

高精度地下水位制御技術による大規模開削工事

小川 司¹・兜 俊彦¹・伊藤 健治¹・木元 清敏²・大内 健²・永谷 英基³

¹小田急電鉄株式会社複々線建設部下北沢工事事務所（〒155-0033 東京都世田谷区代田二丁目31-27）

²鹿島・奥村・フジタ建設共同企業体（〒155-0033 東京都世田谷区代田三丁目56-7）

³正会員 工博 鹿島・奥村・フジタ建設共同企業体（〒155-0033 東京都世田谷区代田三丁目56-7）

小田急電鉄小田原線の連続立体交差事業として地下複々線化が進められている本工事では、閑静な住宅街において、営業線を仮線工事桁で受け替え、鉄道直下において約9ヵ月間で4.5万m³の大規模掘削を行った。土留めは、被圧帯水層を完全遮水していないことから、円滑な掘削工事を行うために坑内地下水を揚水し、ドライアップを図る必要があった。そこで、W I C（ウェルインバーターコントロール）システムによる高精度な地下水位制御技術を適用することで、掘削工程に応じた自在な水位制御を施し、必要最低限の揚水量に抑えるとともに周辺地盤の沈下抑止にも成功した。これらの施工実績について報告する。

キーワード：連続立体交差事業、開削工法、地下水位制御工法、ディープウェル、W I C（ウェルインバーターコントロール）システム、揚水試験

1. はじめに

本事業は、小田急電鉄小田原線の代々木上原駅付近から梅ヶ丘駅付近までの約2.2kmにおいて、道路と鉄道の連続立体交差化と抜本的な輸送サービスの改善を目的とした地下複々線化事業である。図-1及び2に事業概要を示す。当現場は、梅ヶ丘駅付近の端部（第5工区）の非常に閑静な住宅街の中に位置しており、小田原方から新宿方に向かって、掘削形式で地下に下り、ボックスカルバート躯体へと接続する全長約450mの開削工事（一部函体推進工事あり）である。工事にあたっては、営業線を受け替えて、道路や近隣家屋に最大限の注意を払いながらの開削施工が求められ、鉄道施設物や道路等周辺地盤の変状、地下水環境への影響等多くの技術課題に対して検討を進めながら取り組んでいる¹⁾。

本開削工事においては、約9ヵ月間で4.5万m³の大規模掘削を行う必要があるものの、土留構造は被圧帯水層を完全遮水していないことから、掘削盤の泥ねい化によるトラフィカビリティーの欠如が課題となった。そこで、円滑な重機掘削を行うために坑内をドライアップする方法として、W I Cシステム²⁾³⁾による高精度な地下水位制御技術を導入した。本システムにより、掘削工程に応じた自在な水位制御が可能となり、結果、必要最低限の揚水量に抑えると共に、周辺地盤の沈下抑止にも成功したのでその実績を報告する。



