

「道路盛土直下の非開削工事（フロンテジャッキング工法）における路面沈下対策」

- 東亜建設工業(株)土木事業本部技術部課長 村松 紀夫
東亜建設工業(株)土木事業本部設計部次長 上谷 秀一
東亜建設工業(株)千葉支店土木部技術課 江口 浩敬
東亜建設工業(株)横浜支店横浜工事事務所 村上 令一

1. 目的

本工事は横浜市の道路整備事業として、国道1号を横断する円滑な通行が困難な既設トンネルに代わり、十分な幅員を持った新設トンネルの施工を含む道路改良工事である。工事は国道を供用しながらの施工となるため、アンダーパス工法の一つであるフロンテジャッキング工法を採用した。通行する車両や歩行者の通行に支障を与えぬよう路面変位をいかに抑制するかが重要課題であった。本稿では、FEM弾塑性解析による変位予測とその対策および、FEM弾塑性解析では解析困難な要素を含む施工の、路面変位対策とその効果について報告する。

2. 工事概要

- 工 事 件 名 : 市道戸塚第420号線戸塚町地内道路改良工事
発 注 者 : 横浜市 道路局 戸塚土木事務所
施 工 者 : 東亜・小雀建設共同企業体
工 期 : 平成22年9月16日～平成29年3月31日
工 事 場 所 : 横浜市戸塚区戸塚町3329番地先～3017番地先
トンネル延長 : 44.5m
函体けん引延長 : 34.0m
函体諸元 : 幅14.6m 高さ6.7m
歩道部幅員2.0m, 3.0m 車道部幅員7.0m (図2-1)

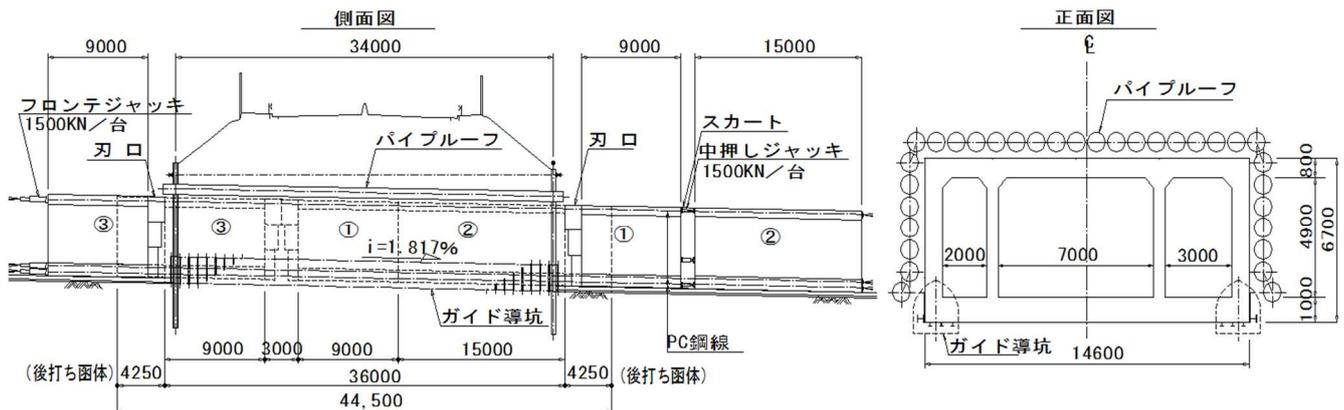


図2-1 トンネル側面,正面図

キーワード：アンダーパス工法, FEM弾塑性解析, 路面変位抑制

連絡先 東亜建設工業株式会社

〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー31階

TEL: 03 (6757) 3841 FAX: 03 (6757) 3846

3. 地盤条件

図 3-1 に地質想定断面図を示す。掘削対象地盤は国道 1 号の盛土で、法勾配は約 1 : 1.35 と標準より急勾配である。盛土層は粘性土 (Bs-c) 及び粘土質砂 (Bs-s) が主体である。盛土下部は現地盤で、沖積有機質粘性土 (Apt)、洪積砂質土層 (Dsc)、洪積粘性土層 (Dc1) から構成されている。掘削部は盛土層で、N 値は 2~6 程度である。地下水位は上位面と下位面の 2 深度で確認されており、上位面は降雨の影響を強く受け、盛土内の水みちを伝わり定常的に供給されている宙水 (溜まり水)、下位面は地下水位面となっている。

