

非開削トンネル構築技術「角形エレメント推進工法」の施工実績

田中 宏典・藤川 博樹

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直通線の羽沢横浜国大駅から東急東横線・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る。新綱島駅は、深さ約35m、幅員約14～25mの島式ホームを有する地下4層を基本とした地下駅であり、全長240mのうち日吉側34.5mは非開削工法を選定している。非開削区間はホームを設置するために内空224m²（高さ14m、幅19m）を有した大断面が必要となる。当該箇所の地層は全体がN値50以上の強固な上総層となっており、また地上部は病院および商業ビルなど堅牢な建物が密集して利用に制限があることから、既存の角形鋼管推進工法を改良した「さくさくJAWS工法（Joint All Water Shutting）¹⁾」を採用した。本稿では、その施工実績について報告する。

キーワード：鉄道、非開削区間、推進工法、さくさくJAWS工法、角形エレメント

1. 適用工事概要

(1) 工事概要

工事概要は以下のとおりである。

工事名称：相鉄・東急直通線 綱島トンネル他

工事場所：神奈川県横浜市港北区綱島東1丁目
～箕輪町3丁目地内

発注者：(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構

工期：平成27年11月24日～令和5年2月24日

主要工事：

- ・泥土圧シールド工法

（セグメント外径φ6,800mm、L=1,065m×2本）

- ・駅非開削部構築工 L=34.5m

角形エレメント推進工（□1,000mm×1,000mm×42本）

継手部推進工（φ600×84本）

相鉄・東急直通線および新綱島駅の位置を図-1に示す。

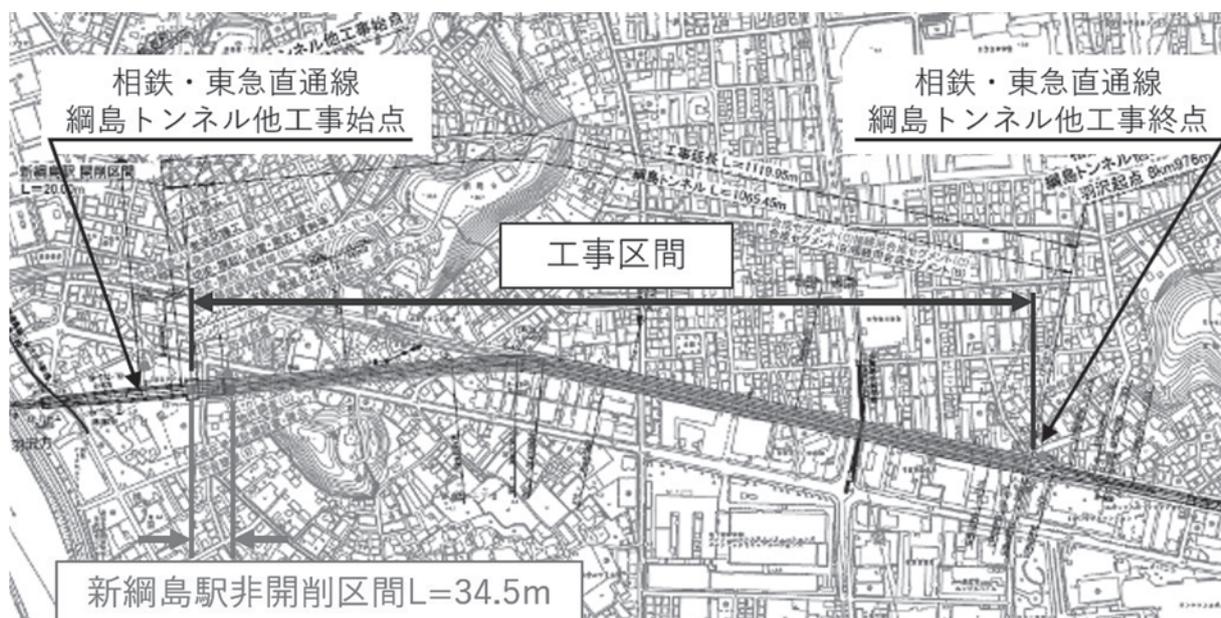


図-1 綱島トンネル位置図

(2) 工法概要

新網島駅の日吉側の非開削区間では、延長 34.5 m、土被り 20.37~21.27 m において内空 224 m² の馬蹄形大断面トンネルを構築する (図-2 参照)。この立地・地質条件を満たす工法として、NATM 工法、シールド切掘り工法、外殻先行型トンネル構築工法 (HEP&JES 工法等) の本工区への適用性の比較検討を行った結果、適用が困難であることがわかった。そこで最も合理的な外殻先行型トンネル構築型工法で、到達立坑を不要とする新たな工法を検討・開発することになった。

