

急勾配・急曲線・小土被りにおける 大断面シールドの掘進管理

副島 直史¹・岸田 政彦²・遠藤 啓一郎³・西丸 知範⁴・小野塚 直紘⁵

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局設計課（〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4）
E-mail: n.soejima107@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路株式会社 技術部技術推進課（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）
E-mail: m.kishida136@shutoko.jp

³首都高速道路株式会社 神奈川建設局横浜工事事務所（〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜3-20-8）
E-mail: k.endou164@shutoko.jp

⁴正会員 清水・東急特定建設工事共同企業体（〒230-0076 神奈川県横浜市鶴見区馬場7-14-2）
E-mail: nishimaru@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 土木事業本部（〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1）
E-mail: n-onozuka@shimz.co.jp

横浜環状北線のほぼ中央に位置する馬場出入口（4つのランプ）は開削およびシールド工法で構築され，そのうち最初に掘進を完了したシールドは，大断面かつ急勾配・急曲線・小土被りという厳しい条件下で線形確保対策や地盤変状抑制対策が必要であった。

線形確保対策は，急勾配・急曲線によって発生するローリング対策をシールド機およびセグメントに行った。またF-NAVIシールド工法，リアルタイム自動測量システムを導入し線形管理を行った。小土被り区間の浮上り対策は，トンネル直上に防護コンクリートを構築し上載荷重を確保した。

地盤変状抑制対策は，トライアル施工の実施，チャンバー内可視化技術，土量管理システムの活用，余掘り充填材および初期強度発現型裏込め材を採用した。

その結果，線形および地盤変状ともに管理値内で掘進できた。

Key Words : shield tunnel, large section shield, steep gradient, sharp curve, shallow overburden

1. はじめに

横浜環状北線（以下，北線）は，横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間であり，第三京浜道路「港北インターチェンジ」から首都高横羽線「生麦ジャンクション」をつなぐ延長約8.2kmの自動車専用道路である（図-1）。

本工事は，北線のほぼ中央に位置する馬場出入口（4つのランプ）および馬場換気所を構築するとともに，大田神奈川線（以下，道路）を整備・拡幅する工事である（図-2）。このうちBランプシールドは，大断面における急勾配・急曲線・小土被りという厳しい条件下でのシールド線形確保対策や地盤変状抑制対策が必要であった。

本報告は，Bランプシールドの掘進管理における線形確保対策および地盤変状抑制対策の内容と施工結果について報告する。



図-1 横浜環状北線位置図

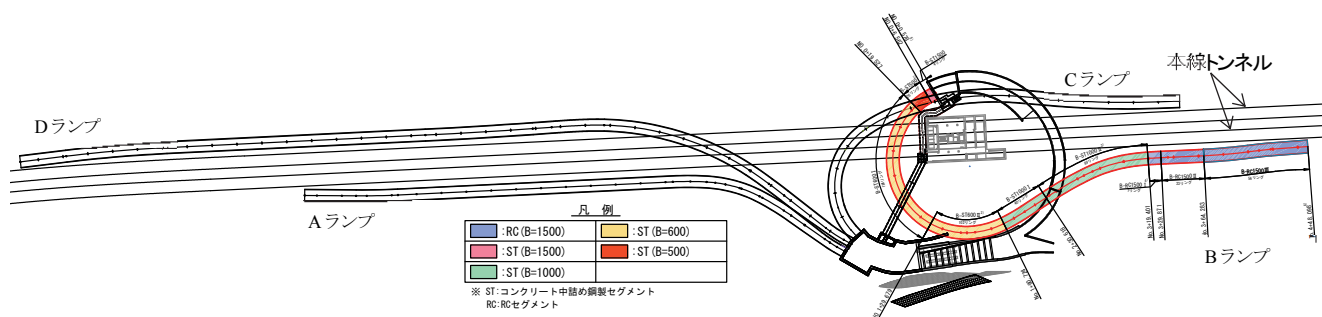


図-2 工事全体平面図

2. 工事概要と施工上の課題

表-1にBランプシールドの概要を示す。図-3に示すとおり、発進立坑から約70mは事業用地内にある。その後、道路下を3度通過し、民地下に入り本線トンネルと接合する。縦断線形は、最大7.6%の下り勾配であり、平面線形の最小曲線半径は50mである。土被りは、シールド発進部で最小1.3m (0.12D)，道路下通過部で最小6.3m (0.58D)，民地下通過部で最小10.3m (0.95D) となる(図-4)。以上の施工条件より、急勾配・急曲線によってシールド機およびセグメントにローリングが発生し、①シールド機では正確な姿勢制御が困難になること、②セグメントでは施設やジェットファンを設置するためにあらかじめセグメントに埋込んだインサートの位置がずれて施設が設置できなくなること、テーパ量が過不足するため所定の曲げ量を管理できなくなることが課題と

