

砂層中での函体推進によるトンネルの施工

吉木務¹・佐藤重孝²・平和男³・加藤勝之⁴

¹正会員 元国土交通省 関東地方整備局 首都国道事務所（〒271-0072 千葉県松戸市竹ヶ花86）

²国土交通省 関東地方整備局 首都国道事務所（〒271-0072 千葉県松戸市竹ヶ花86）

³正会員 鹿島建設株式会社 小塚山トンネル J V 工事事務所（〒272-0836 千葉県市川市北国分1-29）

⁴鹿島建設株式会社 小塚山トンネル J V 工事事務所（〒272-0836 千葉県市川市北国分1-29）

小塚山トンネル工事は、東京外かく環状道路の一部、小塚山公園の下にトンネルを構築する工事であるが、小塚山公園は住宅街にある貴重な緑地であり、樹木保全が事業計画の大前提となっている。そのために、国道部内回り線（2車線：L=127m, W=11.7m, H=8.1m）と外かく環状道路 高速道路部（4車線：L=114m, W=26.3m, H=8.5m）の2本については、非開削工法が採用され、函体推進工法（フロンテジャッキ+ESA工法）でトンネルを計画し、現在施工している。

函体の上部にはφ1mのパイプルーフを施工しているが、このパイプルーフを函体推進のP C鋼線を通す管に利用するバックフレーム方式のフロンテジャッキ工法を採用している。

キーワード：フロンテジャッキ，ESA，パイプルーフ，バックフレーム，函体推進，長距離施工，曲線施工，人力併用機械掘削

1. はじめに

小塚山トンネル工事は、千葉県市川市北国分の小塚山公園下に「東京外かく環状道路」（以下、「外環道」）の上下線を非開削工法で構築する工事である。概略位置を図-1に示す。

併せて、高速道路部と並行する国道部内回り線を非開削工法で、外回り線を開削工法で、それぞれ構築する計画である（図-2, 3）。

本論文は、非開削での函体推進工法として「フロンテジャッキ+ESA工法」によるトンネルが計画され、バックフレーム方式のフロンテジャッキ工法にて施工している、国道部内回り線を中心とした函体推進の施工実績について報告するものである。



図-1 東京外かく環状道路 小塚山トンネル位置図

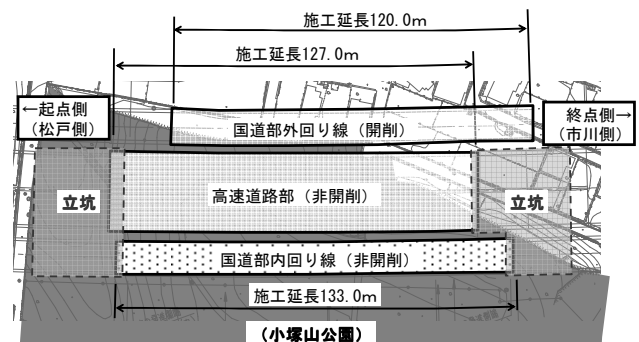


図-2 小塚山トンネル工事 概略平面図

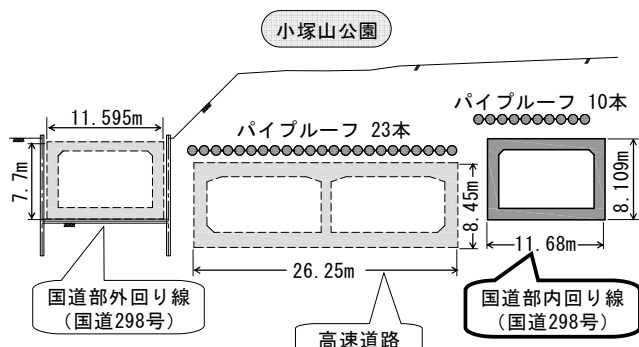


図-3 東京外かく環状道路 小塚山トンネル標準横断面図

2. 工事概要

(1) 全体工事概要

a) 全体工事概要

工 事 名：小塚山トンネル工事

発 注 者：国土交通省関東地方整備局

施 工 者：鹿島・西松特定建設工事共同企業体

工事場所：千葉県市川市北国分1丁目地先

工 期：2005. 3. 12～2010. 3. 31

工事数量：

- ・立坑（起点，終点） 2 箇所
- ・掘削工（非開削部のみ） 33,300m³
- ・カルバート工（非開削部のみ）

	幅	高さ	総延長
高速道路部	26.25	8.45	127.0m
国道部内回り線	11.68	8.109	133.0m
コンクリート			17,449m ³
鉄筋			2,800 t

