

# 既設下水道管に近接した特殊な断面形状の 線路下横断構造物の計画と施工

山田 宣彦<sup>1</sup>・黒木 悠輔<sup>2</sup>・鎌田 拓<sup>3</sup>・今吉 敏<sup>4</sup>・矢島 岳<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄建建設株式会社 土木本部 (〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目 5 番 3 号)  
E-mail: nobuhiko-yamada@tekken.co.jp

<sup>2</sup>正会員 九州旅客鉄道株式会社 建設工事事務 (〒812-0061 福岡県福岡市東区筥松二丁目 35 番 38 号)  
E-mail: y.kuroki@jrkyushu.co.jp

<sup>3</sup>九州旅客鉄道株式会社 建設工事事務 (〒812-0061 福岡県福岡市東区筥松二丁目 35 番 38 号)  
E-mail: kamada.t@jrkyushu.co.jp

<sup>4</sup>鉄建建設株式会社 九州支店 (〒810-0062 福岡県福岡市中央区荒戸二丁目 1 番 5 号)  
E-mail: satoshi-imayoshi@tekken.co.jp

<sup>5</sup>鉄建建設株式会社 土木本部 (〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目 5 番 3 号)  
E-mail: gaku-yajima@tekken.co.jp

汐井牧山海岸線 Bv 新設他工事は、福岡県北九州市が整備する都市計画道路、汐井町牧山海岸線と鹿児島貨物線との交差部に、線路下を横断するボックスカルバートを、非開削のエレメント推進工法のひとつである JES 工法により新設する。一般に JES 工法で線路下にボックスカルバートを構築する場合、線路両側に仮土留めによる立坑を構築するが、当該工事ではボックスカルバートの直下に下水道管渠が敷設されており、仮土留め下部が支障することから、切土のり面形状（のり面勾配 1:1.5）に合わせた構造物を計画した。本稿では、本工事の計画および施工実績について報告する。

**Key Words:** under-track crossing structure, bitten joint, steel element, JES method

## 1. はじめに

鉄道との交差部に新たな道路や水路を建設する場合、列車運行の安全性を確保することが第一であることから、列車運行に支障しないよう施工を進めることが基本である。浜小倉・黒崎間汐井町牧山海岸線 Bv 新設他（以下、本工事）は、線路下を横断する道路構造物を構築する工事である。線路下横断工事の施工方法には、非開削工法の中から、軌道への影響を抑えた線路下横断工法として実績のある JES 工法を採用した。また、既設構造物に近接しての施工条件から、特殊な断面形状を有している。

