

線路下横断の施工に適用した 地下水位低下対策

柳 博文¹・本田 諭²・高橋 俊徳³・糸井 博之⁴・小池 敏雄⁵

¹正会員 鉄建建設株式会社 建設技術総合センター 研究開発センター

(〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

E-mail:hirofumi-yanagi@tekken.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 工事管理室

(〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6 JR新宿ビル8階)

E-mail:hondas@jreast.co.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 品川ターミナル

(〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6 JR新宿ビル9階)

E-mail:toshin-takahashi@jreast.co.jp

⁴正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 安全企画室

(〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6 JR新宿ビル8階)

E-mail:h-itoi@jreast.co.jp

⁵株式会社ジェイテック 工事部 基礎工事グループ

(〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 3-12-3 神保町スリービル 6F)

E-mail:toshio-koike@j-t-e-c.co.jp

地下水位が高い地盤に地下構造物を構築する場合、薬液注入工法や地下水位低下工法といった地下水対策が必要となる。今回、線路下に非開削工法で道路函体を構築する立体交差工事において、補助工法として地下水位低下工法が採用された。当該箇所では、揚水した地下水を下水道に処理できないこと、周辺地域で井戸を利用している環境であることから、揚水した地下水を地盤に還元することとし、地盤中に加圧注水する「エコリチャージ工法」（循環型地下水低下工法）を採用した。その結果、工事全体として必要な範囲での地下水位低下を確保し、安定的な揚注水運転が可能なが確認された。さらに、小口径揚水工法を採用して、ディープウェルを設置できない狭隘な箇所に小口径揚水井を複数配置することによって、ディープウェルの代わりにすることができた。

Key Words : groundwater level reduction, recharge, crossing under railway tracks, pumped water

1. はじめに

地下水位が高い地盤においてアンダーパスなどの地下構造物を構築する場合、地下水対策として薬液注入工法や地下水位低下工法などの補助工法がある。今回報告する工事は、JR横須賀線および東海道新幹線と都市計画道路との立体交差化に伴い、線路下に非開削工法にて道路函体を構築し、現在の踏切を除却するものである。

対象となる施工箇所は地下水位が高く、非開削で道路函体を線路下に施工するためには地下水対策が必要となった。施工条件等を考慮し薬液注入工法と比較検討した結果、当該箇所においては近接構造物への影響が少ない地下水位低下工法が採用された。しかし、揚水した地下水処理に下水道を利用できないこと、周辺での井戸の利

用があることから、周辺地域への影響を考慮して、揚水した地下水を地盤に還元することとした。このとき揚注水を計画的に行うためには、主に注水量を制御することが不可欠であることから、地盤中に加圧注水する「エコリチャージ工法」（循環型地下水制御工法）¹⁾²⁾を採用した。

さらに、ディープウェルの施工が困難である線路脇の狭隘な箇所に、小さい掘削径で施工できる小口径揚水工法³⁾を採用し、3本の小口径揚水井を設置し、ディープウェルの代わりとした。