- ・ 函体推進工
 - 高速道路部 117m
 - 国道部内回り線 130m
- ・ トンネル防護固結工（薬液注入工） 31,000m³
- ・ パイプルーフ工 φ1,016mm

高速道路部	117m-23 列
国道部内回り線	130m- 9 列
国道部内回り線	114m- 1 列

b) 地盤条件

図-4 に国道部内回り線の地質縦断図を示す。

この台地は火山灰に起因する関東ローム層 (Lm) によって覆われており、2 万年以上前に形成された台地である。

関東ローム層の下位には、層厚 2 m 程度の凝灰質粘土 (Jc) が分布し、TP-50m 付近まで層厚 15～20 m 程度の砂質土層 (Ds) と層厚 3～10m 程度の粘性土層 (Dc) が互層状を成し分布している。各地層の分布状況は、水平を成し大きな変化は見られない。

また、表-1 に土質定数を示す掘削対象土層は全断面、砂質土層 (Ds1) であり、シルト以下の細粒分がほとんどない自立性の悪い層となっている。

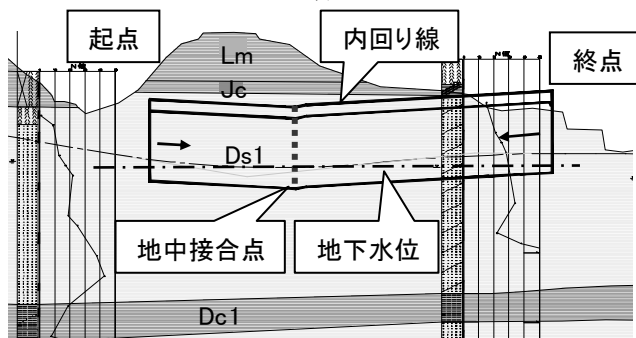


図-4 地質縦断図（内回り線）

表-1 対象地盤の土質定数

対象地盤	N 値	c [kN/ m ²]	φ [°]
Ds 層	7～20	0	35

また、地下水位は施工底面より高い位置にあるため、工事区間を遮水壁で囲い、遮水壁の中の地下水をディープウェルにて排水しながら施工している。図-5 に工事区間の排水工平面図を示す。

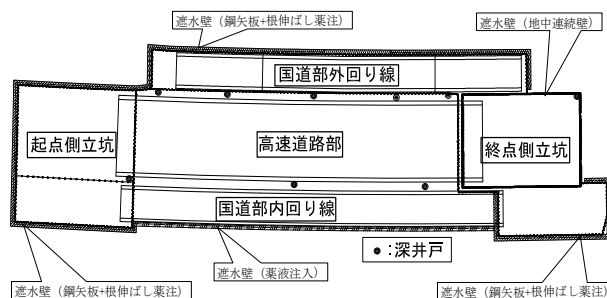


図-5 排水工平面図

(2) 函体推進概要

a) 函体推進概要

本工事の函体推進では、「バックフレーム方式のフロンテジャッキ工法」と「ESA 工法」の 2 工法により推進する。

まず「フロンテジャッキ工法」¹⁾とは、全断面プレキャストのカルバートを PC 鋼線と油圧ジャッキを使用して、先端に鋼製の刃口を取り付けたカルバートを土中にけん引する工法である。

今回の「バックフレーム方式のフロンテジャッキ工法」とは、カルバートを複数に分割した函体を、推進箇所を両立坑で築造し、相互に反力体としながらカルバートを土中にけん引する相互けん引方法の一つであり、水平ボーリング孔を設けずに、函体上部に先行設置したパイプルーフを利用して、PC 鋼線を両端側に通す方法である。パイプルーフから通した PC 鋼線を、緊張する際に定着する構造として、鋼製バックフレームを函体後方に設置したのが「バックフレーム方式」である。

