を確定することが困難になる。今後はこの問題の改良を行い、室内実験による水位の変化と比較を行う予定である。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、国際航業㈱の尾崎哲二氏のご助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河野伊一郎(1989):地下水工学、鹿島出版会、141~161.
- 2) 中川啓、羽井和郎、神野健二、和田信一郎、朴崎謙、中山比佐雄、高橋茂吉(2006):スーパーウェルポイント工法(SWP工法)の地下水位低下に関する数値計算による検討、日本地下水学会2006年春季講演会予稿集、94~97.
- 3) van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, 892~898.
- 4) 土壌物理性測定委員会編(1982):土壌物理性測定法、養賢堂、137~140.

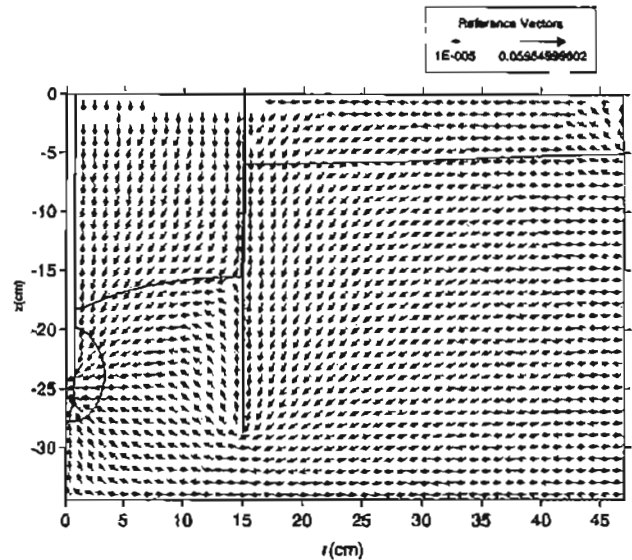


図-3 case-1の流況

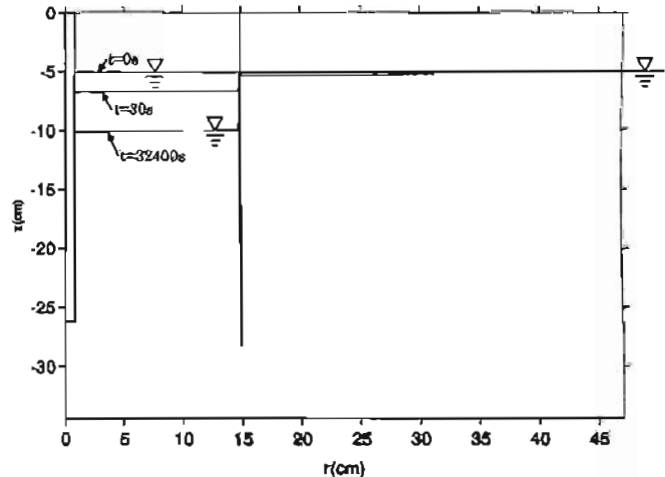


図-4 case-2の地下水面の時間変化

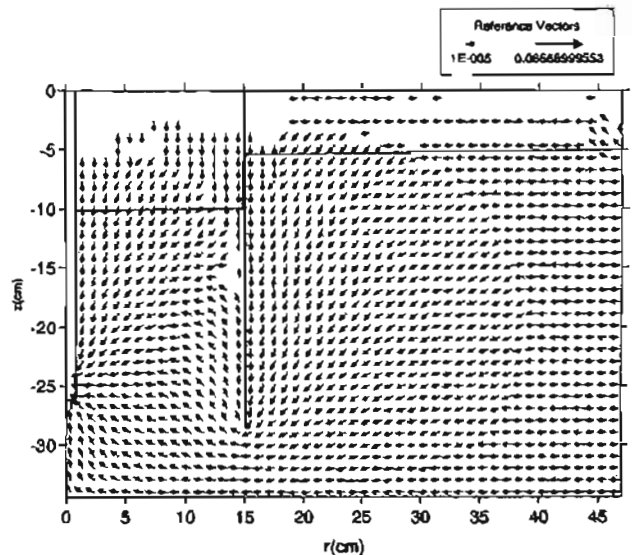


図-5 case-2の流況