

駅非開削部の大断面馬蹄形トンネルに採用した 角形エレメント推進工法の推進精度

篠原 丈実¹・藤川 博樹²・立石 和秀³・田中 孝⁴

¹正会員（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社 綱島鉄道建設所
（〒223-0053 神奈川県横浜市港北区綱島西 1-10-10 第5吉田ビル2階）
E-mail: shinohara.tak-gn8n@jrnt.go.jp

²（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社 綱島鉄道建設所
（〒223-0053 神奈川県横浜市港北区綱島西 1-10-10 第5吉田ビル2階）
E-mail: fujikawa.hir-w2rc@jrnt.go.jp

³正会員 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社 工部部
（〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1）
E-mail: tateishi.kaz-u7gk@jrnt.go.jp

⁴正会員 戸田建設（株）価値創造推進室 技術開発センター 社会基盤構築ユニット
（〒104-8388 東京都中央区京橋 1-18-1）
E-mail: takashi.tanaka@toda.co.jp

新綱島駅（仮称）は、相鉄・東急直通線羽沢横浜国大駅起点 7k800m に位置し、深さ約 35m、幅員約 14～25m の島式ホームを有する地下 4 層を基本とした構造の地下駅である。当該駅の始末端部はシールドトンネルの発進立坑として利用している。駅全長 240m のうち日吉側 34.5m は非開削工法を選定している。また、非開削区間はホームを設置するため内空 224m²（H=14m、B=19m）を有した大断面が必要となる。当該箇所地層は、全体としては N 値 50 以上の強固な上総層群となっているが、砂層と泥岩の互層であり、砂層分布は不明確で豊富な地下水を有している。地上部は、病院および商業ビルなど堅牢な建物が密集し、地上部の利用に制限があること、また地質状況を踏まえて、非開削工法で到達立坑の設置不要な角形エレメント推進工法を採用した^{1) 2)}。本稿では、採用した上記工法の推進精度について焦点を当て、報告する。

Key Words: horseshoe-shaped, trenchless tunneling, digging accuracy

1. はじめに

相鉄・東急直通線は、神奈川東部方面線の一部として、相鉄・JR直通線羽沢横浜国大駅から新横浜駅（仮称）を経由し、東急東横線・目黒線日吉駅までの区間に延長約10kmの連絡線を整備するものであり（図-1）（表-1）、平成24年10月に工事施行認可を受けている。

相鉄・東急直通線、新綱島駅（仮称）は、駅全長240mのうち日吉側34.5mは非開削工法を選定しており、本稿では、採用した上記工法の推進精度について焦点を当て、報告する。

2. 工事概要

(1) 新綱島駅（仮称）の概要

新綱島駅（仮称）は、相鉄・東急直通線羽沢横浜国大

駅起点 7k800m に位置し、深さ約 35m、幅員約 14～25m の島式ホームを有する地下 4 層を基本とした構造の地下駅である。当該駅の始末端部はシールドトンネルの発進立坑として利用している。



図-1 路線図

表-1 事業概要

路線名	相鉄・JR直通線	相鉄・東急直通線
整備区間	相鉄本線西谷駅～JR東日本東海道貨物線横浜羽沢駅付近	JR東日本東海道貨物線横浜羽沢駅付近～東急東横線日吉駅
建設主体	鉄道・運輸機構	鉄道・運輸機構
営業主体	相模鉄道(株)	相模鉄道(株)、東京急行電鉄(株)
鉄道の種類	普通鉄道	普通鉄道
延長	約2.7km	約10.0km
軌間	1,067mm	1,067mm
運行区間	海老名駅・湘南台駅～西谷駅～羽沢横浜国大駅～新宿方面	海老名駅・湘南台駅～羽沢横浜国大駅～日吉駅～渋谷方面・目黒方面
駅の位置	羽沢横浜国大駅 (横浜市神奈川区)	新横浜駅(仮称、横浜市港北区) 新綱島駅(仮称、横浜市港北区)



写真-1 新綱島駅（仮称）付近航空写真

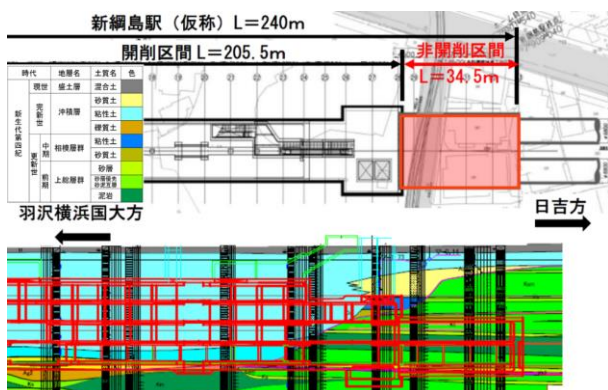


図-2 平面図および地質縦断面図

また、非開削区間はホームを設置するため内空 224m²（H=14m、B=19m）を有した大断面が必要となる。地上部は、病院および商業ビルなど堅牢な建物が密集し（写真-1）、地上部の利用に制限があること、また地質状況を踏まえて、非開削工法で到達立坑の設置不要な角形エレメント推進工法を採用した。