通常のフロンテジャッキ工法による相互けん引方法と、今回のバックフレーム方式の違いを図-6 に示す。

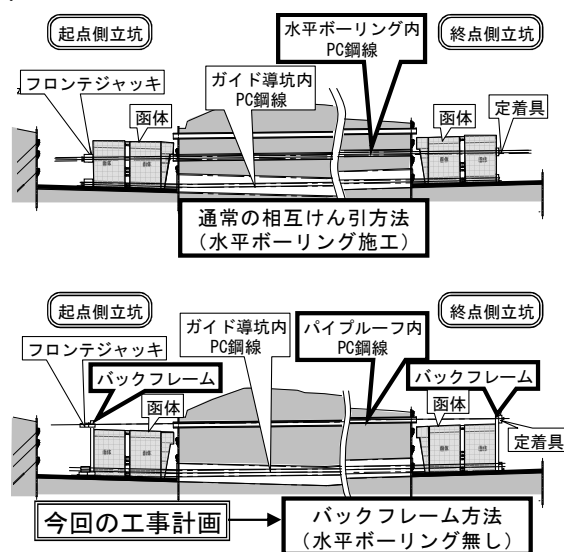


図-6 相互けん引におけるバックフレーム方式概略図

バックフレームの使用状況を写真-1に示す。

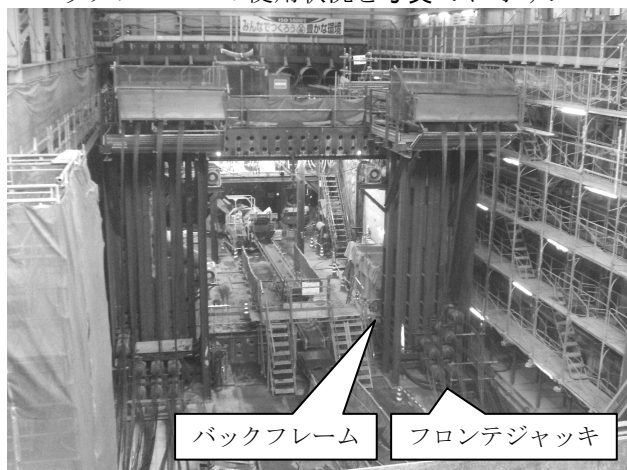


写真-1 バックフレーム使用状況

今回、国道部内回り線における函体推進は、「バックフレーム方式のフロンテジャッキ工法」により2函体1セットで2回推進する。図-7に施工フローを示す。

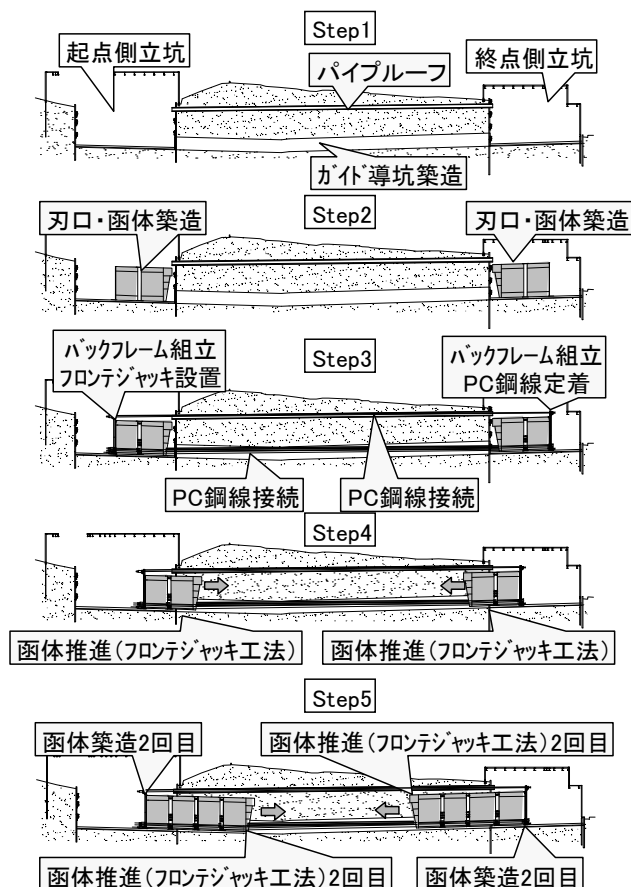


図-7 函体推進フロー図(フロンテジャッキ工法)

