

報文

地下水位低下工法と復水工法を 一体化した揚水・復水工法

—船橋市立船橋高等学校体育館の建設工事—

高丘 健太郎* 遠山 文行** 山本 紀雄*** 尾崎 哲二****

1 はじめに

スーパーウェルポイント工法（以下、SWP工法）は、バキュームディープウェル工法（以下、VDW工法）を改良した地下水位低下工法として、今から20年前（1998年）に㈱アサヒテクノによって開発された。その後、328（2018年3月末）の現場で採用されている。

一方、同社はSWP工法により揚水される地下水が井戸内の減圧により脱気されることを生かし、SWP工法と一体化して運転する真空プレス型リチャージウェル工法（以下、VPRW工法、復水工法）を開発している。

本報では、これらの技術の概要とともに、これらを用いた事例¹⁾を紹介する。

2 SWP工法とVPRW工法

2.1 SWP工法^{2), 3), 4)}

図-1に構造図を示す。

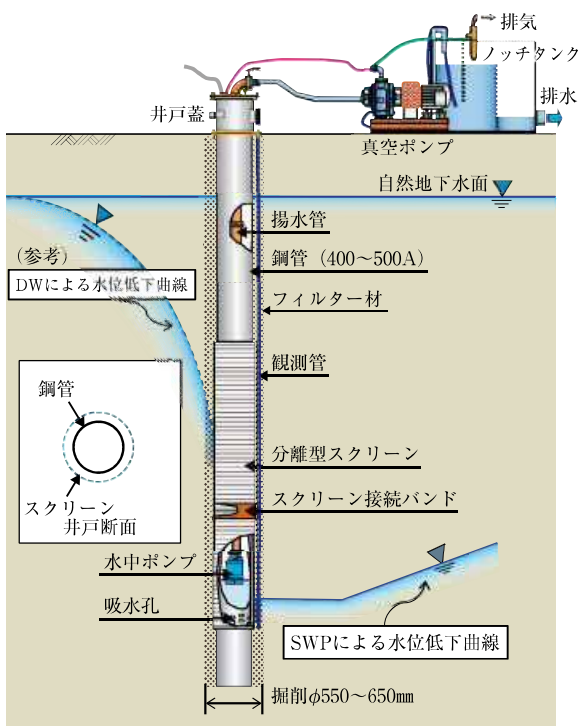


図-1 SWP構造図

井戸管は通常、径400mmの鋼管を用いる。井戸管の下端部に径100mmの孔（吸水孔）を複数個設け、井戸管の周囲を径450mmのスクリーンで取り囲む。吸水孔の直上に水中ポンプ（通常200V、11KW）を設置する。

地上には真空ポンプ（200V、11KW）を設け、井戸管内の空気を吸引するホースを井戸管頭部に接続する。また、揚水した地下水をいったん受けるノッチタンクを設け、貯留する水を真空ポンプの冷却水として利用する。

SWP工法のもとになったVDW工法は、ディープウェル工法（以下DW工法）と同様に井戸管にスリット（スクリーン）を設けているため、周辺の地下水位が低下するとスリットから空気が侵入し、井戸管内の減圧を維持できなくなる欠点があった。この欠点を補うため、SWP工法では井戸管の構造を上記のように改良したのである。

図-2にSWP工法における地下水のピエゾ水頭（位置水頭+圧力水頭）を模式的に示す。

地下水はダルシー則（経験則）にしたがって流れる。

SWP工法、DW工法ともに井戸内の地下水のピエゾ水頭を下げ、周辺地下水のピエゾ水頭との間に水頭差を生じさせ地下水を集めることに変わりはない。そして、集まる地下水を水中ポンプで揚水して井戸周辺の地下水位を低下させるのである。

井戸内の地下水のピエゾ水頭を下げるには、水位を常に低下させておくことが必要である。水中ポンプで揚水できなければ、井戸内水位は上昇してピエゾ水頭が高くなり、集まる地下水量が低下するからである。そのため、計画では集水量を十分に揚水できる水中ポンプを準備する。

