

## 23. 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

○中川 啓 (鹿児島大・農)、初井和朗 (同)、神野健二 (九州大・工)、和田信一郎 (九州大・農)  
 朴埜鏡 (慶東情報大 (韓国))、中山比佐雄 (シエスタクラブ)、高橋茂吉 (アサヒテクノ)

## 1 はじめに

新たな地下水位低下工法としてスーパーウェルポイント工法 (以下 SWP 工法とする) が開発され、多くの現場で採用されている (たとえば太田ほか, 2006)。またその強力な真空力を利用して汚染土壌の浄化にも応用されている (尾崎ほか, 2005)。この工法は井戸内の地下水に大きな負圧を与えることにより多量の地下水を集め、大きな地下水位低下を生じさせるなどの機能を有しているが、その詳細なメカニズムについては未解明である。そこで本研究では、本工法による地下水位低下現象を明らかにすることを目的として、円筒 3 次元の数値計算による検討を行った。また止水壁設置の場合の地下水位低下に及ぼす影響についても検討した。

## 2 SWP 工法の概要

SWP 工法は、真空力を利用したバキュームディープウェル工法の欠点であった井戸への空気侵入をできるだけ防止する工法として開発されたものである。本工法の特徴である特殊セパレートスクリーンは、空気と水を分離する機能を有しており、内筒管と巻線ストレーナの二重管構造となっている。巻線ストレーナで空気と分離された地下水のみが下部の通水孔を通して井戸内に流入する。

## 3 基礎式

円筒 3 次元の地下水流動の基礎式は次式で表される。

$$(C_w + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right]$$

ここで、 $r$ : 井戸から外周方向への距離、 $z$ : 地表面から鉛直下方への距離、 $h$ : 圧力水頭、 $C_w$ : 比水分容量、 $S_s$ : 比貯留係数、 $\beta$ : 飽和の時 1、不飽和の時 0 をとるダミー変数、 $t$ : 時間である。不飽和状態における計算では、van Genuchten (1980) のモデル (以下 VG モデルとする) を用いた。

## 4 室内実験スケールでの検討

## 4.1 室内実験および計算条件

SWP 工法の機能を確認するため、図-1 に示すケイ砂を充填した水槽により室内実験を行った。ただし実験では本工法の特徴である二重管構造について、内管部を塩ビパイプで、巻線ストレーナ部をネットによりモデル化した。真空力による地下水位低下と空気が侵入しない状態での地下水面形状と実験水槽下端におけるピエゾ水頭の分布を調べることを目的とした。図-2 に数値計算の領域を示す。上下端では水の出入りがないので、不透水条件とし、井戸側では、吸水孔で吸水圧を圧力水頭の値として与え、それ以外の部分是不透水条件とし、SWP 工法の内管部分に相当する。外周側では、一定水位の静水圧境界とした。計算に用いた諸定数は、飽和透水係数を  $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ 、比貯留係数には  $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  を与え、計算格子は  $r$  方向のみ不等間隔 (0.2 cm ~ 拡大率 1.02) とし、 $z$  方向は等間隔 (1.0 cm) とした。なお巻線ストレーナ部分に相当する内管から数 cm では、実験でも内管に沿って透水性が高くなっていると考えられるので、飽和透水係数を 1.0 cm

$s^{-1}$ と大きくした。VGモデルパラメータは、 $\theta_s=0.418$ ,  $\theta_r=0.157$ ,  $\alpha=0.02$ ,  $n=2.0$ を用いた。

ところで、吸水部で大きな負圧 ( $h < 0$ )を与えると、当然のことながらその部分を中心として負の圧力水頭領域 (以下負圧領域とする) が計算領域に広がっていく。飽和-不飽和計算では、負圧の部分は不飽和として扱われる。SWP工法では、空気の侵入を排除しているため、吸水孔部分は常に飽和状態であると考えられる。したがって本数値計算では、吸水部近傍は、負圧であっても不飽和状態ではないと考え、透水係数は飽和透水係数を用いた。低下する地下水面よりも上部の領域では不飽和計算を行っている。

数値計算は、室内実験と同様の条件で止水壁なしの条件で実施し、まずは吸水孔の圧力水頭値を実験の吸引圧で与え、計算領域全体の透水係数の異方性を変えて水槽下部のピエゾ水頭値の実験結果との比較を行った。また吸水孔の水頭値を変えた実験結果との比較も実施した。