図-1 事業区間平面図

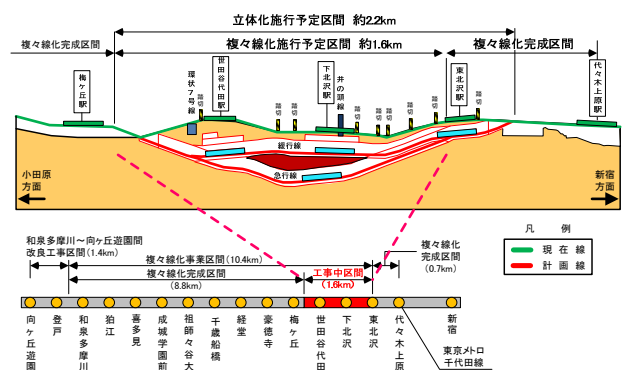


図-2 事業概略図

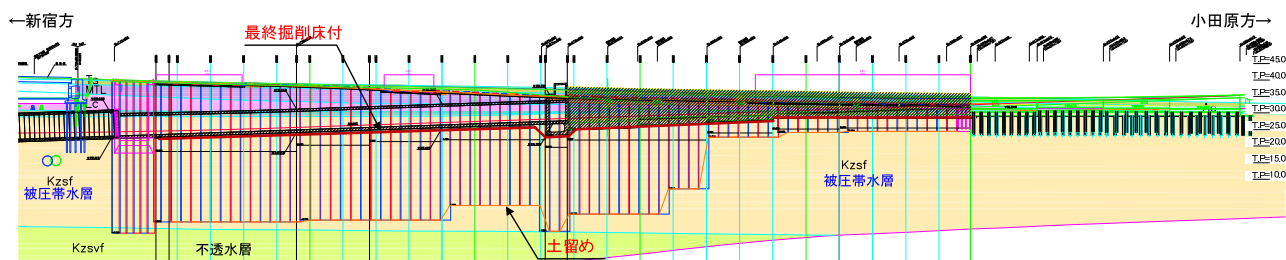


図-3 地質縦断及び土留展開図

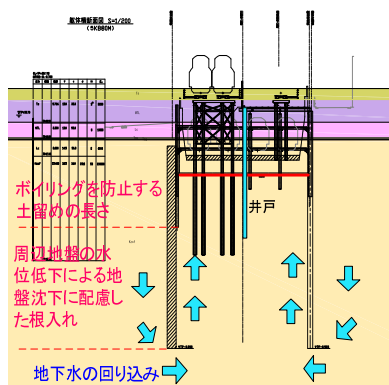


図-4 土留め構造設計コンセプト



写真-1 トラフィカビリティー不足状況

2. 工事概要

(1) 全体工事概要

工事名：小田急電鉄代々木上原駅・梅ヶ丘駅間線増
連続立体交差工事

発注者：小田急電鉄株式会社

施工者：鹿島・奥村・フジタ建設共同企業体

工事場所：小田急小田原線

世田谷代田駅～梅ヶ丘駅間

工 期：2004(H.16).8.30～2014(H.25)3.31（予定）

主要工事数量

・掘削工	85,000m ³
・仮設構台工	3,000m ²
・地中連続壁工	17,500m ²
・鉄筋コンクリート工	19,000m ³
・ニューマチックケーソン工	1基
・函体推進工（10.6mX8.1mX延長44m）	2本
・止水薬液注入工	7,700kl
・仮線工事桁（抱込桁・上路桁）	60+21連
・仮線工事桁（環七複線下路桁44m）	1連

(2) 地盤及び水理条件

図-3に地質縦断及び土留展開図を示す。当該エリアは、関東平野南部に広がる武蔵野台地東部に位置する。地質構成は、地表は盛土で覆われ、その下位にロームと凝灰質粘土が堆積する。その下位は、砂質土と砂礫からなる東京層が堆積し、その下位に

上総層群が堆積する。上総層群は非常に良く締まっており、N値50以上の極密な細粒分質砂及び固結シルトからなる。なお、上総層群は深度が深くなるほど細粒分の含有量が多くなる。地下水位は、上総層において被圧帯水層を形成しており、北東から南西に地下水が流れている。設計水位としては世田谷代田駅付近でTP+38.0mから梅ヶ丘駅付近でTP+29.6mで評価している。透水係数は、Kzsf層で 1.32×10^{-4} cm/sec程度の値を示す。

(3) 本掘削における揚水の必要性

本開削部は、高架から地下へと結ぶ掘割部及びボックスカルバート部から構成されているため、経済性や工事完了後の地下水流動阻害等に配慮し、図-4に示す非遮水の土留構造を採用した。

被圧帯水層で掘削作業を行うにあたって、地下水位を掘削作業盤よりも常に下げておかなければ、当該エリアでは、重機による鍊り返しによって、写真-1に示すように重機が動けず、作業効率が大幅に低下することを確認した。また、被圧帯水層Kzsfは、粒度分布の悪いシルト質砂のため、一度重機により泥ねい化すると残土として受け入れ拒否となった。天日干しや改質材なども考えられるが、コストアップと工程遅延は避けられないため、掘削発生土の品質確保も重要な課題であった。以上から、揚水によるドライワークで作業性向上を図ることとした。