外殻先行型トンネル構築工法は、つくばエクスプレスの六町駅において、交差する污水幹線直下の駅部構築で施工実績²⁾があったが、本工区に適用するに当たり、以下の課題を解決する必要があった。

- ①長距離化への対応 (推進時継手抵抗力の低減)
- ②継手施工品質の向上 (モルタル充填の確実性)
- ③閉合部施工性の改善 (施工誤差の吸収性向上)

これらを受け、既存の工法に改良を加えた角形エレメント推進工法を採用した。

本工法は、従来継手と比べて高い強度と施工性および止水機能を有する継手構造 (JAWS 継手) の採用と密閉型推進機の適用により、先受け工等の補助工法が不要な推進工法にて施工し、地下水対応型の合理的施工を実現する工法である。

そのうち、外殻部を形成する角形エレメントは、鋼板を溶接で接合した 1,000×1,000 mm の箱型断面の本体部と、両側面に取り付けた凹形状と凸形状の JAWS 継手で構成されており、継手を嵌合させることで角形エレメントが連結される。

JAWS 継手の嵌合部は、凹継手の開きを防止するボルト (拘束ボルト) にて等間隔で締結し、継手嵌合内部にモルタルを充填して継手の必要耐力を確保する (図-3 参照)。また継手嵌合部のクリアランスを大きくして、モルタルの充填性を高めて品質を向上させたことと、継手の配置を角形エレメントのフランジ面と同じ高さにして有効高さを確保したことで、高流動コンクリートを充填したエレメントを本体構造部材として利用できる (図-4 参照)。