本稿では、施工方法の概要および施工計画と近接施工の施工実績について報告する。

## 2. 施工方法の概要

線路下や道路下を横断する構造物の構築工法である

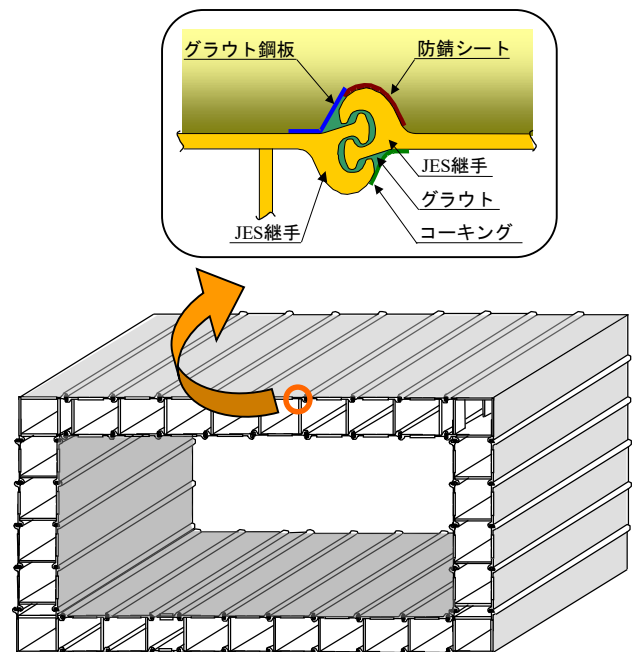


図-1 JES 工法で構築されたボックスカルバート

JES 工法<sup>1)</sup> (Jointed Element Structure method) は、構造物本体を一度に押し込むのではなく、噛み合わせ継手（以下、JES 継手）を有する 1m 程度に分割された角形の鋼製エレメント（以下、エレメント）を、JES 継手を嵌合しながら順次地盤中に挿入する。その後、継手部にグラウトを充填することでエレメントを連続化し、エレメント内部に高流動コンクリートを充填して、それを部材とする構造物本体を構築する工法である。図-1 に JES 工法の概要図を示す。また、JES 工法はエレメントを組み合わせて形成可能な種々の形状（箱形、門形、円形等）に対応でき、構造上は延長の制限はない<sup>2)</sup>。

## 2. 工事概要

本工事は、福岡県北九州市が整備する都市計画道路、汐井町牧山海岸線において、JR 鹿児島貨物線下を横断する道路構造物（図-2）として、施工基面からの土被りが 550 mm の位置に 1 層 2 径間のボックスカルバートを構築する工事である。

### (1) 構造計画

非開削工法にて線路下横断構造物を構築する場合、線路両側（以下、鏡部）に仮土留め壁を設置し、施工延長を短くすることが一般的である。しかし、施工箇所には図-3 に示すように函体の直下に下水道管渠が敷設されていることから、鏡部に仮土留め壁を設置すると下水道管渠に仮土留め下部が支障する。一方、道路の縦断勾配や平面曲線については、それらを包含した断面で構造物が計画される。そのため、上床版設置区間が伸びるほど道路縦断への支障が大きくなる。この 2 点より鏡部は切土のり面形状（のり面勾配 1:1.5）とし、それに合わせた縦断方向の形状の構造物を計画した（図-4）。また、下水道管渠への影響を極力小さくするために、横断方向の断面形状は歩車道境界部で段差を設けた鋸形形状とした。

### (2) 工法選定

工法の選定に際しては、①鏡部に仮土留め壁を設置せずに施工が可能であること、②上床版の延長を抑えることが可能であること、③鋸形の函体形状に対して施工実績があること、これら 3 点の制約条件から、施工実績を有し、施工性に優れた JES 工法を選定した。

JES 工法は、到達側に設置したけん引装置により、エレメントとその先端に直結した掘削装置を PC 鋼より線にて到達側に引き込む施工方法である HEP (Highspeed Element Pull method) 工法を組み合わせた HEP&JES 工法での施工が一般的である。本工事では、鏡部に仮土留め壁を設置せずに施工する。鉄道盛土のり面形状に合わせて



図-2 施工箇所全景

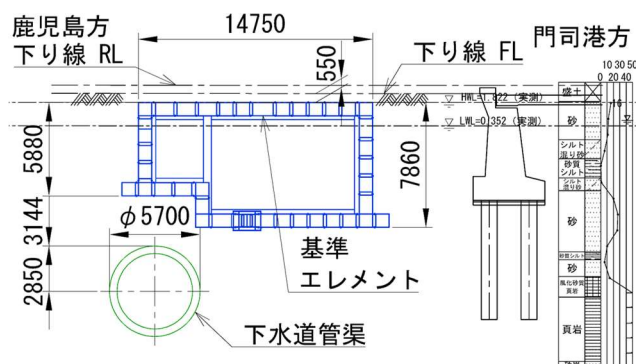


図-3 横断面図

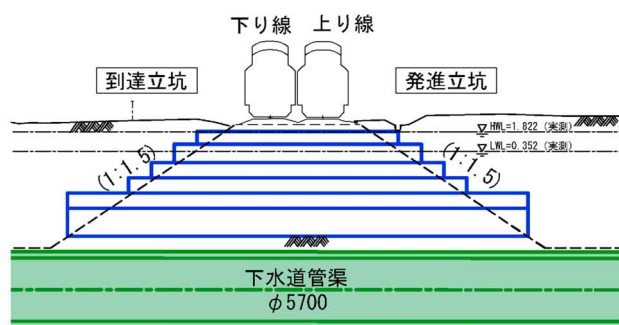


図-4 縦断面図

線路下横断工事を計画、施工した実績<sup>3)</sup>では、けん引装置の反力設備に課題があった。そこで、本工事においては HEP 工法を用いずに、発進立坑背面側の仮土留め壁を反力とした、推進方式で計画した。