次に、冒頭で述べた「フロンテジャッキ+ESA工法」の「ESA工法」とは、無限自走前進工法¹⁾(Endless Self Advancing Method)の略式名称であり、カルバートを地中に長距離にわたって、一方向から自走前進(推進)させる工法である。複数(3個以上)のカルバー

ト函体を貫いてPC鋼線で連結し、各カルバート間と最後部に油圧ジャッキを設置し、1つのカルバート函体を推進する時は、他の複数カルバートの土圧及び函体自重による摩擦抵抗力を反力体として、1函体ずつ順次推進する。

今回、国道部内回り線における「ESA工法」は、1函体を推進するのに、最低4函体の反力体が必要とした為、片側4函体までの推進を「フロンテジャッキ工法」で行い、片側のみで反力体が取れる5函体目からの計画としている。

「ESA工法」により、国道部内回り線は起点側で5函体1セットを1回推進し、終点側では6函体1セットを1回、更に8函体1セットを1回推進する。図-8に施工フローを示す。

最終的には、起点側、終点側のそれぞれの刃口が地中接合して貫通する。

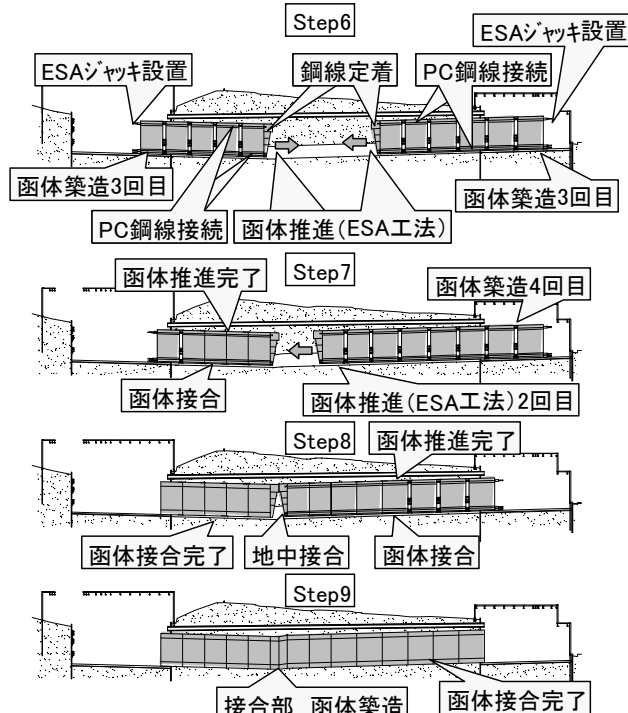


図-8 函体推進フロー図(ESA工法)

b) 函体推進施工数量

国道部内回り線における函体推進数量を以下に示す。(高速道路部は省略)

- ・推進量: 130.1m
(起点側 45.8m, 終点側 84.3m)
- ・掘削長: 127.1m
(起点側 44.3m, 終点側 83.8m)
- ・掘削量: 10,526m³
(起点側 3,665m³, 終点側 6,861m³)
- ・PC鋼線: 4,843.8m (8T15.2)
- ・フロンテジャッキ: 150t, 最大 26 台/面
(フロンテジャッキ工法)
- ・ESAジャッキ: 150t, 最大 20 台/面
(ESA工法、起点側 20 台, 終点側 16 台)
- ・中押しジャッキ: 150t, 最大 30 台/面
(起点側 20~30 台, 終点側 14~26 台)

函体築造は全て両立坑内で行い、高速道路部は起点側6函体、終点側6函体の合計12函体、国道部内回り線は起点側5函体、終点側8函体の合計13函体を築造する。全体配置図を図-9に示す。

