

大口径下水幹線横断部での 三連ボックス推進工法

杉田 文隆¹・加藤 悟¹・小玉 正文²・渡辺 勝広¹・松下 清一³

¹ 戸田建設(株)東京支店土木部 (〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)

² 正会員 戸田建設(株)東京支店土木部 (〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)

³ 正会員 戸田建設(株)土木工事技術部 (〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1)

つくばエクスプレス(常磐新線)六町駅は、全長373m、幅員15m~5m、深さ29mの構造物を南北2工区に分け、開削工法で構築する。このうち駅部を横断する区道直下に外径φ6,600mmの既設下水管が19mの深さに埋設されているため、この区間は以下に述べる非開削工法で施工した。横断方向に力の伝達が可能な継手を取り付けた角形鋼管エレメントを相互に連結しながら順次地中に推進し、三連ボックス形状で閉合した仮設土留め構造物を構築する。次に内部を掘削し本体RC構造物を構築するが、掘削時の支保工架設が不用となり、工期の短縮につながった。本文では継手の各種性能試験結果を踏まえ、角形鋼管エレメント推進工事及び内部掘削までの施工結果及び計測結果を述べる。

キーワード：非開削トンネル、角形鋼管エレメント推進工法、応力伝達継手、断面閉合、内部掘削

1. はじめに

現在建設中のつくばエクスプレス(常磐新線)六町駅は、南工区を2分する位置に幅員10mの区道が横断し、区道直下に外径φ6600mmの既設下水幹線が19mの深さに埋設されている。このため、区道横断部のみが非開削工法で計画されていた。区道横断部加平トンネルの外寸法は幅15.664m、高さ8.0m、延長15mである。

道路下横断工法として、非開削工法の中から大深度における施工実績、発進立坑のスペース等の問題から山岳ベンチカット工法が選定され、その補助工法としてパイプルーフ工と高圧噴射攪拌工法による全断面地盤改良工が計画されていた。パイプルーフと既設下水幹線との純離隔は0.5mと近接している。

検討を進めるなかで当初計画では、被圧水対策が不十分であることや施工方法が煩雑で工期が長くなる等の問題が明らかになった。

代替工法として、以下に述べる工法を考案した。横断方向に力の伝達が可能で曲げ剛性を有する継手を取り付けた角形鋼管エレメントを相互に連結しながら、順次地中に推進させて閉合し三連ボックス形状の仮設土留め構造物を構築する方法である。

本文では継手の各種性能試験をはじめ角形鋼管エレメントを用いた推進工事の結果及び内部掘削に伴う計

測結果を述べる。

2. 工事概要

工事名称：常新、六町St(南)他1

工事場所：東京都足立区六町

発注者：日本鉄道建設公団

工期：平成11年1月28日

~平成16年1月27日

請負形態：戸田・東亜・西武・東武谷内田特定建設
工事共同企業体

工事概要：

- ・工区延長 L=188m(つくばエクスプレス秋葉原起点11K817m~12K005m)
- ・躯体構造 加平トンネル部 地下1層構造
L=113m(非開削部15m含む)
駅舎部 地下3層構造
L=75m
- ・既設下水幹線横断部推進工
口 径：□0.85m×0.85m(上床・下床エレメント)
□0.85m×0.87m(側壁・中壁エレメント)
推進延長：14.3m/本×68本=972.4m
三連ボックス構造寸法：□17.85m×10.01m