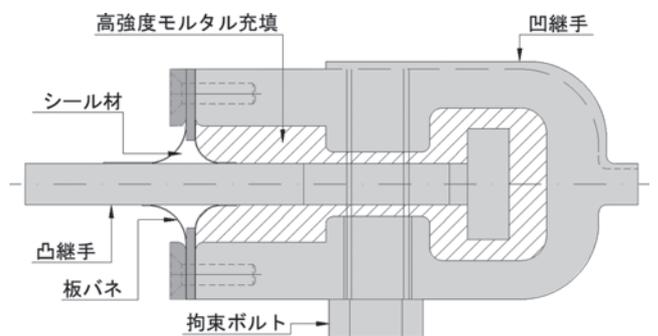


図-3 JAWS 継手詳細構造

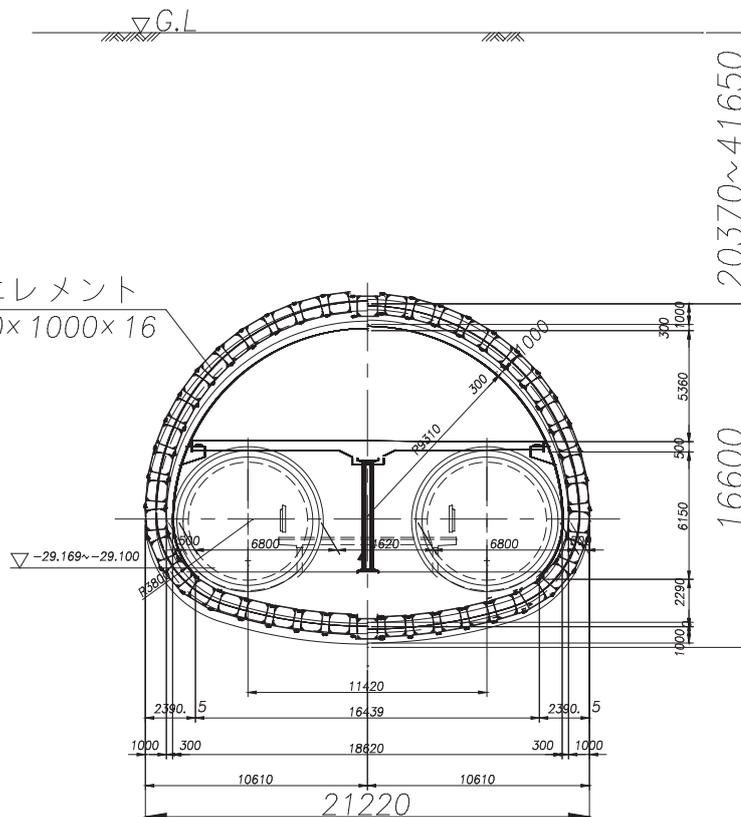
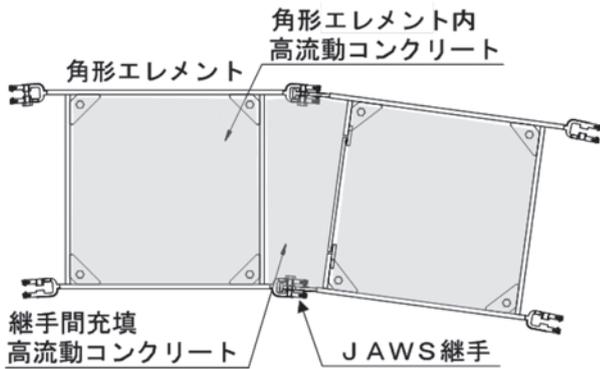


図-2 非開削区間トンネル断面



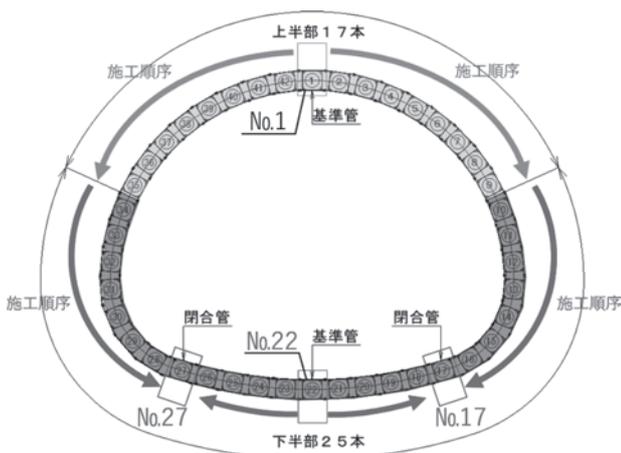
図一4 角形エレメント継手概要

本工事では到達立坑を設置できないため、地中に推進機の的外殻のみを存置し、発進立坑側から推進機内部を回収できる機構に改良することにより、推進機の再利用を可能とした。

2. 施工計画

推進施工にあたり、N値50以上の上総層に対して、継手部推進工により継手が通過する範囲を事前に地山より柔らかい置換材（ $40\sim 80\text{ kN/m}^2$ ）に置き換え、その後に角形エレメント推進工により外殻の構築を行う手順とした。