なっていた。また、③小土被り区間ではセグメントの浮上りが発生すると、セグメントの損傷や縦断線形の確保が困難となること、④急勾配で掘進することにより、切羽の地層構成が大きく変化しチャンバー内の土砂性状の把握が困難となること、⑤民地下通過部の地層構成は、地表面からトンネルスプリングラインまで腐植土を含む沖積粘性土層が分布するため、シールド掘進の影響が地表面に現れやすいことなどが課題となっていた。

表-1 Bランプシールド概要

延長	463.7m	土被り	13～35.5m
掘削外径	10.83m	最小曲線	R=50m
仕上内径	9.80m	最急勾配	i=-7.6%
工法	泥土圧(気泡)	中折れ角	7.2° (最大)
セグメント	RCセグメント、コンクリート中詰め鋼製セグメント		

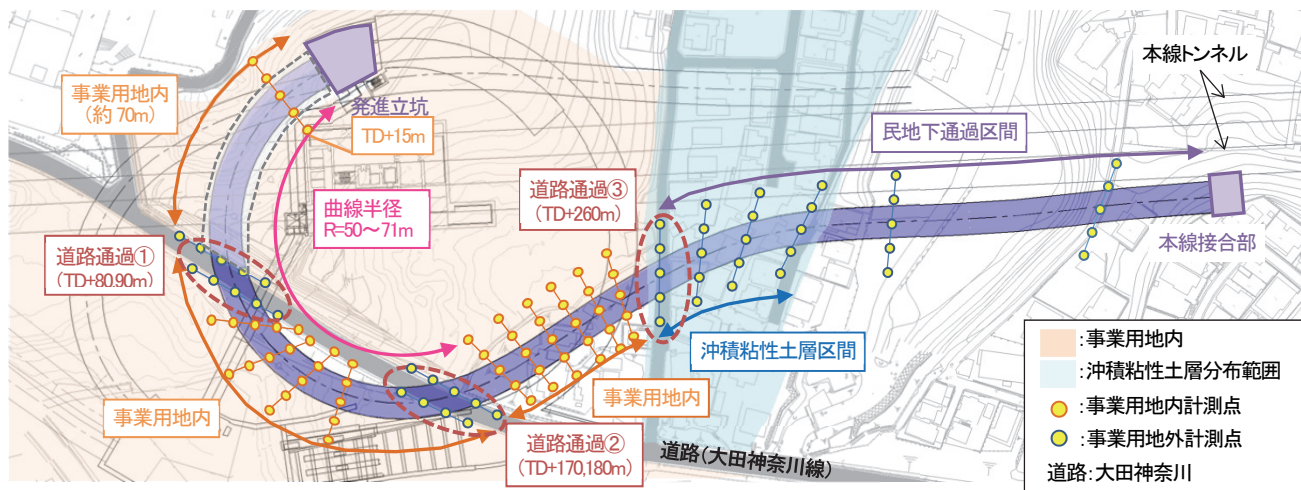


図-3 Bランプ平面図

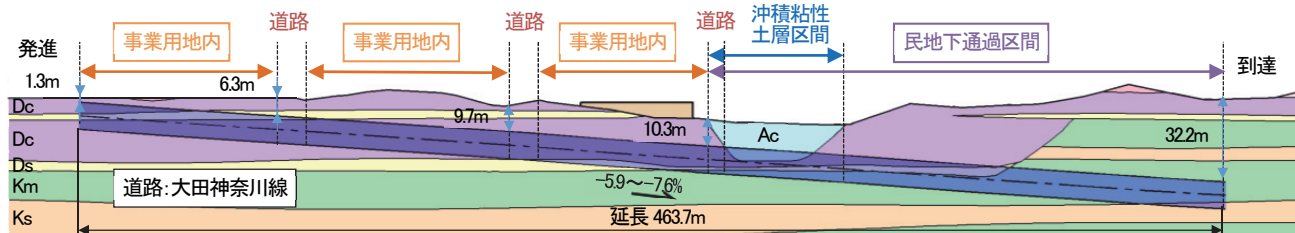


図-4 Bランプ縦断図

3. 線形確保対策と施工結果

(1) シールド機による線形確保対策

急曲線を掘進する場合、中折れ角度によってシールド機の重心がカーブ内側に位置するためローリングが発生し、シールド機の姿勢制御が困難になる。本工事は、下り勾配、左カーブのため反時計回りにローリングする傾向にある。そこで、本シールド機ではローリング修正機能付きシールドジャッキを左右4ヶ所ずつに採用した。また、従来の傾斜計（計測精度0.05deg）に加えて、水レベル計による計測（計測精度0.01deg）を行って入念にローリング量を管理した（図-5）。