### (3) 地質概要

施工箇所は、海岸平野上に位置している。砂層を主体として構成されており、非常に軟質な粘性土層が介在していた。上床版エレメント施工位置の砂層は、N 値が 16 と中位の砂であり、土質試験から細粒分をほとんど含まない (0.6%)、均等係数は 1.8 と非常に小さく自立性の低い層であった。調査結果から、地下水位は GL-24m と上床版エレメント下面付近であり、潮位や隣接する河川の水位に大きく影響を受ける環境にあった。

液状化判定を実施すると、L2 地震動で PL 値が 5 以上となり、液状化を考慮した設計が必要となった。

#### (4) 補助工法

鏡部に仮土留め壁を設置せずに施工することから、鋼矢板による遮水壁に欠損部が生じる。その欠損部については、薬液注入工（ダブルパッカー工法）により、止水を行うこととした。

エレメントを閉合するまでの間、通常上床版エレメントは、地山および鏡部の仮土留め壁に支持される。本工事においては、エレメント推進施工時における上床版エレメントの沈下対策として、柱状の地盤改良杭を発進および到達の両立坑の坑口付近に施工した。また、エレメント到達時における、のり面表層部の崩壊防止対策として、深層混合処理工法による地盤改良工を、到達立坑側ののり面に施工した。図-5 および図-6 に補助工法の施工範囲図を示す。

液状化の影響を考慮する設計項目の一つに、過剰間隙水圧による浮き上がりの検討がある。液状化時に周辺地盤の間隙水圧が上昇し、構造物に作用する揚圧力が増加するため、中が空洞で周辺地盤より重量の小さいボックスカルバートは浮き上がる可能性がある。本工事においては、浮き上がり安全度（揚圧力／抵抗力）が1を上回ることから、浮き上がりへの対策工として、函体底面以深の液状化層に対して地盤改良を行うことで、函体下に発生する揚圧力を抑制した。液状化対策の地盤改良範囲図を図-7 に示す。函体下の地盤改良の施工には、曲がりボーリング式薬液注入工法を採用し、地表面から軌道直下を含めた注入範囲を削孔した後、耐久グラウトを対象地盤に注入し、浮き上がり抑制とした。

#### (5) 下水道管渠近接影響検討

本工事は、下水道管渠（外径： $\phi = 5700$  mm、桁高： $h = 225$  mm）に近接した施工となる。下水道管渠上部の掘削に伴う排土（除荷）荷重によって生じる、下水道管渠に対する影響を予測するため、次に示す項目について検討を行った。

##### a) RC セグメントの断面力照査

完成時の荷重が偏荷重となることから、2次元フレーム解析により RC セグメントの断面力照査を実施した。照査断面は、最も偏荷重となる到達立坑掘削位置とした。セグメントリングは曲げ剛性  $\eta EI$  を持つ剛性一様なリングとし、リング全周に地盤ばねを配置するものとして、各節点の半径方向と接線方向に地盤ばねを設定した。

照査では、上部を掘削した状態として上部鉛直荷重のみ変更し、側部および底部の荷重は設計時の値を使用して解析を行った。また、地盤ばねについて  $0.5D$ （ $D$ ：下水道管渠外径）以下の土被り部は、地盤ばねを考慮しないものとした。照査の結果、偏荷重の影響によるセグメントリングの安全性を確認した。

