

52. 負圧伝播作用下における揚水井戸周辺部の地下水流動の3次元解析

○ 堤 敦 (エスジー技術コンサルタント)・神野健二 (九州大学名誉教授)
尾崎哲二 (アサヒテクノ) ・中山比佐雄 (シエスタクラブ)

1. はじめに

建設基礎の掘削工事に先立っては、予め地下水面を所定の深度まで低下させる必要がある場合に、ウェルポイント工法やディープウェル工法などが適用される。近年では、揚水井戸内の空気を吸引することにより管内水圧をより低くする工法が考案されている（以降、「負圧井戸法」と呼ぶ）。

負圧井戸法の特徴は、真空ポンプによって井戸管内の空気圧を負圧にすることと、井戸管先端部の吸水孔から地下水を吸引することである。そのため、地下水位の目標低下高さに合わせて、井戸の深さを掘削予定深度近くに設定できる。近年、軟弱地盤が広がる沖積平野や沿岸域での地下水位の低下が問題となるような現場において、本工法の採用が増加しつつある。

しかしながら、負圧井戸法の詳細な流動や水位低下の特性に関しては、室内実験スケールでの円筒3次元モデルによる検討^{1) 2)}は行われているが、3次元形状に対応できる現場スケール、井戸運転特性に対する定量的な議論はまだ限られている。本報では、負圧井戸法用に開発した井戸内の水収支を考慮した3次元飽和-不飽和数値解析モデルを模擬掘削現場に適用して、負圧井戸法による地下水位低下に関する解析を行い、その流動特性について検討を行う。

2. 負圧井戸法の構造と吸水原理の概要

図-1は、負圧井戸法の構造と原理を示している。負圧井戸法は、井戸管の上端部が閉じた構造になっており、真空ポンプによって管内の空気圧は負圧状態に維持される。さらに、揚水ポンプによって排水が進み、管内の水位が吸水孔の近くまで低下すると、吸水孔付近の地下水の圧力も負圧となり、井戸周辺との間に大きな動水勾配が生じて、強く吸引することができる。なお、地下水位が吸水孔の位置まで低下し、地下水面上の不飽和領域から空気が管内に流入すると、管内の負圧が低下する。現場では、このような状況になる前に、管内の負圧の大きさを低下させるか、あるいは、揚水量を減少させるなどして、地下水位を一時的に上昇させ、空気が管内に入らないような操作が手動で行われる。

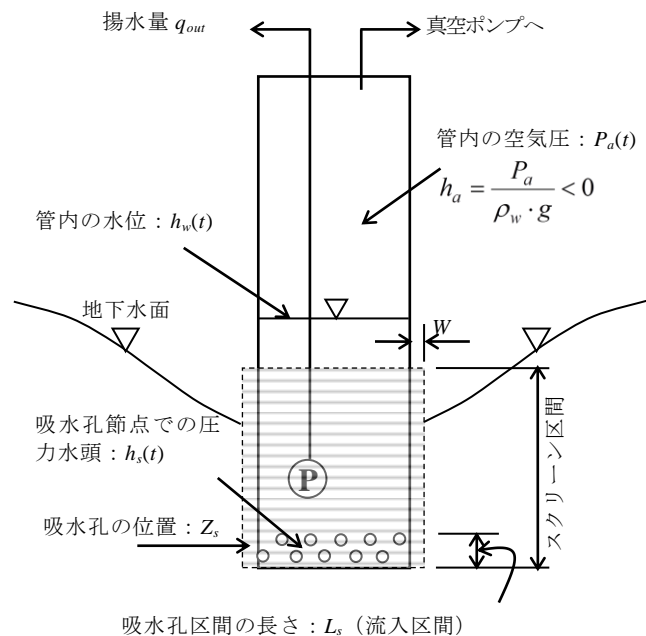


図-1 負圧井戸法の構造と原理の概要

3. 負圧井戸法の基礎式

3. 1 地下水流動の基礎式

地下水の流動解析には、式(1)で表わされる飽和・不飽和の3次元地下水流動の式を用いる。

$$(C_w + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

$$u = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial y}, \quad w = -k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

ここに、 C_w : 比水分容量(m^{-1}), α : 飽和領域で 1, 不飽和領域で 0 をとるパラメータ, S_s : 比貯留係数(m^{-1}), h : 圧力水頭(m), t : 時間(s), (u, v, w) : x 方向, y 方向, z 方向それぞれの流速($m \cdot s^{-1}$), θ : 体積含水率, $k(\theta)$: 透水係数($m \cdot s^{-1}$), (x, y, z) : 位置を表す座標(m)