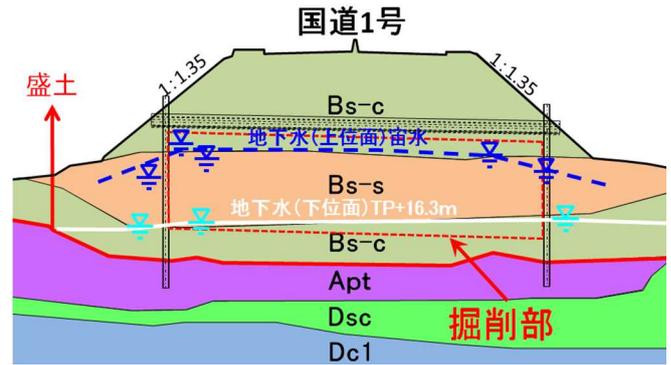


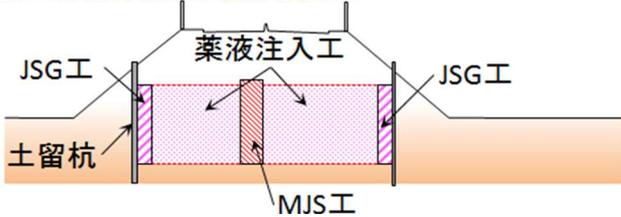
図 3-1 地質想定断面図

4. 全体施工フロー及びフロンテジャッキング工法概要

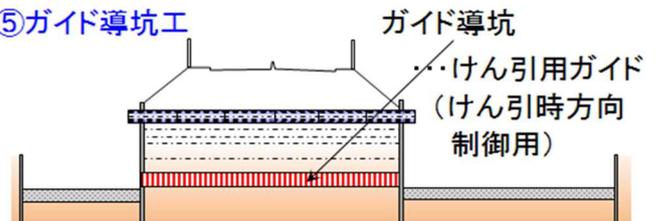
(1) 全体施工フロー

本工法における施工順序を図 4-1 に示す。

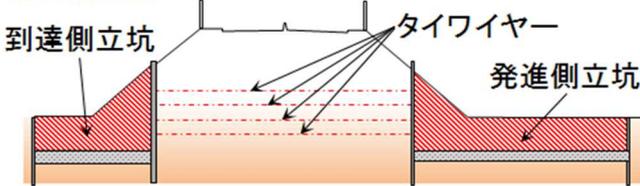
①土留杭打設工、地盤改良工



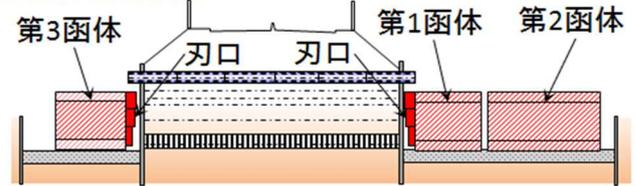
⑤ガイド導坑工



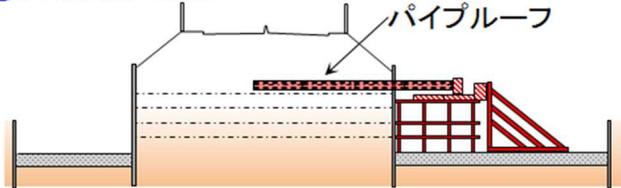
②立坑築造工



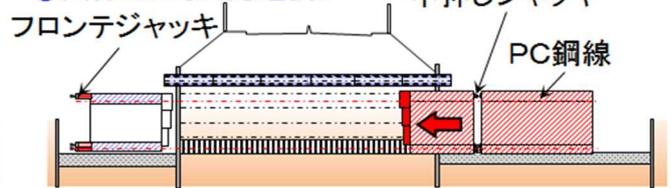
⑥函体現場製作



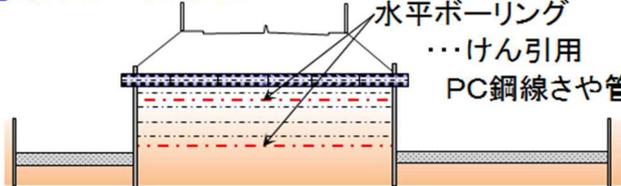
③パイプルーフ工



⑦函体けん引(発進側)



④水平ボーリング工



⑦函体けん引(到達側)

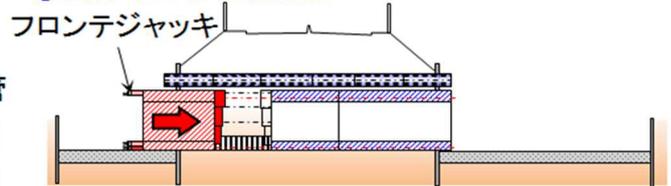


図 4-1 施工順序図

(2) フロンテジャッキング工法概要

フロンテジャッキング工法（以下 FJ 工法と記載）は、鉄道または道路下に地下構造物を非開削で構築する工法で、函体を PC 鋼線で連結し、特殊油圧ジャッキにより所定位置に函体を“けん引”しトンネルを築造する工法である。本工事は、国道 1 号を挟み発進側・到達側立坑に函体を現場製作し、相手方を反力抵抗体として相互にけん引する“相互けん引方式”を採用した（図 4-2）。