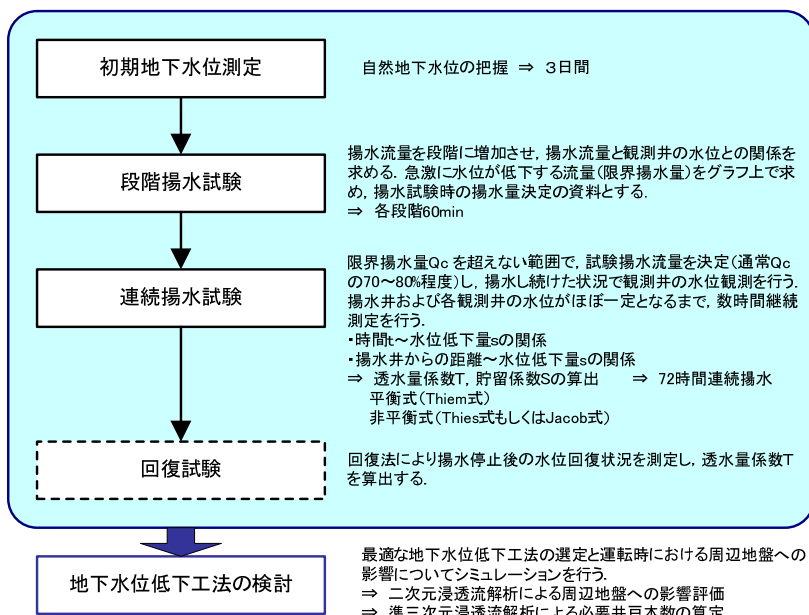


図-5 揚水計画検討フロー

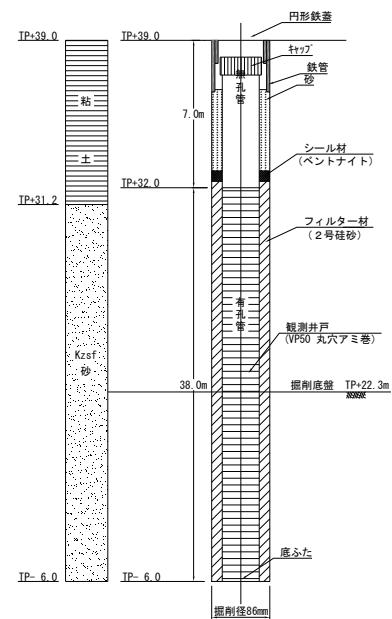


図-6 揚水井戸構造

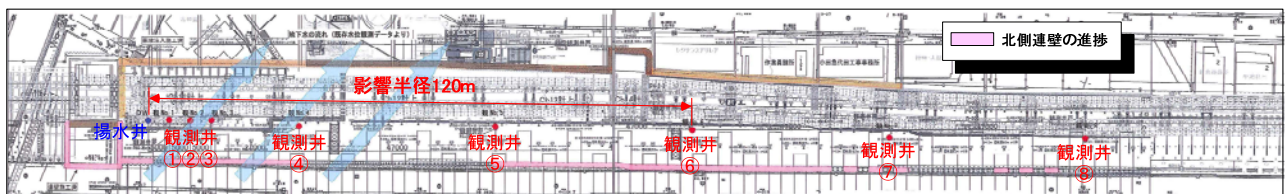


図-7 揚水試験井戸配置

3. 施工計画

(1) 掘削及び揚水計画

掘削補助工法としてディープウェルによる揚水を行うにあたって、揚水設備仕様を設計する必要がある。図-5に設計に必要な検討フローを示す。このフローに従い、井戸構造や本数、排水容量等の計画を行った。

(2) 揚水試験

当該地盤の水利特性を評価するため、揚水試験を行った。図-6に井戸構造、図-7に井戸配置を示す。揚水井1本に対し、小田原方に向かって8本の観測井を配置した。なお、南側土留は完成しており、北側土留が6割程度の進捗状況下で試験を行った。

段階揚水試験では、図-8に示すように100ℓ/分の揚水で突然急激な水位降下が発生したため、限界揚水量は80ℓ/分とみなした。実施工においては、その80%に当たる60ℓ/分を適正揚水量とした。

次に、連続揚水試験（回復試験を含む）を行った。揚水量(Q)=60ℓ/分で開始したが、観測井No.1地点の水位降下量が管理基準値を越えたため、揚水を停止し、回復試験へと移行した。

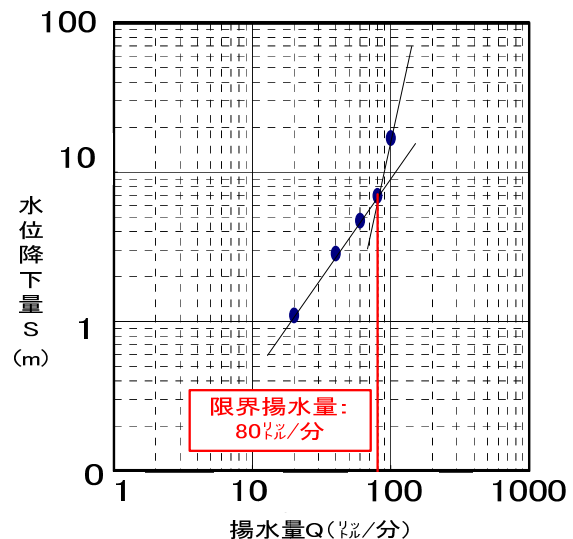


図-8 限界揚水量

試験の諸元は、揚水量(Q)：60ℓ/分、揚水時間：8時間44分で、以下のような水利特性が得られた。

- ①透水系数： 6.7×10^{-4} (cm/sec)
- ②貯留係数：0.01
- ③影響半径：120 (m) . なお、開削範囲外の地下水位変動はほとんど見られなかった。

