

# 海底横断ガス導管シールドへの URUP工法の適用

中村成利<sup>1</sup>・矢野慎二<sup>1</sup>・足立邦靖<sup>2</sup>・丹沢淳一<sup>3</sup>・山元寛哲<sup>4</sup>・森理人<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 中部ガス(株) 豊橋供給センター 導管グループ (〒441-8511 愛知県豊橋市神野新田町字テノ割 1 番地)

<sup>2</sup> 正会員 (株)大林組 名古屋支店 URUP田原JV工事事務所 (〒441-8074 愛知県豊橋市明海町 3-58)

<sup>3</sup> 正会員 (株)大林組 名古屋支店 大樹寺シールドJV工事事務所 (〒444-2135 愛知県岡崎市大門一丁目地内)

<sup>4</sup> 正会員 (株)大林組 土木本部 生産技術本部 シールド技術部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

「田原第2幹線三河湾シールド工事」は、天然ガスパイプライン整備事業のうち、愛知県豊橋市明海町から田原市緑が浜の工業団地への三河湾横断部分のガス導管をシールド工法にて築造する工事である。

本稿では、海底を横断するガス導管シールドトンネルに、シールド地上発進・地上到達が可能な「URUP (Ultra Rapid Under Pass. ユーラップ) 工法」を適用した施工事例について報告する。

**キーワード：** シールドトンネル, URUP工法, ガス導管, 地上発進, 地上到達, 小土被り, 海底横断, 急勾配

## 1. はじめに

「田原第2幹線三河湾シールド工事」は、三河湾を横断するガス導管シールド工事である。本工事の発注にあたっては、三河湾の計画航路との隔離や護岸通過位置等の所定の条件を満たす範囲でトンネル線形を任意とし、VE提案を受け付けた。その結果、シールドトンネルの地上発進および地上到達を行うことで、工期や工事安全性、経済性において優位となるURUP工法を採用するに至った。

URUP工法による地上発進としては国内で2例目<sup>1)</sup>、地上到達は国内初となる工事である。

表-1 工事概要

|           |                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------|
| 工 事 名 称   | 田原第2幹線三河湾シールド工事                                   |
| 発 注 者     | 中部ガス株式会社                                          |
| 施 工 者     | 大林組・神野建設特別共同企業体                                   |
| 工 期       | 平成22年6月～平成23年11月                                  |
| 施 工 延 長   | 1,086.7m                                          |
| 掘 削 外 径   | φ2.13m                                            |
| セ グ メ ン ト | 鋼製セグメント 外径φ1,956mm,<br>内空φ1,800mm,<br>幅750mm, 5分割 |
| 縦 断 勾 配   | 発進側15.0%, 到達側14.0%                                |
| 最小曲線半径    | 平面:R=200m, 縦断R=100m                               |
| 最 小 土 被 り | 0.8m (約0.4D)                                      |

## 2. 工事概要

本工事の概要を表-1に示す。また、当初計画とVE提案との主要工事数量の比較を表-2に、比較縦断図を図-1に示す。

### (1) 線形概要

当初計画は、三河湾の両岸に深さ約25mの発進立坑および到達立坑を築造し、水平にシールドト

表-2 主要工事数量の比較

| 項 目            | 当初計画              | VE提案                            |
|----------------|-------------------|---------------------------------|
| シールド延長         | L=937.2m          | L=1086.7m                       |
| 発進立坑<br>内空寸法   | φ12.0m<br>×H25.0m | (掘割部)<br>W3.7m×L19.6m<br>×H2.7m |
| 到達立坑<br>内空寸法   | φ4.0m<br>×H25.2m  | (掘割部)<br>W3.1m×L11.6m<br>×H2.0m |
| 開削延長<br>(別途工事) | —                 | (当初計画に対して)<br>—130m             |