本報告では、当該現場で採用された地下水対策工法の適用状況について報告する。

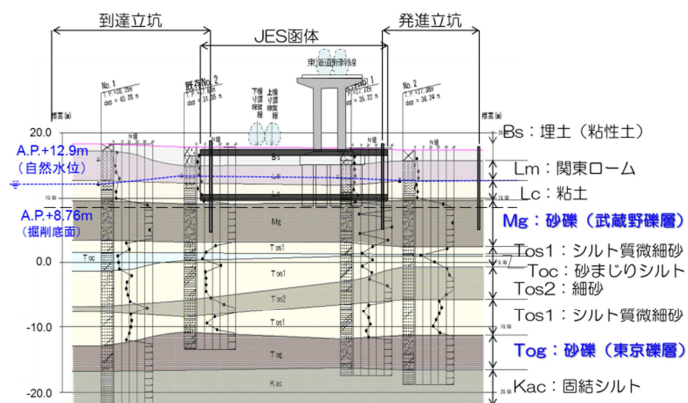


図-1 施工箇所の地層断面

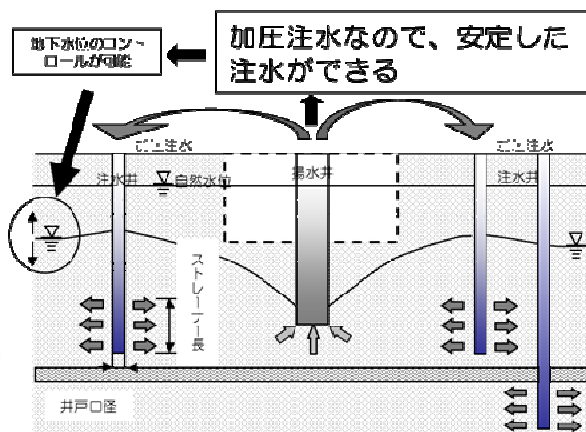


図-2 エコリチャージ工法の概要

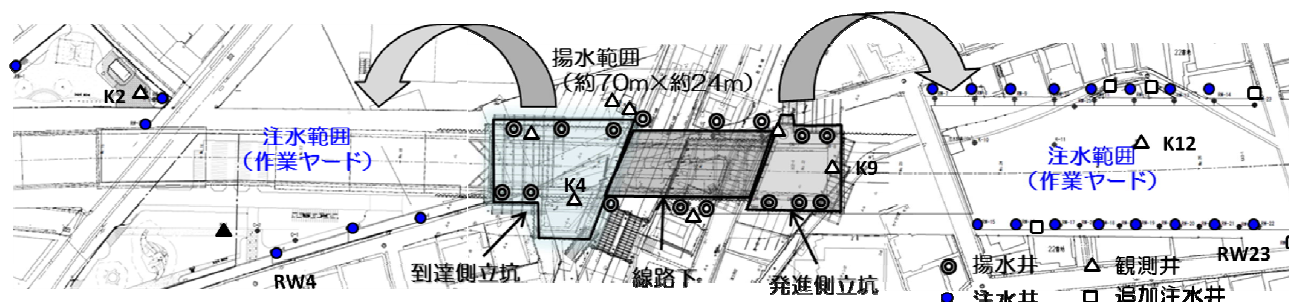


図-3 施工箇所の平面図および井戸配置

2. 工事概要

施工箇所は、JR横須賀線と都市計画道路の立体交差部であり、線路下を横断する幅11.5m×高さ7.7m×延長31.6mの一層一径間ボックスカルバートを構築する工事である。新設構造物が新幹線橋脚のフーチングに近接しているため、施工による影響を考慮して、非開削工法であるHEP&JES工法を採用した。この工法は、小断面の鋼製箱型エレメントを順次掘進し、閉合することでボックスカルバートを構築する工法である。図-1の施工箇所断面図に示すように、掘削底面（A.P.+8.76m）に対して、底面付近の武蔵野礫層（以下、Mg層とする）の地下水位がA.P.+12.9mとなっており、掘進時の止水対策として、地下水位を低下させる必要があった。その際、地下水位低下による圧密沈下が懸念されたが、過去の工事履歴を確認したところ、既に揚水により地下水位を低下させた実績があることから、当該地盤は過圧密状態にあり問題はないと考えた。また、下水処理能力や周辺環境への影響を考慮し、揚水した地下水を下水道に放流しないように、施工ヤード内に設置する注水井で復水することとした。

3. エコリチャージ工法の概要

本工法の概要を図-2に示す。揚水した地下水を重力に

より復水する従来のリチャージ工法では、注水量をコントロールできないため、期待通りの効果が得られず、揚水した地下水を下水などに排水する場合が多かった。本工法では、揚水した地下水を加圧して地盤に戻すことで、注水量を増加させ、下水などへの排水を少量にするものである。注水圧の増減により注水量を制御できるほか、1本当たりの注水量を増加させることで稼働させる注水井の本数を減らすことが可能になる。また、下水道への排水を少なくすることでコストの縮減になる。

4. 揚注水による地下水位低下計画

図-3に施工箇所の平面図を示す。地下水位を低下させたい範囲は、発進側立坑、線路下、到達側立坑となる約70m×24mの範囲である。揚注水する層は、Mg層である。自然地下水位は、図-2に示したように事前調査によりA.P.+12.9mであり、道路函体の施工には水位をA.P.+8.76m（立坑床付けおよびボックスカルバート下端）まで低下（水位低下量4.4m）させる必要があった。そこで、揚注水計画を井戸理論（Theisの非定常式）を用いて行うことにした。その際、事前に行った到達側ヤード内で現場揚水・注水試験の結果から、そのときの地下水位の経時変化より揚注水の対象となるMg層の透水係数を $k=3.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と推定した。必要揚水量は、水位低下量よ