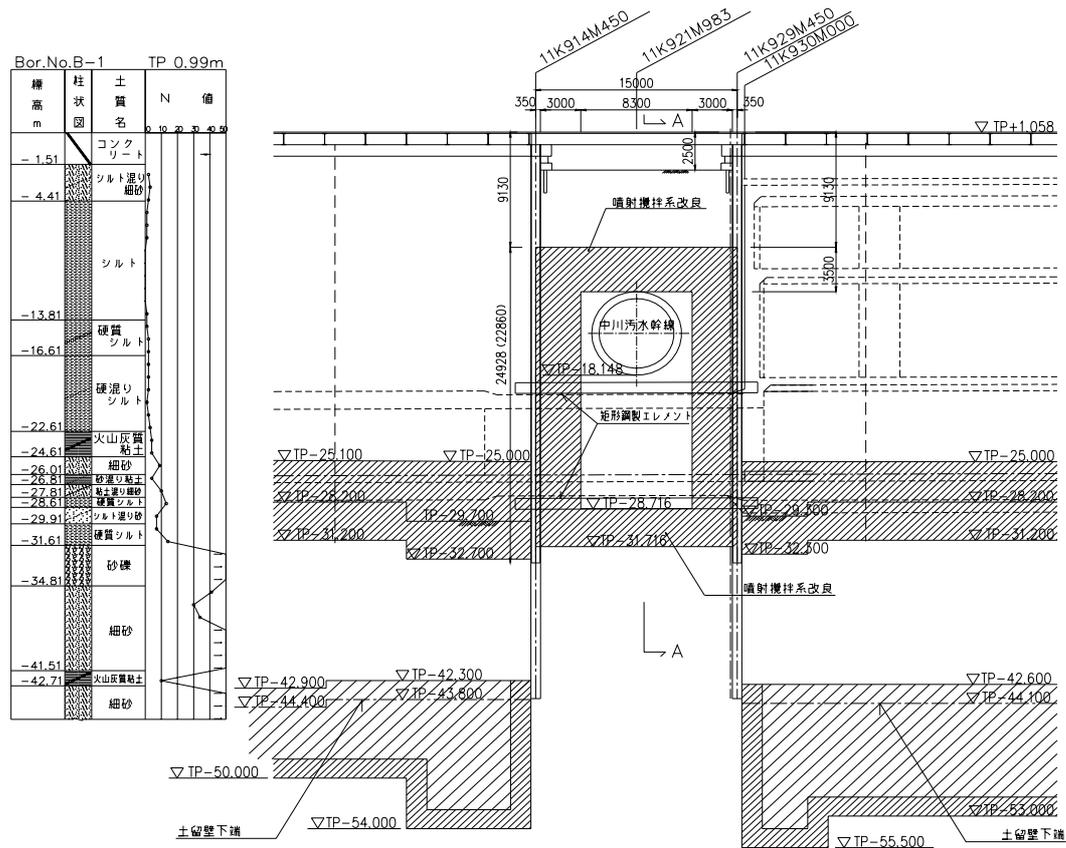


図-1 既設下水幹線横断面縦断面図

3. 土質概要

角形鋼管エレメント推進部の土質は、上床エレメント部分がN値1～2の砂混りシルトの下部有楽町層であり、側部エレメント部分が七号地層の互層地盤で上から火山灰質粘土(N=4)、細砂(N=9)、砂混じり粘土(N=4)、粘土混り細砂(N=10)と続き、下床エレメント部分が硬質シルト(N=13)である。

七号地層の砂質土はG_L-5.0m(0.23Mpa)まで被圧されている。推進方向の土質はトンネル延長14.3mうち、発進側、到達側ともに高圧噴射攪拌杭の改良体が片側3.0mあり、その間8.3mが地山となっている。(図-1参照)

4. 代替工法の検討

(1) 基本方針

a) 地盤改良の規模

全断面地盤改良から推進用の発進および到達立坑掘削に伴う土留め壁の水平変位による既設下水幹線への影響を低減できる最小必要限の改良範囲と厚さをFEM解析により算定する。

b) 既設下水幹線への影響

既設下水幹線直下の水平土留め材の鉛直変位による既設下水幹線への影響をより小さくできる構造形式を検討する。

c) 掘削方法

上下段を2分割し、さらに各段を3つのブロックに分けて掘削する方法から全断面掘削が可能な方法を検討する。

d) 支保工の有無

上半の各ブロックにおいて、縦断方向に1.2m掘削後、路下TBH杭を打設して支保工を組み立てるやり方を順次繰り返す方法から、無支保工で掘削できる方法を検討する。

e) 掘削面における被圧水対策

コの字型パイプ工の場合には内部掘削時に被圧地下水による盤ぶくれが発生する。そのため地盤改良による盤ぶくれ対策を実施する必要があるが、既設下水幹線を避けながらの斜め削孔となり改良体の信頼性に疑問が残る。そこで、盤ぶくれ対策が不要な方法を検討する。