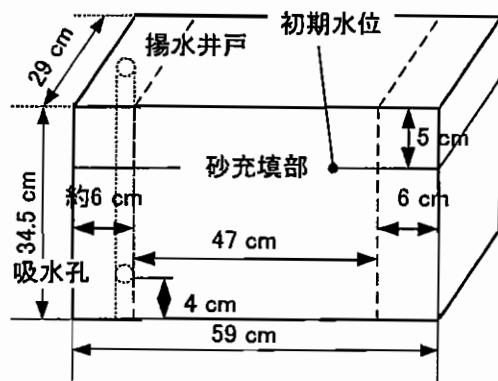


図-1 室内実験装置

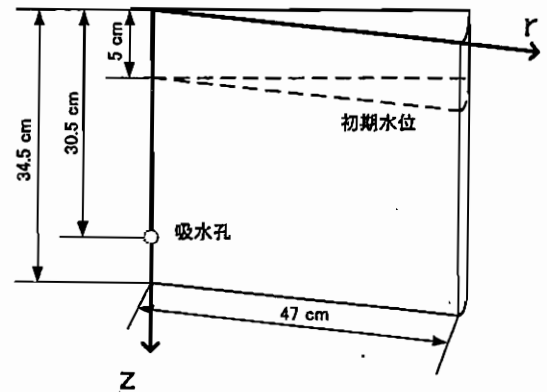


図-2 数値計算領域

#### 4.2 止水壁なし、実験結果との比較

まず、透水係数の異方性が水位低下に及ぼす影響を調べるため、水平方向の飽和透水係数が鉛直方向と同じ場合 (Case-1)、1.5倍とした場合 (Case-2)、2.0倍 (Case-3)、3.0倍 (Case-4)の計算を実施した。前述のように非定常計算を行う場合、地下水位の低下と同時に、吸水孔の周囲に負圧領域が生成して、 $h=0$ の線をつなぐとき、低下する地下水位を表す $h=0$ 線と吸水孔周りの $h=0$ 線がつながってしまい、井戸近傍での地下水面が不明確になってしまう。そこで本論では、このつながる直前の地下水位を最終状態とした。図-3に4ケースの $h=0$ 線および流速ベクトル分布を示す。異方性を調べたところ、水平方向の透水係数を鉛直方向の1.5倍とした時に、最も実験結果の水位低下状態に類似していた。実際も大きな負圧による吸水により、水平方向の透水係数が鉛直方向のそれに比べ大きくなっていることが考えられる。なお現場における地下水面の形状は、井戸近傍からほぼ水平に伸びる部分とそれから地表面に斜めに伸びる部分の折れ線のような状態を示し、Case-3のような状態を示している。吸引孔付近の流速は、Case-2の場合が大きくなっており、よって井戸近傍での水位低下も大きくなっている。水面形の水平に見える部分は、流速ベクトルが真下を向いており、この下向きの流れによって水面が水平に押し下げられているようである。

続いて吸水孔の外側の境界条件として与える値について検討した。実験で与えた吸水圧力の0.5倍 (Case-a)、0.8倍 (Case-b)、1.0倍 (Case-c)、1.5倍 (Case-d)、2.0倍 (Case-e)として水槽下端のピエゾ水頭の実測値と計算結果を比較しよう。図-4に計算結果と実測値を示す。Case-bの 때가最も実測結果を井戸近くまで再現しているが、実験で与えた値であるCase-cでもほぼ再現できている。よって吸水部の水頭値は、吸水孔その場所の値としてではなく、1つ内側の格子点の値とし

て与えているので、実験値よりも小さくなっており、実際の値に近づいていると考えられる。したがってあえて小さめの値を与える必要はないと考えられる。なお、実験結果では0-10 cmでは負圧となっていないので、実際の負圧領域の広がりも計算結果よりも小さいと考えられる。