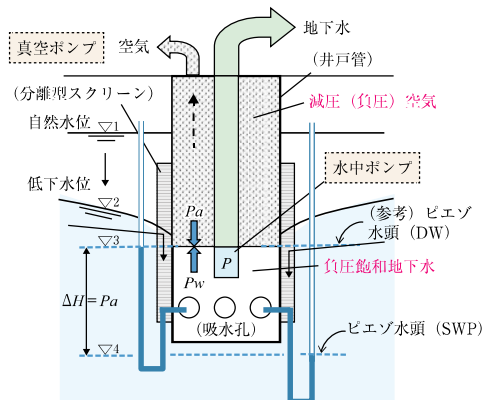


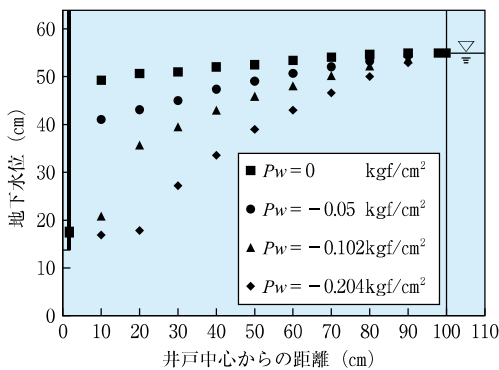
図-2 SWP工法の原理

ここで確認しておきたいことは、地下水を井戸に集める機能と揚水する機能とは基本的に独立しており、大きな水中ポンプを設置したからといって直ちに揚水量が大きくなるものではない。

さて、井戸内の地下水と周辺地下水の

* TAKAOKA Kentarō 船橋市役所 建設局 建築部 建築課
 ** TŌYAMA Fumiyuki 日本国土開発㈱ 東北支店 プラウド堤通雨宮町Ⅲ計画新築工事事務所 所長
 *** YAMAMOTO Norio ㈱教育施設研究所 常務取締役 設計本部 副本部長兼構造部長
 **** OZAKI Tetsuji ㈱アサヒテクノ 東京支社、博士(工学)

船橋市湊町2-10-25
 仙台市青葉区堤同笠雨宮町2-21 クラッセ雨宮ビル3階
 東京都中央区日本橋本町3-4-7 新日本橋ビル
 東京都江戸川区平井5-11-8 サンヨーハイツ401



高さ64cm、直径231cmの半円筒の水槽に砂（6号珪砂 $k=5.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ ）を充填し、円周部近くを網で区切り外側に貯水槽を設ける。直線部の中央に井戸を設置する。井戸のストレーナー（スクリーン）の下端の高さ14.5cm、長さ3cm。（参考文献5）より引用。

図-3 水槽実験結果

ピエゾ水頭の差によって井戸に集まる地下水の流速（流量）は決まるが、周辺地下水位が低下すれば、その差は小さくなるから集まる流量は低下する。このため、DW工法では平衡時、井戸脇の水位が高止まる（井戸ロス）ことになる。

一方、SWP工法では井戸内の地下水位を低下させることに加え、井戸内の空気を真空ポンプで吸引する。このため井戸内の空気圧が減じ、地下水面が負圧（飽和 водаが負圧）となって井戸内の地下水のピエゾ水頭がさらに低下する。この仕組みにより、SWP工法ではDW工法に比べ多量の地下水が集まる。つまり揚水量が多くなる。また、周辺の地下水位が低下しても井戸の地下水には負圧が生じているから、有意なピエゾ水頭差が維持され井戸ロスが生じない。これをDW工法と比較して示しているのが図-3である。これは九州産業大学の細川土佐男教授によって実施された実験結果⁵⁾である。負圧の付加により水位が大きく低下しているようすが分かる。水位低下が井戸脇のみならず周辺にも及んでいる。

SWP工法は、このように井戸内の水位を下げ、加えて負圧を与えピエゾ水頭を大きく低下させる工法なのである。

SWP工法は上記の仕組みから次の特徴を持つ。

図-3より、SWP工法とDW工法（図中の $P_w = 0$ ）は同じ深さに設置されている。地下水面の比較から仮にSWP工法で生じる井戸周辺の地下水位低下をDW工法で得ようとすると、さらに深い井戸を設置する必要がある。このとき揚水量が大きくなり、井戸周辺の広い範囲で地下水位が大きく低下することは容易に推定される。