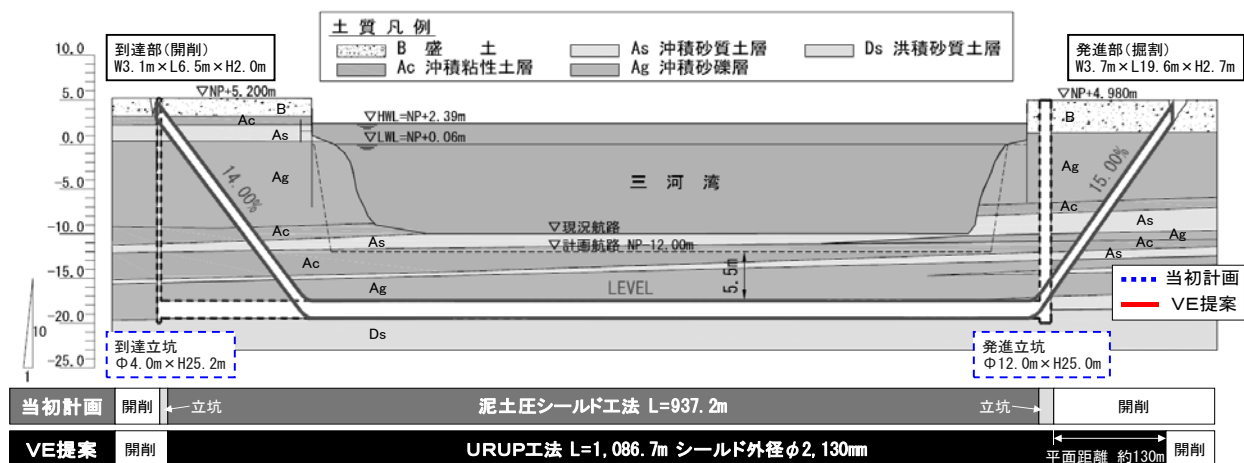


図-1 全体縦断面図

ンネルを施工するものであった。これに対し、URUP工法を適用した場合、直接シールド機を地上から発進させて地上に到達させることになり、発進立坑と到達立坑が不要となる。

そのため、平面線形は当初計画とほぼ同じであるが、縦断線形は発進側および到達側に急勾配区間を含むものとなった。

発進側の勾配は、護岸の制約条件を満足しつつシールド延長が最短となるよう、過去のシールド施工実績およびトンネル内配管の施工実績をもとに15.0%とした。到達側の勾配は、護岸の制約条件を満足しつつ当初計画していた立坑用地内へ地上到達する14.0%とした。

これにより、シールドトンネルの総延長は約150m長くなる一方、別途施工される開削工事延長は約130m短くなった。

また、発進・到達部の土被りは、隣接する開削区間とガス配管中心を一致させるよう考慮し、0.8mとした。

## (2) 地質概要

急勾配区間の地質は、沖積砂質土層、沖積粘性土層、沖積砂礫層からなる互層であり、発進・到達付近では盛土も掘削対象となる。また海底横断部の水平区間では、沖積砂礫層が主体であり、下部に洪積砂質土層を一部含む。それぞれの土層の特徴を表-3に示す。盛土層ではガラ等の障害物の出現が懸念されたが、事前のボーリングデータや埋立工事の調査から最大径40mmの礫の出現が予測された程度で、掘削部の掘削時においても特にシールド掘進に支障となる状況ではなかった。

地下水位は、発進側、到達側ともにGL-2.95mであり、地上発進および地上到達時のシールド下端付近となるため、発進・到達における出水については問題ないと判断した。

表-3 地質概要

| 地 質   | 概 要                                           |
|-------|-----------------------------------------------|
| 沖積砂質土 | As N値7～40<br>緩い砂質土から非常によく締まった砂質土              |
| 沖積粘性土 | Ac N値2～3 柔らかい粘性土                              |
| 沖積砂礫土 | Ag 海底部はN値50で想定最大礫径35mm<br>勾配部はN値30で想定最大礫径25mm |
| 洪積砂質土 | Ds N値30～50と非常によく締まった砂質土                       |

## 3. URUP工法

### (1) 工法概要

URUP工法は、交差点における地下立体交差（アンダーパス）道路を非開削工法にて実現することを目的として開発された技術である。シールドを地上から掘進し、交差点下を通過後そのまま地上へ到達することで、従来必要であった発進、到達立坑の構築が不要となる（図-2）。これにより、従来の開削工法よりも短期間でのアンダーパス構築が可能となる。さらに、工事による発生土量や排出ガスの縮減、騒音振動や二次渋滞の抑制など、周辺環境や地球環境にも配慮した工法である。

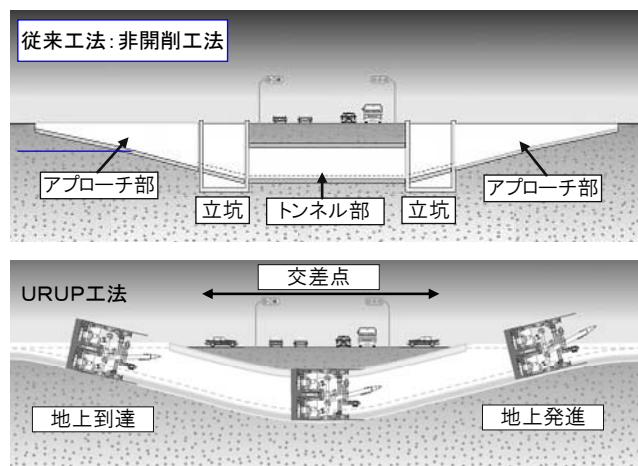


図-2 アンダーパスの施工概念比較図

このURUP工法による地上発進・地上到達の技術は、本工事のような海底横断シールドなど様々な工事へ適用が可能であり、工期短縮やコスト削減、環境負荷低減を図ることができる。

## (2) 実証実験工事

URUP工法の開発においては、国内でも例を見ないシールドの地上発進・地上到達という新技術の実現性を、実機を用いた実験工事により確認した。

アンダーパス構築を想定した実証実験工事では、高さ2.15m、幅4.8mの泥土圧シールド機を使用し、施工延長は100mとした。なお、掘進線形は、曲線半径300mの平面線形、曲線半径100mの縦断曲線を設定した（図-3）。