(2) 地質概要

当該箇所の地層は、全体としては N 値 50 以上の強固な上総層群となっているが、砂層と泥岩の互層であり、砂層分布は不明確で豊富な地下水を有している（図-2）。

3. 工法検討

(1) 非開削工法の選定

上記の立地・地質条件に基づき、NATM、シールド切広げ工法および外殻先行構築型工法を比較対象工法として本区間への適用性の検討を行った。

a) NATM

トンネル上部の上総層群の被りが 1D 以下と小さく、介在する砂層が豊富な地下水を有することから、掘削時の地表面沈下や地下水位の低下等、周辺への影響が懸念される。

b) シールド切広げ工法

当該工区のように、土被りが約 23m となる大きい深度での施工例が無く、新たに構造検討や実証実験が必要となる。また、切広げに際してセグメント変形防止とセグメント間掘削を組み合わせた複雑かつ慎重な支保が必要であり、経済性・施工性に劣る。

c) 外殻先行構築型工法

地上部への影響が少なく、止水注入範囲も小さくできるなど合理的な工法であるが、当該工区のように、土被りが約 23m となる大きい深度での施工例が無く、新たに構造検討や実証実験が必要となる。

また、HEP&JES 等既存の外殻先行構築型工法は、推進機がけん引式であるため、到達側に立坑を構築する必要があることから、当該現地条件（到達立坑の構築と、堅牢な建物の撤去が不可）では適用できない。

a)～c)の非開削工法のうち、到達立坑を不要とする外殻先行構築型工法を開発することが最も合理的と判断した。

(2) 非開削部構造と推進機および角形鋼管の改良

トンネル断面形状は、従来の施工実績で用いられている長方形断面よりも構造的に有利な馬蹄形断面を採用した。図-3は長方形断面の施工実績の一例¹⁾として、つくばエクスプレス六町駅工事における非開削区間の横断面図を示したものであり、当該区間の施工延長は約 15m、掘削対象の地盤の N 値は 1～10 程度であった。

今回の施工は、従来の施工実績と比較して固い地盤内の施工であること。施工延長が長いこと、および本設部材とすることなどから、角形鋼管や推進機に以下の改良を行った。

a) 角形鋼管の改良

角形鋼管については、従来実績より施工延長が長くなること、本体利用することおよび馬蹄形断面を採用したことなどから、推進時継手抵抗力の低減、継手品質向上のためのモルタル充填の確実性、および確実な継手閉合のための施工誤差の吸収性向上が課題であった。

そのため、形状に変更を加え新たに角形エレメントを開発した(図-4)。すなわち、鋼板を溶接で接合した1000mm×1000mmの箱型断面を1エレメントとし、凹形状と凸形状の継手を嵌合させ推進し、ボルトで拘束することで、継手の必要耐力を確保する構造である。

b) 推進機の改良

推進機については、到達立坑を構築できない当該工区では、従来の実績のように到達側から駆動部などを回収することは不可能であったため、新たに引抜き回収自走台車(図-5)を開発し、駆動装置などを再利用することとした。

また、経済性から外殻を本体構造部材とするため、エレメント内をコンクリートで充填する一体化構造とするとともに、継手は約60kN(トルク約288N・m)の軸力を導入して拘束ボルトで締め付け、内部をモルタルで充填することとした(図-6)。