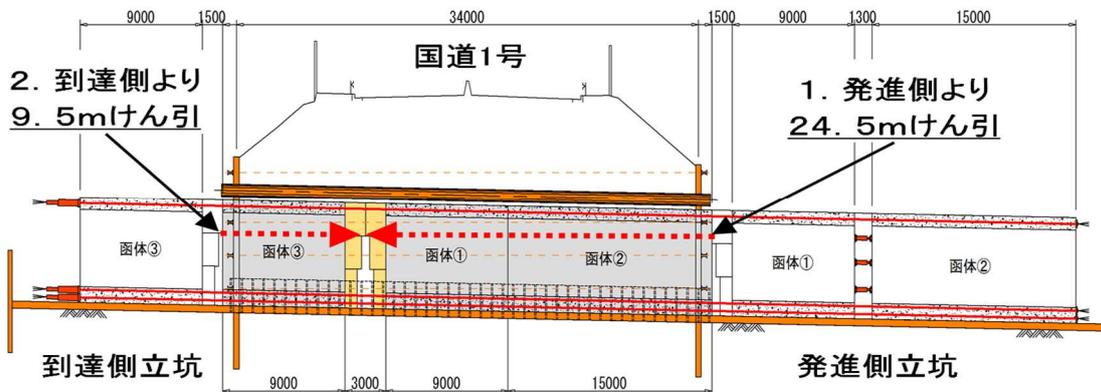


図 4-2 函体けん引断面図

5. 計測管理

発注者及び国道管理者との施工協議により、路面変位量上限値を±40mm までとして、管理体制を 4 段階に区分し計測管理を実施した。施工期間を通しノンプリズムトータルステーション 2 台による路面変位計測と、函体けん引作業では、さらにパイプルーフ（以下 PR と記載）管内に水盛式変位計を追加設置し、ともに 24 時間自動変位観測を行った（図 5-1, 5-2）。

PR 変位計測位置は、路面変位計測との相互関係を把握するため、路面変位計測 D・E・F 測線の直下の 3 列とした。函体けん引作業では、PR に即時に変位影響が現れるのに対し、路面へは土被りが約 7m ある影響で、変位時差が発生すると考えられたため、路面変位管理値の 75%を PR 変位管理値とした。路面および PR 変位管理基準値を示す（表 5-1）。

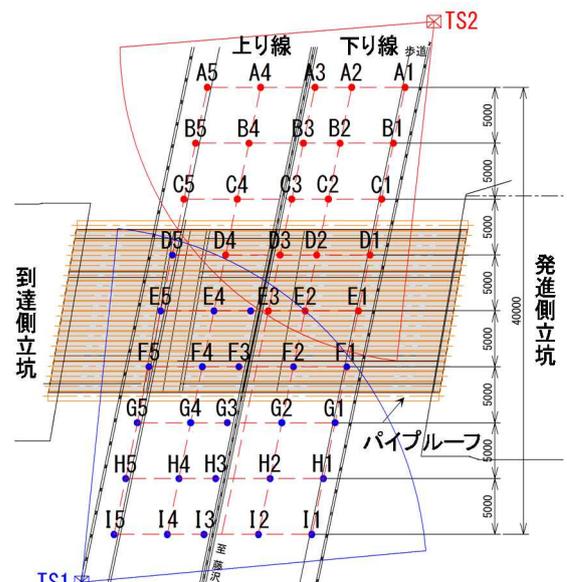


図 5-1 路面変位計測 平面位置図

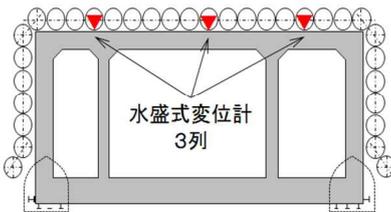
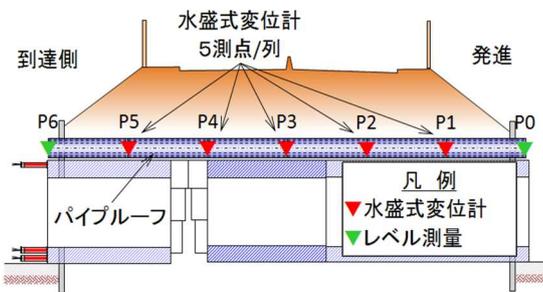