##### b) 下水道管渠リバウンド量の予測

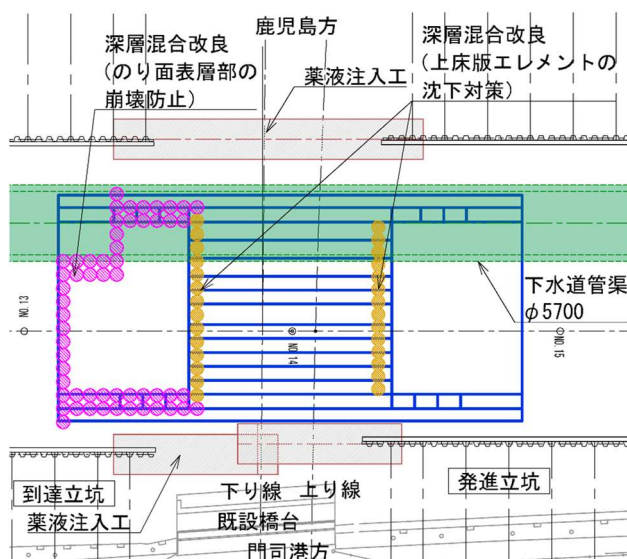


図-5 補助工法施工範囲平面図

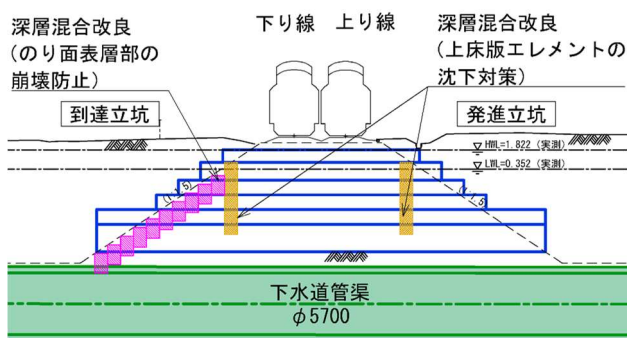


図-6 補助工法施工範囲縦断面図

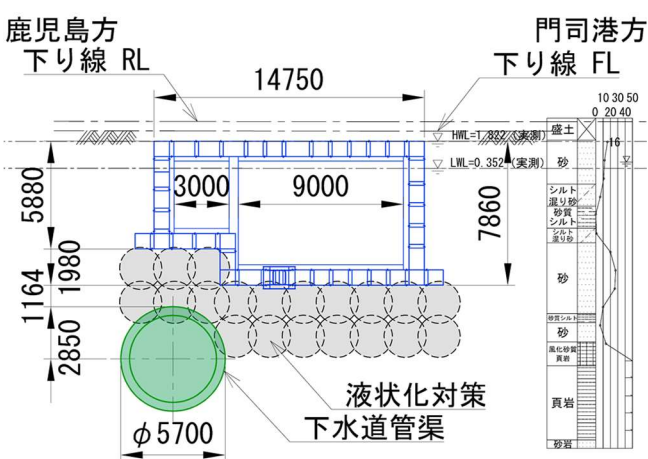


図-7 液状化対策工横断面図

下水道管渠の縦断方向および横断方向について、施工に伴う影響として2次元FEMにより下水道管渠のリバウンド量を算定した。掘削領域周辺の地盤は、砂質土が支配的であることから線形弾性モデルとした。表-1に解析に用いた土質定数を示す。なお、変形係数Eについては、リバウンド量を計算するときの変形係数の補正<sup>4)</sup>



から、変形係数の求め方に応じた係数を乗じた補正後の値を示す。解析領域は、側方領域を立坑掘削深さの2倍とし、下方領域を下水道管渠外径 $D$ の2倍とした。解析境界の拘束条件は、底面は鉛直固定・水平固定とし、左右の境界面は鉛直自由・水平固定とした。解析例として図-8に下水道管渠縦断方向の解析モデル図および解析手順を示す。縦断方向の検討では、隣接工区を含めた範囲に対してモデル化を行った。また、非開削工法による鉄道下での構造物新設を簡易に表すために、解析手順のSTEP3：JES エlement物性変更として、単位体積重量をElementの横断方向の総断面積と掘削断面積の比に応じて減じることで表現した。