また、大断面での急曲線区間（最小R=50m）においても精度の高い線形管理を行うため、F-NAVIシールド工法の前胴首振りシステムを採用した（図-6）。F-NAVIシールド工法とは元来、掘進時にセグメントの組立を同時施工することを目的として開発され、掘進に使用するシールドジャッキがセグメント組立のために入れ替っても基線に沿った方向制御が可能となるように、前胴の首振りによって調整するものである。本工事では、この首振り（特殊中折れ）ジャッキを使用し、線形を確保、または改善しながら掘進できるものとした。さらに測量システムについては、トータルステーション、ジャイロコンパス、マニュアル測量の3つのシステムを複合したリアルタイム自動測量システムを採用し線形管理を行った。

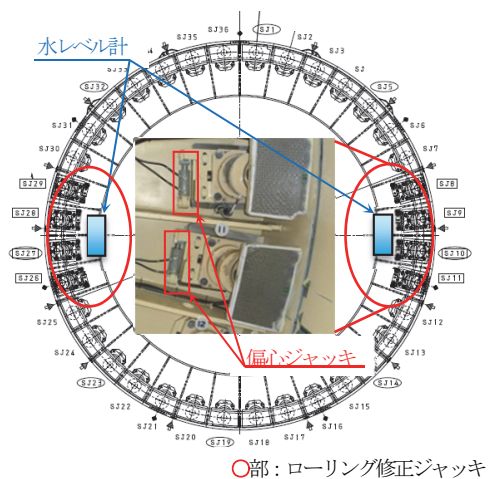


図-5 シールド機ローリング対策

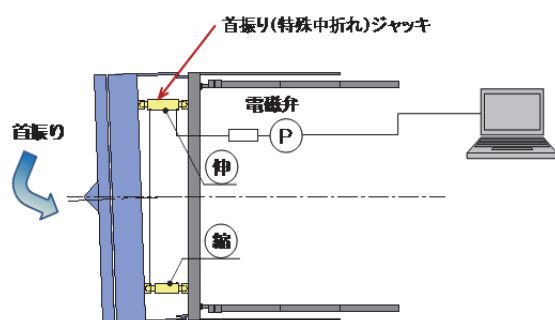


図-6 前胴首振りシステム

(2) セグメントによる線形確保対策

急曲線区間のセグメントは、最小テールクリアランスを20mm以上確保できるセグメント幅とし、最小曲線半径50mではセグメント幅500mmのセグメントとした。その他の急曲線区間ではセグメント幅を600mmとした。

上記の急曲線部のセグメントのローリング修正対策については、縦断勾配（-6.7～-7.6%）、平面曲線半径（R=50～71m）、曲線長（L=183m）等を考慮した時に幾何学的に発生するセグメントのローリング量を算出し、このローリング量を1リング毎に徐々に修正を行うように計画した。具体的には、計算上発生するローリング量+1170mm（+13.27deg）を、割付けリング数312リングで相殺させるよう坑口側リング継手の位置をローリングが発生する方向と同じ方向へ4mmシフトさせる対策を施した（図-7）。なお、+が坑口側から切羽を見て時計回りである。

(3) セグメントの浮上り対策

Bランプシールドは、発進部で最小土被り1.3mの小土被り発進（写真-1）であり、セグメントの浮上りが懸念された。対策としては、シールド発進から延長30m程度までのトンネル直上に防護コンクリートを構築し、上載荷重を確保することでトンネルの安定に対する安全率が1.2以上となるようにした。また、リスク対策として、小土被り区間のトンネル周辺に排水井戸を設置し、急激な地下水位の上昇を防ぐ処置を実施した（図-8）。