また発進側の立坑工事やシールド工事との兼ね合いから、上半部（17本）と下半部（25本）に分割して、継手部先行置換工と角形エレメント推進工を実施した（図一5）。



図一5 角形エレメント配置および施工区分（正面図）

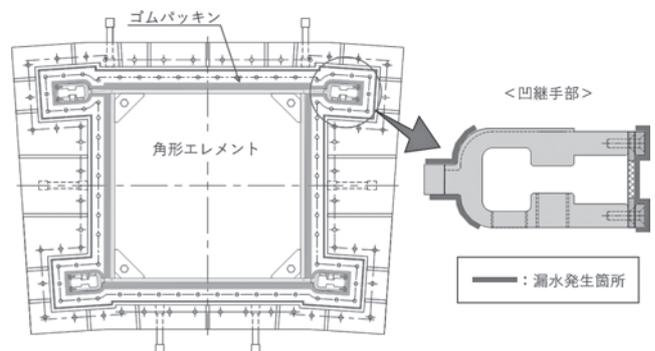
3. 上半部施工時の課題と下半部施工への対応

先行した上半部の施工では、所定の精度で角形エレメント推進工を完了することができたが、施工時に坑口止水装置の止水性確保が課題となった。その課題へ

の対応と最後の閉合方法について、下半部の施工前に検討および対策を行った。以下にその内容を示す。

(1) 上半部施工時の課題への対応

角形エレメント推進時に発進坑口止水装置のゴムパッキンと継手の接触部分から漏水が発生し、地表面沈下の要因の1つとなった（図一6）。漏水発生原因として、ゴムパッキンが継手の複雑な形状になじまなかったこと、角形エレメントの推進精度にゴムパッキンが追従できなかったことが挙げられた。そのため、ゴムパッキンを含む坑口止水装置の構造の見直しが求められた。



図一6 坑口装置漏水箇所

上半部では図一7に示すとおり、厚さ30mmのゴムパッキンを2段に配置した坑口止水装置を用いた。

下半部の施工に向けては、このゴムパッキンの形状や厚さ、硬度、枚数などに着目し、止水性能の向上を目的とした要素試験を実施し、適切な組み合わせを検証した。試験ケースを表一1に示す。

試験は上半部施工時の状況（継手の偏心、傾き）を再現し、表一1に示す6つのケースについて、設計条件である水圧3.0MPaを目標とし、最大0.45MPaの高水圧をかける止水性能試験と、実際の施工延長と同じ34.5m分の継手試験体を通して連続してゴムパッキンに摩擦を与える耐久性能試験を行い、最後に耐久性能試験で摩耗したゴムパッキンに対して再度止水性能試験を行った。

ゴムパッキンを1枚のみ、もしくは2枚重ねでゴムパッキンの硬度を45度としたケース1～4については、初めの止水性能試験にて、水圧0.2MPa付近でゴムパッキンが坑口側に押し出されて漏水が発生し、試験を中断した。また切羽側ゴムパッキンの硬度を60度としたケース5については、目標水圧0.3MPaまでの加圧に至ったが、隅部の隙間からゴムパッキン間のグリスが漏出し、その後に漏水が発生した。一方で、

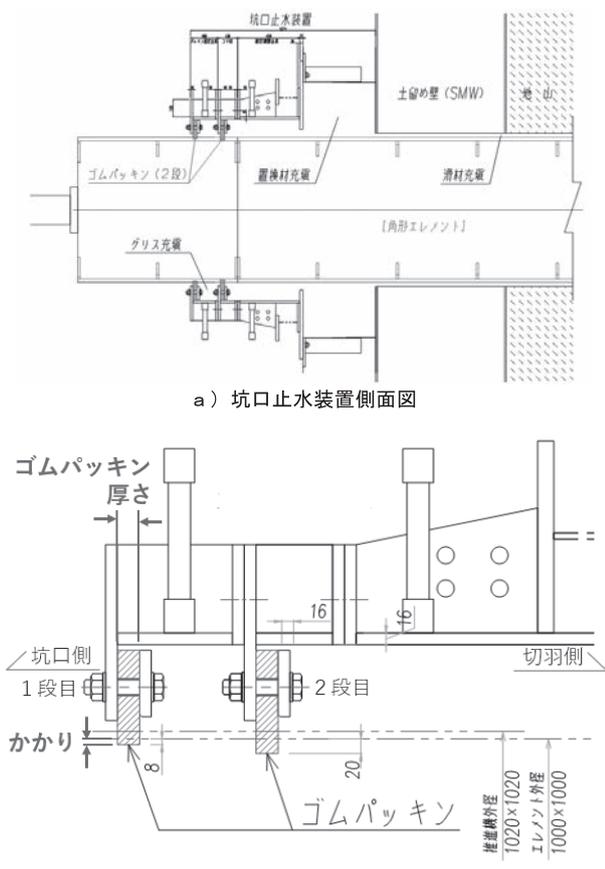


図-7 上半部施工時の坑口止水装置構造図

坑口側ゴムパッキンの硬度を 65 度に変更したケース 6 については、1 度目の止水性能試験にて目標水圧を満足し、その後耐久性性能試験にて実施工と同様の摩擦をゴムパッキンに与えた後、2 度目の止水性能試験においても、約 3 時間半継続して 0.3 MPa の高い水圧を維持でき (図-8)、かつ漏水は 0.02 l/min 程度とほとんど見られなかった。