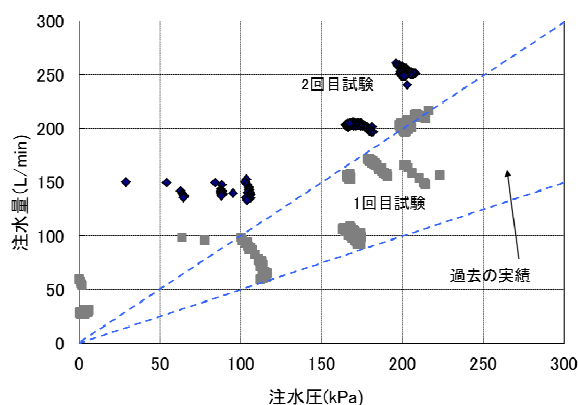


図-4 現場注水試験による注水圧と注水量の関係

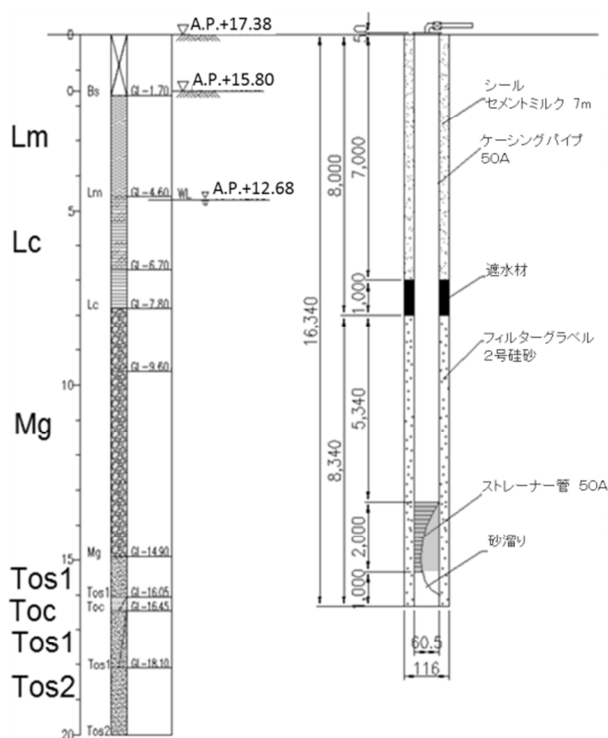


図-5 注水井構造例

り5,920L/minとし計16本の揚水井を設置した。注水については、揚水した地下水をすべて注水するものとした。図-4に示す現場注水試験の結果と既往の実績に基づく注水圧と注水量の関係⁴⁾を参考にして、注水量を270L/min/本、注水圧を270 kPa(0.27MPa)とした結果、必要な注水井本数は22本となった。図-5に注水井の構造を示す。井戸の掘削径はΦ116mm、注水管は50A(Φ60.5mm)、ストレーナー長は2mである。通常、注水井のケーシングパイプは32A(Φ42.7mm)を使用していたが、想定よりも透水性の良い地盤で、注水量が増加することを考慮して、管内の圧力損失を小さくするため、その後はケーシングパイプを50Aに変更した。

井戸の配置は、図-3に示したが、地下水は発進側および到達側立坑部と線路下部で揚水し、発進側および到達側の作業ヤードに設置した注水井で還元した。揚水範囲

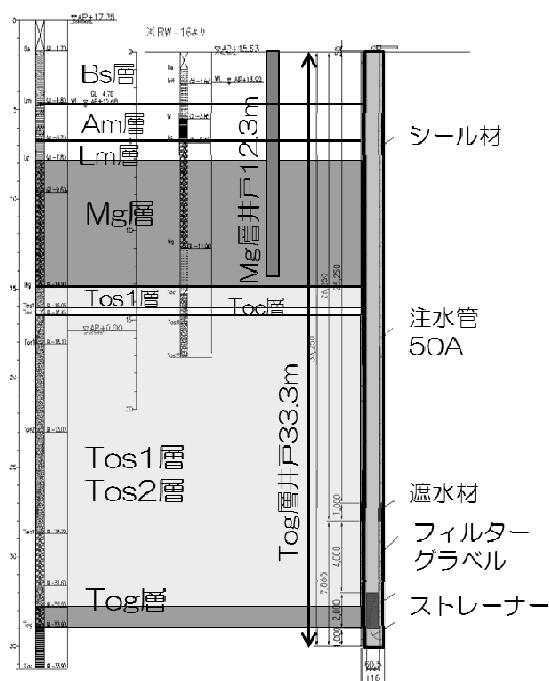


図-6 発進側地層図と Tog 層注水井構造

の地下水位は、井戸の配置に基づき、Theis 式などを用いて計画水位まで低下することを確認した。また、施工中は周辺の観測井の実測値をフィードバックして、計算値とほぼ一致するように仮の透水係数等を算出し、後の地下水位の低下に必要な揚水量、注水量を推定した。

5. 発進側ヤードの注水井計画の変更

本工事では、到達側ヤードで先行して注水試験等を実施し、上記の計画を策定してきた。その後、発進側ヤードでの注水開始に先立ち、注水試験を実施したところ、一部の注水井で井戸周囲からの漏水が確認された。そこで、この付近において追加で地質調査ボーリングを行ったところ、図-6に示すように腐植土層 (Am 層) が堆積し、当初想定していた不透水層 (関東ローム層 ; Lm 層) が薄くなっていることが分かった。そのため、十分な遮水効果が得られず、井戸周辺に水みちができたことが、漏水の原因であると推定した。そこで、前述の試験結果を踏まえ、発進側ヤードでは、当初計画した一部の井戸は地下水涵養のため最低限の注水を行いながら、より深い第2滞水層である東京礫層 (Tog 層) にも注水することで、不足した注水量を確保することにした。追加した注水井の長さは33.3mであり、注水試験の結果400～600kPaで200～300L/min/本の注水を行うことができた。その際、揚水する第1帯水層であるMg 層と注水する層が異なることから、Mg 層上層の圧密沈下等が懸念されたが、Am 層については、圧密試験により過圧密状態で