つまりSWP工法では揚水能力が大きいため、所定の地下水位低下を得るために比較的浅い深度に井戸を設置することができるのである。このため、水位低下後の平衡時の揚水量はDW工法に比べ小さくなり、周辺の地下水位低下量も小さくなる。この特徴はSWP工法の大きな利点である。

2.2 VPRW工法

揚水した地下水は通常、近傍の下水道や河川に排水される。しかし、排水先において大きな費用が発生する場合や管理上問題となる場合には、近傍において復水（リ

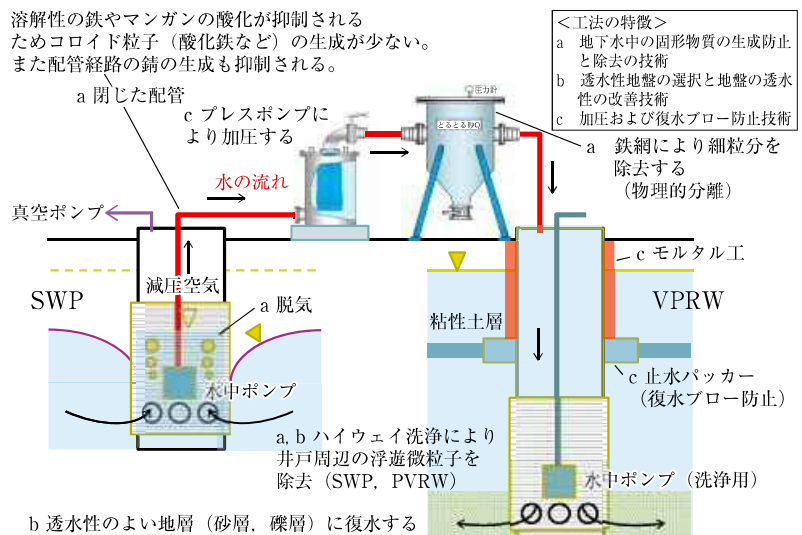


図-4 VPRW工法の概要と特徴

チャージ）が行われる。

復水においては、一般に揚水井戸1本の揚水量に対して1本の復水井戸で復水することは難しく、2本以上の復水井戸が必要になる場合が多い。これは、復水では目詰りが生じやすいことや加圧が必要であることに起因すると考えられる。

開発したVPRW工法は、SWP工法と一体化（1対1対応）した復水工法である（図-4参照）。

VPRW工法では揚水井戸（SWP）からの排水管を直接復水井戸（VPRW）に接続する。途中にはプレスポンプ（水中ポンプ）および砂や細粒分を除去する装置（とるとる砂Q）を組み込む。

揚水井戸および復水井戸の設置時には強力な洗浄（ハイウェイ洗浄）を実施し、井戸近傍の地盤中の細粒分を除去する。またSWP工法では井戸管内を減圧するため地下水中の気体が脱気され、排水管は閉じているため地下水は空気に触れずに復水井戸へと流れる。このため地下水に含まれる溶解性の鉄分などが酸化されず、コロイド粒子（酸化鉄など）の生成が抑制される。このように、本工法では目詰りを防止する仕組みとなっている。

さらにプレスポンプは復水する地下水の圧力を高め、地盤中に押し込む作用を担う。これまでの事例ではプレスポンプの圧力を 3 kg/cm^2 （水柱高で30m）まで高める場合もあるが、運転せずに復水できる場合もある。

3 事例

SWP工法とVPRW工法を用いた事例を紹介する。

千葉県船橋市にある船橋市立船橋高等学校の新設の体育館（第3体育館）建設工事における事例である。

3.1 工事概要

対象地は下総台地にあり、地表の標高（施工基盤面GL）はTP+6.5mである。図-5の平面図に土留め壁（SMW）、揚水井戸のSWP（2本）、復水井戸のVPRW（2本）および水位観測井戸（3本）の設置場所を示す。