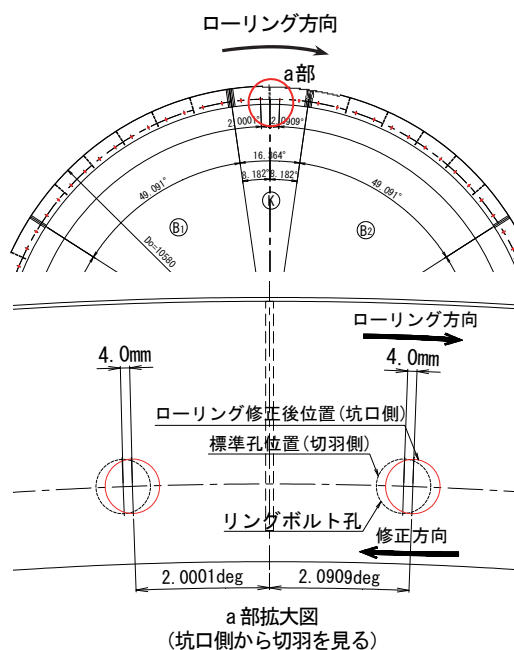


図-7 セグメントローリング対策

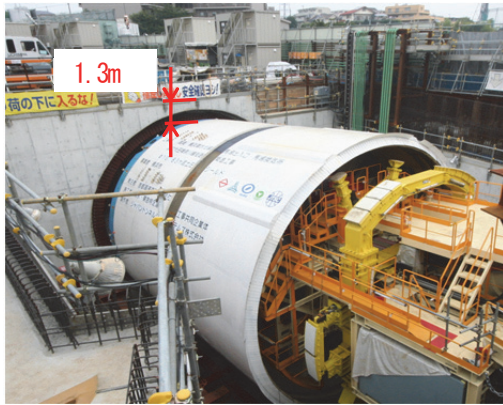


写真-1 シールド機組立状況

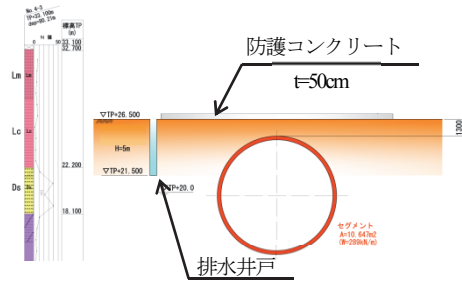


図-8 セグメントの浮上り対策

(4) 施工結果

シールド機の線形確保対策の結果、カッター回転方向の調整およびローリング修正ジャッキを用いてシールド機のローリング量を+9mm (+0.09deg) ~ -30mm (-0.32deg) 程度で制御することができた (+: 坑口側から切羽を見て時計回り)。セグメントの線形確保対策の結果、急曲線部では平均-140mm (-1.59deg) 程度、到達部で-70mm (-0.82deg) 程度のローリング量で管理できた (インサートの許容ローリング量+1.8~-1.9deg)。セグメントの浮上り対策の結果、セグメントの浮上りは発生せず掘進することができた。

上記の対策に加え、F-NAVI工法の前胴首振りシステムおよびリアルタイム自動測量システムを使用したことにより、セグメントの蛇行量は管理値内 (±100mm: 建築限界管理上からの設定値) で掘進することができた (写真-2)。

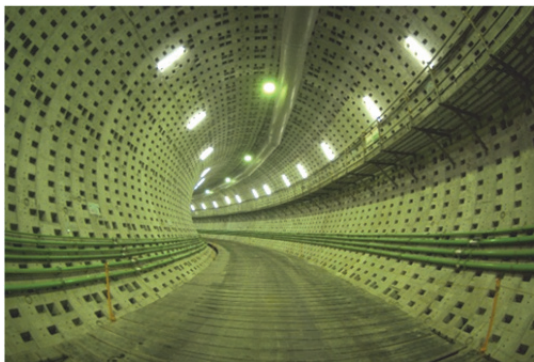


写真-2 急曲線部坑内状況

4. 地盤変状抑制対策と施工結果

(1) トライアル施工による適切な掘進管理値の設定

小土被り施工においては、切羽圧やテールボイドの影響が即時に地表面に及ぶため、適切な掘進管理値の設定が重要となる。そこで、発進直後の事業用地内においてトライアル施工を実施し、切羽圧、添加材注入、余掘り充填注入、および裏込め注入の管理値を定めた。なお、地盤変状の計測は、沈下計測棒の水準測量に加えて、層別沈下計や傾斜計等による自動測量を実施し、情報化施工に努めた (図-9)。地盤変状とマシンの位置関係の情報より、掘進管理項目へフィードバックし管理値の調整を行った (図-10、表-2)。また、トライアル施工以降においても、地表面の水準測量を実施し、管理値の調整を行った。