図-9に縦断方向の解析により求めた、本工事近傍での下水道管渠上端のSTEP2、STEP3における鉛直変位の傾向を表した図を示す。解析結果は、貨物線直下の非開削部で最大2.47mmの沈下、到達立坑の開削部で3.83mmの隆起を示した。

表-1 解析用土質定数

| 土質名称   | 記号  | 単位体積重量<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 内部摩擦角<br>$\phi$ (°) | 粘着力<br>$c$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 変形係数<br>$E$ (kN/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$ |
|--------|-----|-----------------------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 盛土     | B   | 18.0                                    | 28                  | 0.0                             | 28000                            | 0.47           |
| 砂      | As  | 18.0                                    | 31                  | 0.0                             | 44000                            | 0.50           |
| 砂質シルト  | Ac  | 16.0                                    | 0                   | 0.0                             | 32000                            | 0.50           |
| シルト混り砂 | As  | 18.0                                    | 31                  | 0.0                             | 44000                            | 0.50           |
| 砂      | Ds  | 18.0                                    | 34                  | 0.0                             | 60000                            | 0.49           |
| 砂質シルト  | Dc2 | 16.0                                    | 0                   | 68.0                            | 92000                            | 0.49           |
| 砂      | Ds  | 18.0                                    | 34                  | 0.0                             | 60000                            | 0.49           |
| 風化砂質頁岩 | Sh  | 19.8                                    | 21                  | 0.0                             | 460000                           | 0.47           |
| 頁岩     | Sh  | 19.8                                    | 21                  | 0.0                             | 460000                           | 0.47           |
| 砂岩     | Ss  | 21.1                                    | 41                  | 0.0                             | 460000                           | 0.47           |

