

小土被り・高水位条件下における 鉄道横断トンネルの非開削工法による施工

高橋 正登¹・寺田 正和²・本杉 方人³・別当 雄亮⁴・今枝 靖典⁵

¹正会員 株式会社大林組 生産技術本部設計第四部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:takahashi.masato@obayashi.co.jp

^{2,3}正会員 株式会社大林組 東京本店東武業平橋工事事務所 (〒343-0845 埼玉県越谷市南越谷4-8-8)

²E-mail:terada.masakazu@obayashi.co.jp, ³E-mail:motosugi.masato@obayashi.co.jp.

^{4,5}正会員 株式会社大林組 東京本店東武竹ノ塚工事事務所 (〒121-0822 東京都足立区西竹ノ塚2-13-4)

⁴E-mail:betto.yusuke@obayashi.co.jp, ⁵E-mail:imaeda.yasunori@obayashi.co.jp.

本工事は東武スカイツリーラインの軌道直下に水路函渠(仕上がり内径2.4m×2.4m, 延長15.0m)を築造する工事である。人力刃口推進による非開削工法(R & C工法)が採用されていたが, 最小土被りが0.35mと小さく, 地下水位の高い緩い砂質土が掘削対象地盤であることから, 軌道および周辺地盤への影響が懸念された。本報文は, この厳しい条件下において営業線の安全を確保するために採用した対策工とその結果について報告するものである。

Key Words : 軌道横断推進, R & C工法, 小土被り, 高水位

1. まえがき

埼玉県越谷市大袋地区では大雨時に浸水被害が出るため, 雨水幹線水路整備が進められている。その一環である本工事は, 東武スカイツリーラインとの交差部において延長 15.0mの雨水用函渠を人力刃口推進によるR & C工法で設置するものである。事業主体は越谷市治水課であり, 軌道部分の工事は東武鉄道株式会社へ委託された。

施工箇所は元荒川の旧河川部であり, 地下水位が GL-0.8m~1.1m と高く, 地下水の流れも旧河川に沿って流下している(図-1)。地盤構成は施工箇所から 10m 程度離れた位置の地質調査結果より GL-0.6m まで人為的埋土, GL-1.4m まで細砂が混入する不均質な粘土層, GL-6.7m まで透水性の良い砂質土層であった。また, 施工中の追加調査により有機質粘土層が介在することが判明した。

本工事は, 営業線直下の超小土被りトンネルの施工であることから, 列車運行の安全確保が重要課題であった。地盤の変位を抑えるため, 薬液注入による地盤改良工, ウェルポイントを用いた地下水位低下工, 小土被り部の盛土工を行うとともに, 軌道の変位抑制を目的として簡易軌道桁の設置を行った。さらに, 画像処理システムによる軌道計測管理を実施した。本稿では, これらの対策工の採用経緯, 概要および施工結果について報告する。