結果として、硬度 60 度で厚さ 25 mm のゴムパッキンと、硬度 65 度で厚さ 10 mm のゴムパッキンを重ねた 2 枚配置としたケース (ケース 6) が、止水性・耐久性において最も性能が高い組合せであることを確認した。

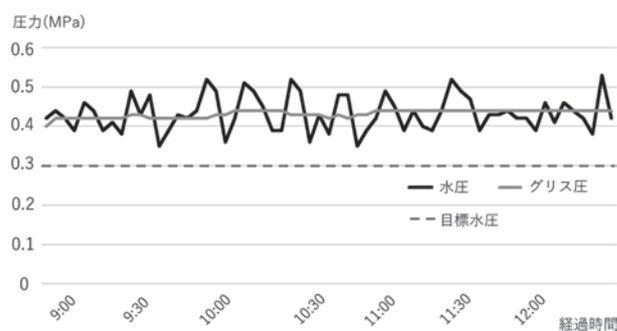


図-8 止水性能試験結果 (ケース 6)

表-1 試験ケース一覧

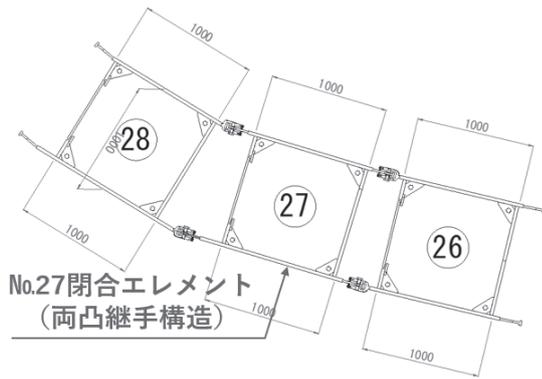
ケース	配置位置	硬度 (度)	厚さ (mm)	かかり (mm)	備考	
1	1 段目	坑口側	60	35	8	1 枚のみ
		切羽側	-	-	-	
	2 段目	坑口側	60	35	20	
		切羽側	-	-	-	
2	1 段目	坑口側	45	5	30	1 段目と同じ
		切羽側	45	15	10	
	2 段目	坑口側	45	5	30	
		切羽側	45	15	10	
3	1 段目	坑口側	45	5	30	1 段目と同じ
		切羽側	45	20	10	
	2 段目	坑口側	45	5	30	
		切羽側	45	20	10	
4	1 段目	坑口側	45	5	30	1 段目と同じ
		切羽側	45	20	20	
	2 段目	坑口側	45	5	30	
		切羽側	45	20	20	
5	1 段目	坑口側	45	5	30	1 段目と同じ
		切羽側	60	25	30	
	2 段目	坑口側	45	5	30	
		切羽側	60	25	20	
6	1 段目	坑口側	65	10	30	1 段目と同じ
		切羽側	60	25	8	
	2 段目	坑口側	65	10	30	
		切羽側	60	25	20	

(2) 閉合部の施工方法の検討

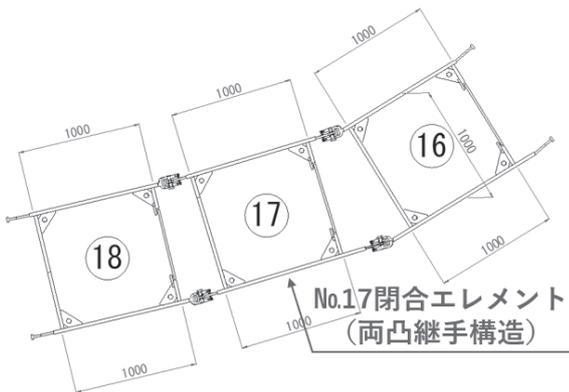
本工事の角形エレメントの配置では、図-9 に示す 2 箇所の閉合部 (No. 17, 27) を設けている。閉合部の施工は、これまでの施工の累積誤差や両隣りの角形エレメントの設置精度に大きく影響を受けることから、確実な閉合方法を検討しておく必要があった。