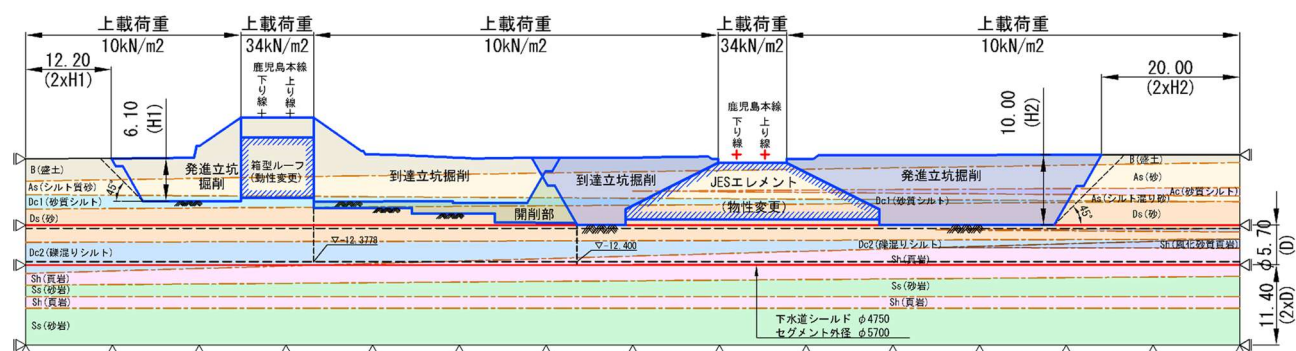


図-8 縦断方向解析モデル図および解析手順

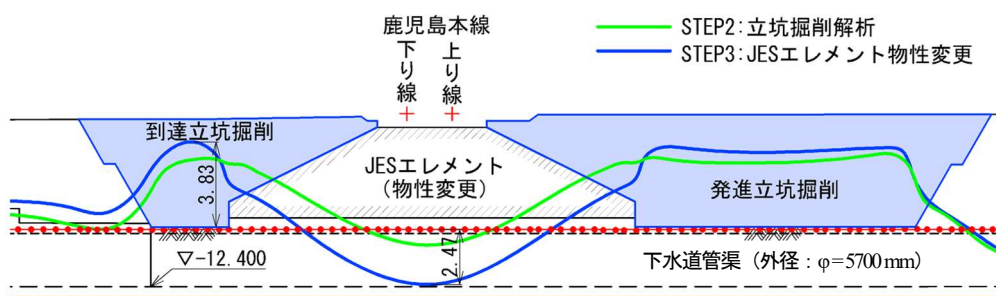


図-9 下水道管渠上端鉛直変位図

### c) セグメント許容変位量の算定

下水道管渠の既存設計計算書を基に、セグメントリング継手ボルトの引張応力度が、引張許容応力度となる鉛直変位量を逆算して求め、その特定のセグメントの鉛直変位量 (13 mm) をセグメント許容変位量と定めた。前節の解析結果は、算出したセグメント許容変位量と比較して十分余裕があったことから、下水道管渠は近接施工による応力、変位に問題がないことを確認した。

## 3. 上床版Elementの施工

### (1) 施工計画

上床版Elementは土被りが 550 mm と小さいことから、軌道変状リスクを考慮し、夜間線路閉鎖間合で施工する計画とした。最初の1本目 (基準Element) は人力掘削、2本目以降は機械による掘削で計画した。また、施工に際し 95 km/h から 50 km/h への徐行規制を行い、上部を走行する JR 鹿児島貨物線の速度を制限した。

上床版Element推進作業中の軌道監視として、軌道の変位計測にプリズムミラーを用いた画像処理計測システムを採用した。計測は 10 分間隔で行い得られた計測

#### ◆解析手順

STEP1：初期応力解析

STEP2：立坑掘削解析 (応力開放率 100%)

STEP3：JES Elementおよび箱型ルーフ物性変更

STEP4：開削部掘削解析 (応力開放率 100%)

値は、レールの軌間、水準、高低、通り、平面性の5項目について10m弦の測定値に換算し、表-2に示す軌道変位の管理値に基づき管理した。軌道変位の管理値は、10m弦の測定値に対して、警戒値（ $A \times 0.4$ ）、工事中止値（ $A \times 0.7$ ）、限界値（ $A$ ：軌道の整備基準値）の3段階を設定した。また、施工期間中は計測器による軌道監視に加えて、夜間の作業中は軌道工を配置し、目視点検および必要により軽微な軌道整備を行った。

## (2) 施工結果

基準エレメント推進作業中の上下線軌道の計測結果から、基準エレメント直上の計測点について、エレメント推進距離ごとの軌道の計測結果に、推進距離に応じた最大推進力を重ね合わせた図を図-10に示す。軌道の計測結果は表-2に示す軌道の計測項目から、通り、平面性に着目して図に示した。軌道の計測値は、警戒値内で推移した。切羽が計測点に近づくにつれて変位が生じ始め、切羽通過後は、しばらく変位が進行した後に収束することがわかった。また、推進力は計画の7割程度の値であった。エレメントと砂との間の摩擦による抵抗が、設計より小さかったと想定した。

上床版エレメント施工位置の砂層は、土質試験から地山の流動化現象が生じやすい地質と考えたこと、基準エレメント施工時の切羽の状況から、機械掘削による地山の取り込み過多に起因する路盤の陥没リスクを再検討し、当初予定していた機械掘削による上床版エレメントの施工を、人力掘削に切り替えた。なお、当該砂層から外れた位置を施工する側壁エレメント2段目以降には機械掘削を適用し、施工の効率化、省力化を図った<sup>5)</sup>。

全てのエレメント完了後に、上床版エレメントの出来形を測定した。施工精度はエレメントの施工誤差範囲に収まっていたことから、上床版エレメント沈下対策とした柱状の地盤改良杭の効果を確認した。