f) 工期

当初設計の場合には、施工方法が煩雑なため、既設下水幹線横断部の工期が約30ヶ月を要し、つくばエクスプレスの開業に支障を来す恐れがある。

よって、工期短縮が可能な方法を検討する。

の関係から850mm×870mmとした。

③ 角形コラムの板厚

規格の最小板厚である16mmを基準とした。

④ 推進順序

既設下水幹線への影響を最小限にするため、先ず三連ボックス上床部を構築することとした。

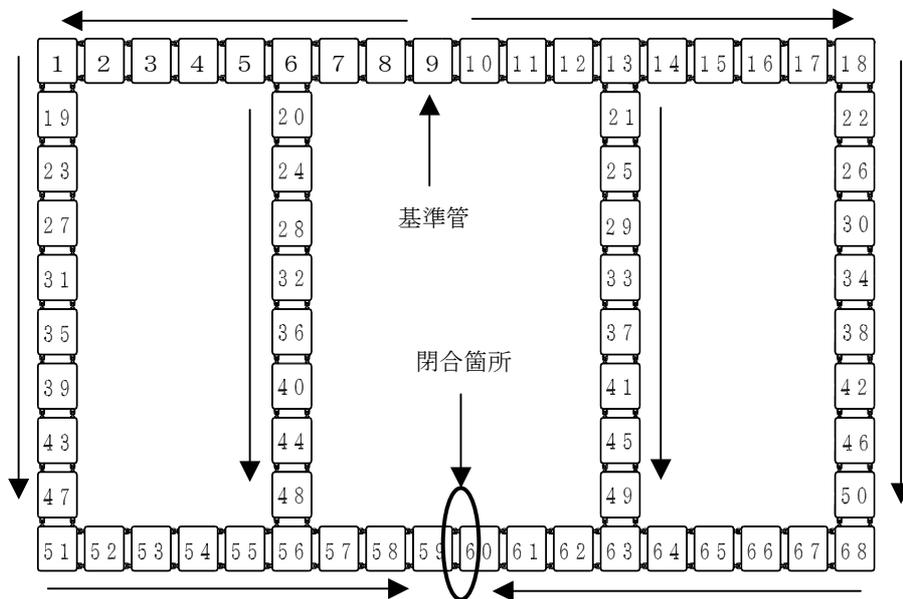


図-2 エレメント割付図

(2) 工法の選定

a) 既設下水幹線横断工法

横断方向に力の伝達が可能な継手を開発して、その継手を取り付けた角形鋼管エレメント（以下、鋼製エレメントという）を相互に連結しながら、順次地中に推進して横断方向に曲げ剛性を有する三連ボックス形状の仮設土留め構造物を構築する方法を考案した。

① 鋼製エレメント敷設方法

発進・到達立坑部の掘削に伴う棲土留めの変位による既設下水幹線の内空変位を抑えて断面方向の安全を確保することを目的として、棲土留め背面を3m厚さで高圧噴射攪拌杭工法にて改良する。そのため、牽引工法の採用が難しいため推進工法とした。

さらに、被圧地下水圧が最大で0.2Mpaを超えるため密閉型推進工法（泥濃式）を選定した。

② 鋼製エレメント

鋼製エレメントは安価な日本鋼構造協会規格に準じた角形コラムとした。角形コラムの寸法は、市場にある矩形推進機の口径と昭和50年労働基準監督局長通達より作業員が坑内に入って作業ができる口径800mm以上を確保することより850mm×850mm(870mm)とした。

また、中壁および側壁エレメントについては割付

推進順序は、上床エレメント中央部に基準管を推進した後、基準管の継手に新設管の継手を連結させながら順次、中央から端部に向かって施工することとした。上床エレメント完成後は側壁、中壁を上から下へ施工し、下床エレメントは端部から中央に向かって施工して中央部で閉合させる計画とした。

図-2にエレメント割付図を示す。当初設計のパイプルーフ工に対して、鋼製エレメント□850*850(870)*16mm、L=16.70m、n=68本を推進させて三連ボックス形状の仮設土留め構造物を事前に構築することにより、以下の効果が期待できる。

- ・掘削時の盤ぶくれ対策は不要となる
- ・三連ボックス上床エレメントの最大変位量が約15mmと小さく既設下水幹線への影響は少ない
- ・支保工・中間杭が不要、全断面掘削が可能である
- ・施工方法がシンプル且つ安全で、工期は約12ヶ月短縮できる

b) 鋼製エレメント断面の検討

鋼製エレメント断面の検討手順を以下に示す。

① エレメント断面および三連ボックス構造の仮定

三連ボックス解析モデルはボックスカルバートで用いられる梁モデルとし、角形コラムとの結合条件を剛結と考え、床版、側壁などを角形コラムと継手

の集合体からなる部材と考えた。エレメント断面モデルを図-3に示す。

②エレメント中空時（エレメント内にコンクリートが充填されていない時）の鋼殻発生応力度 σ_{s1} の算出

推進時の中空エレメントの設計荷重は、市街地における沖積粘土層において多くの実績を積んでいる「下水道推進工法の指針と解説(2000年度版)」¹⁾に準じて算定した。モデル図を図-4に示す。