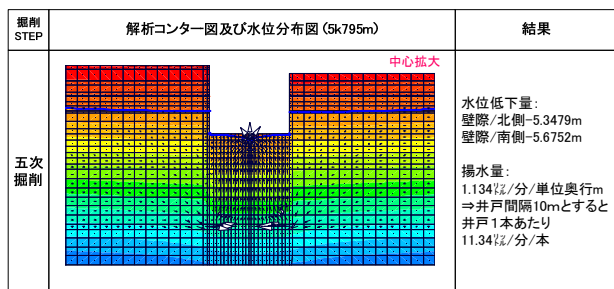


図-9 二次元浸透流解析

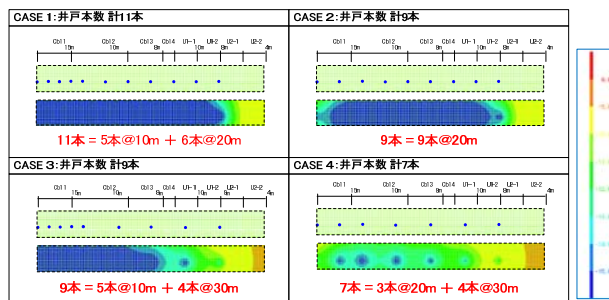


図-10 準三次元浸透流解析



図-11 井戸配置

(3) 浸透流解析

二次元浸透流解析による周辺地盤への影響評価を行った。定常状態における周辺地下水位分布を解析的に照査しており、解析入力パラメーターは、揚水試験結果を反映した。ただし、影響半径120mは、安全をみて1.5倍し、モデル半径180mとした。井戸揚水モデルは、全水頭ゼロ固定（すなわち重力排水）とした。その結果、図-9に示すように最終掘削床付時、開削エリア最深部周囲の水位は、当初設計2.65mに対して、5m以上になることがわかった。

次に、準三次元浸透流解析による必要井戸本数の算定を行った。群井評価を行う上で、井戸1本あたりの適正揚水量を井戸干渉に配慮し、1/3に低減して20ℓ/分とし、複数の井戸配置パターンでの検証を行った。その結果、図-10に示すように掘削範囲内に必要な井戸本数は計11本であることがわかった。

(4) 圧密沈下予測

当該エリアは、過圧密地盤であることが確認されている。この場合、圧密沈下量の算出には膨潤指数Csを採用するが、当初設計では圧縮指数Ccに対し、 $Cs=1/10Cc$ として評価が行われていた。

そこで、すべてのボーリングデータにおける圧密試験データを再評価した結果、Ccに対し、1/9～1/27程度のバラツキを有することが確認された。設計的には安全側での評価が確保されていたが、前述のように当初設計段階を上回る周辺地盤の水位低下が予想されたため、再評価値を採用することで、倍程度上回る水位低下が生じてても、圧密沈下量としては許容沈下量20mm以内に収まるものとして判断するに到った。

(5) 井戸配置計画

揚水試験並びに浸透流解析の結果、計11本の揚水井を配置することになった。ストレーナーは、余裕をみて掘削床付以下15mまで伸ばすこととした。観測井は、周辺地盤の水位低下を詳細に把握するため、既存観測井や土留めと敷地境界の間のスペースを使った新規設置により坑外に計7本、また掘削坑内の水位の詳細な制御と管理を目的に坑内に計10本を配置することとした。なお、観測井、揚水井すべての水位を水压計で自動計測することで、地下水位の動態観測と、後述する地下水位制御に活用することとした。図-11に井戸配置計画平面及び縦断を示す。