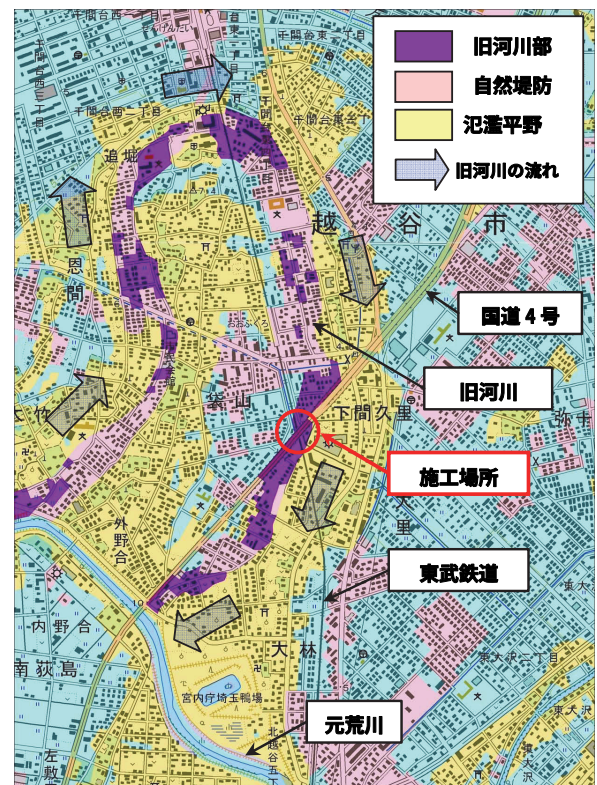


図-1 施工位置図

2. 工事概要

工事概要を表-1に、主な工事内容を表-2に示す。

表-1 工事概要

工事名称	北越谷～大袋間水路新設工事
事業主体	越谷市治水課
発注者	東武鉄道株式会社
工事場所	埼玉県越谷市袋山地内
工期	平成23年12月16日～平成25年3月31日

表-2 主要工事内容

項目	工事内容
発進側立坑	土工、土留工（鋼矢板Ⅲ型） 土留支保工、路面覆工
到達側立坑	掘削土留工（ライナープレートφ6000）
地盤改良工	発進立坑側：高圧噴射攪拌工法 到達立坑側、軌道敷内：薬液注入工
函体推進工	箱形ルーフ推進工（標準0.8m×0.8m） 函体推進工（3.0m×3.0m L=15.0m）
軌道工	画像処理変位計測、軌道検測 軌道整備、簡易軌道桁工

線路下構造物の代表的な施工方法として工事桁架設による開削工法があげられるが、施工箇所の土被りが非常に小さいため函体天端に工事桁が支障する。このため、工事桁架設による開削工法よりも非開削工法の適用が有効と考えられた。しかし、非開削工法の中でも線路と構造物本体の間に防護工を必要とする工法は、最小土被り0.35mという条件には適用できない。そこで、線路の防護工として箱形ルーフと呼ばれる角型鋼管（標準断面800×800）をあらかじめ推進工法により設置し、その後箱形ルーフを押し出しながら本体構造物に置き換えていくR&C工法が採用された。この工法の場合、防護工を残置しないため必要な土被りを小さくすることができる。なお、推進掘削方法としては、予期せぬ支障物等への対応が可能であり、余掘りによる軌道への影響が抑えられる人力掘削を選択した。

R&C工法の概要図を図-2に、箱形ルーフ設置完了状況を写真-1に示す。本工事では、函体推進に使用するボックスカルバートは工場製作によるプレキャスト製品（外寸3.0m×3.0m、幅1.0m）を採用し、函体構築工程の短縮を図った。



写真-1 箱形ルーフ設置完了状況

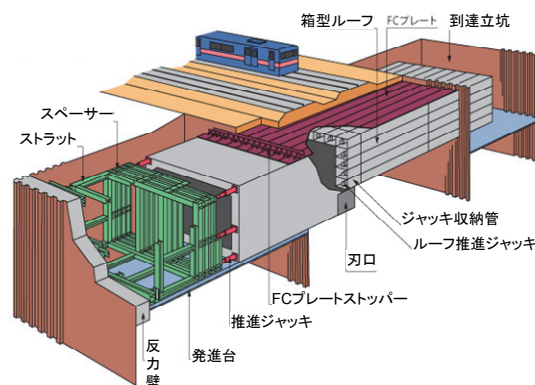


図-2 R&C工法の概要図

3. 技術的課題

(1) 軌道への影響

箱形ルーフおよび函体掘進時は地下水位下での開放型掘削であるため、切羽の崩壊による土砂の流出により地盤が沈下・陥没することが懸念された。地盤の変状が発生すると軌道へ直接影響が生じるため、営業線の徐行運転や運行停止を余儀なくされ、多くの乗降客に影響を及ぼす。さらに、営業線の運行時間内に陥没のような急激な地盤変状が生じた場合には脱線の可能性も考えられ、多くの一般市民を巻き込んだ重大災害につながる。軌道への影響を最小限に抑え安全な営業線の運行を確実に確保した上で、経済性および工程にも配慮した対策が必要であった。