ここで、 $\sigma_{s1} < \text{許容応力度}$ の時、次ステップに進む。

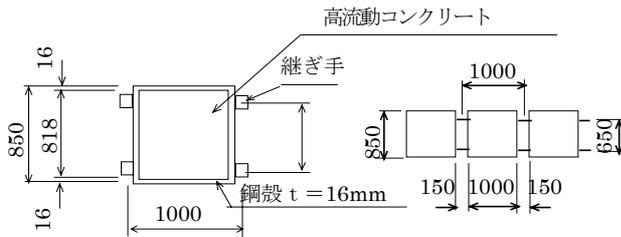


図-3 エレメント断面モデル図

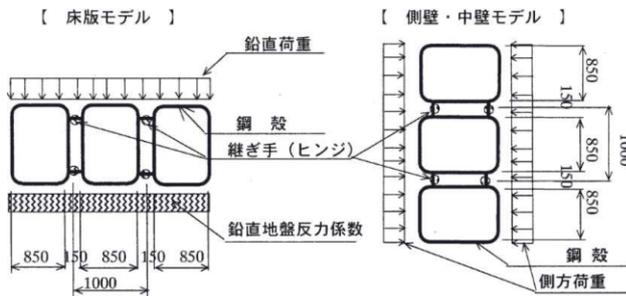


図-4 中空エレメント設計モデル図

③三連ボックス時（三連ボックスが完成し、内部掘削した時）のボックス発生応力度（ σ_{s2} 、 σ_c ）、変位量（ δ_{y2} ）および継ぎ手応力度（ σ_{st} 、 σ_{ct} ）の算出

・発生応力度、変位量はモデル-1とモデル-2を合成したものとする。

・土被り荷重は土木学会トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、第26条の全土被り土圧を採用し、側方荷重は土木学会トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、第27条の開削トンネルに働く静止土圧および最小土圧のめやすとしての静止土圧（最大土圧）の70%²⁾を採用した。

モデル-1 開削トンネル設計モデル

モデル-2 掘削解放力モデル（リバウンドの影響を考慮するためのモデル）（図-5参照）

ここで、 $\sigma_{s2} < \text{許容応力度}$ 、 $\sigma_c < \text{許容応力度}$ 、 $\delta_{y2} < \delta_{y\max} = 25\text{mm}$ 、 $\sigma_{st} < \text{許容応力度}$ 、 $\sigma_{ct} < \text{許容応力度}$ の時、次ステップに進む。

④ボックス鋼殻の合成応力度の算出

$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} < \text{許容応力度}$ であることを確認する。

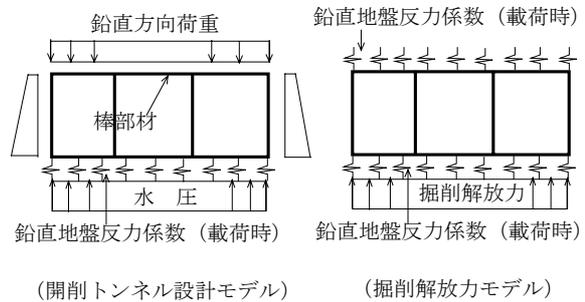


図-5 三連ボックス構造モデル

5. 継手の開発

継手の形状および寸法は以下の手順にて決定した。

(1) 三連ボックスの継手発生応力度の算出および継手強度の算定

三連ボックスフレーム計算時の継手剛性を厚さ $t = 16\text{mm}$ の鋼板相当と仮定した時の単位幅当たりの継手の最大引張強度は式(1)となる。

$$P = \sigma_{st\max} \times t \\ = 114.7\text{N/mm}^2 \times 16\text{mm} = 1.836\text{KN/mm} \quad (1)$$

(2) 継手単独引張強度試験による継手強度の確認

事前にFEM解析により強度を確認した形状・寸法の継手を用いて引張強度試験を行った。

降伏時の引張強度は式(2)となる。

$$P = \text{降伏荷重} / \text{試験体幅} \\ = 240\text{KN} / 70\text{mm} = 3.42\text{KN/mm} \quad (2)$$