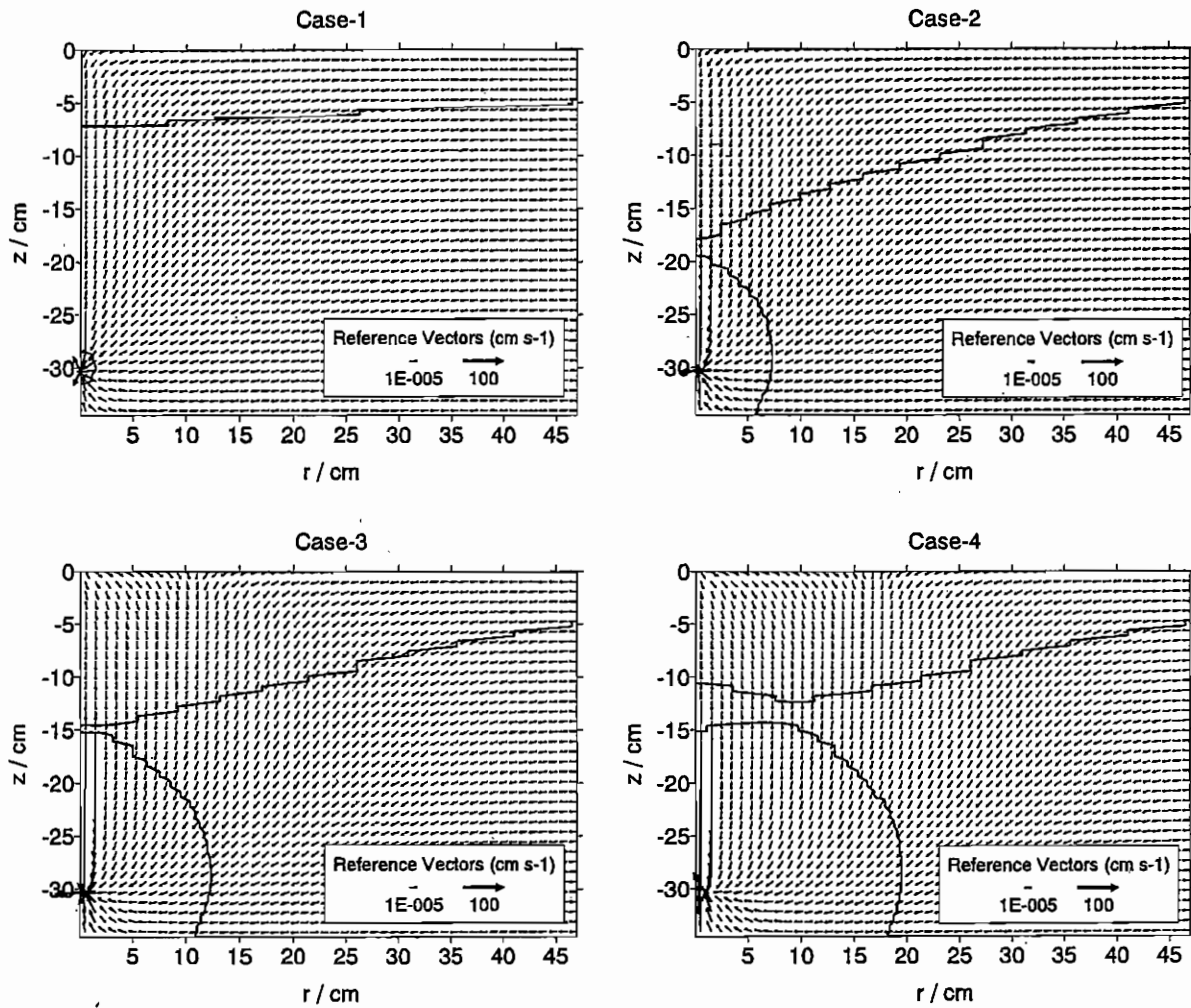


図-3 各計算ケースにおける  $h=0$  線 (地下水位低下の最終状態)

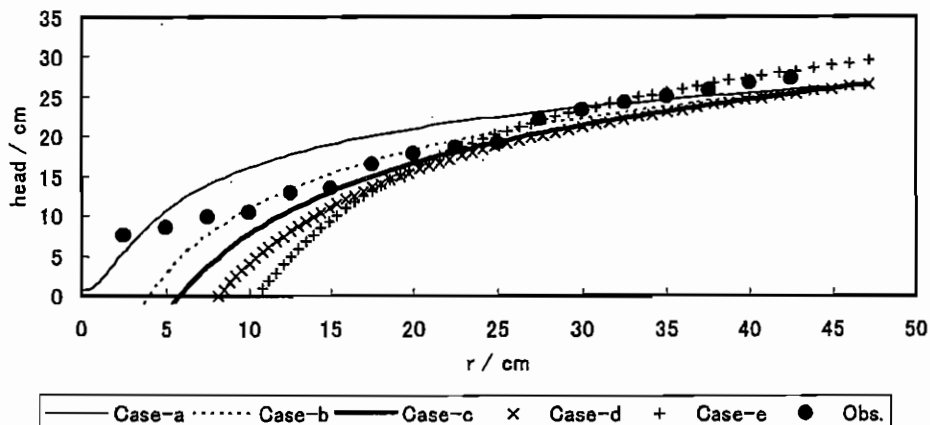


図-4 吸水孔境界での圧力水頭値に対する計算結果の違い

### 4.3 止水壁の影響

ここではSWP工法を止水壁と組み合わせて用いる場合の水面形について数値計算により検討する。初期・境界条件などは止水壁なしの場合と同様とし、止水壁位置は、井戸から17.0 cm、地表