工法	従来工法(フロート運転)	WICシステム
概念図		
説明	揚水井戸内の任意の高さに運転・停止用のフロートスイッチを設置し、その間で井戸内水位を制御することにより、水位を管理する方法。	井戸内に間隙水圧計を設置し、設定された管理水位値に増減が生じた時にはインバーター制御盤によりポンプの回転数を制御し自動的に揚水流量を調整して水位を管理する方法。 地盤の水理特性に関して把握した情報をパソコンによって解析処理し、効率的なディープウェル運転管理を行う。
長所	比較的に設備コストが小さい。	常に一定の地下水位を保持することができるため、揚水流量を最小限に抑えることができる。地下水揚水量を小さくすることができるため、周辺への影響(井戸枯れ、地盤沈下)が小さい。トラブル時においても、地下水位を自動的に保持することが可能である。
短所	フロートによる水位管理のため、管理水位より余分に水位を低下させる必要がある。透水性の高い(揚水量が多い)地盤では、フロートスイッチの作動間隔が短くなることから、ポンプに負担がかかり、故障の原因となる。トラブル時、手動運転に切り替える必要があり、タイムリーなトラブル対応が難しい。	従来工法に比べて、設備コストが大きい。
周辺への影響	今回協議案に比べ、周辺水位の低下・影響範囲は大きくなる。	周辺水位の低下・影響範囲は最小限となる。

図-12 W I Cシステムの特徴

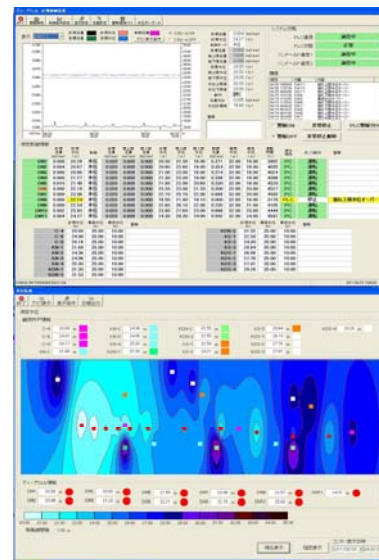


写真-2 W I Cシステム管理画面

(6) 地下水位制御技術 (W I Cシステム)

揚水による周辺地盤の水位低下と地盤沈下リスクを分析した結果、許容値内に収まるが細心の注意を払う必要があることがわかった。影響を最小限に抑えるには揚水量を極力減らす必要があり、掘削工程に合わせた最適な坑内水位の制御を目指すべきであると考えた。そこで、国道9号線京都西立体千代原トンネル本体工事において開発適用されたW I Cシステム²⁾³⁾を導入することとした。

本システムの特徴は、揚水井戸(ディープウェル計11本)の稼動状態を地盤中の水理条件に応じて総合的にインバーター制御により自動運転するものである。本システムによって揚水井戸の制御管理をパソコン上で全て行うことができ、坑内地下水位を自在に制御することで周辺地下水への影響を最小限に抑え、効率的かつ経済的な揚水が可能になる。また、従来のフロート式と比べ、井戸内水位の変動が小さいため、揚水量が30～40%という削減実績もある。図-12に従来技術との比較図を示す。

次に、パソコン上の制御管理画面を写真-2に示す。上段が井戸推移制御、下段が水位計測によるリアルタイム水位分布を示す。視覚的な情報により井戸運用の労力が大幅に軽減されている。これら揚水井を含むシステムとその周辺機器を写真-3に示す。なお、汲み上げた地下水は、場内散水等の雑用水として使用可能なように配管流末に下水放水設備に加えて、タービンポンプなども配置した。

以上のシステムを揚水量削減による周辺影響の最小化と地下水の処理費削減をメリットに費用対効果を鑑み導入することとした。



写真-3 井戸設備

(7) 地盤変状測量計画

周辺地盤の地下水位管理を行うとともに地盤変状についてもレベル測量により管理を行うこととした。地表面沈下の管理値は、自主管理値12mm、一次管理値15mm、二次管理値20mmとして定めた。測量範囲に関しては、水位が当初設計での掘削時想定水位低下量であった2.65mを参考に、それ以上低下する範囲を2次元浸透流解析で評価し、第一種警戒ライン(半径50～100m)内を地表面沈下警戒範囲とした。また、第二種警戒ライン(半径100～200m)内を井戸枯れ警戒範囲として、併せて注視することとした。

4. 施工実績

(1) 掘削土量

掘削実績を図-13に示す。1次～5次まで約4万5千 m^3 の掘削を約9ヵ月にわたって施工を行った。本格的な掘削を開始した7月以降で5千～6千 m^3 /月ペースで掘削しており、揚水が必要となった9月以降も問題なく掘削進捗を伸ばすことに成功した。写真-4にボックスカルバートエリアにおける掘削状況を示す。ドライアップされた良好な施工環境を最終掘削地盤高まで維持することができた。