(3) 実物大載荷試験による継手強度の確認

曲げ耐力は設計荷重の2倍であり、せん断耐力は設計荷重の約3倍の耐力を確認した。また、設計荷重に対する変位量が約10mmであった。

(4) 継手モデルの評価

・三連ボックス構造体の継手が存在することにより低下後の剛性は25%となった。

・剛性低下を考慮した三連ボックス上床エレメントの最大変位量はフレーム計算で $\delta = 11.9\text{mm}$ 、施工ステップを考慮したFEM解析では $\delta = 11.05\text{mm}$ となった。これに鋼製エレメント推進施工時の沈下量3mm（後硬化型滑材のグリージング分）を加えて約15mmの

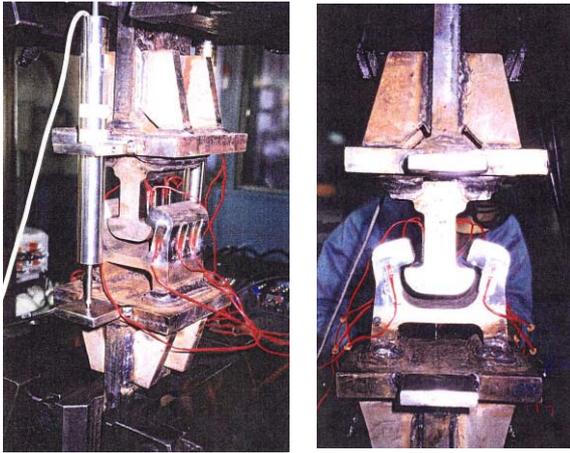


写真-1 継ぎ手引張試験



写真-2 実物大曲げ載荷試験



写真-3 実物大せん断載荷試験

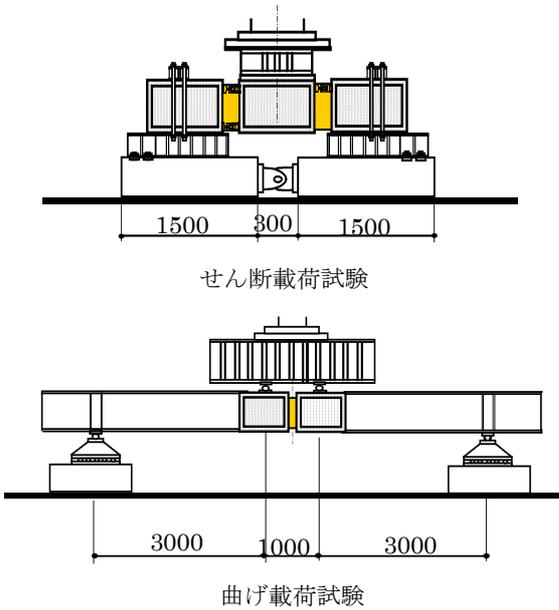


図-6 実物載荷試験仕様

鉛直変位が予想された。この変位は現設計のパイプルーフの最大沈下量 $\delta y = 25\text{mm} + \alpha$ (施工時の影響) を大きく下回った。

・実物大載荷試験において、エレメント鋼殻のひずみを計測して安全であることを再確認し、角形コラム

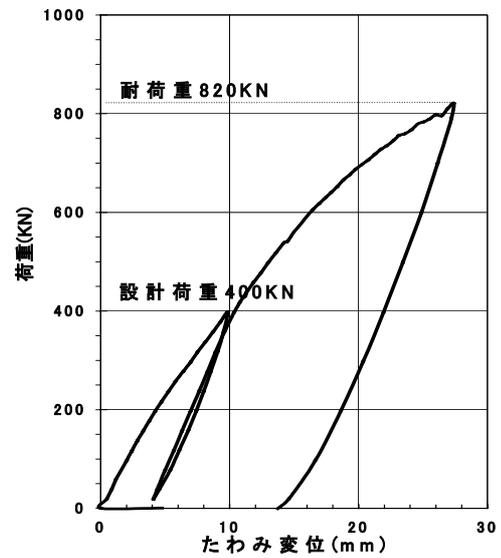
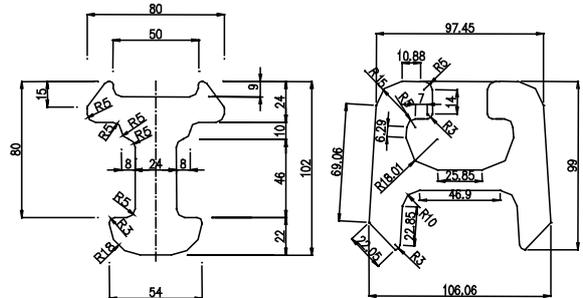