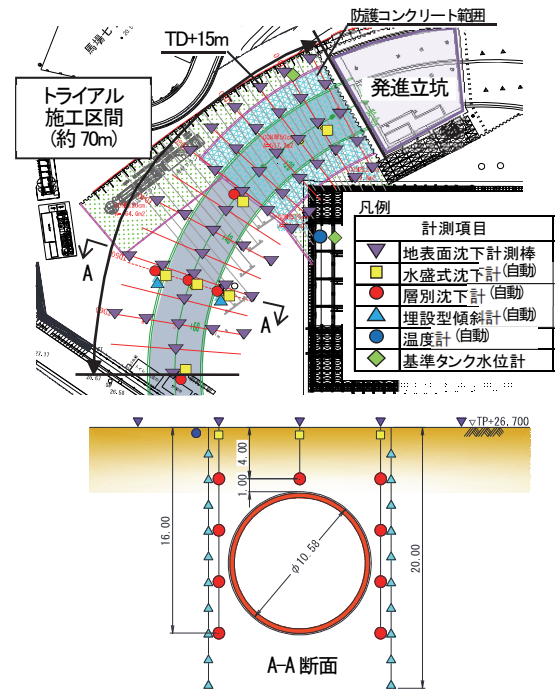


図-9 トライアル施工概要

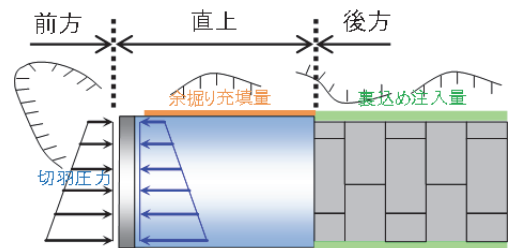


図-10 地盤変状と掘進管理項目の関係

表-2 掘進管理項目

掘進管理項目	フィードバックする情報
切羽圧	前区間の シールド機前方 の地盤変状
余掘り充填	前区間の シールド機直上 の地盤変状
裏込め注入	前区間の シールド機後方 の地盤変状

(2) チャンバー内可視化による掘削土の塑性流動性管理

Bランプシールドは、最大7.6%の急勾配であり、掘進にしたがって切羽の土層構成が大きく変化する。このため、切羽の安定および地盤変状に対して掘削土の性状をリアルタイムに把握し、塑性流動性を確保することが重要となる。

そこで、土圧計測データの標準偏差やフーリエ振幅を算出し、それらを指標値としてチャンバー内の土砂性状を面的に評価・可視化するチャンバー内可視化技術を適用した¹⁾ (図-11)。

(3) 土量管理システムによる適切な排土量の把握

従来のズリ鋼車による土量管理では、リアルタイムに排土量を管理することが困難である。そこで、ベルトコンベア上の掘削土の体積をレーザースキャナで測定するとともに、その重量をベルトスケールで測定し、排土量をリアルタイムに把握し、掘進管理に反映させた。

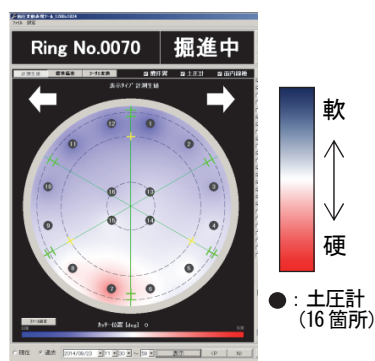


図-11 チャンバー内可視化

(4) 余掘り充填材による地山の緩み防止

最小曲線半径50mの急曲線部では、シールドの方向制御のために最大230mmの余掘りを確保する必要があったため、余掘り部の地山の緩みが懸念された。そこで、余掘り部に充填材（特殊水ガラスに水と粘土鉱物系材料を混合）を注入し、地山の緩みを防止した。

(5) 初期強度発現型の裏込め材による地山の緩み防止

小土被り施工において、テールボイドに起因する地盤変状を抑制するためには、裏込め材の確実な充填と早期の強度発現が重要である。そこで、道路・民地下通過区間では、初期強度発現型配合の裏込め材（材齢1日の圧縮強度0.05N/mm²、標準配合0.02N/mm²）を使用した。