図 5-2 水盛式変位計 設置位置図

表 5-1 変位管理基準値

単位：mm	路面変位計測	PR変位計測
管理体制	管理値	管理値
通常体制	±10未満	—
監視強化体制	±10～±20	± 8～±15
警戒体制①	±20～±30	±15～±23
警戒体制②	±30～±40	—
緊急体制	±40以上	—
(突発的変位)		

6. 施工上の課題と対策

(1) 函体けん引による路面への影響

a) 課題

工事初期段階で既存ボーリング調査に加え、連続的な地盤構成・地盤強度を把握するために追加ボーリング調査を実施し、結果に基づき FEM 弾塑性解析（以降 FEM 解析と記載）を行った（図 6-1）。

解析では変位対策を行わない場合、盛土中央付近にて立坑築造完了時で-42mm、さらに函体けん引完了時で-28mm 沈下が増加し合計-70mm となり、管理基準上限値を大幅に上回る結果となった。この結果を踏まえ路面沈下防止対策が必要であった。

b) 対策

函体けん引時の切羽掘削は、分割して掘削し完了部分は刃口に常設されている油圧ジャッキにより速やかに土留めを行うが、徐々に応力が解放され、地山は安息角を取ろうとゆるみが徐々に前方へ拡大してゆく。PR はけん引される函体と、前方の地山に支持されるが、ゆるみ領域が拡大することで仮想支持点のスペンが長くなり、PR の変形量が増加し路面変位が発生する（図 6-2）。対策として、①PR 鋼管の剛性向上案 ②地盤改良により PR を土中で支持する

“先受け地盤改良”案、の2案を挙げ検討した。①案は期待する効果は得られなかったが、②案では大きな沈下低減効果が得られた。また検討は、改良対象範囲改良率 100%・50%・37.5%の3ケースで行い、費用対効果を考慮し立坑築造完了時で-25mm、函体けん引完了時で-16mmの合計-41mmと、管理基準上限値を若干上回るが改良率 37.5%を採用した。地盤改良方法は高圧噴射攪拌工法を選定したが、主要幹線道路に占用帯を設け、路上から改良体造成を行うことが困難なことから、水平・斜め方向の施工が可能な全方位高圧噴射攪拌工法（以降 MJS と記載）を採用した。図 6-3 に MJS 施工概要図と対策後の地盤変形解析結果を示す。