図-7 荷重-変位曲線 (曲げ載荷試験)

の板厚を規格の最小板厚である 16mm、寸法を 850mm × 850mm (870mm) に決定した。

・継手を厚さ $t = 16\text{mm}$ の鋼板相当と仮定した時の破壊抵抗モーメントと試験時に作用した最大曲げモーメントが近似しているため、当初の継手の仮定は正しいものと判断した。



オス継手

メス継手

図-8 継手形状

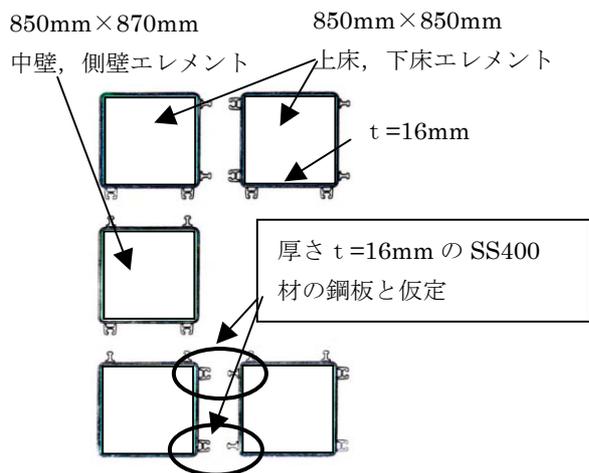


図-9 継手設置状況

6. 施工

(1) 鋼製エレメント推進工

a) 鋼製エレメントの製作

継手は、複雑な形状且つ少量生産となるため、熱間押出法により製造した。メス継手内面とオス継手外面とのクリアランスは、継手の軸方向の曲がり量(3mm)と継手の断面方向の公差($\pm 1.2\text{mm} \sim \pm 1.0\text{mm}$)から、推進可能限界の片側4mmとした。矩形鋼製エレメントは既製品の角形コラムにグラウトホール等の取り付けを行った後、継手を工場溶接して製作した。その際、継手溶接による角形コラムのひずみ取りを行った。

b) 矩形推進機

泥濃式推進工法の中で対応土質範囲の広い、低推力推進の実績のある超流動性バランス式セミシールド工法の原理にてのボックス推進工法(推進機外径 $\square 880\text{mm}$ 、掘削外径 $\square 900\text{mm}$ 、排土バルブは多重制御、カッター駆動は多軸自転公転式)を採用した。

c) ジャンクションカッター

本工法は、継手を取り付けたエレメントを相互に連結しながら順次地中に推進する工法のため、高強度の地盤改良体を推進する際に継手部に発生する大きな抵抗力を減じる必要があり、推進機にメス型継手部を先行掘削するジャンクションカッター(外径 $\phi 110\text{mm}$ 、突出高さはスペーサで調整可能)を推進機に装備した。

d) エントランス

継手付矩形エレメントであることから発進・到達のエントランス構造は極めて複雑なものとなる。通常のゴムパッキンのエントランスは細部で合致しないため、1/3 模型実験、実物大実験により角型止水ケースとゴムパッキン積層構造と加圧充填止水材(エ

コメール)を用いて坑口防護を行った。

e) 充填注入工

推進終了後、継手間および継手内を洗浄し、継手間は設計基準強度 30N/mm^2 以上の無収縮モルタルを現場にて混練してモルタルポンプで充填注入し、継手内はハンドミキサで混練した設計基準強度 30N/mm^2 以上の無収縮ミルクを手押しポンプにてエレメントとメス継手の通し孔(注入孔)より注入した。

最後に、エレメント内に設計基準強度 24N/mm^2 以上の高流動コンクリートを地上よりコンクリートポンプ車にて打設した。

f) 鋼製エレメント推進工

平成 14 年 8 月末に全本数 68 本推進し、閉合した。

元押しジャッキの計画総推力は推進機前面抵抗、周面摩擦抵抗、推進機重量より 550.5KN であったが、最大 1300KN 、平均 400KN にて推進することができた。(装備推力： $1500\text{KN} \times 2$)