なお, 吸水孔周辺部ではレイノルズ数が大きくなりダルシーの法則が適用できない場合が考えられるが, 本報では非ダルシー流れについては考慮していない。

式(1)を用いて, 不飽和領域の地下水の流動を計算する場合, 圧力水頭 h と含水率 θ との関係が必要となる。本報では, 式(2)の Van-Genuchten³⁾の式を使用した。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + \alpha \cdot (|h|)^n\right)^m}, \quad m = 1 - 1/n$$

$$C_w = \frac{\alpha \cdot m \cdot (\theta_s - \theta_r) \cdot S_e^{1/m} \cdot \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m}{1 - m} \quad (2)$$

$$k = k_s \cdot S_e^{1/m} \cdot \left\{1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right\}^2$$

ここに、 S_e : 有効飽和度, θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, k_s : 飽和透水係数である。簡単のため, 本報では透水係数は等方性と仮定する。また, α, m, n は土壤に固有のパラメータである。表-1 は, 本報の計算で用いたパラメータである。

表-1 計算に用いたパラメータの値

| 比貯留係数 | 飽和透水係数 | 不飽和特性 | | | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------|------|-------|------------|------------|
| | | α (m^{-1}) | m | n | θ_s | θ_r |
| 1.0×10^{-3} | 5.0×10^{-5} | 4.91 | 0.86 | 7.138 | 0.342 | 0.075 |

前述したように, 負圧井戸法では吸水孔に負の水圧境界条件を与える。吸水孔やスクリーン周辺部に水圧が負圧で土壤水分が飽和である領域が形成されるが, この負圧飽和領域では, 圧力が負でも透水係数は飽和透水係数に等しいと置く。すなわち, 式(1)において, $\alpha=1, C_w=0$ とする。一般的に負圧井戸法を適用する場合, 土壤間隙に空気が侵入するのは, $p=0$ となる地下水面よりも上方だけである。また, 地下水面より下は飽和地下水($p>0$), 上は不飽和地下水($p<0$)であり, 透水係数も土壤水分率も飽和時の値と比べて小さい。従って, 数値解析で得られる各時点の水圧分布の算定値で $p=0$ の面を計算プログラムの中で探すことにより, $p=0$ なる地下水面を求めることができる。同様に, 負圧井戸法では井戸周辺に負圧領域が形成される。従って, 地下水面よりも下の正圧と井戸で与える負圧の境界条件との間には $p=0$ の面が数値解析により求められる。この面の井戸側が負圧領域である。この原理はパイプの入り口が正圧, 一方の出口に負圧をかけて空気が混入しないようにして水を流すことと同じである。この場合, パイプのどこかに $p=0$ の点が存在する。負圧井戸法という負圧伝播というのはパイプの場合の $p=0$ よりも出口側の区間のこととに対応する。なお, 水圧が負圧になることにより, 溶存気体が揮発する可能性があるが, 本報では考慮しない。

3. 2 吸水孔での P_g と井戸の境界条件 h_s との関係

図-1 において, $h_w(t)$ は時刻 t における管内の水位, $P_a(t)$ は空気圧である。吸水孔の位置を井戸

底部から高さ Z_s までとする。このときの吸水孔における管内水の圧力水頭 $h_s(t)$ は式(3)で表される。

$$h_s(t) = h_w(t) - Z_s + \frac{P_a(t)}{\rho_w \cdot g} \quad (3)$$

また、真空作用下での井戸水の全水頭 $H_s(t)$ は、

$$H_s(t) = h_s(t) + Z_s = h_w(t) - Z_s + \frac{P_a(t)}{\rho_w \cdot g} + Z_s = h_w(t) + \frac{P_a(t)}{\rho_w \cdot g} \quad (4)$$