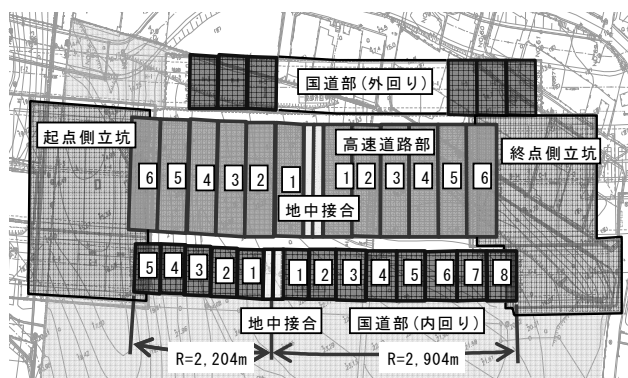


図-9 函体配置図（完成形）

写真-2にフロンテジャッキを設置した状況、写真-3に、函体間に中押しジャッキを設置した状況を示す。

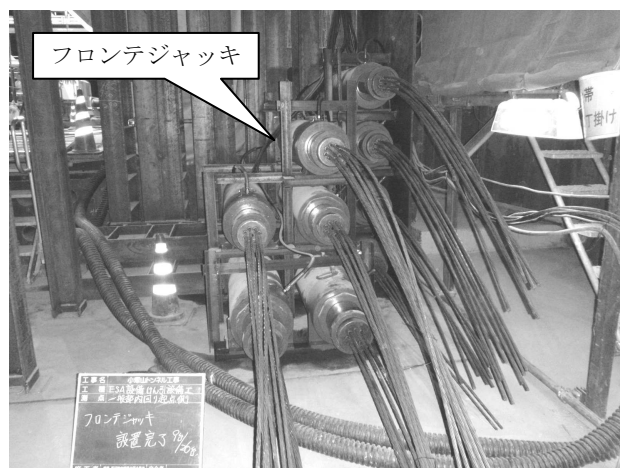


写真-2 フロンテジャッキ設置

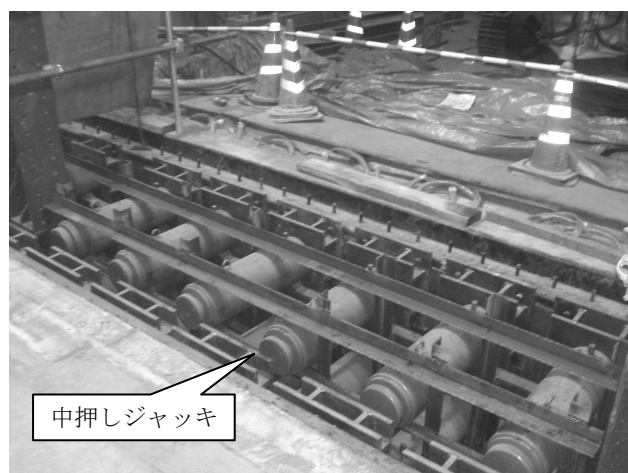


写真-3 中押しジャッキ設置

3. 施工計画

(1) 工事の特徴と問題点

a) 長距離、長期間による推力増大

当工事では、函体推進としては比較的長距離となる127mを掘進する。また、函体築造を4回行う為、掘進を途中3回停止し、発進から函体接合までの期間が約13ヶ月と長期間を要する。

その為に、推力の増大が想定され、適切な推進管理を計画しなければならない。

b) 下り勾配、曲線施工による線形異常

平面線形は、全区間が緩やかな曲線（曲率半径：起点側2,204m・終点側2,904m）であり、縦断線形は、起点、終点共に下り勾配（起点側-1.573%、終点側-1.686%）である。

直線での推進とは異なり、かつ函体を曲線状に推進する為に、平面線形に誤差を生じやすい。

c) 周辺環境と調和

工事場所は、公園を取り囲む閑静な住宅地域である為、騒音等の低減を図り、環境維持に努めなければならない。

d) 切羽の崩壊

自立性の悪い砂質土が、函体推進の全体を占め、今回計画している刃口掘削では、切羽面が崩壊する危険性が高い。

e) 工期の遵守

先の施工フローで述べた様に、本工事では函体構築し、構築した函体を推進する。この作業サイクルを繰り返す為、工程を短縮できる作業としては、函体推進に限られてくる。全体工期に余裕は無い為、不測の事態を考慮し、少しでも工程を短縮できる方法を函体推進で確立しなければならない。