(2) 有機質粘性土の出現

軌道横断部の施工に先行して、深礎工法による到達立坑の掘削を薬液注入を併用して開始した。しかし、掘削途中のGL-3.5m付近で掘削底面からの出水量が増加したため、掘削を中断した。立坑を冠水させた後、出水箇所周辺に追加薬液注入を実施したが、掘削を再開すると再度出水するという状態であった。そこで、出水箇所付近の土層を確認したところ、砂質土の間に腐植物を多く含む粘性土層が介在していることが判明した（写真-2）。



写真-2 有機質粘土層

対策として、セメント系懸濁型注入材による空隙の充填を行った上で、再度水ガラス系材料による注入を実施したが、十分な止水効果は得られなかった。この結果、改良対象土は空隙の大きい有機質粘土を介在した特殊な地盤であり、通常の薬液注入では止水性を確保することが困難であると考えられた。

到達立坑同様に軌道横断面においても有機質粘土層が介在していた場合、止水性を確保することができず推進施工時に切羽から出水することが懸念された。そこで、軌道横断面周辺の地質について追加調査を実施した。追加地質調査の結果に基づく軌道横断面の土層縦断面図を図-3に示す。土層縦断面図より、軌道横断面部の地層は均質な砂質土層ではなく、粘性土や有機物を多く含む層が介在していることがわかった。特に、GL-3.0m以深の有機質粘土層(Asc)は到達立坑掘削時の出水箇所付近に見られた有機質粘土層と同じ地層であると考えられた。このような特殊な地盤条件では当初の薬液注入計画により止水性を確保することが難しいため、追加の補助工法により出水対策を行う必要があった。

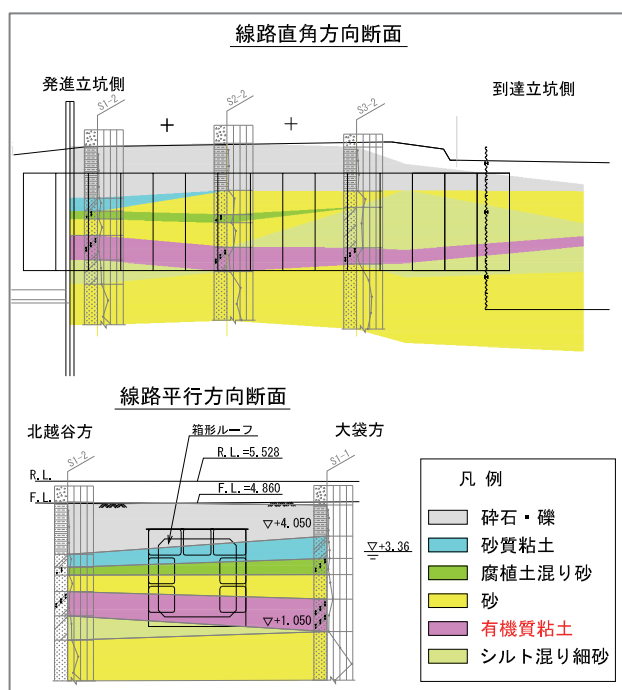


図-3 土層縦断面図

(3) 到達部地盤の側方変位

推進到達部における最小土被りは0.35mである。そのため、到達時に小土被り部の上方路盤が引きずられることで側方に変位し、軌道変状を引き起こす懸念があった。さらに、小土被りシールドにおいては到達する際にシールド機側部の地山が押し出される現象が生じたことが報告されており、本工事でも推進到達時に函体外周の地山との摩擦により掘進方向に押し出されることが懸念された。小土被り部の上方路盤の側方変位および側部の地山の押し出しによる地盤変状を最小限に抑えるための対策が必要であった。

4. 技術的課題に対する解決策

(1) 軌道への影響抑止対策

①簡易軌道桁による軌道変状防止

R & C工法では箱形ルーフ推進時に切羽が崩れて土砂を取り込んだ場合、路盤が局所的に陥没し軌道変状を引き起こすことが懸念された。そこで、軌道変状防止対策として簡易軌道桁を採用することとした。簡易軌道桁は、図-4に示すとおりマクラギの上部にレールと平行にH鋼桁を通し、マクラギとH鋼桁をUボルトで固定することにより軌道の連続性を確保する工法である。簡易軌道桁の設置により、軌道の連続性が確保でき剛性も向上するため、万一軌道直下で局所的な路盤の陥没が生じたとしても、軌道の不同沈下を抑えることができる。また、箱形ルーフや函体の推進時に、路盤に蓄積された摩擦応力が開放されて発進側へ瞬時に水平移動した場合にも、軌道の局所的な水平変位を抑えることができる。