となり、式(4)の右辺第2項が加わる。 $P_a(t)$ が負圧であればその分だけ H_s が小さくなり、水頭勾配を大きくすることが可能である。

3. 3 井戸管内水の水収支式および揚水量と管内空気圧の関係

式(5)は、井戸管内水の水収支式である。

$$A_w \frac{dh_w}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (5)$$

ここに、 A_w ：井戸管の内空面積、 q_{in} ：地下水流入量、 q_{out} ：揚水ポンプによる井戸排水量である。

吸水孔周辺での地下水の流動現象にダルシー則が成り立つと仮定すると、吸水孔を通過して井戸管内へ流入する地下水の流速のある閉曲面に対する法線方向成分 v_n は式(6)で、鉛直方向成分 v_z は式(7)で表される。

$$v_n = -k \cdot \frac{\partial \phi_s(t)}{\partial n} \quad (6)$$

$$v_z = -k \cdot \frac{\partial \phi_s(t)}{\partial z} \quad (7)$$

ここに、 k は透水係数、 $\phi_s(t)$ は閉曲面での全水頭である。本報では吸水孔の外側を囲む閉曲面が円筒であるとすると、地下水流入量 q_{in} は円筒側面および円筒上下の円板面に対して式(8)で表される。

$$q_{in} = \sum_{i=1}^n v_{ri} \cdot 2\pi \cdot (r_w + w) \cdot L_{si} + (v_{zu} + v_{zd}) \cdot \pi \cdot \{(r_w + w)^2 - r_w^2\} \quad (8)$$

ここに、 v_{ri} は地下水流速の半径方向成分、 r_w は井戸管の半径、 w は巻線スクリーンと井戸管との間の隙間の幅、 L_{si} は吸水孔区間（流入区間）の長さである。また、 v_{zu} と v_{zd} は流速の鉛直方向成分で、それぞれ、鉛直上向きと鉛直下向きの流速である。 i は吸水孔区間に該当する格子番号である。

次に、式(8)による吸引量および井戸排水量を逐次与えると、式(5)から井戸内水位 $h_w(t)$ の変化を求めることができる。式(4)からも明らかのように、 $h_w(t)$ が変化すると井戸水の全水頭 $H_s(t)$ も変化する。しかし $h_w(t)$ に応じて $P_a(t)$ を調整すれば、井戸水の全水頭 $H_s(t)$ を制御できる。ちなみに、揚水開始からしばらくの間は h_w が高く、また、 P_a （負圧）も十分には低下していないため、式(4)から判るように $H_s(t)$ の値が大きい。そのため、式(6)と式(7)からは v_n と v_z が小さく、式(8)の q_{in} も小さい。もし、運転開始時に q_{out} が揚水ポンプの最大能力 (Q_{max}) に設定すると、式(5)から判るように $h_w(t)$ の低下は大きい。他方、地下水位の低下により地下水面上の不飽和領域が低下し、空気の吸い込み発生を避ける場合は、負圧 $P_a(t)$ を小さくすることで吸水量を小さくできる。

以上のように、管内水の水収支式を併用することによって、吸水口での圧力水頭 $h_s(t)$ （全水頭では $H_s(t)$ ）を境界条件として逐次変化させながら3次元地下水流動を実行することができる。換言すると、管内水の水収支式に基づいて求める圧力水頭 $h_s(t)$ を、地下水流動の境界条件として逐次変えながら計算する方法を採った。

4. 掘削工事を想定した数値解析の結果

本項では、実際の掘削工事を想定した計算条件を設定し、負圧井戸法による地下水位低下の特徴と流動特性について検討する。図-2は、地下水位低下予定領域（掘削部）の形状である。地表面の標高が EL+2.0m、水理基盤面が EL-25m で、飽和透水係数が $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ の等方均質地盤とする。地表面における降雨の浸透等は考慮せず、水理基盤面は不透水境界とする。また、井戸の中心から水平方向に 100m 離れた位置をモデルの外周部境界位置として、そこに EL+1.0m の一定水位の境界を設定する。図のように井戸を中心に地盤を一辺 14.8m の正形状に止水矢板で締切り、地表面下 12m の位置 (EL-10m) まで掘削する場合を計算する。なお、止水矢板の先端は水理基盤面 (EL-25m) の上 3.3m の位置 (EL-21.7m) とする。表-2 は、計算用に設定した負圧井戸法の仕様である。負圧井戸法の吸水孔の高さ L_s は EL-23.5~24m 間の 0.5m であり、高透水性ゾーンとして設定した巻線スクリーンは EL-18~24m 間の 6m である。