また、R<200mの急曲線部の地盤反力の確保および沖積粘性土層区間の早期安定の目的でも使用した。

(6) 施工結果

掘進前に設定した計画掘進管理値およびトライアル施工区間における掘進結果を表-3に示す。計画の掘進管理値において掘進したところ、カッター通過前および中折れ通過時に地盤の隆起が見られたため、切羽圧を計画切羽圧より0.02MPa下げ、さらに余掘り充填注入率を0%～10%とした。

道路通過②（TD+170，180m）位置の施工結果を図-12に示す。道路通過②では、計画切羽土圧に対して0.04MPa下げて掘進を行ったが、地盤の隆起傾向が見られたため、切羽土圧をさらに0.02MPa下げて掘進した。その結果、10mm程度の隆起で抑制することができた。

また、沖積粘性土層区間（図-13）位置における掘進管理値の代表としてTD+260m地点の施工結果を図-14に示す。施工結果の計測点は、図-15に示すとおりであり、道路通過①、道路通過②および沖積粘性土層区間の掘進結果を表-4にまとめる。

表-3 トライアル施工区間の掘進結果

	計画値 (理論値)	トライアル施工区間		
		区間1	区間2	区間3
土被り(m)	—	2.0～3.5	3.5～5.0	5.0～6.3
切羽圧	静止土圧+水圧+変動圧(0.02MPa)	計画値	計画値 -0.02MPa	計画値 -0.02MPa
余掘り充填率	余掘り量の50%	50%	0%	10%
裏込め注入率	110%以上	110%		
地盤変状	—	前面隆起 直上隆起	直上沈下	前面隆起