図-6の模式断面図にはSWP、VPRWおよび水位観測

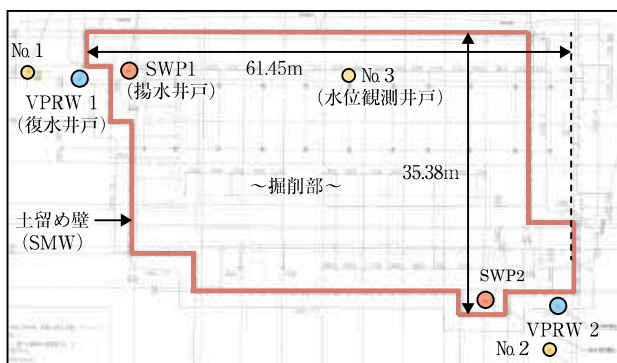


図-5 平面図

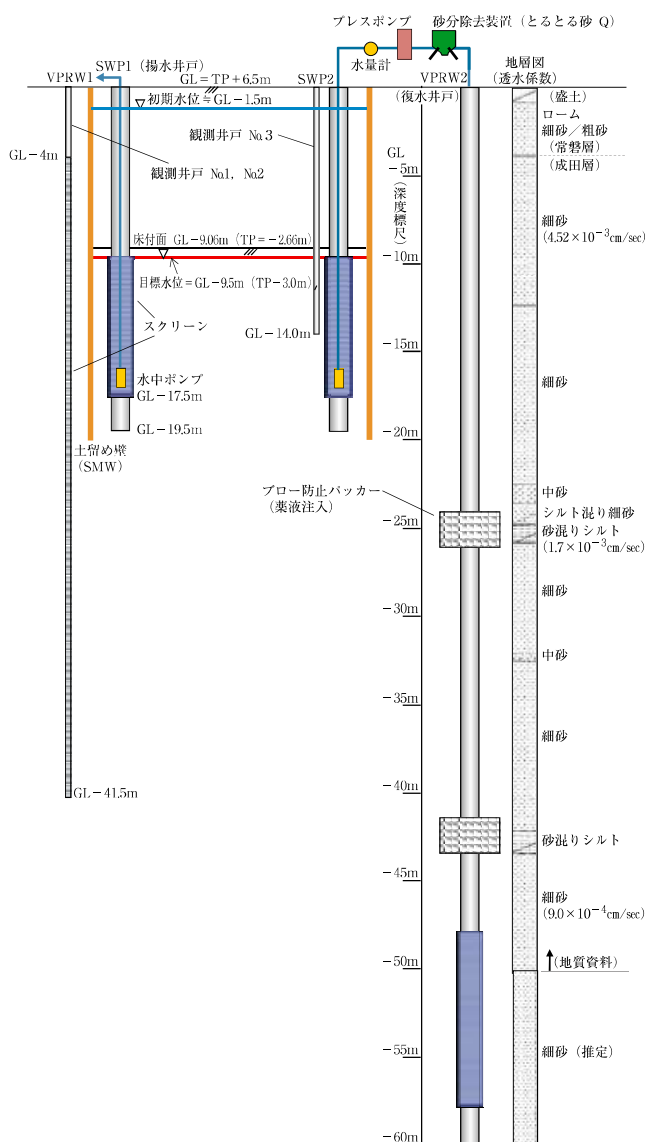


図-6 断面図

井戸の構造を示し、地層区分および透水係数（現場透水試験による）を併記する。

図-6より、地表部の盛土（舗装含む）の下にはローム層、常陸層（細砂、粗砂）がGL-3.8mまで続く。その下位は成田層であり、細砂を主体とする地盤がGL-50mまで確認される。途中には層厚1～2mの粘性土層が2深度に存在するが、地下水は被圧しておらず自然地

下水位はGL-1.5m近くにある。

SWPの設置場所は仮設物、トラフカビリティなどを考慮して決定した。VPRWは土留め壁外の対応するSWPの近傍に設置した。水位観測井戸は土留め壁内の掘削部に1カ所、壁外に2カ所設置した。掘削床付面はGL-9.16m（TP-2.66m）にあり、土留め壁の下端はGL-20mにある。

図-6より床付直下のGL-10m近くの揚水の対象となる細砂層の透水係数は $4.52 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、GL-25m近くの細砂層では $1.7 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、GL-45m近くの復水の対象となる細砂層では $9.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ である。