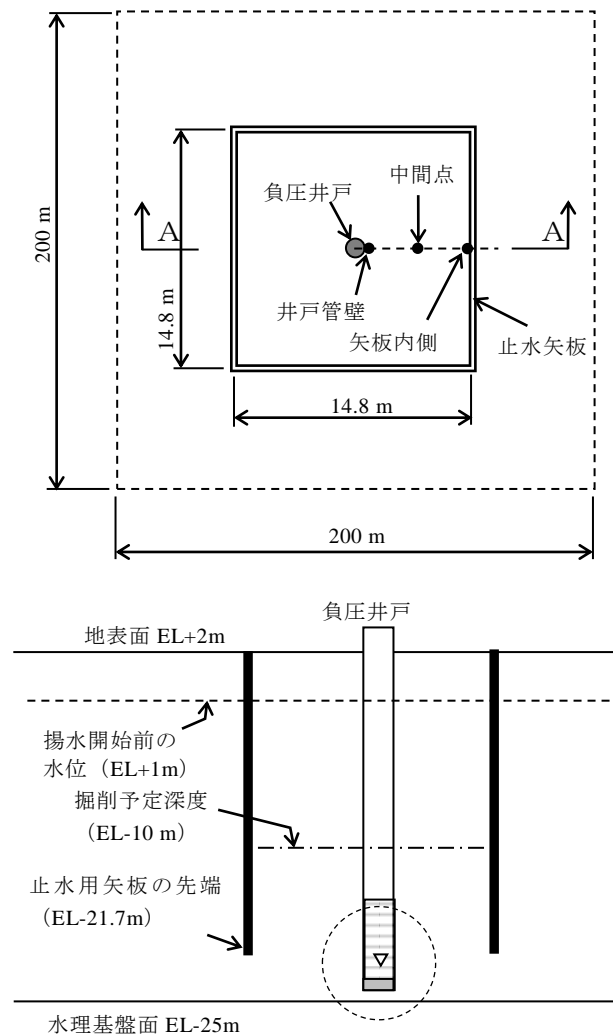


図-2 解析領域と地下水位低下予定領域

表-2 負圧井戸法の仕様

| 井戸口径 | 井戸先端位置 | 吸水孔の位置 | 管内目標水位 | スクリーンの区間 | 止水矢板先端位置 | 最大管内空気圧の水頭換算値 |
|-------|--------|---------------------------------------|--------|---|----------|------------------------------------|
| 500mm | EL-24m | EL-23.5~24m ($L_s=0.5\text{ m}$) | EL-23m | EL-18~24m ($L_s' \leq 6.0\text{ m}$) | EL-21.7m | $\max(P_a/\rho_w g) = -7\text{ m}$ |

4. 1 流入量・揚水量の時間変動と管内空気圧との関係

本報の計算では、負圧井戸法の最大ポンプ揚水量を $2.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ とし、管内空気圧は -7m まで低下可能とした。図-3は、揚水開始直後の流入量、揚水量と管内の空気圧の変動の様子である。管内の空気圧は揚水開始後 300 秒間で -7m の負圧に達するように負圧の大きさを一定の割合で増加させ、それに達した時点で、-7m の負圧を一定に保つようにした。図において、300 秒が経過した時点で流入量の増加傾向に変化が出ている。これは、管内空気圧の負圧の増大が停止した結果、流入量が増加する割合がそれまでよりも小さくなったためである。図-4は、揚水開始直後の揚水量と管内の水位の変動の様子である。揚水開始後、 $2.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ の一定量の揚水を行うと、管内の水収支式(5)

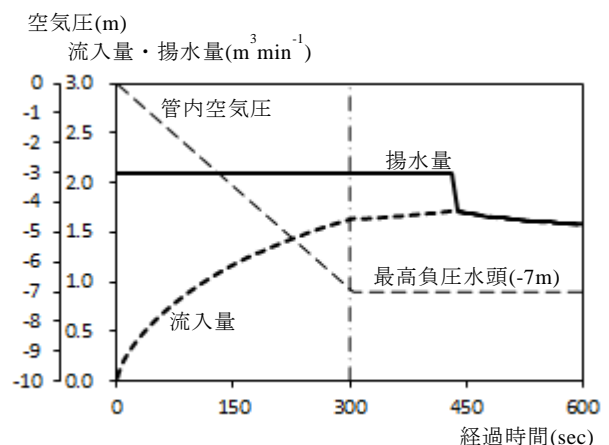


図-3 流入量・揚水量・管内空気圧の変動の様子

に示すように管内の水位は低下し、約 440 秒が経過した時点で吸水孔の 1m 上の位置（管内目標水位：EL-23m）に達する。一方、井戸管内への地下水の流入量は増加し、管内の水位が目標水位に達した時点で流入量は約 $1.7 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ となった。その後、水位を一定にすると、流入量は減少に転ずるが、負圧の効果で高い動水勾配が維持されるため流入量の低下は小さい。なお、約 50 時間経過時点での流入量は $0.99 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ である。