軌道内における簡易軌道桁設置状況を写真-3に示す。

簡易軌道桁の効果の検証は、2次元フレームモデルを用いた弾性解析により行った。解析の結果、局所的な変位が生じたとしても、簡易軌道桁を設置した場合は鉛直変位を30%程度低減、水平変位を70%程度低減できることがわかった。

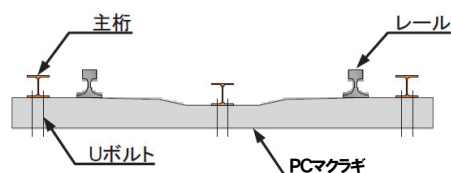


図-4 簡易軌道桁 標準断面図

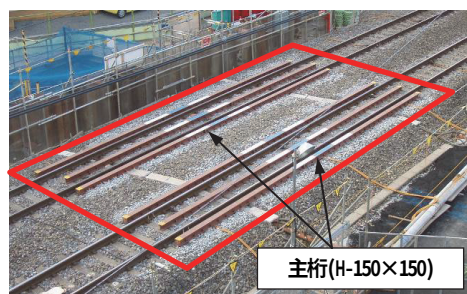


写真-3 簡易軌道桁設置状況

②画像処理変位観測システムによる軌道計測

営業線直下の薬液注入工や函体推進工の施工にあたっては軌道の変状が懸念された。そのため、施工中の軌道変位（鉛直・水平）を常時監視し、東武スカイツリーラインの列車運行の安全確保に努める必要があった。そこで、軌道計測の方法として影響範囲外に設置した画像処理変位観測システム（カメラユニット）を採用した。このシステムはレールの側面に取り付けたターゲットをカメラで撮影し、時間ごとの撮影画像の比較により軌道の変位を計測するものである。軌道変位を0.1mm単位の高

精度で計測し、計測結果を最短5分ごとの高頻度で表示できるため、リアルタイムで軌道の状態を把握できる。また、赤外線による自発光式ターゲットを使用するため、昼夜を問わず安定した計測結果が得られる。軌道計測のターゲット配置図を図-5に示す。

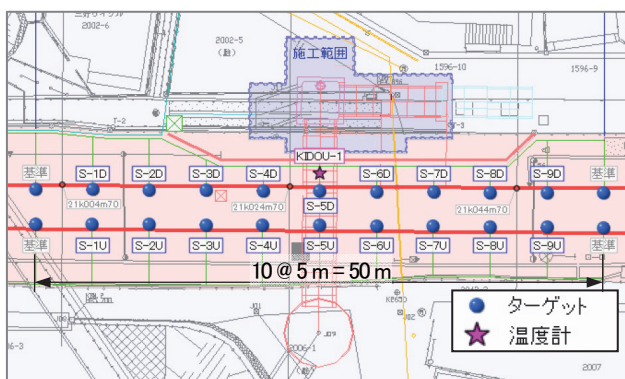


図-5 軌道計測ターゲット配置図

(2) 有機質粘性土対策

①当初地盤改良計画

箱型ルーフおよび函体掘削箇所は強度増加と止水を目的とした地盤改良を行い、地山の安定性を向上させる必要があった。当初計画では、施工箇所の土質条件がN値10程度の中位の砂質土であったため、地盤改良の方法として二重管ストレーナー複相式の薬液注入工法を採用した。使用する注入材は、浸透性に優れ地下水による希釈が少ない水ガラス系溶液型無機系注入材を選定した。薬液注入工断面図を図-6に示す。軌道横断面部については薬液注入時の地盤隆起による軌道変状が懸念されたため、線路閉鎖時間（1:00～4:30）での施工とし、毎夜、軌道検測と軌道整備を実施した。