(2) 問題点への対策

a) 推力増大への対策

函体推進時の周面摩擦力及び刃口抵抗に対して、安全率1.2を考慮した推進設備を計画した。

但し、想定推力よりも増大する事が考えられた為、推進毎にジャッキ推力を計測し、想定推力との差を把握できる様な管理を計画した。

推力が増大した際には、摩擦低減を目的とした、以下の2対策を検討した。

- ① 函体内に設けた裏込め注入用グラウト孔より函体底部に滑材を注入する。（立坑発進台との摩擦）
- ② 地山内の函体については、同じく注入用グラウト孔より、函体周面ヘテルシーラー又はボイドキーパーを打設する。

b) 的確な線形管理と函体変状測定

推進中の線形管理としては刃口函体の向き及び傾きが重要な管理項目となる。

平面線形の管理方法として、函体内に測定点を左右2箇所固定設置する。測定点を函体後方の基準点から開放トラバース測量し、函体座標を常に把握出来る計画とした。

水準管理は、函体内に測定点を前後左右4箇所固定設置し、函体の傾き、ローリング管理を常に把握出来る計画とした。図-10に測量イメージを示す。

その他に、刃口推進に後続する函体が軌跡通りに推進しているか管理出来る様に、全函体毎に同様な測定点を固定設置し、日常の測量管理を計画した。

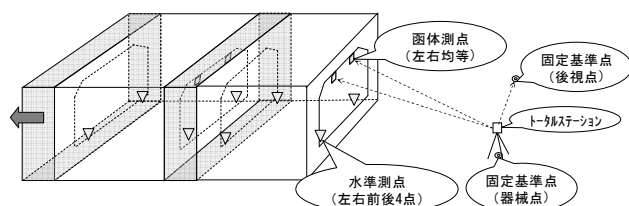


図-10 函体推進測量イメージ

c) 周辺環境の維持

全体工期を遵守する為には、昼夜作業は必至となるが、夜間の騒音対策として、2立坑（起点、終点）共に防音ハウスで覆って、騒音低減を図った。防音ハウス設置後の状況を写真-4に示す。



写真-4 防音ハウス設置（起点側立坑）

d) 切羽崩壊への対策

函体推進区間の全線において薬液注入による地盤改良を函体推進に先行実施した。改良範囲におけるDs層の粘着力を0→70KN/m²以上まで確保し、地山の自立性を高めて、切羽面からの地山崩壊防止を図った。図-11に地盤改良範囲図を示す。

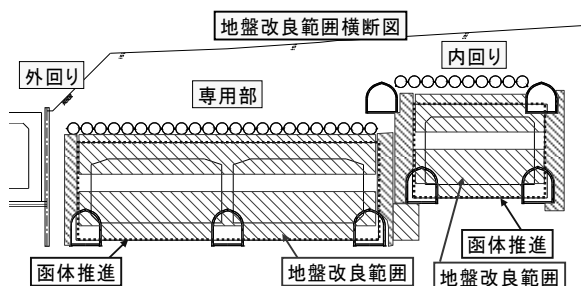


図-11 地盤改良範囲図

e) 工期遵守（工程短縮）への施策

今回の函体推進工法は、刃口を貫入推進し、刃口面を掘削し、掘削とほぼ同時に後続函体を推進する。

この流れを1サイクルとする施工手順で行った。

計画における掘削作業は、昼間で人力併用機械掘削、夜間では特定建設作業にあたる重機作業が出来ない為、人力掘削のみとしていた。但し、先に述べた様に工程短縮を図る為、夜間の人力掘削を補助する機械として、動力源を電気とする「ずり落とし機（写真-5）」と「シャフローダー（写真-6）」を設置した。ずり落とし機は、刃口上部で地山を削り落とす役割をし、シャフローダーは刃口下部にて地山掘削と、ずり集積、搬送の役割をする計画とした。図-12に掘削方法の変更配置図を示す。