4. 2 時間経過に伴う地下水位低下の特徴

図-5 の 3 本の実線は、負圧井戸法によって地下水位を低下させた場合の地下水位の時間変動を示している。線色が薄いものから順に、図-2 における井戸管壁部、中間点、矢板内側における変動である。また、破線は、井戸の長さが同じで、井戸壁全体にストレーナーを設けたディープウェル（以下、DW と記す）によって、地下水位を低下させた場合の変動を示している。

負圧井戸法では、約 16 時間が経過するまでは 3 地点の水位の低下状況はほとんど同じである。その後、まず、矢板内側が遅れ始め、約 23 時間が経過する頃になると中間点も遅れ始める。さらに、時間の経過とともに、3 地点の水位差は次第に大きくなる。一方、DW の場合は、揚水開始直後から 3 地点の地下水位の低下状況に明瞭な差が見られ、井戸管壁部で低下が最も大きく、中間点、矢板内側の順で小さい。また、約 48 時間が経過する時点までは、3 地点の水位の差が次第に大きくなる。その後、3 地点の水位の低下速度は小さくなる。

図では、揚水開始から約 17 時間が経過する間は、3 地点とも、DW の場合の方が負圧井戸法の場合よりも水位が低くなっている。これについては、井戸壁部における地下水の流入面積の差によるものと考えられる。地下水の流入量は流入速度と流入面積に比例する。揚水開始からしばらくの間は、地下水位が十分に低下していないため、DW では、ストレーナー区間の長さが長く、流入面積が大きいものに対して、負圧井戸法では、この計算例の場合、前出の q_{in} の計算に用いる流入区間の長さ L_s を吸水孔区間の長さ（0.5 m）としており、流入面積が小さい。このため、負圧井戸法では、揚水開始の初期段階では揚水量が小さい。

4. 3 掘削域内における地下水位低下の特徴

図-6 は、図-2 の A-A' 方向にとった断面図である。負圧井戸法による地下水位と吸水孔およびスクリーン周辺に形成される負圧飽和領域の変化の様子である。地下水位の低下速度は時間の経過に伴って徐々に小さくなるが、48 時間が経過する頃まで明瞭な低下を示す。12~24 時間が経過する頃までは、地下水位は地表面にほぼ平行に低下し、その後は井戸管周辺の低下速度が矢板内側に比