鋼製エレメント 68 本に継手を噛み合わせながら推進したなかで、継手余裕度と施工誤差が集約されて、水平方向の変位を最大 40mm 、鉛直方向の変位を最大 30mm にて推進することができた。



写真-4 矩形推進機



写真-5 矩形推進機カッター



写真-6 推進状況

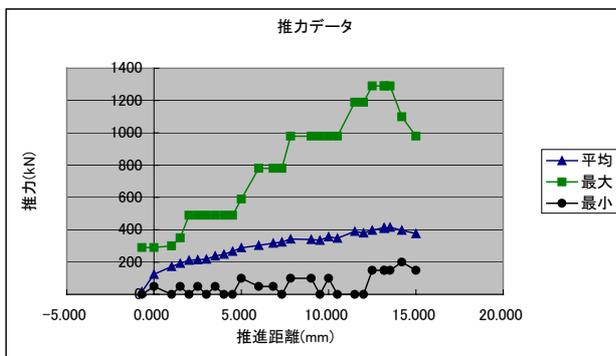


図-10 推進工の推力

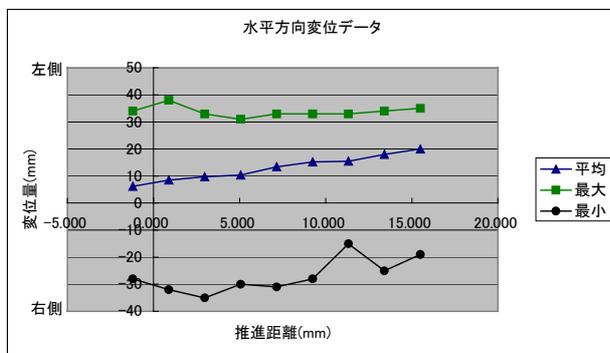


図-11 推進工の水平変位

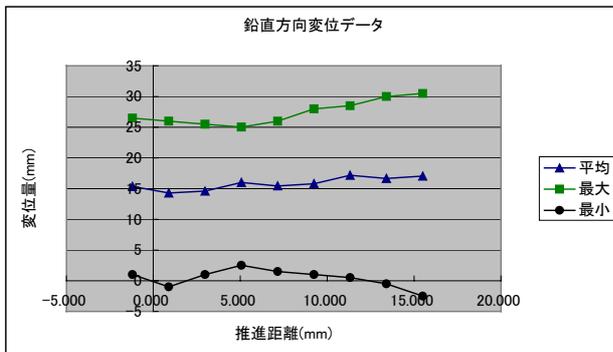


図-12 推進工の鉛直変位

(2) 鋼製エレメントの閉合

最後のエレメントには施工誤差が集約されるため、通常継手による閉合が困難となる。

本工事では、下床エレメント中央部で両メス継手を取り付けたNo. 59とNo. 60の鋼製エレメントの間に両オス継ぎ手を推進させて閉合した。

閉合に当たり、推進の精度管理、方向修正を行うとともに閉合箇所の左右5エレメント前から継ぎ手取り付け位置を変えて高さの調整を行い、さらにメス継手の台座を加工してNo. 59とNo. 60の鋼製エレメントを平行にした。

(3) 内部掘削工

内部掘削は、上半と下半の二つに分けて行った。各半は三連ボックスの左右の掘削を行った後、中央部分の掘削を行った。

鋼製エレメントの応力度、既設污水幹線の沈下量から判断して下半掘削を開始し、無支保工にて全断面の掘削を行った。



写真-7 全断面掘削終了

7. 計測結果

三連ボックス構造解析上の荷重条件の検証および三連ボックスの安全性の確保を目的として鋼製エレメント鋼殻に発生するひずみを計測（ひずみ計は9本のエレメントに74台設置）した結果、上床エレメントの中空時の鋼殻発生応力度 $\sigma s1$ は設計時の同応力度に対して平均で67%、最大で81%発生した。

また、内部掘削後の計測した増加応力度 $\sigma s2$ は表-1に示すように設計時の増加応力度に対して、三連ボックス中央スパンで約50%、左側スパンで最大88%発生した。