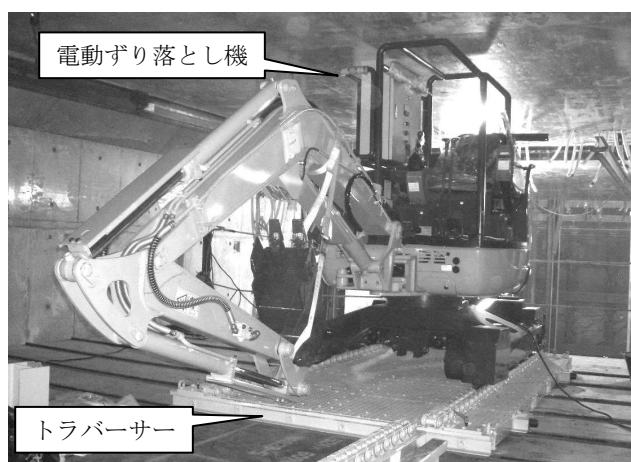


写真-5 ずり落とし機

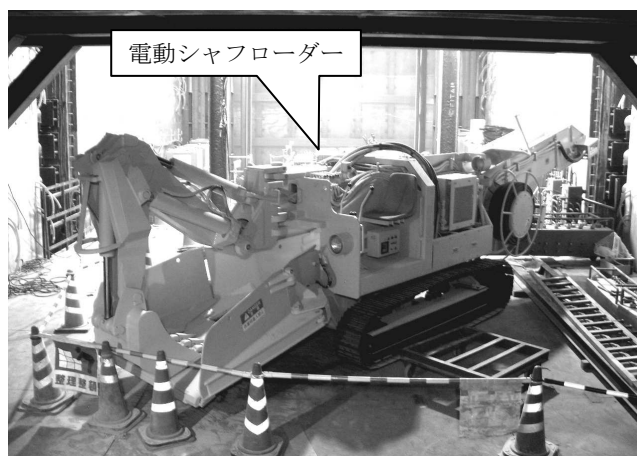


写真-6 シャフローダー

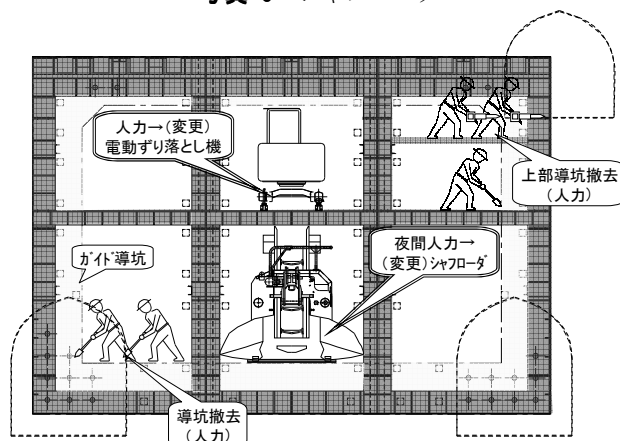


図-12 掘削機の変更配置図（刃口正面図）

4. 施工実績

(1) 現在までの工事進捗

国道部内回り線の工事は、図-8の施工フロー図のStep6、バックフレーム方式のフロンテジャッキ工法により第2回目の函体推進まで完了している。内回り線における函体推進進捗を図-13に示す。

国道部内回り線における函体推進の出来高数量を以下に示す。

- ・推進長：86m（起点側 40.5m，終点側 45.5m）
- ・掘削長：83m（起点側 39m，終点側 44m）
- ・掘削量：約 6,900 m³
（起点側 3,250m³・終点側 3,650m³）