(2) 揚水量（下水排水量）

図-14に示すとおり、下水に放水している総流量は3月末時点で約1万8千 m^3 となっており、各エリアの掘削床付が完了するとともに揚水量もさらに微調整をかけて絞った結果、11月をピークに月別の総揚水量は減少していることがわかる。

次に、揚水井戸の個別流量管理状況を図-15に示す。WICシステムでは、すべての井戸に流量計が設置されており、詳細な揚水流量の管理が可能となっている。揚水井DW①（新宿方端部）では、掘削進捗にあわせた井戸内水位の設定がされており、その際のポンプ流量は自動制御で増加している。また、3/30時点で揚水井DW①から⑨に向かって、水位設定が浅くなるため、ポンプ揚水量も絞って自動運転していることが確認できる。

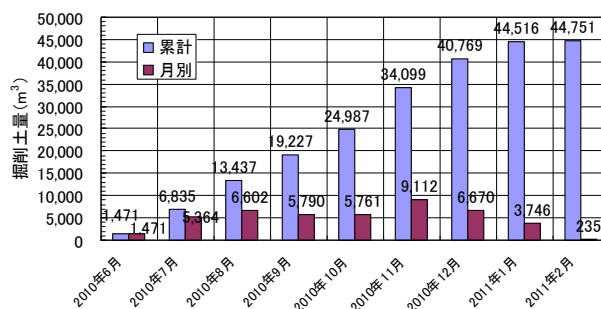


図-13 掘削土量実績



写真-4 掘削状況（3次掘削）

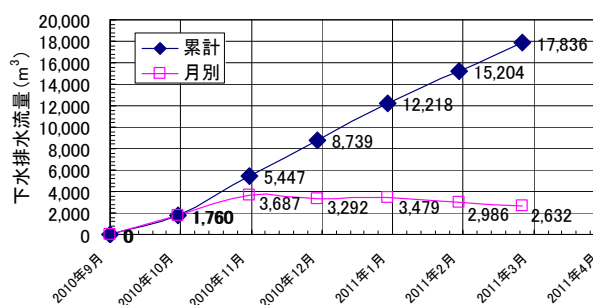


図-14 揚水量実績

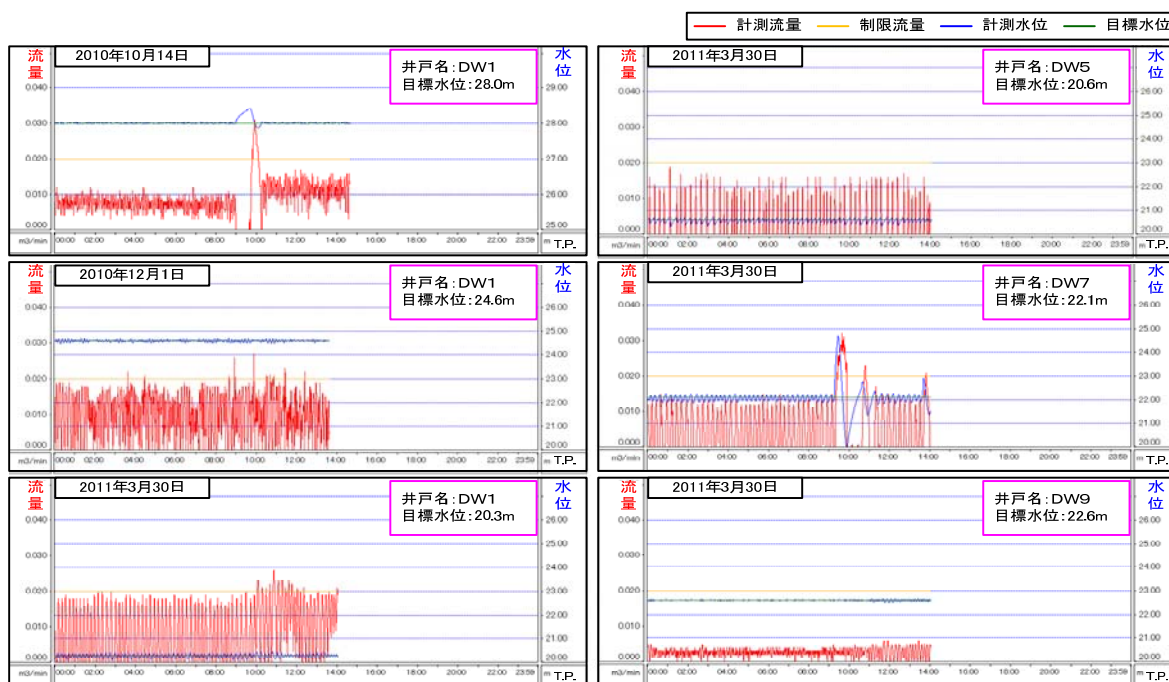


図-15 揚水流量制御状況

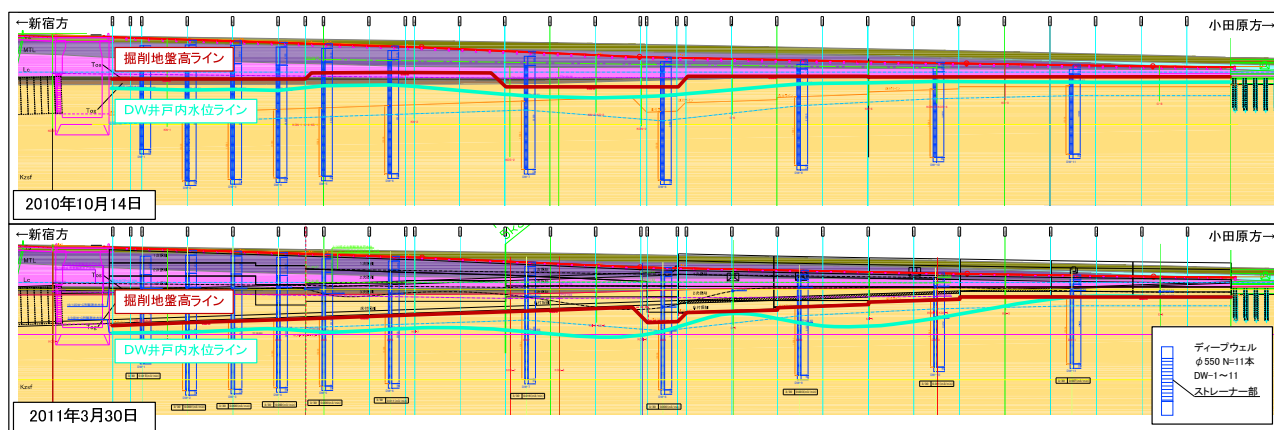


図-16 掘削地盤高及びDW井戸内水位分布推移

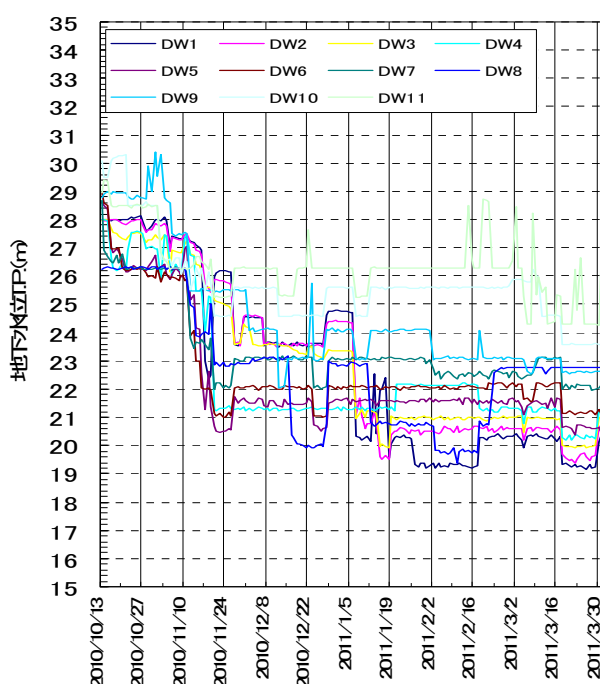


図-17 DW井戸内水位低下実績

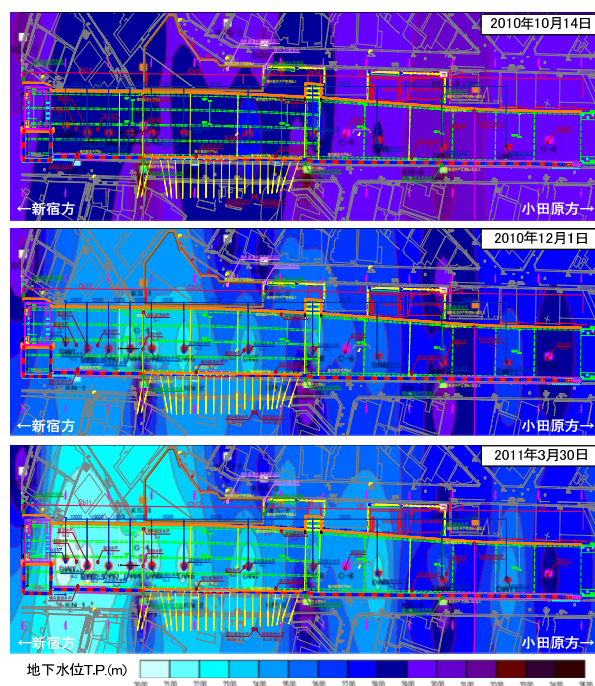


図-18 地下水位分布推移

(3) 地下水位低下量