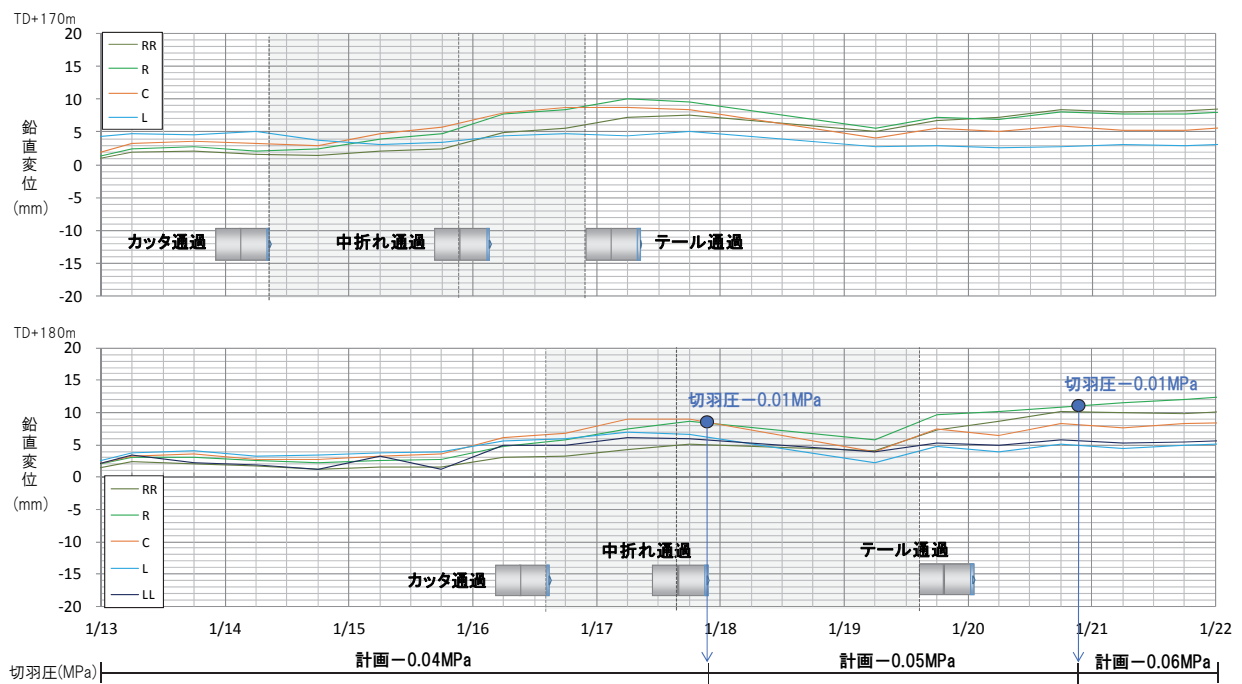


図-12 道路通過② (TD+170, 180m) 施工結果

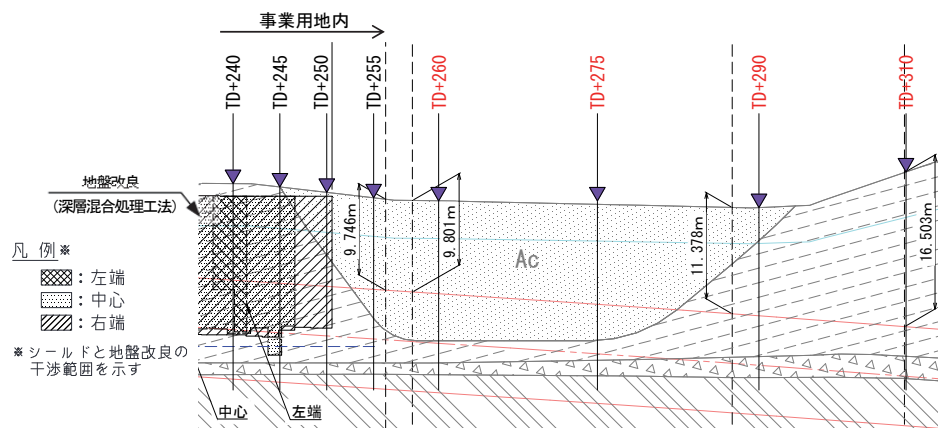


図-13 沖積粘性土区間縦断面図

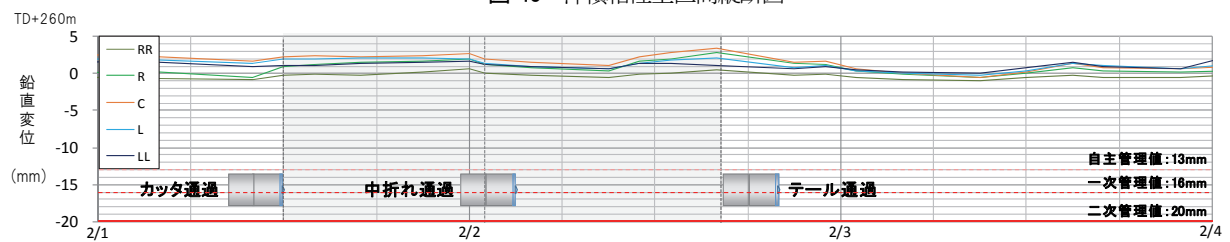


図-14 沖積粘性土区間 (TD+260m) 施工結果

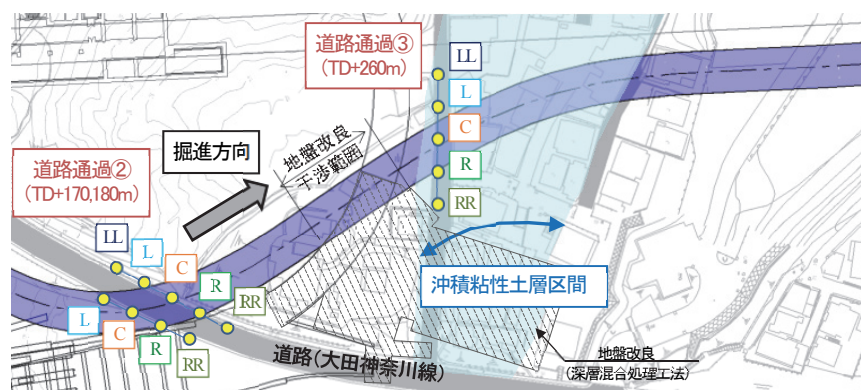


図-15 計測点平面位置図 (TD+170, 180m, 260m)

表-4 道路通過①，道路通過②および沖積粘性土層区間の掘進結果

	道路通過① (TD+80m,90m)	事業用地内	道路通過② (TD+170m,180m)	事業用地内	沖積粘性土区間			土被り1D以上
					TD+260m	TD+275m	TD+290m	
土被り(m)	63~72	72~133~9.7	9.7~130	133~9.4~103	103~120			12.0~35.5~32.2
切羽圧	計画値 -0.03MPa	計画値 -0.03MPa	計画値 -0.04~-0.06MPa	計画値 -0.06MPa	計画値 -0.06MPa~-0.05MPa			計画値 -0.06MPa
余掘り充填率	10%				0%			0%
裏込め注入率	110%					120%		110%
地盤変状 (最大変位)	変状小 隆起 (7mm,3mm)	前面隆起	前面隆起 (10mm,12mm)	変状小	変状小 隆起 (4mm)	直上 沈下 (8mm)	前面 沈下 (11mm)	変状小