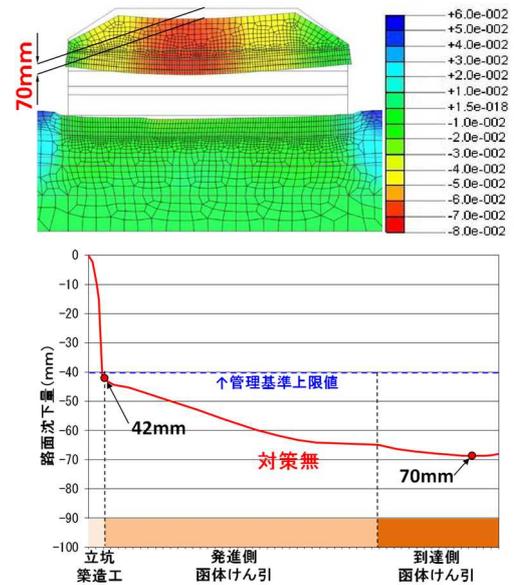


図 6-1 地盤変形解析結果

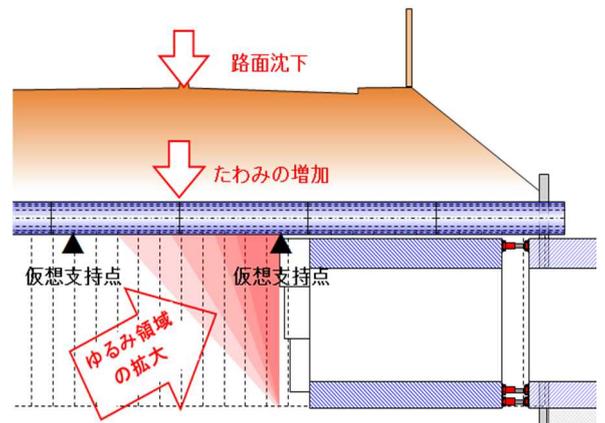


図 6-2 路面沈下概要図

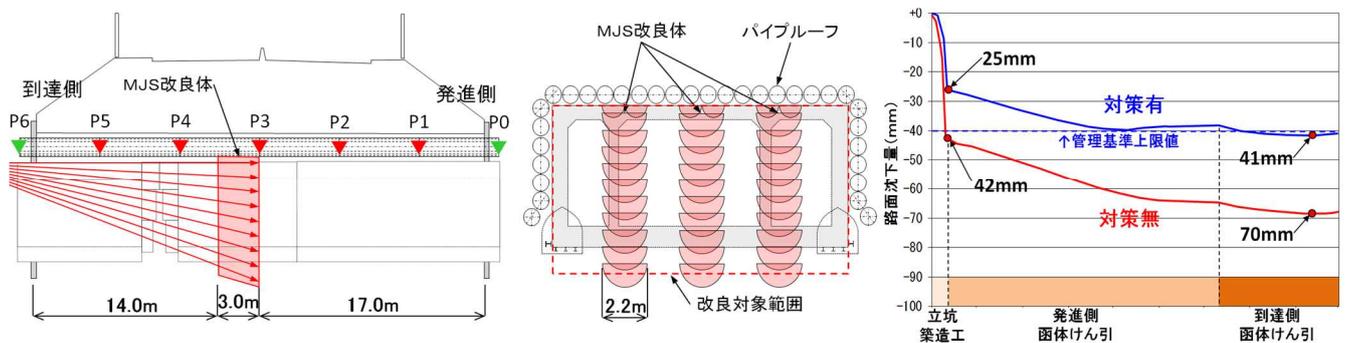


図 6-3 MJS 工法概要図および対策後の地盤変形解析結果

c) 結果

MJS改良による沈下抑止効果を経時変化グラフ及び概要図によって示す(図6-4、6-5)。

改良体から遠いPR変位計測点P2では、測点と切羽離隔が7.0mの段階から沈下が始まったのに対し、P3測点では2.0mまで顕著な沈下傾向が観測されなかった。この計測データから、MJS改良体が、土中においてPRを支持する役割を果たすとともに、地山のゆるみ領域拡大を抑制する効果が確認された。

なおFEM解析では、PR推進時の影響、函体けん引時のPR端部挙動の影響、函体けん引時のスカート部段差による影響は評価が困難な不確定要素であり、施工時に行った対策と効果について(2)～(4)項にて述べる。

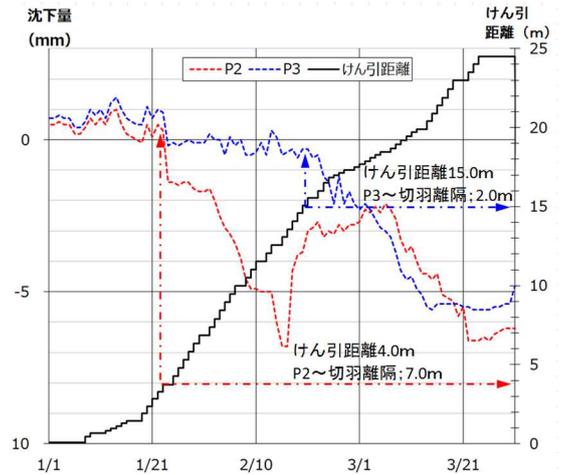


図6-4 経時変化グラフ

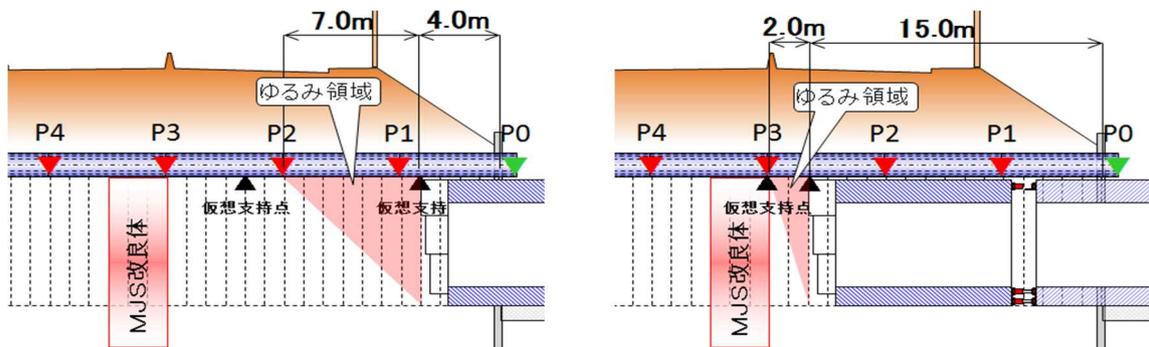


図6-5 MJS改良体による沈下抑止概要図

(2) パイプルーフ施工時の路面への影響

a) 課題

PR1列の延長は36.0mで6.0m×6本を基本とし、水平方向に18列、鉛直方向に7列×2箇所合計32列を門型に配列し、2台の圧入機で施工を行った。鋼管矢板と同様に隣り合う鋼管はアングル継手により連結し、先頭管は厚さ9mmの補強PLにより補強を施している(図6-6)。PRを施工する地盤はN値が2～6程度であり掘進時の過掘防止と、補強PL肉厚(9mm)によりPR外周に生じる空隙の防止が課題であった。