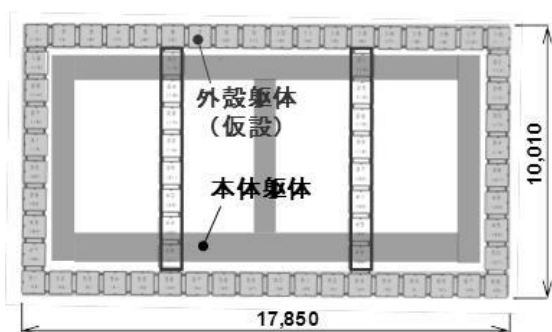


図-3 つくばエクスプレス線六町駅構築断面図

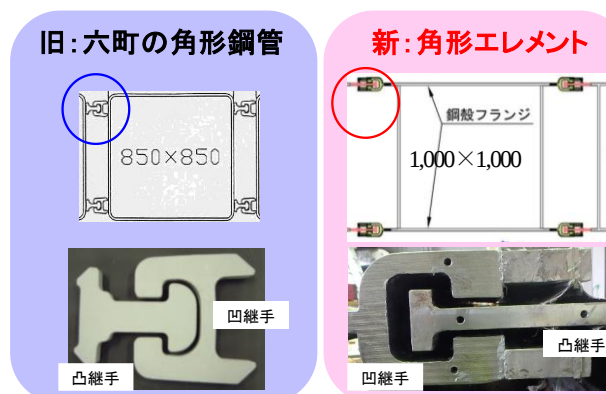


図-4 角形鋼管および角形エレメントの継手概要

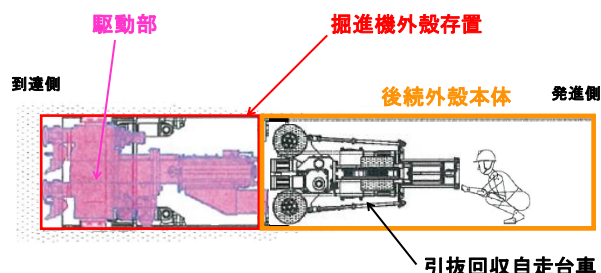


図-5 角形エレメント駆動部引抜き概要図

4. 非開削部の施工フローおよび事前試験

非開削部の施工ステップ図を図-7に示す。前述したとおり、当該工区にて初採用となる工法のため、施工ステップ各段階で施工に支障が無いことを確認するため、実施施工前に確認試験を実施した(表-2)。表-2のうち、本報告では⑨推進時の精度確認試験及び上半施工結果について述べる。

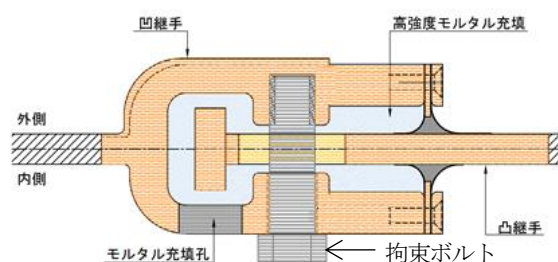


図-6 角形エレメント間継手標準図

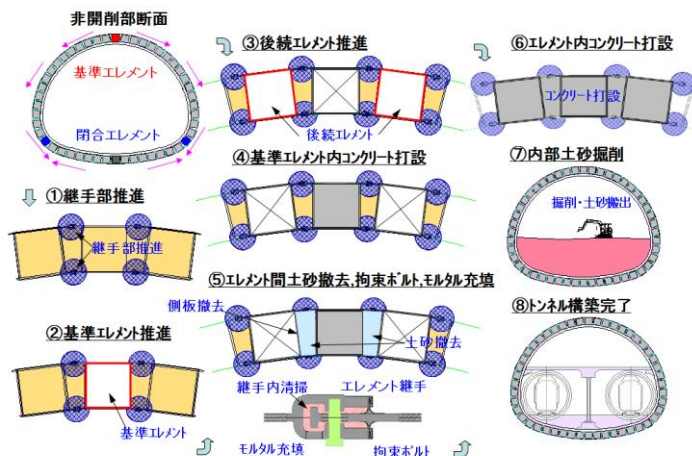


図-7 非開削部施工ステップ図

表-2 施工前試験項目

番号	項目
I 構造性能確認試験	
①	単体エレメント載荷試験
②	継手単体引張試験
③	連結エレメントによる載荷試験
II 止水性能確認試験	
④	継手部止水装置試験
⑤	坑口止水装置試験
⑥	開口蓋止水性能耐力確認試験
⑦	凹継手止水性能確認試験
III 施工性確認試験	
⑧	継手部充填材注入試験
⑨	推進時の精度確認試験

5. 推進時の精度確認試験

(1) 試験目的

推進時の精度確認試験は、実際に使用する推進機と改良した角形エレメントを用いて水平から 22.5° 傾けた状態で推進させ、推進精度が、所定の管理値内の精度（鉛直・水平精度（ $\pm 10\text{mm}$ 以内））を確保できるか、また、後述する新たに追加したローリング（回転角度）修正ジャッキの効果などを確認することを目的に実施した。