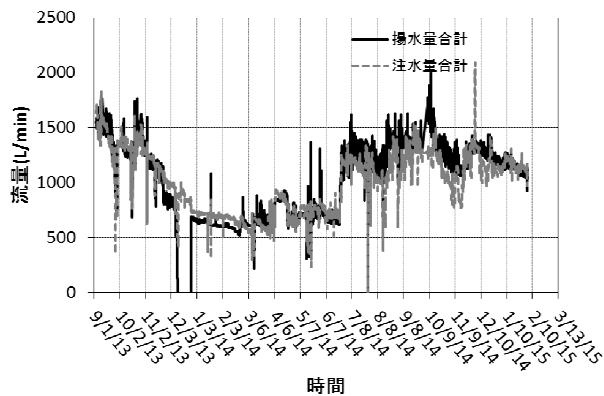


図-7 総揚水量と総注水量の経時変化

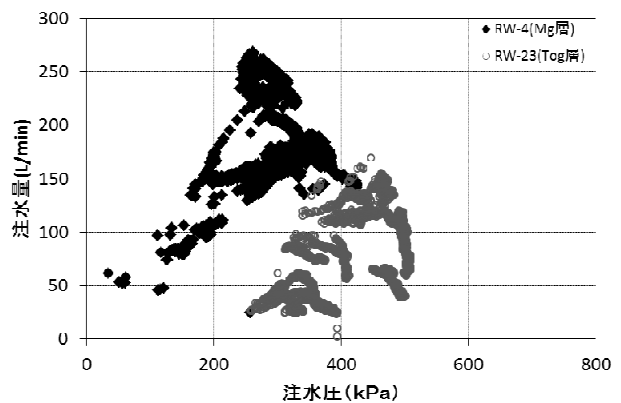


図-9 注水圧と注水量の関係

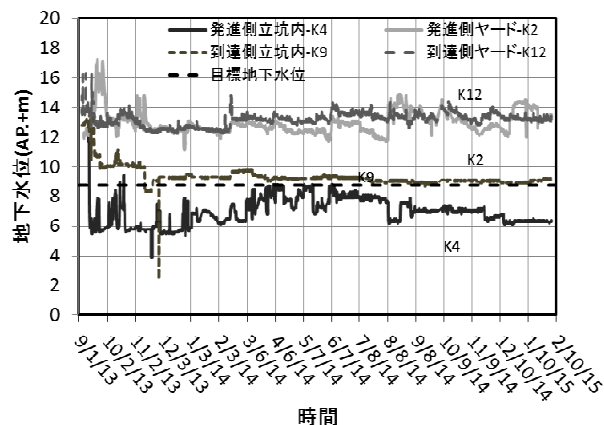


図-8 地下水位の経時変化

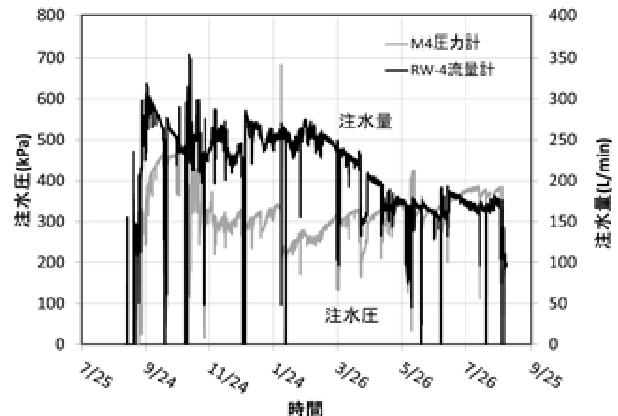


図-10 RW-4の注水圧と注水量の経時変化

あることを確認した。また、当初想定していた立坑および発進側ヤード付近のLm層については、過去の地下水位履歴の調査結果より、今回よりさらに低い地下水位の履歴があったため、過圧密状態であり、圧密沈下はないと判断した。

6. 揚注水の運転

(1) 揚水量と注水量の経時変化

図-7に、総揚水量、総注水量の経時変化、図-8に観測井 (K4, K9, K2, K12) の水位変動を示す。2013年9月の運転開始以降、立坑内 (K4, K9) の地下水位は低下しているが、発進側、到達側作業ヤード (K2, K12) の地下水位には大きな変動が見られない。さらに、全揚水量と全注水量はほぼ同じ変動になっており、周辺の地下水位を安定させながら注水量を制御できている。

(2) 注水圧と注水量の関係

図-9に、Mg層への注水井 (RW4) およびTog層への注水井 (RW23) の2014年9月～2015年2月の注水量と注水圧の関係をプロットしたものを示す。RW4の実績に対して、RW23の注水能力は相対的に低くなっている。これは、Mg層の透水係数が $k=3.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ であるのに対して、Tog層の透水係数が $k=2.9 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と小さいこ