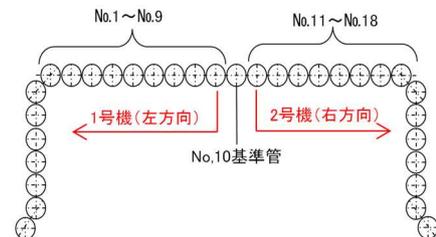


図6-6 PR配列断面・先頭管写真

b) 対策

b-1) 過掘防止対策

PR掘進時の過掘防止対策として、オーガヘッドをPR先端から150～200mm下げ、先端を地山に圧入しながら掘進することで、過掘防止対策を実施した(図6-7)。

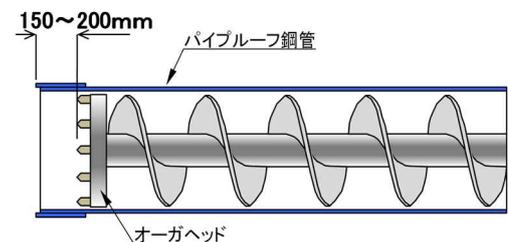


図6-7 オーガヘッド位置図

b-2) 補強 PL 部空隙対策

通常 PR 外周注入材はセメント系裏込め材料を用いるのが一般的だが、本工事では外周注入を1次・2次注入に分けて実施した。1次注入は補強板により生じる空隙を早期充填することを目的とし、PR 継手内に注入材が入り強度発現することで掘進作業の障害にならないよう水ガラス系材料を選定した。注入は推進完了した PR 内部から隣列で施工中の PR に向けて注入を行った(図6-8)。2次注入はセメント系裏込め材にて外周注入を実施することで確実に空隙の充填を図った。

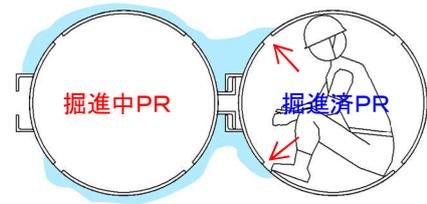


図 6-8 PR外周注入状況図

c) 結果

上記対策の結果、発進・到達側歩道部分(E1, E5 測点)に約-13mmの沈下を観測したが、道路中央部(E3 測点)では-5mm程度に沈下を抑止する事が出来た。また水平部の施工が完了した後に実施した2次注入では、E1, E5 測点において3~5mm程度の隆起を観測した。図6-9に路面変位計測E側線の両歩道及び車道中央部の計測結果グラフを示す。

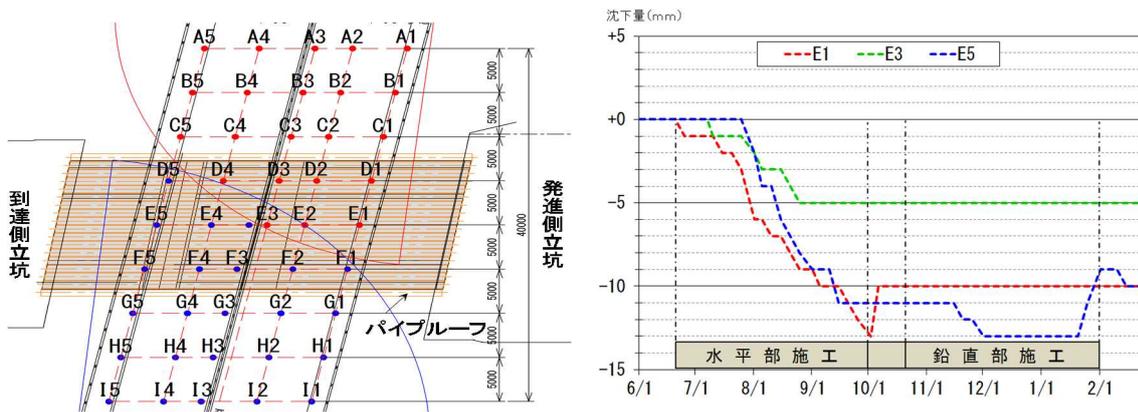


図 6-9 路面沈下計測グラフ

(3) スカート部通過による路面への影響

a) 課題

発進側からの函体けん引は、第1・第2函体間に中押しジャッキを配置しており、厚さ19mmの土砂流入防止鋼板(以降スカートと記載)で外周を覆っている。中押しジャッキ(最大ストローク500mm)は、切羽掘削後に第1函体を前方へ押し出す役割を担っている。ジャッキ伸縮にとまないスカートが可動できるように第2函体側にスカート厚さ分の段差が設けられており(図6-10)。この段差影響による路面沈下を抑制することが課題であった。