当現場は、施工延長が長く、他工種や地上ヤードの使用状況にあわせながら施工エリアを選び、掘削する必要があった。そのため、揚水井内の水位で掘削盤から2 m下がりを目安に各施工エリア別に地下水位を設定し、掘削進捗にあわせた細かい制御を施した。図-16に掘削進捗別の水位縦断分布図を示す。従来、こうした水位の制御は、手間のかかるバルブ操作やポンプ位置の変更、ポンプの間引き運転等が必要であったが、WICシステムでは、きめ細かい水位制御と管理をパソコン上で操作でき、管理労力が大幅に削減されたことにより、刻々と変わる掘削進捗に遅れることなく水位を制御できた。

次に、各揚水井の井戸内水位の低下実績を図-17に示す。降雨等の影響もあり、日々、揚水井を細かく制御しつつ、掘削盤にあわせて地下水位を低下させていったことがわかる。これら水位データから分析した現場全体の地下水位分布図を図-18に示す。小田原方から新宿方に向かって、掘削深度が深くなるため、地下水位を下げている、工程の進捗に伴い、全体的に水位を下げていったことが伺える。なお、WICシステムでは、この地下水位分布を評価分析した上で、各揚水井の揚水量を自動的に制御し、土留め際からの湧水を最低限に抑えた最適な水位分布とすることで、良好な掘削環境の維持を実現している。



写真-5 掘削完了状況

(4) 周辺地盤沈下量

地盤変状測量計画に示した範囲について、レベル測量を行い、地表面沈下を監視した。地盤変状測量計画において示したように、第一種警戒ライン（半径50～100m）内を地表面沈下警戒範囲として監視を進めているが、全体的に管理値に到るような地表面沈下は計測されていない。当該地盤は、過圧密地盤であることや、揚水量を極力抑制した結果、当初設計と比べて周辺地盤の水位低下は大きいものの、沈下トラブルを回避できたものと考えられる。

5. おわりに

東京都内では、昭和30年代から40年代にかけて地下水の過剰な汲み上げによる地下水位の低下により、地盤沈下が問題となったため、法律や条例による揚水規制を強力に推し進めてきた結果、近年では地下