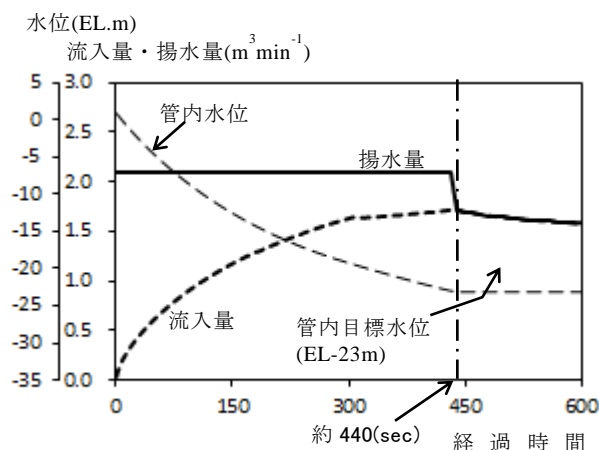


図-4 揚水量と管内水位の変動の様子

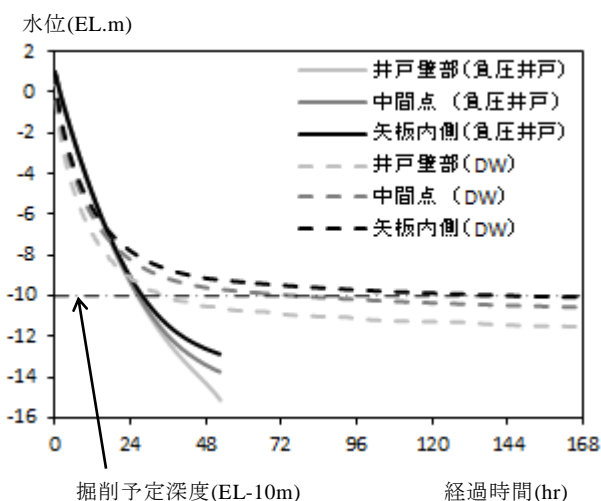


図-5 負圧井戸法による地下水位低下の様子

べて次第に大きくなり、地下水面の形状が下向きに凸状を示すようになる。また、負圧飽和領域は、井戸管に沿って上向きに拡大する。24時間が経過する頃まではほぼ一定割合で拡大し、その後、時間の経過とともに拡大する割合が大きくなる傾向がある。

図は約53時間経過時までの様子を示しているが、この後ごく短時間のうちに、上側からは負圧（毛管圧）の不飽和領域が、また、下側からは負圧の飽和領域が互いに接近し合致する。その場合、地下水面上の空気が負圧飽和領域内に侵入し、吸水孔から空気が井戸管内に入るため、管内の空気圧が上昇し、負圧井戸法の吸水効果が低下する。実際の現場では空気圧を調整して揚水量を低下させるなどの作業をしているが、本報で提示した管内の水収支式はこのような調整の妥当性を記述するものである。

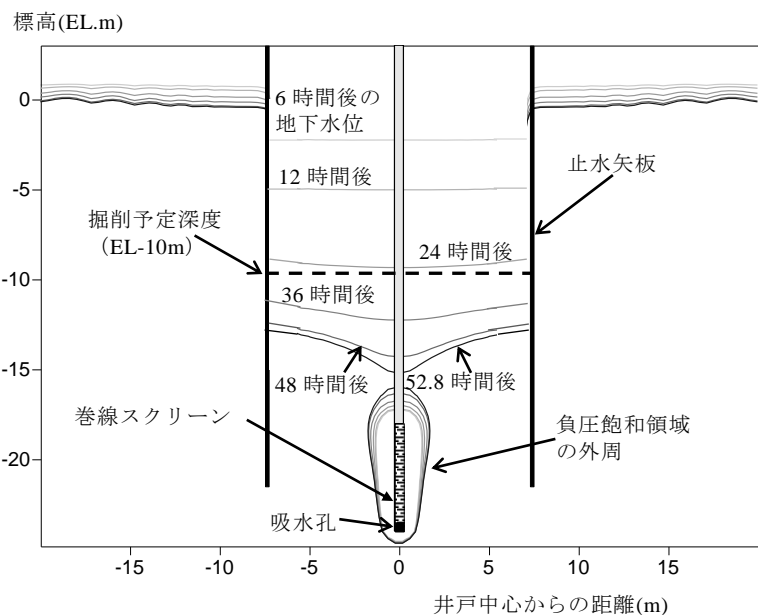


図-6 負圧井戸法による掘削域内での地下水位低下状況

5. まとめ

本報の検討で得られた知見は以下のとおりである

1. 井戸による地下水低下の数値解析モデルにおいて、井戸で与える境界条件等を負圧井戸法に合わせることによって負圧井戸法の水位低下を表現できる。
2. 揚水開始から約16時間は、掘削域内の井戸壁部、中間点、止水矢板内側の3地点での地下水位の低下状況はほぼ一様である。その後、井戸から遠い地点ほど低下量の割合が小さくなる。
3. 揚水開始直後の地下水位の低下速度は、DWの方が負圧井戸法よりも大きい。その後、DWでは、低下速度が急激に小さくなるのに対して、負圧井戸法の場合、低下速度は徐々に小さくなるが、比較的長い時間、明瞭な低下を示す。
4. 負圧飽和領域は、井戸管に沿って上向きに拡大する。24時間が経過する頃まではほぼ一定割合で拡大し、その後、時間の経過とともに拡大する割合が大きくなる傾向がある。
5. 井戸管への不飽和空気を侵入させないためには、本報で示したように、管内の空気圧を調整し、地下水面の低下を制御することになる。

参考文献

- 1) 中川啓・靱井和朗・神野健二・和田信一郎・朴崎鎬・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 春季講演会講演要旨, 94~97.
- 2) 細川土佐男・高橋茂吉・神野健二・中山比佐雄・朴崎鎬 (2006) : 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. 日本地下水学会 秋季講演会講演要旨, 84~87.
- 3) Van-Genuchten, M.Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.