その対応方法として、凸継手の先端を従来の T 形から I 形とし、凹継手内の突起部分をなくした継手構造に変更することで継手内のクリアランスを大きくした (図-10 参照)。ただし、この構造では本来継手に期待する引張力への耐力が得られなくなるため、その補強として棒状連結材を用いてエレメント間の接続を行った。さらに両隣りの出来形に合わせて凸継手の長さを変更することにした。

実際の施工では、閉合部の両隣りの角形エレメントの設置精度を確認してからの判断では角形エレメントの製作が施工に間に合わず、工程が遅延するため、閉合エレメントの二つ隣りの角形エレメントの設置精度を確認し、隣接する角形エレメントの水平・鉛直変位および左右のローリングが最大と想定して、判断することとした。

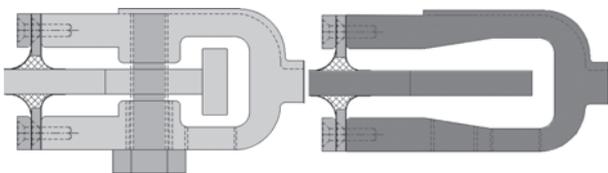


a) 閉合部 (山側)



b) 閉合部 (海側)

図一9 閉合部エレメント連結構造



図一10 閉合部継手構造 (左：一般部, 右：閉合部)

4. 下半部の施工実績 (上半部との比較)

上半部と下半部の施工は、土質条件等の違いはあるが、基本的に同じ手順の繰り返しとなる。そのため今回は、本工法で重要となる閉合部を含む、下半部の施工実績を報告する。

(1) 角形エレメント推進工

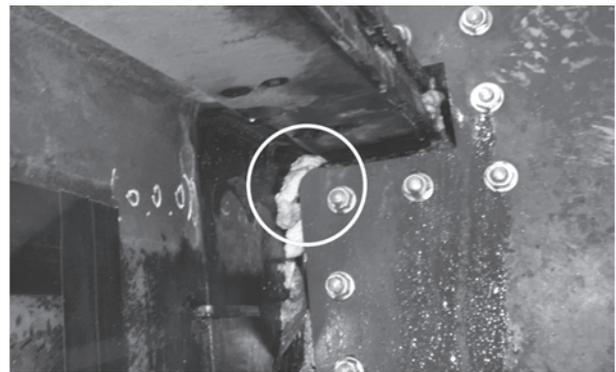
角形エレメント推進工は、最大4機で施工を行った。各作業工程の中で本掘進が最も大きな作業時間を占めており、1路線の掘進あたり上半部では平均9.4方(約5日)、下半部では平均7.1方(約3.5日)を要しており、主に作業の効率化により最短では5.3方(約3日)まで作業時間を短縮するに至った。また掘進速度は上半部で施工時の最大12mm/min(平均約

9mm/min)、下半部で最大32mm/min(平均約21mm/min)と、こちらも施工性の向上がみられた。ジャッキ推力は最大1,744kN(平均685kN)で施工が行われ、下半部の推進施工も大きなトラブルなく到達することができた。

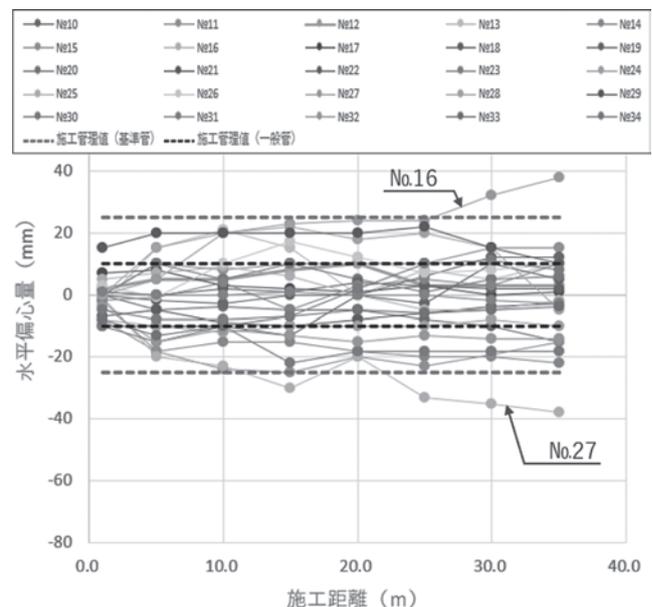
上半部の課題であった推進中の漏水については、上半部の施工時の漏水量(約5ℓ/min/箇所)と比べ、坑口装置のゴムパッキンからの漏水量は減り、大幅に改善された。一方で、ゴムパッキンからの漏水が抑えられたことで坑口装置の別の箇所(鉄板のボルト接続面など)からの漏水がみられた。