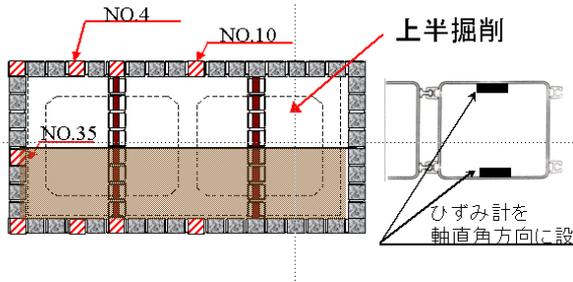


図-13 ひずみ計取付エレメント

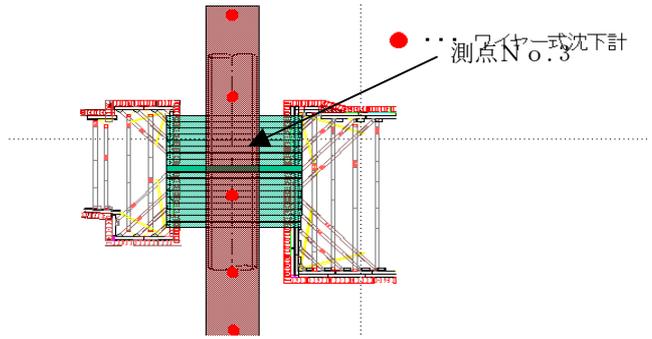


図-14 沈下計設置場所

表-1 エレメントひずみ計測結果一覧表

単位：N/mm²

エレメント	TAG.N O.	掘削前	設計 応力度	発生応 力度 率%	掘削完了後	掘削後の設計予測値		掘削後の 変化量	設計増加 応力度と の比率%
		H14年9月30日 応力度			H14年10月29日 応力度	設計増加応力度	設計応力度		
1OEL	10-1CU	72.3	185.2	39.0	47.69	-57.7	14.64	-24.6	42.7
	10-1CD	108.9	162.0	67.2	132.71	46.3	155.19	23.8	51.4
	10-2CU	33.8	185.2	18.2	6.40	-57.7	-23.87	-27.4	47.5
	10-2CD	38.3	162.0	23.6	62.26	46.3	84.56	24.0	51.8
4EL	4-1CU	150.7	185.2	81.3	150.13	-2.5	148.14	-0.5	20.6
	4-1CD	88.0	162.0	54.3	79.30	-22.3	65.71	-8.7	39.1
	4-2CU	96.0	185.2	51.8	94.95	-2.5	93.47	-1.0	41.1
	4-2CD	135.4	162.0	83.6	115.70	-22.3	113.1	-19.7	88.3
35EL	35-1CU	91.0	185.2	49.1	86.89	-63.5	27.47	-4.1	6.4
	35-1CD	60.6	162.0	37.4	66.96	57.8	118.33	6.4	11.1
	35-2CU	33.2	185.2	17.9	29.62	-63.5	-30.31	-3.6	5.6
	35-2CD	5.1	162.0	3.2	10.02	57.8	62.9	4.9	8.4

既設汚水幹線の沈下は測点No.3において図-15に示すように、推進完了した8月28日が-0.7mm、内部掘削開始前の9月30日が-0.9mm、内部掘削と中壁の盛替えにより-9mmまで増加したがベースコンクリートを打設した12月3日は、-9mm~-10mmの間で推移している。

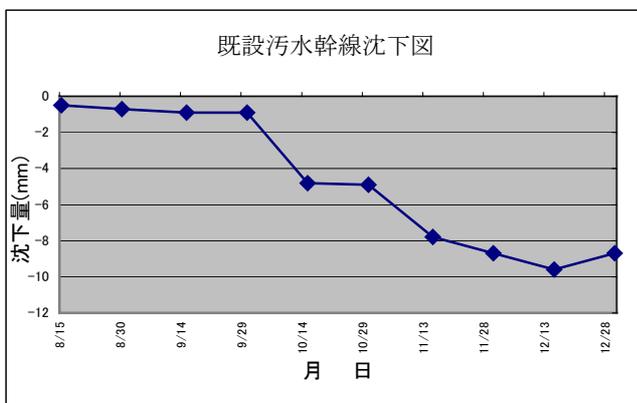


図-15 既設汚水幹線沈下図

8. おわりに

3月上旬に本体ボックストンネル上床版に高流動コンクリートを打設して既設汚水幹線横断部の工事が完成する。それまで計測管理を継続しながら一層慎重に且つ安全に工事を進めていきたい。最後に、既設汚水幹線横断部の計画に際し指導、協力を頂いた日本鉄道建設公団の関係者に、この紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説
- 2) 土木学会：トンネル標準施工方書〔開削工法編〕・同解説