## 4. 下水道管渠の計測管理

### (1) 計測管理計画

本工事の施工による下水道管渠への影響は少ないと考えられたが、影響が予測どおりか否か、変位・変形の進行性を確認するため、下水道管渠の挙動を計測管理する必要があった。計測は下水道管渠内側の天端に5m間隔でセンサーを設置し、リアルタイムに挙動（鉛直変位）を計測した（図-11）。管理値は近接影響検討により算定したセグメントの許容変位量から、鉛直変位量の限界値を $\pm 10\text{ mm}$ と定め、警戒値、工事中止値は限界値をもとに割掛けして警戒値： $\pm 5\text{ mm}$ 、工事中止値： $\pm 7\text{ mm}$ と設定した。

表-2 軌道変位の管理値

|     | 警戒値     | 工事中止値    | 限界値      |
|-----|---------|----------|----------|
| 軌 間 | $\pm 5$ | $\pm 9$  | $\pm 14$ |
| 高 低 | $\pm 7$ | $\pm 13$ | $\pm 19$ |
| 通 り | $\pm 7$ | $\pm 13$ | $\pm 19$ |
| 平面性 | $\pm 6$ | $\pm 11$ | $\pm 16$ |

（単位：mm）

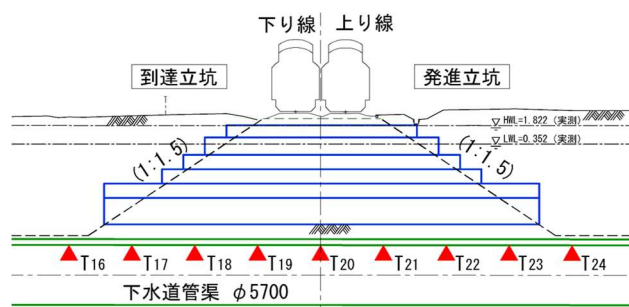


図-11 センサー設置位置縦断面図

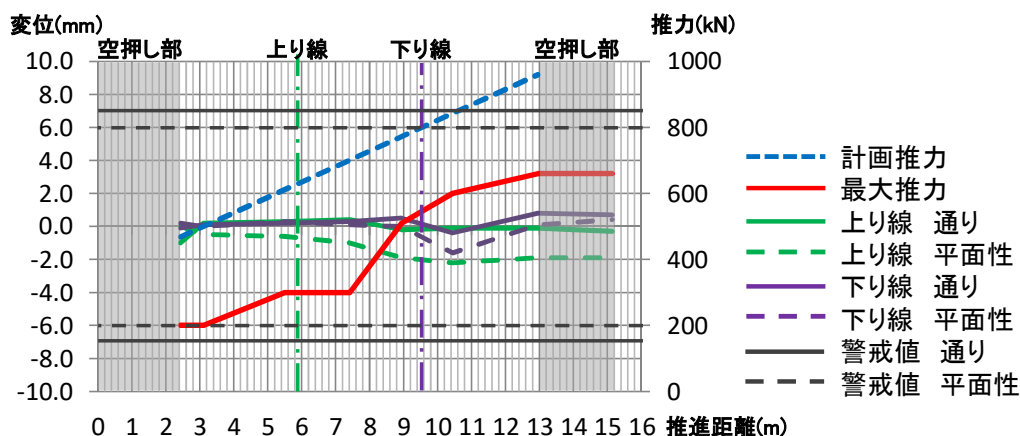


図-10 基準エレメント推進時地表面変位

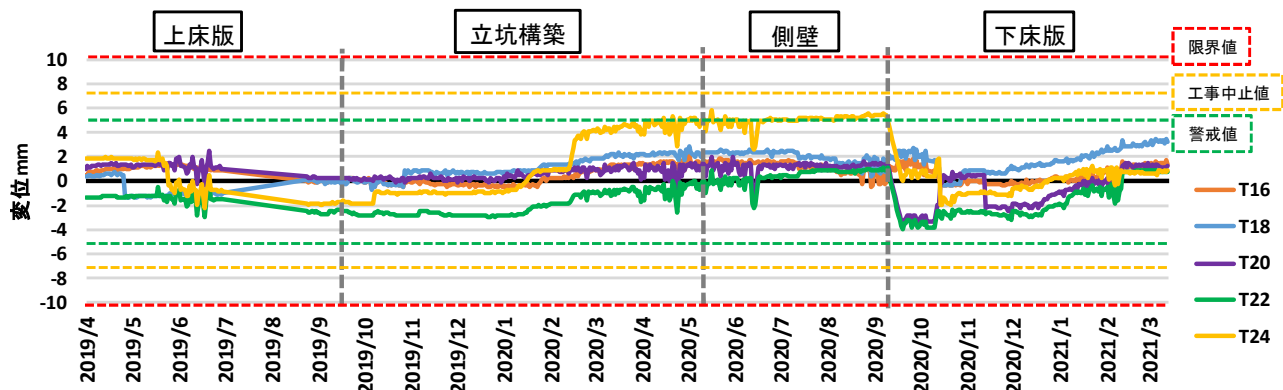


図-12 下水道管渠鉛直変位

## (2) 計測結果

図-12 に上床版エレメントの施工開始から、下床版エレメントが完了するまでの施工期間における、図-11 に示した計測点 T-16, T-18, T-20, T-22, T-24 の計測結果を示す。計測点 T-20 は鹿児島貨物線上下線の線間直下に位置している。図-12 の上床版、側壁、下床版とは、それぞれの部位におけるエレメントの地盤への挿入からコンクリートの充填までの一連の作業に要した期間を示し、立坑構築とは発進、到達両立坑の掘削や支保工等に要した期間を示した。なお、図-12 にはエレメント閉合後のエレメント内の掘削期間は含まれていない。計測点 T-24 が警戒値を若干超えた時期があったが収まり、影響解析結果と比べ、変位量は概ね予測の範囲内であった。

## 4. まとめ

下水道管渠と近接している環境下における線路下横断工事において、鏡面に仮土留めを設置せずに切土のり面を活かした特殊な形状の構造物を構築した。その施工に

当たり、補助工法を十分に検討し、適切な計測管理を行うことで、列車運行に支障することなく施工を終えることができた。また、下水道管渠との近接施工において、影響解析を行い、解析結果と計測結果を比較することで、既設構造物の挙動を把握するとともに、解析の妥当性を検証した。本稿が近接施工における参考事例となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 清水満, 森山智明, 木戸素子, 桑原清, 森山泰明: 鋼製エレメントを用いた線路下横断トンネルの設計法, トンネル工学研究論文・報告集, vol.8, pp.407-412, 1998.