また新たな課題としては、角形エレメントと継手(柄の部分)の溶接部からの漏水があり(写真一1参照)、角形エレメント偏心時にゴムパッキンが追従できていないことが確認されたため、今後さらに改善の必要があることがわかった。

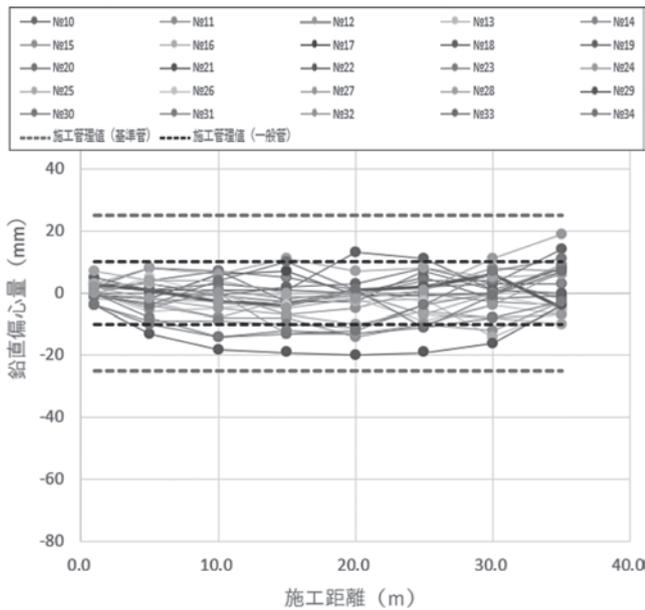
角形エレメント推進工(下半部)の出来形を図一11、12に示す。



写真一1 下半部施工時の漏水状況



図一11 施工距離における水平変位 (下半部)



図一 12 施工距離における鉛直変位 (下半部)

基準管No.22の水平変位は最大4mm、鉛直変位は最大5mmであり、施工管理値(±10mm)に収めることができた。一般管についても、施工管理値±25mmに対し、基準管を除く24本の水平変位は平均10.1mm、鉛直変位は平均5.3mmであった。しかし水平変位に関しては、海側の閉合管に隣接するNo.16と山側の閉合管であるNo.27で、施工延長20m付近から30mmを超える変位となった。原因として、推進機が推進する際に嵌合する凸継手と既設の凹継手との抵抗力や、既設の角形エレメント側の地山が先行掘削により緩んだ状態になっていることによる影響、それと2つが地層境と同じ深さ位置であるため脆弱な地層の影響で姿勢制御機能が十分に機能しなかったこと等が考えられた。

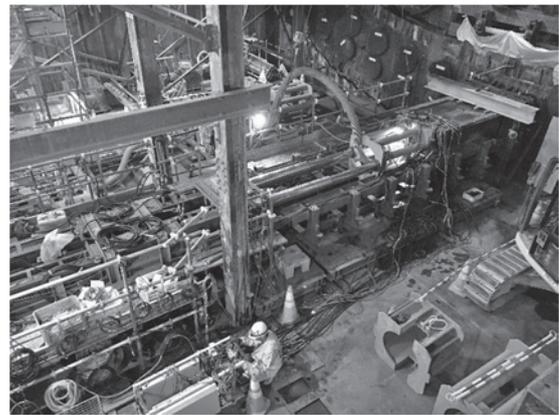
角形エレメント推進工の完了後は、角形エレメント間の土砂掘削と、継手内の拘束ボルト取り付け、継手内へのモルタル充填、角形エレメント内および角形エレメント間への高流動コンクリートの打設を実施し、いずれも大きなトラブルなく作業を完了できた。