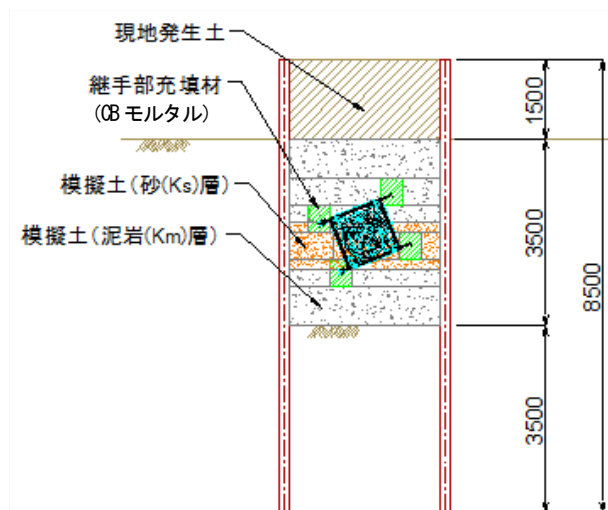


図-8 角形エレメント推進試験概要断面図

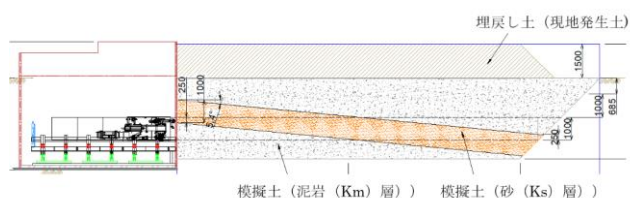


図-9 角形エレメント推進試験概要縦断面図（推進前）

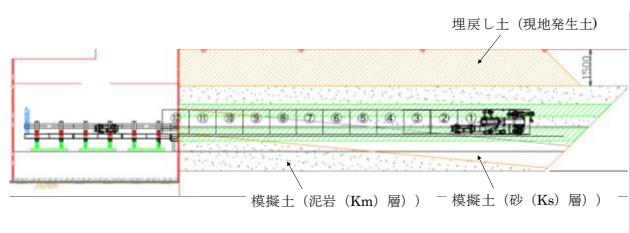


図-10 角形エレメント推進試験概要縦断面図（推進後）

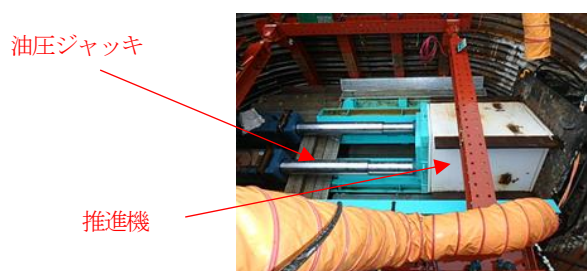


写真-2 推進状況（発進架台）

(2) 試験方法

図-8のとおり現地を想定した模擬土層を造成し、実際に使用する推進機を用いて推進精度確認試験を実施した。図-9のとおり発進立坑部に推進機を据え、図-10のとおり油圧ジャッキにて推進機を地中に貫入させ、後続のエレメントを接合し、推進を進めた。試験中は表-3に示す管理値を満足するかどうかを記録することとした。また、当該工法は継手部が推進の支障となる懸念があったので、継手部は図-8のとおり、模擬土層部に先行置換（CBモルタル：目標強度 0.08N/mm^2 ）を実施した。推進距離 13mより奥は置換部を造成せずに、継手部が支障するか否かを確認することとした。

(3) 試験結果

図-11, 12に推進機の鉛直方向および水平方向の偏心量の推進精度結果を示す。推進距離 13mまで、推進精度 $\pm 3\text{mm}$ 以内で推進することができ、管理目標値である $\pm 10\text{mm}$ 以内で推進可能なことが確認できた。図-13に推進機のローリングの推進精度結果を示す。ローリングについても $\pm 0.2^\circ$ 以内であり、新設したローリングジャッキが確実に機能することが分かった。なお、図-11～13図中の緑線は許容値を表している。

また、推進機と接合する後続のエレメントについても、 $\pm 3\text{mm}$ 程度で追随し、推進機と概ね同様の推進精度で構築できることを確認した。一方、推進距離 13mより奥の部分については継手部が支障して推進不能となり、継手部は地盤の先行置換が必要であることが判明した（写真-3）。

この結果から、以下の結論が得られた。

22.5° 傾斜した状態で推進した場合でも方向修正ジャッキやローリング修正ジャッキを使用して推進することで、推進機とエレメントは、偏心量 $\pm 10\text{mm}$ の精度を確保しながら推進することができる。また、推進機のローリングにおいても $\pm 1.0^\circ$ 以内の姿勢を確保しながら推進することができる。②泥岩層において継手部に置換材による置換を行わない場合、継手部が抵抗となり方向修正ジャッキの推力上昇により推進不能となることから継手部は置換材による置換が必要である。

表-3 推進精度確認試験管理項目

確認項目	確認・計測内容	許容値	測定頻度
掘進性能	推力	最終計画推力 871kN	550mm 掘進時、掘進完了時に記録
	カッター圧力	装備能力 13.8MPa	
	掘進速度	—	
	掘削土量	—	
掘進制御	掘進精度（水平、鉛直）	水平： $\pm 10\text{mm}$ 以内 鉛直： $\pm 10\text{mm}$ 以内	550mm 掘進時、掘進完了時に記録
	掘進機の姿勢（ローリング、ピッチング）	—	
	エレメントの姿勢（水平、鉛直）	水平： $\pm 10\text{mm}$ 以内 鉛直： $\pm 10\text{mm}$ 以内	エレメント1本掘進完了ごとに記録
	周辺地盤への影響	地盤変状（レベル）	