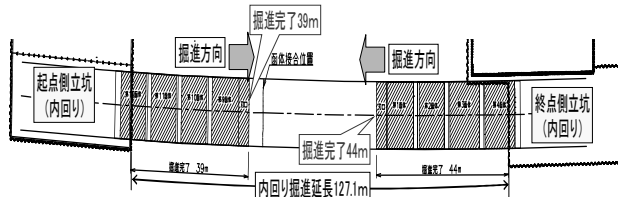


図-13 現在までの工事進捗図（内回り線）

(2) 現在までの施工実績

a) 推力実績

現在までの実績において、函体推進の増大は発生していない。反対に殆どの位置において、想定推力よりも大幅に低く収まっている。その理由として、函体推進による砂質土の崩れにより摩擦力の増大を想定していたが、地盤改良した地山の自立性が高い為、想定よりも低い推力になっていると考えられる。推力実績グラフを図-14に示す。

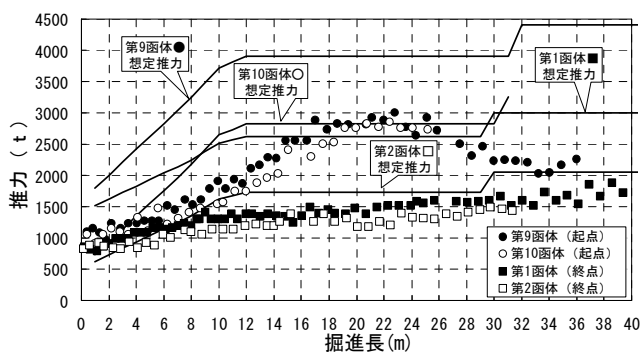


図-14 推力実績グラフ

b) 線形管理結果

線形管理をする際の管理基準値は、完成出来形の規格値とし、平面誤差±30mm、水準誤差±30mmである。現在までの推進においては、規格値を超える事はなく、順調な管理が出来ている。函体推進時における刃口函体の平面位置実績グラフを図-15に示す。

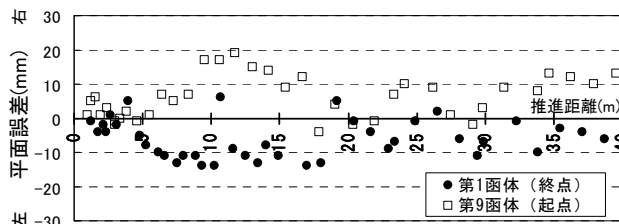


図-15 刃口平面位置実績グラフ

c) 切羽の状態

現在までの推進区間において、地盤改良効果で粘着力が高くなり、人力掘削としては固すぎる箇所もあるが、全体的には十分な固結が確認されている。その為、上部からの雨水等の浸透はあるが、地山が崩壊する心配はなかった。切羽の状況を写真-7に示す。

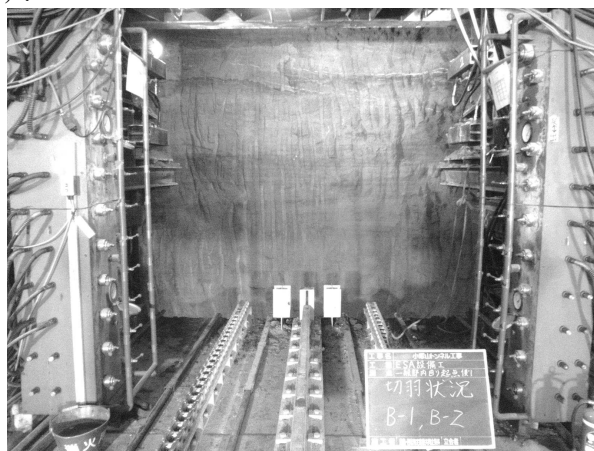


写真-7 切羽状況（起点側・刃口上部中央）

d) 函体推進における工程実績

工程については、函体構築作業において計画工程より約1週間程度の遅延が発生したが、2回の函体推進によりほぼ計画工程まで回復出来た。機械トラブルも少なく、順調な作業を維持出来ている。

5. むすび

今後、内回り線は第3回目の函体推進を「ESA工法」に切り替えて再開する。現在までの実績では、対策の効果も得られ順調にきている。しかし、今後は推進長の増加に伴う推力の増加や、高速道路部との同時推進時の近接部の緩み等、幾つかの課題もあり、より慎重に施工を進めていく予定である。

参考文献

- 1) アンダーパス協会：鉄道・道路 立体交差工法，パンフレット，2007。