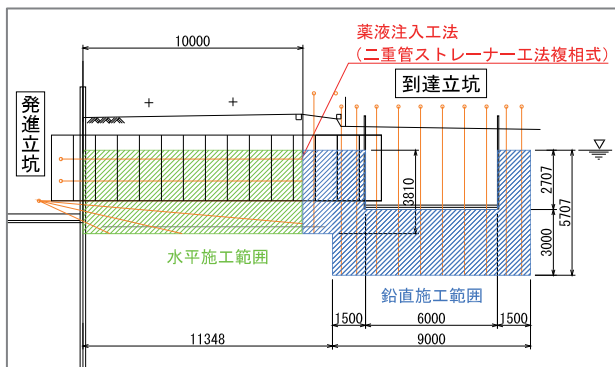


図-6 薬液注入工 断面図

②ウェルポイントによる出水防止対策

前述の通り、当該地盤では空隙の大きい有機質粘性土が介在していることが判明したため、上記の水ガラス系溶液型注入材による薬液注入に加え追加の出水防止対策が必要であった。検討した対策工の特徴を表-3に示す。

表-3 出水防止対策の比較

対策工	特 徴
追加薬液注入	概要 不具合の発生要因である有機質粘土層部分にも止水効果を期待できる材料を使用した追加の薬液注入工法
	得失 ・改良対象が既に薬液注入を行った範囲であるため、追加注入により急激な地盤の隆起を招く可能性がある ・追加の薬液注入は施工期間として1.5ヶ月程度を要し工程に影響を与える ・有機質粘土層にも効果の期待できる注入材料は無機溶液型の注入材料に比べて高価である
ウェルポイント	概要 深さ6.0m程度までの範囲で強制排水が可能なウェルポイントの設置により地下水位を低下させる
	得失 ・ウェルポイントの設置にかかる期間は追加の薬液注入を行う工程に比べ短い ・ウェルポイントの設置および維持にかかる費用は、追加の薬液注入工とそれに伴う軌道工にかかる費用に比べて安価である ・当該工事における掘削深度は到達立坑側でGL-4.5mと比較的浅く、地下水位の低下量が少ない

ウェルポイント工法では地下水位低下に伴う砂質地盤の即時沈下が懸念されたが、事前検討の結果地盤沈下量は最大で10mm程度と予測され、夜間の線閉作業内に復旧できる範囲であると考えられた。水位を低下させることにより軌道横断面部の掘削をドライな状態で安全に施工可能であり、施工性、経済性、工程の面でも有利であることから、追加の対策工としてウェルポイント工法を採用した。地下水位の低下後の目標水位は、推進函体下端を基準としてGL-4.0mに設定した。

軌道内におけるウェルポイントの施工は実績が無かったため、運転時の影響低減策を検討した。まず、ウェルポイントの試験稼働を夜間線路閉鎖時間に実施し、稼働前後の周辺地盤高と軌道変位を測定し、本稼働時の水位低下量と地盤沈下量を推定した。その結果、地盤沈下は最大3mm程度であり局所的な沈下も生じなかったことから、ウェルポイントの本稼働にあたっては夜間の軌道整備で十分に対応可能と判断した。ウェルポイントの稼働にあたっては、停電や機械の故障に備えて非常用の発電機および予備ポンプを準備した。さらに、揚水量が低下した場合には職員へ緊急連絡が入るシステムを導入し、不具合に対して速やかに対応できる体制とした。ウェルポイントの施工位置図を図-7に示す。

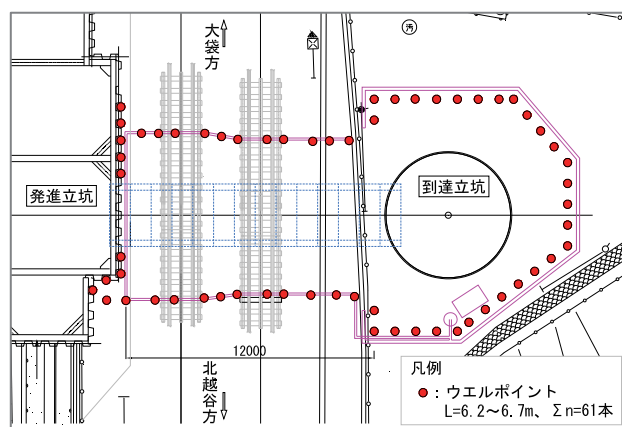


図-7 ウェルポイント施工位置図

(3) 到達部地盤の側方変位抑制対策

推進到達部の函体上部の路盤の側方変位を抑制するため、写真4に示すとおり到達立坑側小土被り箇所への盛土工を実施した。盛土材には再生砂を使用し、盛土を拘束するためアスファルトにより盛土表面を保護した。