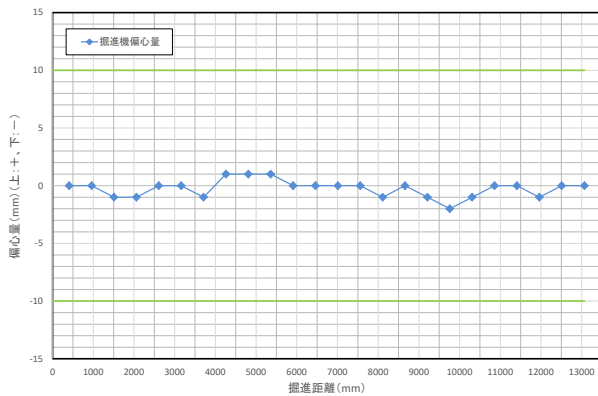


図-11 推進機の推進精度結果（鉛直方向の偏心量）

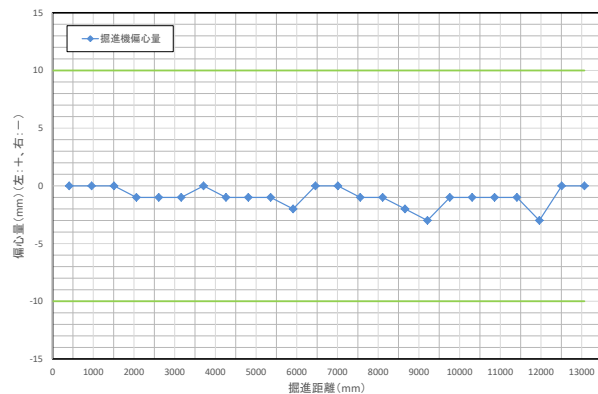


図-12 推進機の推進精度結果（水平方向の偏心量）

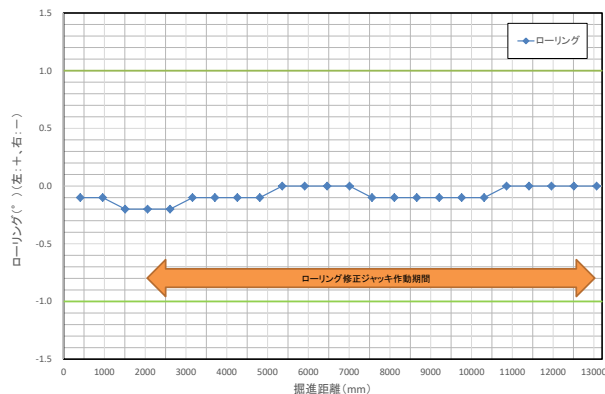


図-13 推進機の推進精度結果（ローリング）



写真-3 継手先端部と泥岩層との接触状況

6. 試験結果を踏まえた施工計画

(1) 継手部先行置換工

角形エレメントを立坑側から終点側に向かって施工する際に、N 値 50 以上の上総層群を推進することから、エレメントから張り出した継手が推進時の支障となる。そこで、図-14,15 に示すとおり、先行して継手部を地山よりも軟らかい流動化材に置き換える工法を採用した。

この工法により、推進抵抗を低減し、角形エレメントをより精度良く設計位置に構築することが可能となる。この改良体は、角形エレメントの継手位置に確実に配置する必要があるため、継手部先行置換工の推進精度は、鉛直・水平方向に管理目標値（ $\pm 50\text{mm}$ 以内）を設定した。

(2) 角形エレメント推進工

試験時と同様に、発進立坑内の元押しジャッキを伸長させて推進機を地山に貫入させ（図-16）、後続のエレメントを順次接続していく手順で施工した。角形エレメント推進にあたっては、推進位置がそのまま本体構造位置となるため、継手部先行置換工よりも高い推進精度が求められる。そこで、推進機について、従来管理していた鉛直・水平変位だけでなく、ローリングについても高精度で制御・管理できるよう、従来は推進機の後胴部に設置していた油圧式修正ジャッキを、新たに推進機の前胴部に追加した（図-17）。推進機に圧力式水位計（鉛直変位）およびターゲット（水平変位）、後続のエレメントにジャイロ計（ローリング）を設置し、各変位を常

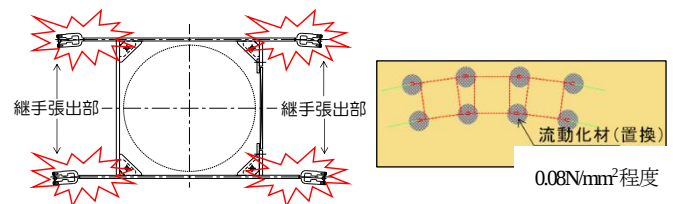
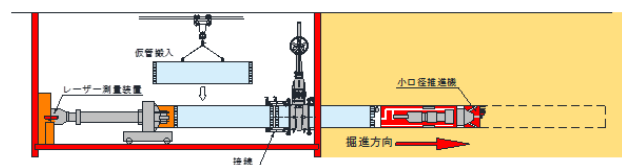