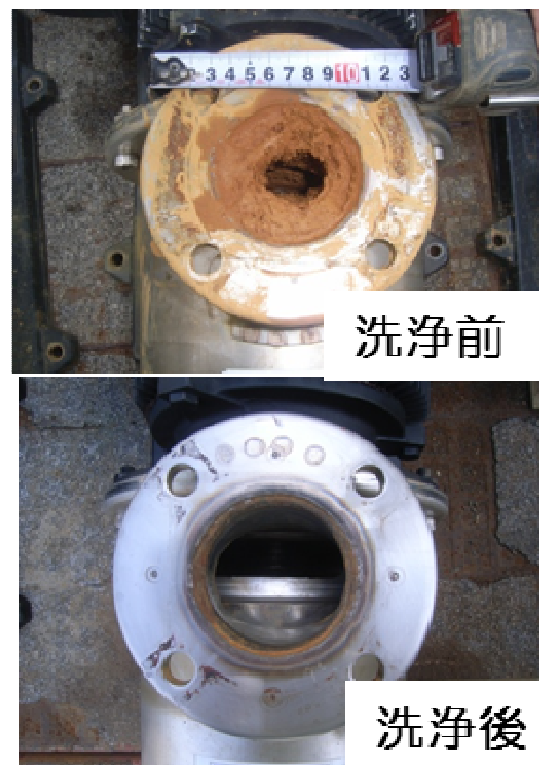


図-11 ポンプ内スケール付着状況

とが要因と考えられる。

その注水能力について、RW4の注水量、注水圧の経時変化を示したものが図-10である。それによると、時

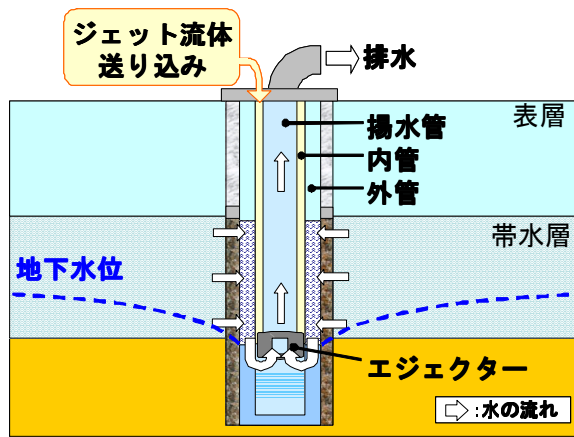


図-12 小口径揚水工法の概要

間とともに注水量が低下していく傾向があり、それに伴って注水圧も上昇した。この原因としては、ポンプや配管、注水井のストレーナーへのスケール分および鉄分の堆積によって管内が閉塞していくことによるものと考えられた。通常のリチャージ工法でも、このような現象は発生しており、細粒分とスケールによる目詰まりが生じ、注水量が低下するため頻繁に逆洗浄を行っている。本工法では、加圧注水しているため細粒分は井戸外に出され目詰りは生じないが、スケールによる目詰まりは生じている。

図-11に1年以上経過したポンプ内のスケールの発生状況と洗浄後の状況を示す。ポンプ内の水の流れがスケールによって塞がれ、送水する効率が悪くなっていることが確認された。今回のような鉄分を多く含んだ地下水では、ポンプからの送水量を回復させるために、ポンプの定期的な洗浄を行う必要がある。ポンプの洗浄によって送水量が増えたことで、注水量も回復したが、注水井の管内も同時に洗浄することで、さらに注水量の回復を得ることができた。その他の注水井についても、同様の傾向が確認されている。本工法では、地下水位を安定させるために、揚水量と注水量のバランスが重要である。今回のようにスケールが発生が著しい場合には、ポンプおよび注水井の計画的な洗浄が、各注水井の注水量、注水圧を安定させ、効率的な運転を可能にさせると考えられる。

7. 小口径揚水工法の採用

(1) 小口径揚水工法の概要と特長

当該現場では、線路に近接する狭隘な箇所にて揚水井が必要となったことから、小口径揚水工法を一部に採用している。小口径揚水工法とは、地上から帯水層にジェット流体を送り込むことで小口径かつ高い揚程を実現する揚水井である。狭隘な箇所で大口径の揚水井を適用で

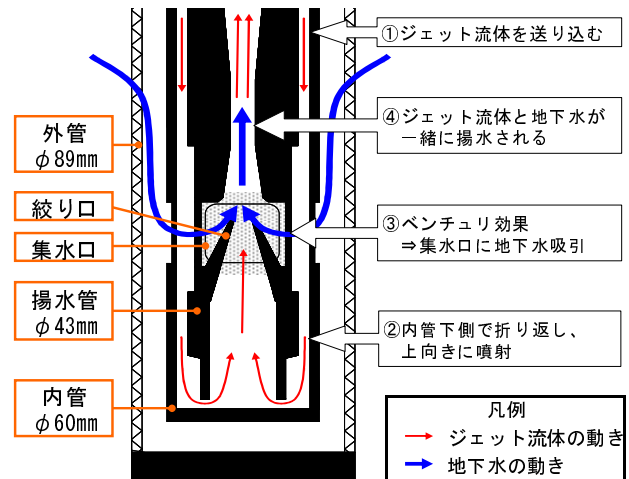


図-13 小口径揚水機構（エジェクター一部）

きない場合や、ウェルポイント工法の揚程に限界があり、深い地層からの揚水ができないといった課題を解決するための工法³⁵⁾である。

図-12に小口径揚水井の概要図を示す。この工法は、地山に設置した外管（φ89mm）の中に、エジェクターの先端を設けた内管（φ60mm）・揚水管（φ43mm）で構成される二重管を挿入する。この三重管式の構造に、地上にある送水ポンプから内管にジェット流体を送り込み、エジェクターを介してジェット流体とともに地下水を地上に揚水する。