下半部の施工状況を写真一2～4に示す。

(2) 閉合部接続工

閉合部について、先行エレメントの出来形を計測した結果、現行の継手構造のままでは継手内で摩擦が生じて推力が増大することが懸念され、施工が困難な箇所があると判断した。そのため事前に計画していた変更継手構造(図一9参照)を適用し、隣接エレメントおよび閉合エレメントの施工を行った。

3章(2)で述べたとおり、凸継手をI形とした構



写真一 2 角形エレメント推進施工状況全景



写真一 3 角形エレメント推進状況 (No.10)

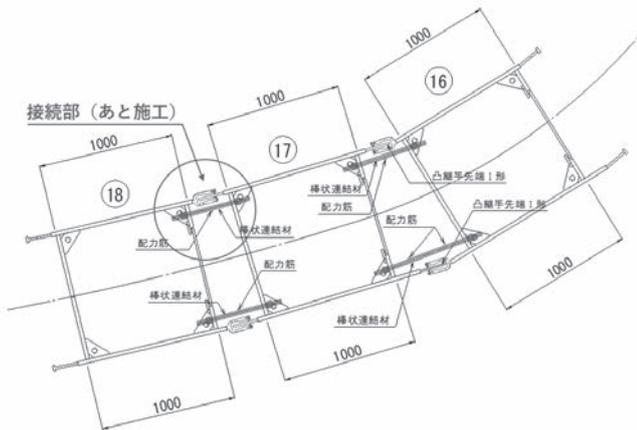


写真一 4 角形エレメント間掘削状況

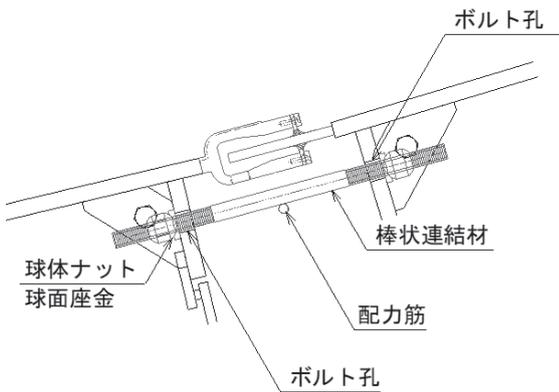
造では本来の耐力が得られないため、閉合エレメントの設置完了後に図一13に示す棒状連結材を用いた接続構造を適用し、角形エレメント内への高流動コンクリート打設前に接続作業を行った。

閉合部の構造は、角形エレメントの側壁に棒状連結材(異形鉄筋)を通す孔を追加で設けて、棒状連結材を等間隔で配置するものとした。両端部はエレメントの傾きを考慮して球体ナットと球面座金で角形エレメント側壁に固定した(写真一5参照)。

実際の施工では、狭い函体の中での作業のため時間



a) 閉合部接続構造 (海側)



b) 詳細構造

図一 13 棒状連結材を用いた閉合部接続構造

件での施工であったが、今回無事に閉合させることができた。その後は機械土工によって内部掘削を完了し、外殻部の構造については問題は確認されていない(写真一6)。現在は運用開始に向け、新網島駅の内装および設備工事が進められている。



写真一6 非開削区間内部全景

本工法はより大きな断面でも施工可能であり、掘削断面形状の自由度が高く、今後様々な場面で適用できる汎用性の高い工法である。今回の施工結果を踏まえ、本工法の更なる改善に努め、新たな現場への展開を進めていきたい。

JCMA



写真一5 閉合部棒状連結材設置状況

を要したものの、特に大きな問題はなく全箇所を設置を完了し、無事に外殻の構築を完了することができた。

5. おわりに

当該工事では大深度かつ高水圧下の施工環境で、到達立坑がなく、また断面形状を馬蹄形とした特殊な条

【参考文献】

- 1) 鉄道 ACT 研究会：PR 対象工法, http://rail-act.org/tec/tec_08_09.html
- 2) 江戸清, 半田卓, 斉藤道真: 角形鋼管推進工法で大口径下水道を貫く, つくばエクスプレス六町駅, トンネルと地下, vol.34, No.11, pp.23-30, 2003.

【筆者紹介】



田中 宏典 (たなか ひろふみ)
戸田建設(株)
技術研究所 社会基盤構築部
主管



藤川 博樹 (ふじかわ ひろき)
(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
東京支社 新横浜鉄道建設所
副所長