図-14 継手部先行置換工概要（断面図）

1. 推進工



2. 置換工

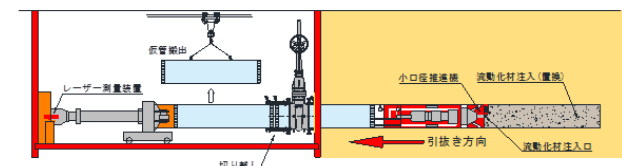
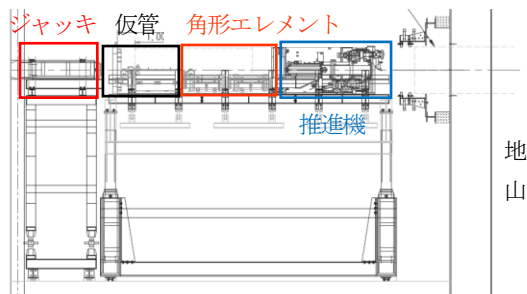


図-15 継手部先行置換工概要（縦断面図）

時モニタリングし、推進精度を管理する計画とした（図-18）。なお、定規の役割となる基準管（No.1 エLEMENT）の鉛直・水平変位の管理目標値は±10mm、その他一般管については±25mmの管理目標値を設定した。

1.角形ELEMENT推進前



2.角形ELEMENT推進後

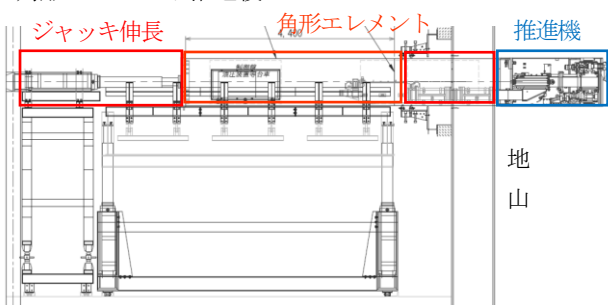


図-16 角形ELEMENT推進概要図

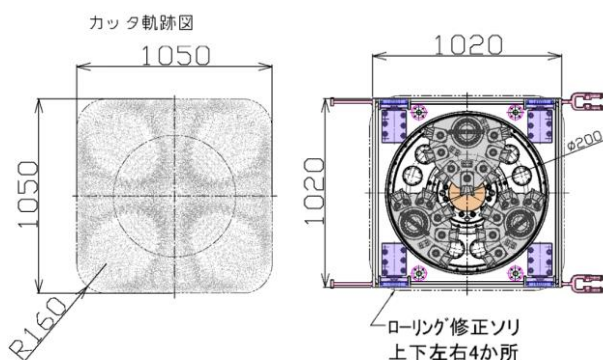
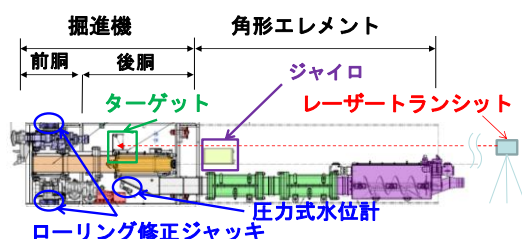


図-17 角形ELEMENT推進機断面図



制御盤



モニター

図-18 角形ELEMENT推進精度管理概要図

7. 上半角形ELEMENT施工実績

(1) 継手部先行置換工

継手部の推進中に傾斜した砂層と泥岩の境目で推進機が下方へ下がる傾向が生じたが、推進速度を低下させて慎重に施工した（図-19）。

上記の対策を講じても、一部引抜き・再推進が必要となる箇所があったが、次の先行置換工前にオーバーカット量を減らす（11mm→7mm）など、推進機の改造を実施し、最終的には推進精度を全て管理基準値内に収めることができた。

(2) 角形ELEMENT推進工

角形ELEMENT構築の実績を図-20～22に示す。推進機と後続ELEMENTの出来形の精度については、平均水平変位は±15mm、平均鉛直変位は±20mm程度であり、標準偏差については10mm程度であった。推進精度は、