水位も回復上昇傾向にあり、地盤沈下は沈静化している。こうした背景のもと、地下水位低下工法の採用による地盤沈下リスクの低減によって、土留め構築や地盤改良に要するコストと比較し、その経済的な合理性を再評価しつつある。また、建設事業の環境負荷低減が求められる今日、土留めや地盤改良による恒久的な地下水流動障害も問題視されていることも再評価の一助となっている。

今回、当現場では、周辺地盤の沈下リスク等を十分に検証した上で、「積極的な地下水位制御」を採用した。従来の井戸管理とは一線を画し、高精度な地下水位の制御と管理が可能なW I Cシステムを導入することで、最小限の影響に抑える最適な地下水位を維持し、掘削工程に影響を与えることなく、良好な施工環境を保持しながら、無事掘削を完了することが出来た。ドライアップされた良好な最終掘削盤の状況を写真-5に示す。地下水位を積極的に「見える化」し、管理することは、発注者からの工事に対する信頼度の向上にも大きく貢献した。

以上、地下水位制御技術による大規模掘削の検討過程とその施工実績について報告した。当工事が今後の同種工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 伊藤 健治, 木元 清敏: R & C工法（箱型ルーフとボックスカルバートを置き替えるアンダーパス施工法）, 基礎工, Vol. 52/No. 3, pp. 28-37, 2011.
- 2) 島田 哲博, 田中 啓之, 田中 耕一, 性田 学, 松岡 永憲: ディープウェル工法自動制御（W I C）システムの概要, 土木学会第65 回年次学術講演会, 2010.
- 3) 島田 哲博, 田中 啓之, 五十嵐 寛昌, 性田 学, 松岡 永憲: ディープウェル工法自動制御（W I C）システムの適用実績, 土木学会第65 回年次学術講演会, 2010.