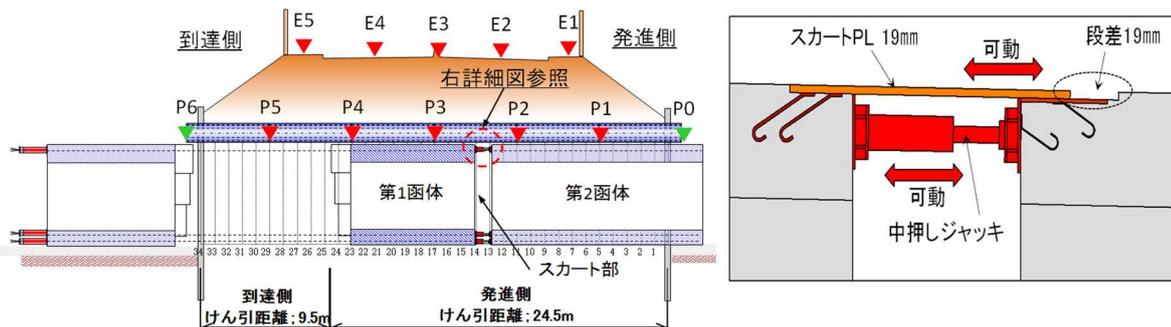


図 6-10 スカート詳細図

b) 対策

PR 変位計が管理基準で定めた監視強化体制 (-15mm) に近づいた時点で、PR 内グラウト注入孔から緊急注入を実施する事を対策とした。注入は沈下傾向の著しい測点付近 (図 6-11 PR 変位計測モニタ画面例) を限定的に行うこととして、注入材は懸濁型を採用した。

c) 結果

函体けん引時のスカート段差影響を受ける計測測点は、PR 変位計測の P0, P1, P2 の 3 測点で、特に P1 測点では地山のゆるみ影響もあり、けん引距離約 13.0m 時点 (この段階でスカートは未通過) で沈下量が-15mm に近づいたため、1 回目の緊急注入を実施し、測点 P1 で約 5mm と路面変位測点 E 1 で約 2 mm の隆起を観測した。その後、測点 P1 をスカートが通過し再び沈下速度が速くなり、2 回目の緊急注入を実施し沈下は収束方向に向かった。2 回目の緊急注入では、測点 P 1 で約 8 mm の隆起を観測したが、路面測点 E 1 では目立った隆起は確認されなかった (図 6-12)。また路面および PR 変位計測値で約 14 mm の沈下量差 (※1) が発生している事から、土盛り 7.0m による変位時差が確認された。

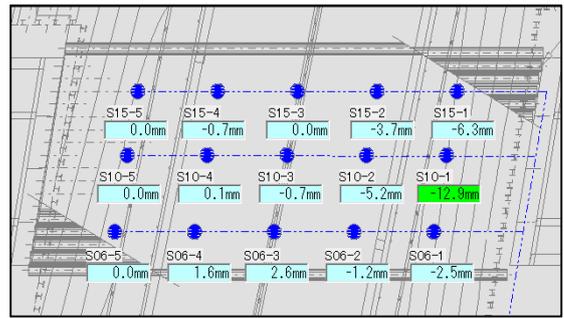


図 6-11 PR 変位計測モニタ画面例

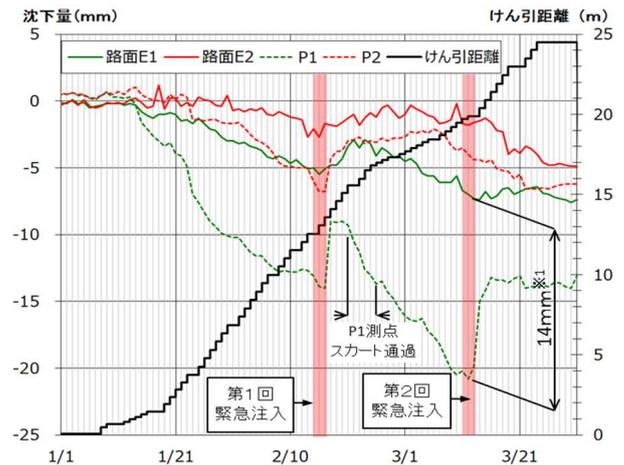


図 6-12 経時変化グラフ

(4) パイプーフ端部沈下による路面への影響

a) 課題

PR 端部は鏡切以降、片持ち梁状態となり、たわみに伴う路面沈下が発生することが予測された。そこで、PR 上部に吊り防護鋼材 (H-400) の設置と函体天端に砂を敷き、函体けん引と共に砂を引き込むことで、PR 端部の沈下抑止対策としたが (図 6-13)、発進側からの函体けん引作業では、PR 端部が最大-38mm まで沈下し、敷き砂だけでは対策不十分であることが判明した。