当該地では、①掘削のための水替工（地下水位低下工法）が必要であり、②近くの道路・住宅の沈下防止対策として周辺地下水位の低下を抑制する必要があった。そのため、これらの課題に対応でき、多くの実績のあるSWP工法により地下水位低下を図った。一方、揚水した地下水の処理方法にはVPRW工法を選定した。

掘削部の水位低下目標は床付面よりやや低いGL-9.5m（=TP-3.0m）とした。自然地下水位から8mの水位低下を図ることになる。その他、真空ポンプの騒音対策、停電などの緊急時対策なども実施した。

3.2 SWPおよびVPRWなどの構造ならびに工事中の測定

SWP 2本の井戸構造は同じであり、深さはGL-20mまでとした。スクリーンは床付面直下のGL-9.5mからGL-17.5mまでの8m区間に設置した。そのため、吸水孔は土留め壁の下端より2.5m上にある。VPRW 2本の井戸構造はSWPと同じであり、深さはGL-60mまでとした。復水する区間すなわちスクリーン区間はGL-48mから-58mまでの10mとした。復水時、井戸脇の豆砂利層を通じて地下水が上方にブローする恐れがあるため、井戸脇の粘性土のある2深度に薬液注入によるブロー防止対策を行った。掘削部の水位観測井戸1本は、径43mmのロッドを所定深度まで挿入し下端を開放した構造とした。土留め壁の外の水位観測井戸2本は径50mmでGL-4m以深にスクリーンを設けた。これらの水位観測井戸の水位は、原則作業日の朝8時半から9時において手計りの水位計で測定した。揚水量（復水量）は復水管の途中に水量計（瞬時値、累積値）を取り付け、作業日の朝に測定した。また、地上においては沈下測定を目的に道路や住宅地において標高を定点観測した。

3.3 運転および測定結果

地下水位および揚水量（=復水量）ならびに掘削の進捗状況を図-7（期間2016年6/16～12/9）に示す。また掘削時の状況を写真-1に示す。

図-7より運転を開始した6月23日の3カ所の水位観測井戸の水位はTP+5.0m（GL-1.5m）前後であった。開始から13日目の7月6日には掘削部のNo.3は床付面のTP-2.66m（GL-9.06m）のレベルに、7月14日には目標水位のTP-3.0m（GL-9.5m）に達し、その後は掘削終了時まで概ね床付面と目標水位の間で推移した。写真-1に示すように地盤はよく乾いた状態になり、掘削などの作業を良好に進めることができた。