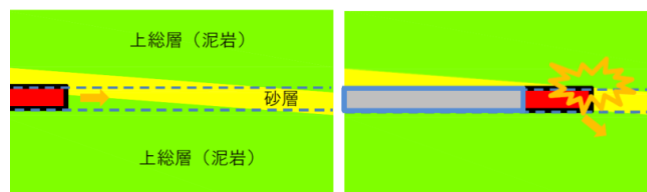


図-19 推進速度低下概念図

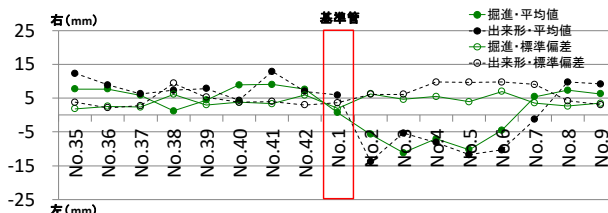


図-20 角形ELEMENT推進と出来形の平均水平変位・標準偏差

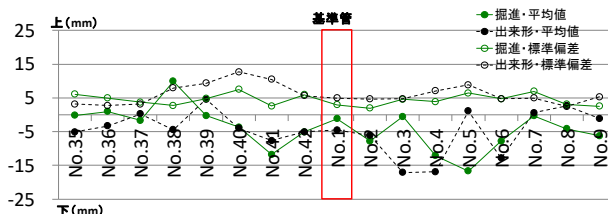


図-21 角形ELEMENT推進と出来形の平均鉛直変位・標準偏差

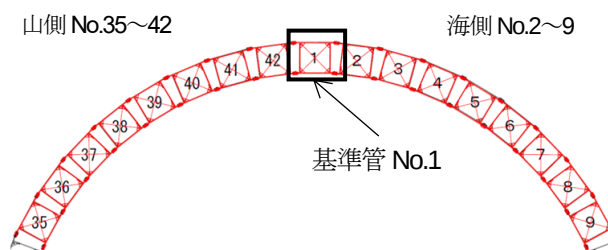


図-22 上半角形ELEMENT施工断面図（概要図）

推進機、角形エレメントともに、全て推進精度管理値内に収まった。基本的には、推進機の推進精度が管理目標値を満足していれば、追従する角形エレメントの位置も管理目標値内に収まることが確認された。なお、今回、推進機の前胴に新たに油圧式修正ジャッキを追加したことにより、事前確認試験と同様に、管理目標値内のローリング角度で制御・管理が実現できたと考えている。

また、基準管の隣接管については、図-23 に示すとおり、概ね先行して掘削したエレメントの方に偏移していることが確認された。水平方向の精度は、No.2～No.4（断面右）は左側に、No.39～No.42（断面左）は右側に動く傾向を示している。これらは、既設角形エレメント側の地山が掘削されて、緩んだ状態になっているために生じたと考えられる。鉛直方向のエレメントの出来形は図-24 に示すとおり、中央部が大きく沈み込む傾向が

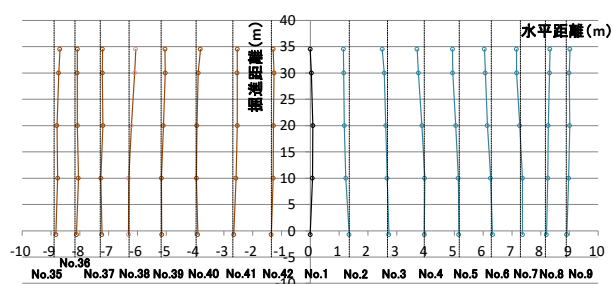


図-23 角形エレメント水平方向変位図

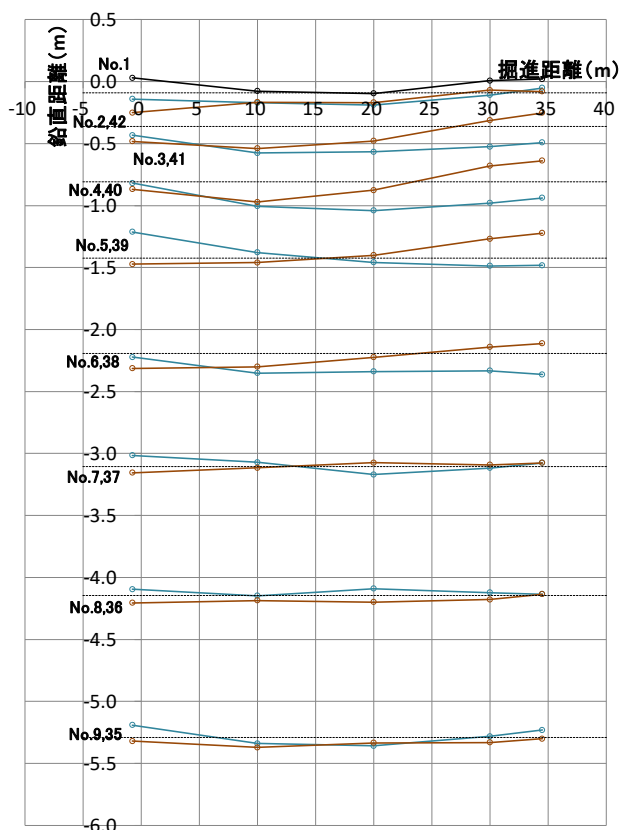


図-24 角形エレメント鉛直方向変位図

見て取れる。各推進箇所地層構成が異なることなどが原因として挙げられるが、推進中の排土性状からは原因として特定には至らなかったことから、今後、下半部の施工データ等も分析して考察を加えたいと考えている。なお、図-23,24の変位は10倍に強調しており、点線は計画位置を表している。