一方、函体側部の地山の押し出しについては、到達部を薬液注入により地盤強化することとした。到達立坑側の改良範囲の一部は、立坑掘削時に既に改良済みであったが、出水の影響で強度低下している箇所があると考えられたため追加薬液注入を実施した。追加薬液注入の施工範囲を図-8に示す。注入材料には短期間で高い強度発現が期待できる有機溶液型の注入材を選択した。ただし、掘削時の地山の自立が主な目的となる函体設置範囲に関しては注入率を下げ、全体の注入量を低減しコストダウンを図った。



写真4 小土被り部盛土断面図

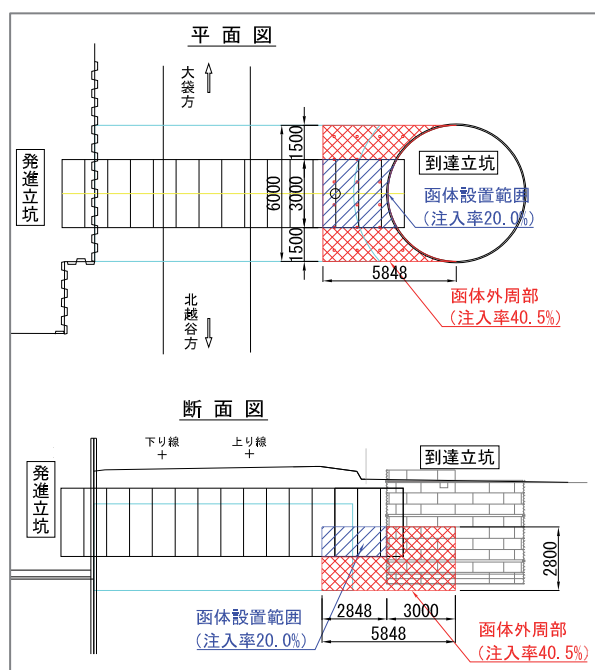


図-8 追加薬液注入図

5. 対策工に対する技術的評価

(1) 軌道への影響

①簡易軌道桁の施工結果

簡易軌道桁の施工は軌道部の薬液注入完了後に実施した。簡易軌道桁施工の前後を比較すると、整備頻度と所要時間が大幅に減少した。これは、簡易軌道桁の設置により局所的な軌道変位が抑制された結果、軌道整備が容易になったためと考えられる。

②画像処理システムによる軌道計測結果

函体推進期間中の軌道計測結果を図-9に示す。図中の緑の破線は軌道の整備基準値であり、それぞれ鉛直変位（高低） $\pm 7.0\text{mm}$ 、水平変位（通り） $\pm 5.0\text{mm}$ を示す。常に軌道の変状を把握することにより、整備基準値を上回るような急激な軌道変状が発生する前に施工を中断し、直ちに軌道整備に移れる体制を取った。その結果、線路閉鎖時間内に軌道整備を完了し、工事により始発列車が遅れる事態を防ぐことができた。