一方、外部のNo.1では8月9日にTP+4.10m（GL-2.4m）、No.2では8月5日にTP+4.5m（GL-2.0m）

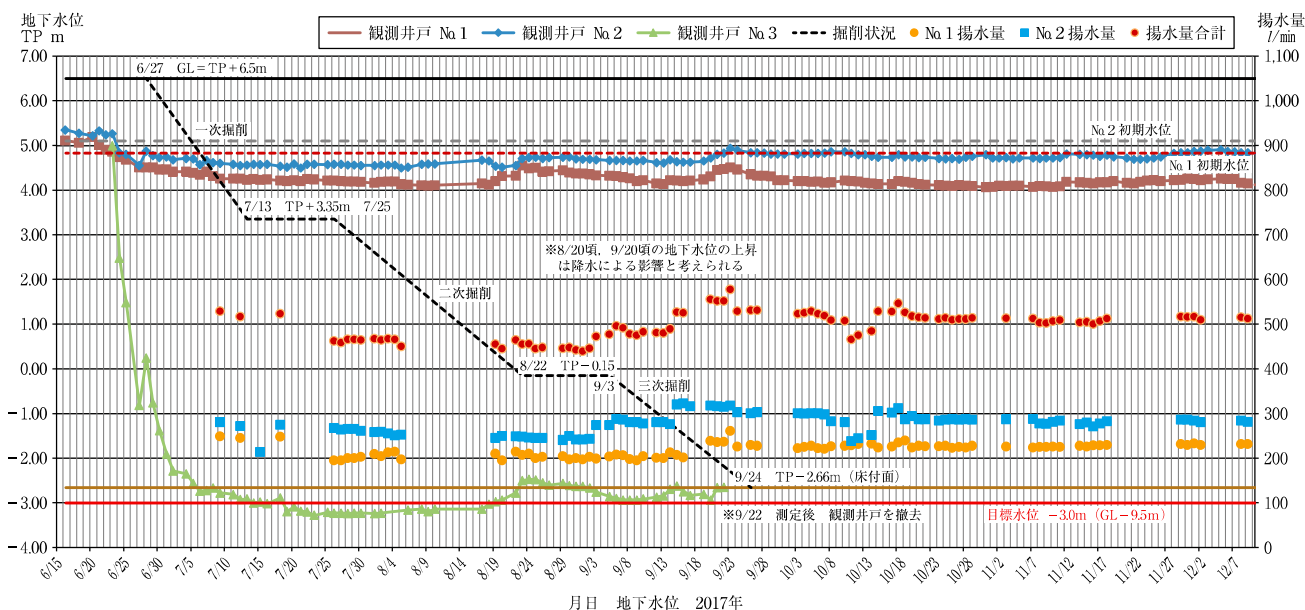


図-7 地下水位および揚水量（復水量）と掘削の進捗状況

の最低水位を記録するが、No.1・No.2ともに初期水位から1m以内の水位低下で推移した。

復水においては、復水する地層の透水係数が $9.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ と比較的小さいこともあり、運転初期には目詰りが生じた。そのため洗浄を実施するとともに、揚水量（=復水量）を調整しながら運転を進めた。水位がTP-2.78mまで低下した7月9日の揚水量（全体）は529 L/minであった。その後は500L/min前後で推移し、目詰りは生じなかった。またプレスポンプは運転せず、揚水ポンプの余圧力に数メートルの静水圧を加えた圧力で復水することができた。

周辺地盤の沈下に関しては、道路においても住宅地においても生じなかった。9月24日に掘削工事は終了し、同時に掘削部のNo.3の水位観測井戸を撤去した。

その後、ベースコンクリートの打設を終え、2階（地上）床コンクリート打設後の2017年の5月12日に運転を停止した。体育館は同年12月27日に竣工した。

3.4 まとめ

地下水位低下および復水にSWP工法およびVPRW工法を用いた結果、

- ① 地下水位を目標の水位（GL-9.5m）まで低下させ、掘削作業等をドライワークで進めることができた。
- ② 土留め壁外の地下水位は初期水位（自然水位GL-1.5m）より1m以内（GL-2.0m, GL-2.4m）の低下に留まり、道路・住宅地において沈下は生じなかった。
- ③ 揚水した地下水を復水井戸により復水することができた。

4 おわりに

SWP工法およびVPRW工法の概要を示し、これらを用いた事例を紹介した。

ともに真空ポンプによる負圧を利用した工法であり、SWP工法では井戸内の負圧を地下水の集水力として利用した点が、VPRW工法ではSWPの負圧による地下水



写真-1 掘削時の状況

の脱気に利用した点がポイントであった。SWP工法、VPRW工法とも実績を重ねているが、改良すべき点はまだ多い。今後の課題として取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 遠山文行, 川村和靖, 川尻謙一, 山本紀雄, 尾崎哲二, 高橋裕幸, 大島博美, 菊池拓: 体育館建設工事にともなう地下水位低下と復水について, 土木学会第72回年次学術講演会概要集, pp. 979~980, 2017.
- 2) 山根隆行, 高橋茂吉, 武田滋生, 小山康文, 神野健二, 武曉峰, 尾崎哲二: スーパーウェルポイント工法, p. 7, 建設通信新聞, 2006年5月30日.
- 3) 尾崎哲二, 高橋茂吉, 中山比佐雄, 神野健二: 真空ポンプを利用した新しい地下水位低下工法, CEレポート, 土木学会誌 Vol. 92, No.8, pp. 68~69, August, 2007.
- 4) 堤敦, 神野健二, 尾崎哲二, 中山比佐雄: 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, 日本地下水学会秋季講演会講演要旨, pp. 234~239, 2012.
- 5) 細川土佐男, 中山比佐男: 井戸に揚水と同時に真空圧を作用させる地下水位低下工法の室内実験による検討, 日本地下水学会秋季講演会要旨, pp. 98~103, 2009.