内管と揚水管で構成される二重管の先端に設けているエジェクターによる揚水機構を図-13に示す。エジェクターには絞りの口が設けられており、そこをジェット流体が通過する際に加速することで、負圧が発生し（ベンチュリ効果）集水口から地下水を汲み上げる機構となっている。ステップは以下のとおりである。

- ①地上からジェット流体を送り込む。
- ②ジェット流体が内管内で折り返し、上向きに噴射。
- ③流体の絞りの口で流速が加速。
- ④ジェット流体とともに集水口の地下水を地上に汲み上げる。

この工法の主な特長を以下に示す。

- ①井戸内にポンプを設置する必要がなく井戸径を小さくできる。
- ②一般的なウェルポイント工法で揚水できない深度からの揚水が可能となる。
- ③井戸内に可動部を持たないため、駆動系のトラブルリスクが減り、メンテナンスが軽減できる。
- ④井戸の掘削径が小さく、線路内などの狭隘地や空頭制限があるところでも施工が可能となる。

(2) 現場での単井揚水試験

試験現場の地盤は2m 厚のローム層の下に3.2m厚の粘性土層、7.1m厚のMg 層、そして砂層となっている。こ

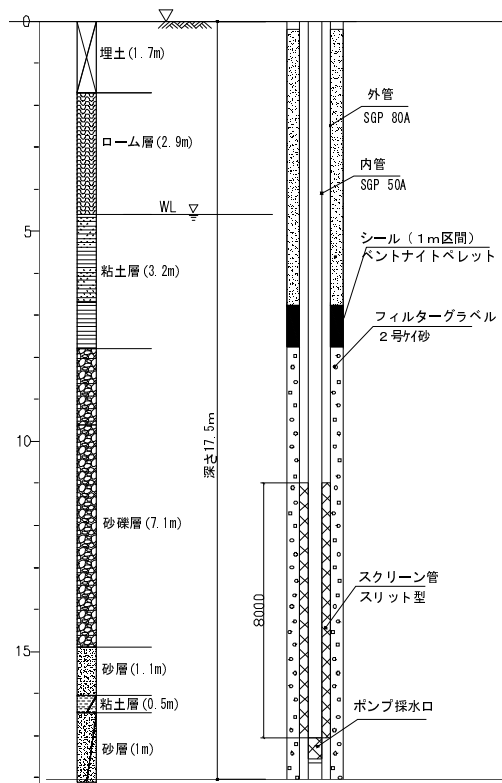


図-14 小口径揚水井の構造と地層図

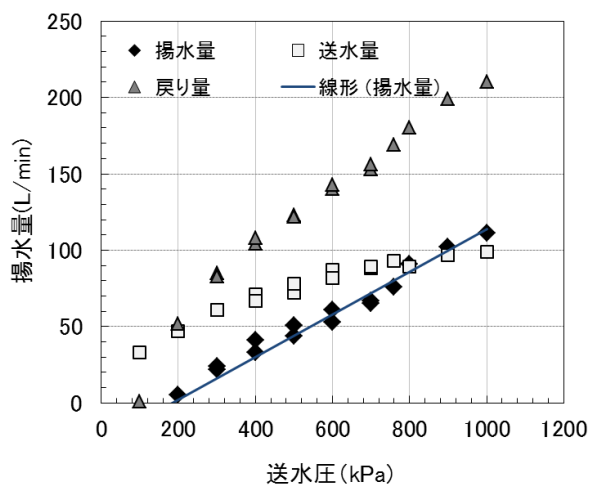


図-15 小口径揚水井の送水圧と揚水量の関係

ここに小口径揚水井を設置し、揚水性能を把握するため現場揚水試験を行った⁹⁾。小口径揚水井の構造と地層図を図-14に示す。送水圧300kPa～760kPaで段階的に揚水を行ったが、ほぼ送水圧に比例して揚水量も増加し、送水圧760kPaで最大で76L/minの揚水ができた。しかし、限界揚水量を表す明確な折れ点は確認できなかった。そこで、送水圧を1000kPaまで増加させて試験を行った。そのときの揚水量と送水圧の関係を図-15に示す。送水圧1000kPaで揚水量(=戻り量-送水量)約110L/minを揚水したが、ここでも、限界揚水量を表すような明確な折れ点は見られず送水圧に比例して揚水量は増加していった。既存のディープウェルの揚水試験結果においても、同様

表-1 小口径揚水井の現場揚水試験結果

	送水圧 (kPa)	送水量 (L/min)	戻り量 (L/min)	揚水量 (L/min)
SDW-1	400	38	52	14
	800	56	125	69
SDW-2	400	37	58	21
	800	57	117	60
SDW-3	400	37	56	19
	800	58	129	71
3本稼働	800	182	350	168