推進機の挙動は、図-25 に示すとおり、推進到達距離別の結果を見ると、推進距離が長くなるにつれて、推進精度のばらつきが大きくなることがわかった。

継手の嵌合精度については、エレメント推進時のジャッキ推力が概ね計画値内であること、後述する継手部の拘束ボルトが問題なく嵌合できたこと、継手部のモルタル充填量としては設計値以上に充填されていることなどから、問題なかったと考えている。

また、継手内部からの土砂流入はなく、継手先端部の蓋及びシール材の有効性が確認できた。

さらに、拘束ボルトは全数挿入でき、締め付けまでの確認も行え、かつ設計数量以上のモルタル注入が確認できたことから、継手部の充填も確実に行えたものと考えている。角形エレメント上半部の推進完了後の状況を写真-4 に示す。

8. まとめ

角形エレメント推進工で構築する断面が馬蹄形断面であることから、施工位置によりエレメントの傾斜角度が異なる条件においても、所定の位置に推進させることが

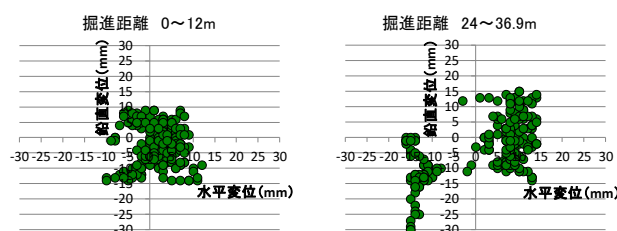


図-25 推進距離1m毎の水平変位と鉛直変位



写真-4 角形エレメント上半部推進完了状況

求められた。施工前の推進精度試験結果を反映した施工計画により、上半部の施工は全て所定の管理値内に収めることができた。これにより、本工法は自由に断面形状を設定し、計画位置に断面を構築することが可能であることが確認された。

また、本工法は掘削断面形状の自由度が高いことから、地山の止水性と自立性が確保できれば、大断面地下空間の構築も可能であると考えられる。今後は下半部の施工において、これまでと同様に角形エレメントの推進精度を確保し、計画通りの完成を目指すとともに、さらなる長大化に向けたデータを蓄積していく所存である。

参考文献

- 1) 江戸清・半田卓・斉藤道真：角形鋼管推進工法で大口径下水管を貫く，つくばエクスプレス六町駅，トンネルと地下，vol34，No11，pp.23-30，2003.11
- 2) 藤川博樹・長谷川利晴・大野友和・田中孝：駅非開削部の大断面馬蹄形トンネルを角形エレメント推進工法により施工，相鉄・東急直通線 綱島トンネル，トンネルと地下，vol50，No7，pp.47-55，2019.7

(2020. 8. 7 受付)

ADOPTED FOR LARGE-SECTION HORSESHOE-SHAPED TUNNEL IN NON-OPNING STATION DIGGING ACCURACY OF THE RECTANGULAR ELEMENT PROPULSION METHOD

Takemi SHINOHARA, Hiroki FUJIKAWA, Kazuhide TATEISHI, and Takashi TANAKA

Shin Tsunashima Station (tentative name) is located at the 7k800m from starting point of the Sotetsu-Tokyu Through Railway Hazawa Yokohama Kokudai Station, and is a four story underground railway station that contains an island-type platform with a width of approximately 14-25m at depth of about 35 meters. Both ends of station are planned to be used as the starting and arrival shaft for the shield TBMs. Of the 240m total length of the station, a trenchless tunneling was selected for the 34.5m section along the Hiyoshi side. Also, the trenchless section requires a large cross section that carries a 224m² inner space (H=14m, B=19m) in order to install the platform. The geological condition of the site consists of hard Kazusa Formation with an N value over 50, but it has alternating of strata with sand and mudstone, and distribution of sand which contains abundant groundwater is unclear. Based on the fact that the above-ground site is built-up with robust buildings such as hospitals and commercial buildings, restrictions on the use of the above-ground site and the geological conditions, rectangular element jacking method as the trenchless technique that doesn't require the installation of an arrival shaft was adopted. In this document, we report on the examination process, construction plans and construction results of the trenchless tunneling.

In this paper, we focus on the digging accuracy of the rectangular element propulsion method and report it.