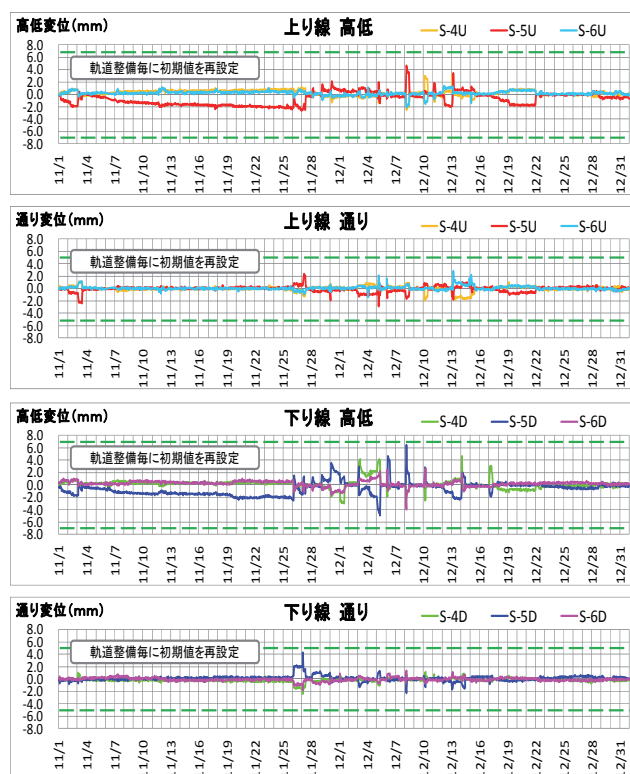


図-9 函体推進時の軌道計測結果

(2) 有機質粘性土の出現

①ウエルポイントの施工結果

ウエルポイント稼働42時間後の地下水位は到達立坑でGL-4.2mとなった。施工箇所の地下水位が十分に低下したことにより、出水のトラブルに見舞われていた到達立坑掘削を無事に完了することができた。また、軌道横断部推進施工時についても、掘削作業をドライな条件下で安全に行うことが可能となり、全工程を通して切羽の崩

壊による局所的な路盤の沈下を防止することができた。ウェルポイントの稼働に伴う周辺地盤の沈下量は、解析値が最大10mmであったのに対して、実測値は最大7mmであった。沈下量の実測値が解析値よりも小さな値となった要因としては、砂層への薬液注入により間隙が充填され即時沈下が抑制されたこと、改良により地盤の強度が増加し全体の沈下量も抑えられたことが考えられる。

(3) 到達部地盤の側方変位

盛土工により小土被り部の上方路盤の側方変位を抑制し、追加の薬液注入により到達時に函体側部の地山が押し出される現象を防止することができた。地盤の変状を抑制できたことで、軌道変状の発生を防ぎ、列車運行の安全を確保できた。

6. おわりに

本工事は、R & C工法により営業線直下に外寸3.0m×3.0mの水路函渠を築造する工事であり、最小土被りが0.35mと小さいことに加え、地下水位が高いという非常に困難な施工条件であった。このため、事前に掘削時の切羽崩壊や軌道変状に関する様々なリスクを検証し、

効果的な対策工を検討し適用した。施工中には想定外の地層に遭遇したが、迅速に追加の対策工を検討し、営業線内ではこれまで用いられなかったウェルポイントによる地下水位低下工法を採用した。これらの対策工の結果、箱形ルーフ推進時および函体推進時を通して地盤沈下を最小限に抑え安全に工期内に施工を完了させ、顧客のニーズにタイムリーに応えることができた。本事例が、小土被り・高水位条件下における今後の同種工事の参考になれば幸いである。



写真5 函体設置完了状況

(2014. 9. 15 受付)

“TRENCHLESS CONSTRUCTION OF THE SEWER TUNNEL STRUCTURE CROSSING UNDER THE RAILWAY WITH A SMALL GROUND COVER AND A HIGH GROUND WATER TABLE”

Masato TAKAHASHI, Yusuke BETTO, Yasunori IMAEDA, Kazumasa TERADA,
Masato MOTOSUGI

A box culvert concrete tunnel structure (inner size : w=2.4m, h=2.4m, 15.0m length) was constructed for a sewer line under the Skytree rail line of TOBU Railway Corporation. Trenchless hand-excavation with multiple open-face steel square boxes (Roof & Culvert Method) was used for the tunnel construction. However, the impacts on the rail track and adjacent ground surface settlements were concerned due to a small ground cover (0.35m) of loose sandy soils and a high ground water table.

This paper describes the measures used to deal with such severe conditions and maintain safety in the tunnel excavation and the monitoring system adopted and its results.