面より不完全貫入型でその深さは 20.5 cm とした。吸水孔位置は深さ 22.5 cm で、初期水位は深さ 6 cm とした。今回も異方性の違いにより結果を調べるため、水平方向の透水係数が鉛直方向と同じ (Case-I)、1.5 倍 (Case-II)、3.0 倍 (Case-III) の 3 ケースについて検討した。図-5 に Case-II と III の最終的に低下した地下水位の分布 ( $h=0$  線) と流速ベクトル分布を示す。等方性の地盤の時 (Case-I) は、止水壁がない場合と同様、わずかに止水壁内部の水位が低下するだけである。Case-II の場合は、止水壁内外の違いが出ているものの水位低下は SWP 工法の実際ほど大きくはない。止水壁外は低下が小さく、ほぼ水平の水面形となった。止水壁より内側の流速ベクトルは壁に沿うよりも吸水孔に向かう斜め下向きで、止水壁外側においても壁に沿って壁の下端を回り込んで吸水孔に引かれる向きに流れた。Case-III では、吸水孔周辺の負圧領域が大きくなり Case-II より水位低下が進まなかった。流速ベクトル分布によれば、止水壁外側近傍では鉛直下向きの流れを示した。また止水壁外側で地表面近くにおいて、両側からの流れが合流する点が表れた。

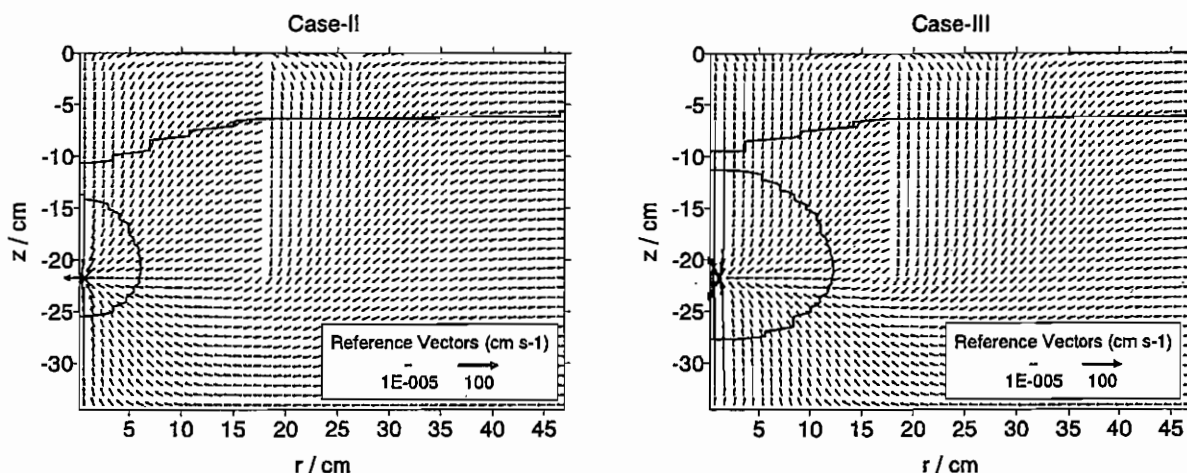


図-5 止水壁を考慮した場合の低下地下水面 ( $h=0$  線)

## 5 おわりに

本報では、SWP 工法による地下水位低下のメカニズムを調べるため、円筒 3 次元の数値計算を実施し、室内実験結果との比較を行った。吸水部近傍で形成される負圧領域を不飽和領域と扱わず、ここでの透水係数として飽和透水係数を用いることにより概ね水位低下を再現できたと考える。このような状況は、実際の SWP 工法の井戸吸水部周辺においても起こっていると考えられる。ただし室内実験結果によれば、井戸近傍の負圧領域は計算結果よりも小さいものと推定される。今後は、完全な円筒 3 次元での室内実験を実施することや、実際の現場スケールでの数値計算を実施し、地下水位低下の理論的背景を明らかにしていくことを考えている。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、スーパーウェルポイント協会および西松建設(株)の資料を参考にさせていただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- van Genuchten : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 49, pp.12-19, 1980.
- 太田耕栄, 河野悦朗, 高橋茂吉 : 仙台空港アクセス鉄道地下部本体工事における地下水対策, 基礎工, 34(3), pp.55-59, 2006.
- 尾崎哲二, 山内大祐, 白川俊明, 千葉政孝, 高橋茂吉 : 強力な真空力を利用した VOCs 汚染土壌の浄化技術の開発, 土壌環境センター技術ニュース, 10, pp.6-11, 2005.