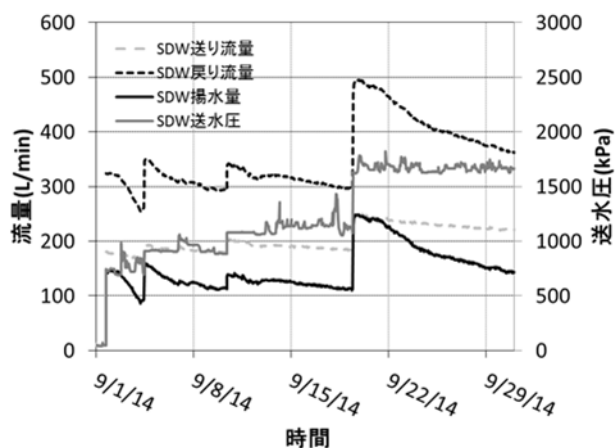


図-16 3本稼働時の小口径揚水井の経時変化

な結果が得られており、当該地域の地盤の透水性能が非常に良く、地下水が豊富なため、明確な限界点が見られなかったと推察される。

(3) 複数井での現場揚水

現地での小口径揚水井の能力を確認した上で、1本のディープウェル(井戸径Φ300mm)の代わりに小口径揚水井3本を設置し、揚水運転を行った⁹⁾。それぞれの揚水井の間隔は1.1mである。

事前に行った試験運転の結果を表-1に示す。3本の揚水井については、同一ポンプからジェット流体を送り込む構造としている。まず、それぞれの小口径揚水井を単独で稼働させたところ、400kPaで平均揚水量18L/min、800kPaで67L/minとなり、3本の揚水能力について大きな差異がないことを確認した。次に、800kPaの送水圧をかけ3本を同時に稼働させたところ、平均揚水量は168L/minとなった。3本稼働したときの各井戸の揚水量を計測していないが、単純に単独で稼働させたときの3倍(67L/min×3倍=201L/min)より16%ほど少なかったことから、井戸同士の干渉の影響は多少あったと考えられる。しかしながら、近接した複数井でも十分な揚水ができることがわかった。

図-16に3本を同時に稼働させてから1ヶ月間の流量と送水圧の経時変化を示す。送水圧を1600kPaまで上げたときに揚水量が最大で248L/minまで増加した。しかし、その後揚水量も低下していった。これは周辺の地下水位

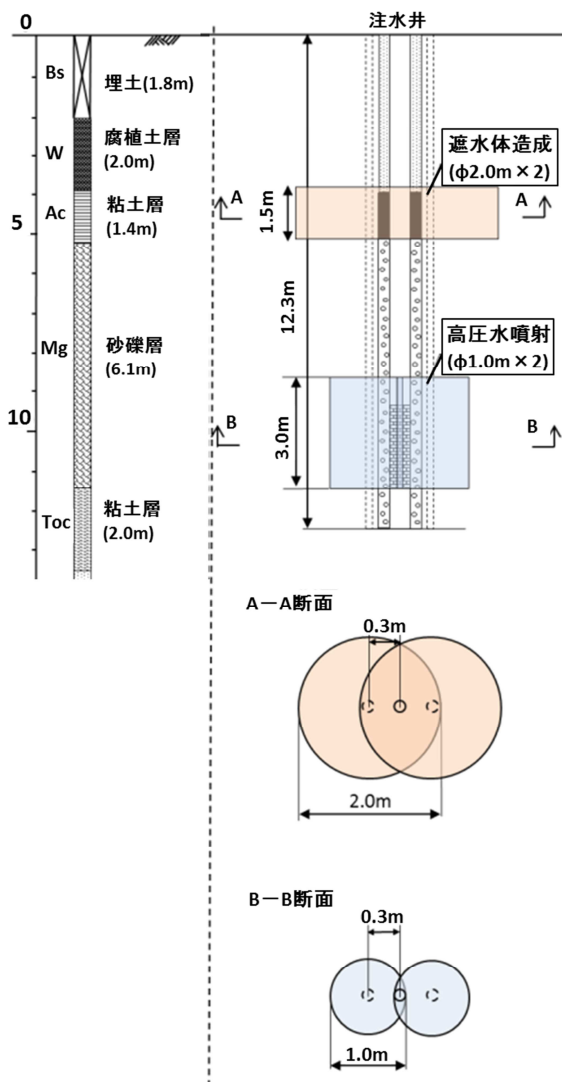


図-17 既設注水井への遮水体造成と高圧水噴射の概要

が低下したことで、揚水量も低下したと考えられる。

8. 漏水した注水井能力の再生

5.で述べたが、一部の注水井で井戸周囲から地上への漏水があった。その原因として、腐植土層（Am 層）が堆積し、当初想定していたLm 層が薄くなっていたため、十分な遮水効果が得られず、井戸周辺に水みちができたことが考えられた。そこで、既設の漏水した注水井を使って、図-17に示すように、Lm 層付近に遮水のための地盤改良体（以下、遮水体）を造成し、さらに注水を行うストレーナー部分の透水性をよくするために高圧噴射攪拌を行って地盤を乱すことで、加圧注水による地上への漏水防止効果を試験的に確認することにした。遮水体の施工については、高圧噴射水攪拌と同一機械を使用し、Lm層付近へのセメント系固化材吐出により行った。有効径は、対象の地層および施工条件により決定し、遮水体は2.0m、高圧噴射攪拌は1.0mとした⁷⁾。遮水体造成後1週間の養生期間をとり、注水を開始した。図-18に加圧