TD+260m地点においては、カッター通過前、中折れ通過時、テール通過後と、やや地盤の隆起傾向が認められたものの、全体的に安定していたため、沖積粘性土層区間直前の事業用地内で設定した管理値（計画切羽圧に対して-0.06MPa）において掘進した。その結果、4mm以内の変状で抑制することができた。

その他の沖積粘性土層区間においても、地盤の変状に応じて管理値を調整し掘進した結果、最大沈下量は11mmであり、全区間において自主管理値の沈下量13mmを下回った。（また、最大傾斜角は $0.74 \times 10^{-3} \text{rad}$ であり、全区間において一次管理値の $0.8 \times 10^{-3} \text{rad}$ を下回った。）

急勾配の掘進により、切羽の地層構成が大きく変化することで塑性流動性が維持できず、閉塞や噴発が懸念されたが、通常の添加材注入の管理とチャンバー内可視化技術を併用したことにより、閉塞や噴発を発生することなく掘進することができた。

土量管理システムによる適切な排土量の把握については、ベルトコンベア上の掘削土の体積をレーザースキャナで測定するとともに、その重量をベルトスケールで測定した過去10リングの排土量結果を反映させた結果、掘進量に見合った掘削土を排出することができた。

余掘り充填材については、初期掘進の段階では計画通り余掘り量の50%を注入したが、小土被りの影響もあり地盤の隆起傾向が見られたため、注入量を0%~30%に変更して掘進した。その結果、カッター通過後からテール通過までの区間において、沈下させることなく掘進することができた。

初期強度発現型の裏込め材は、道路通過部等の小土被り区間の地盤変状抑制の他にも、 $R < 200\text{m}$ の急曲線部の地盤反力の確保および沖積粘性土層区間の早期安定を目的に使用した。注入率は、テールボイドの110%を管理値として注入した結果、道路通過部等の小土被り区間および $R < 200\text{m}$ の急曲線部においては、テール通過後に地

盤の沈下傾向はなく適切な管理ができた。沖積粘性土層区間では、TD+275m~TD+290m区間において地盤の沈下傾向が見られたが、注入率を10%上げて掘進したことで地盤の沈下を抑制することができた。

5. おわりに

本工事では、大断面シールドにおける急勾配・急曲線・小土被りに加えて、道路通過部および沖積粘性土層が分布する民地通過部での土被り1D未満という厳しい施工条件において、所定の線形を確保し、地盤変状を抑制して無事に到達することができた。

本稿で述べた筆者らの経験が、今後の類似工事の一助となれば幸いである。

今後、残り3本のシールド工事を進めるにあたり、Bランプシールドで得た経験を活かし、さらに有識者の貴重なご意見を賜りながら、慎重に施工していく所存である。

謝辞：本工事の実施に際しては、「横浜環状北線トンネルの設計施工に関する調査研究」（委員長：東京都立大学 今田 徹 名誉教授）をはじめとする関係各位に多大なるご指導とご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小瀧伸也，杉山博一，島厚夫，原忠，渡邊洋輔：チャンバー内土圧計測から掘削土の塑性流動性を評価する方法の検討（その4），第67回年次学術講演会講演概要集，67巻，6-147号，pp.293-294，土木学会，2012

(2015.8.7 受付)

A REPORT ON A LARGE SECTION SHIELD TUNNEL DRIVE UNDER
CHALLENGING CONDITIONS - A STEEP GRADIENT , A SHARP CURVE AND
A SHALLOW OVERBURDEN-

Naofumi SOEJIMA, Masahiko KISHIDA, Keiichirou ENDOU,
Tomonori NISHIMARU and Naohiro ONOZUKA

The B-Ramp tunnel, one of four ramp tunnels forming Baba Entrance/Exit located at the center of Yokohama Circular Northern Route of Metropolitan Highway, was constructed as a shield tunnel under the exceptionally challenging conditions. Thorough studies were made in the design of the tunneling machine and the segment linings in terms of alignment control. A cover concrete was laid on the ground surface to help face pressure control under the shallow overburden, and additional cares were paid to settlement control. During the initial drive, trial excavation was made with use of various monitoring systems. As a result of the cares, the tunnel was completed with both the alignment and settlement within the allowable levels.