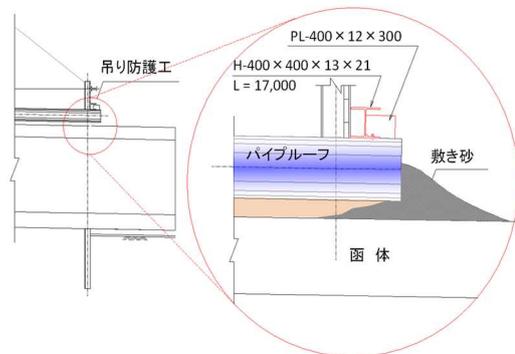


図 6-13 PR 吊防護敷き砂概要図

b) 対策

PR 端部沈下対策として函体上床版と PR 間に、H 鋼材と端角を組み合わせた支持枕により端部養生を行った (図 6-14)。設置位置は支持枕に集中荷重が生じた場合、函体にクラックが発生しないように設置位置は壁の上部付近とした。

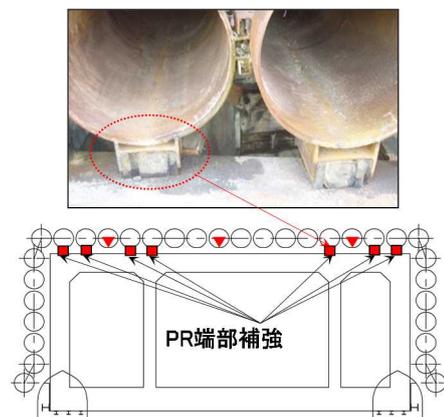


図 6-14 PR 端部補強図

c) 結果

到達側からのけん引距離は9.5mであり、発進側からの同じけん引距離の時点でのPR端部沈下量比較(図6-15)では、発進側(P0測点)で沈下量が約-21mmであったのに対し、到達側(P6測点)では約-11mmと1/2程度であり、端部補強効果が確認された。

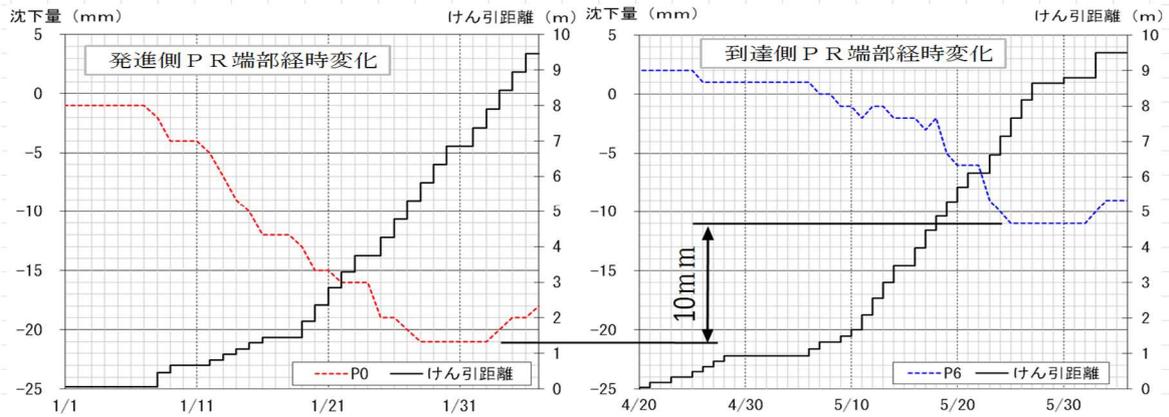


図 6-15 経時変化グラフ比較

7. おわりに

トンネル掘削において、地山のゆるみを最小限にとどめ施工することは、普遍的な課題である。そのため昼夜施工により速やかに掘削することは、地山ゆるみ防止対策の一つとなるが、都市土木の場合制約条件により夜間・休日作業が出来ないことの方が多い。本工事の場合も昼間施工のみの制約の中、FEM解析では、函体けん引作業に発生すると予測した沈下量-16mmに対し、MJS改良効果により実施工では-12mmであった。また施工全期間を通し盛土中央部で約-20mmに沈下を抑止し工事を完成させることが出来た(表7-1)。

本工事の施工にあたり、ご指導ご支援を頂いた関係者の皆様に感謝の意を表すとともに、本報告が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

表 7-1 路面変位量総括表

	FEM弾塑性解析値		実施工
	対策無	対策有	
立坑築造完了	-42	-25	-7
函体けん引完了	-28	-16	-12
累積沈下量	-70	-41	-19

単位:mm