- 2) HEP&JES 工法技術資料: 鉄道 ACT 研究会, 2020.
- 3) 高橋紗希子, 阿部哲, 佐々木泰参, 松尾伸之, 中村邦夫: 高盛土区間における線路下横断工法の設計施工, トンネル工学報告集, vol.19, pp.291-294, 2009.
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, 鉄道総合技術研究所編, 2001.
- 5) 山田宣彦, 今吉敏, 余傳直之, 江藤誠司: 切土のり面形状に合わせたアンダーパスにおける側壁エレメントの機械掘削, 土木学会第 76 回年次学術講演会, IV-176, 2021.

(2021. 8. 6 受付)

## PLANNING AND CONSTRUCTION OF UNDER-TRACK CROSS-SECTION WITH A SPECIAL CROSS-SECTIONAL SHAPE CLOSE TO EXISTING SEWER PIPES

Nobuhiko YAMADA, Yusuke KUROKI, Taku KAMADA, Satoshi IMAYOSHI and Gaku YAJIMA

Shioi Makiyama Coastline Bv new construction and other construction is one of the element propulsion methods of non-excavation of box culvert that crosses under the track at the intersection of Shioimachi Makiyama Coastline and Kagoshima Freight Line, a city planning road developed by Kitakyushu City, Fukuoka Prefecture. It will be newly established by the JES method. Generally, when constructing a box culvert under the track by the JES method, a shaft is constructed by temporary earth retaining on both sides of the track, but in the construction, a sewer pipe is laid directly under the box culvert, and the lower part of the temporary earth retaining is an obstacle. Therefore, we planned a structure that matches the shape of the slope of the cut. This paper reports on the plan and construction results of this work.