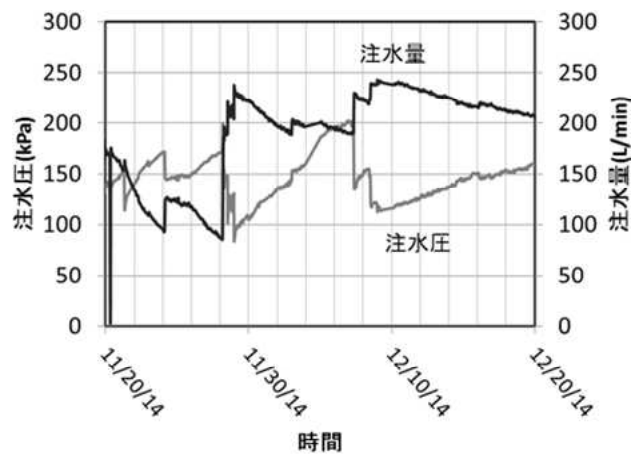


図-18 注水量と注水圧の経時変化

注水を行った注水量と注水圧の経時変化を示す。試験前は注水できなかった（注水量0L/min）が、注水圧50～200KPaの間で注水可能となり、注水試験期間中の最大注水量は240L/minとなった。このことは、遮水体の造成と高圧噴射水攪拌により、地上への地下水の漏水防止と地盤の透水性の向上に一定の効果があつたと考えられ、漏水した注水井を再生でき、エコリチャージの適用範囲を拡大できる可能性を示唆した。

9. おわりに

本報告では、線路下横断工における地下水対策工として採用したエコリチャージ工法の計画と実績、また新しく採用された小口径揚水工法について報告した。その結果、工事全体として必要な範囲での地下水位低下を確保し、安定的な運転が行われていることが確認された。一方で、注水井の運用に関しては、注水する帯水層の地盤条件によって、注水圧と注水量の係に差が見られた。今後、実績データを蓄積することで、計画時に注水能力の推定する際の精度を向上させていきたいと考えている。また、帯水層の上の遮水層が薄い場合については、遮水体の造成、高圧噴射水攪拌により、注水量の向上、地上への漏水防止に一定の効果が見られた。今後、注水能力の低下についても検討を重ね、エコリチャージ工法の効率化を図っていく予定である。

さらに、小口径揚水工法についても、ウェルポイントでは揚水できない深い地層からの揚水が可能であり、複数の井戸を近接して配置しても、多少の井戸干渉があるものの十分な揚水が可能であることがわかった。今後、小口径揚水井が有効に適用できるように、データの収集を行っていき、エコリチャージ工法と組み合わせることで、地下水位低下工法の適用範囲を拡大していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 小泉秀之, 桑原清, 柳博文: 効率的なリチャージウエルの開発—高圧注水試験—, 土木学会第60回年次学術講演会6-210, pp.419-420, 2005.9
- 2) 桑原清, 小泉秀之: 復水効率を向上させた新しいリチャージ工法の開発, トンネルと地下, 第37巻,10月号, pp.771-778, 2006
- 3) 高橋保裕, 桑原清, 小池敏雄: 小口径で経済的な揚水工法の開発, 土木学会第67回年次学術講演会6-374, pp.747-748, 2012.9
- 4) 香月一仁, 桑原清, 柳博文, 中井寛: 循環型地下水制御工法 (エコリチャージ) における高圧注水試験, 土木学会第61回年次学術講演会6-232, pp.463-464, 2006.9
- 5) 榊間遼, 本田諭, 小泉秀之, 柳博文, 小池敏雄: 小口径揚水井の開発, 日本地下水学会秋季講演会講演予稿, 2014.11
- 6) 柳博文, 桑原清, 松林誠, 栗栖基彰, 中村征史: 小口径揚水井による現場揚水試験, 土木学会第68回年次学術講演会6-008, 2013.
- 7) 日本ジェットグラウト協会: 技術資料ジェットグラウト工法技術資料, 2003.10

(2015. 8. 7 受付)

A GROUNDWATER LEVEL-LOWERING MEASURE SUITABLE FOR CONSTRUCTION OF AN UNDERGROUND STRUCTURE CROSSING A RAILWAY

Hirofumi YANAGI, Satoshi HONDA, Toshinori TAKAHASHI,
Hiroyuki ITOI, and Toshio KOIKE

Considering from the environmental viewpoint, that the situation of the construction site does not make it possible to drain pumped-out groundwater into the sewer system, and that neighbors around the site currently use water from wells, we selected a solution to inject pumped-out groundwater to the in situ ground, which is known as “Eco-Recharge Method” (recycling-type groundwater level reduction method) to charge groundwater under pressure. As a result, it was confirmed that since the groundwater level could be lowered successfully to a required extent over the whole area, and at the same time, pumping/injection could be performed in a stable condition.