## (3) 実証実験工事により得られた知見

実験工事の結果をもとに、地上発進、地上到達の確実性、および小土被り掘進の確実性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- ①地上発進、小土被り掘進、地上到達といったURUP工法一連の工程（写真-1）を実施するにあたっては、チャンバー内掘削土砂の塑性流動化を図り、切羽を安定させることで、施工条件に関わらず、地表面変位を抑制して掘進できることがわかった。
- ②アプローチ部の掘進では、チャンバー内の掘削土砂の状況や裏込め注入の充填状況を目視で確認でき、添加材注入量や排土量、裏込め注入量を適正に管理できた。また、シールドの姿勢制御については、ジャッキの選択や中折れ調整等、従来とほぼ同様な手法で制御が可能であることを確認できた。
- ③小土被り掘進においては、掘削土砂の塑性流動化、切羽土圧の適正設定に加えて、必要に応じ

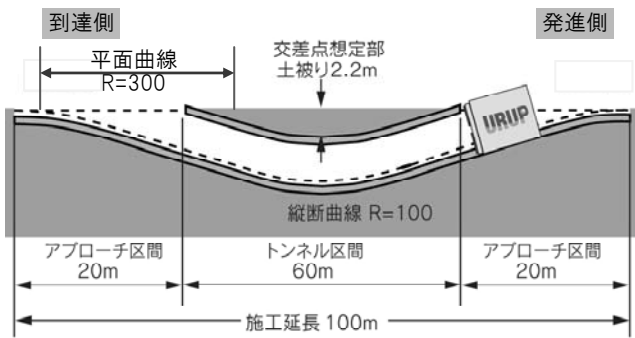


図-3 実証実験概要



写真-1 URUP実証実験施工状況

て滑材を使用して地山の引き込みを防止することで、地表面変位を抑制できることを確認した。以上の知見から、URUP工法は、立体交差のアンダーパスに限らず、地上へのアプローチが必要な様々な用途のシールドトンネル工事に適用できることがわかった。また、実験工事ではトンネル断面形状は矩形であったが、矩形に限らず円形や複合アーチ断面など、幅広く活用できる技術である。

## 4. 本工事へのURUP工法適用の効果

### (1) 全体工程の短縮

当初計画とVE提案との全体工程の比較を図-4に示す。以下の理由により、当初計画と比較して工期を5.5ヶ月短縮できた。

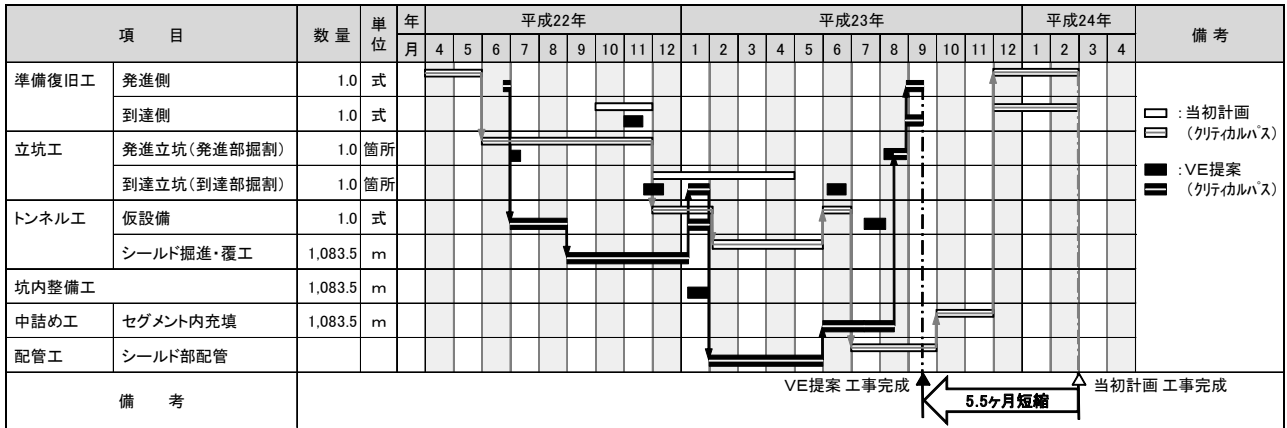


図-4 全体工程比較図

#### a) 発進・到達立坑が不要

発進・到達立坑およびシールド発進・到達防護（地盤改良）が不要となり、各工事を省略できた。

#### b) 初期掘進・段取り替えが不要

地上から直接発進するため、シールド掘進に必要な設備を搭載した後続台車を、地上に配置・連結して掘進を開始することができた（写真-2）。これにより、効率の悪い初期掘進と段取り替えを省略できた。

### (2) 工事の安全性の向上

#### a) 鏡切り作業が不要

大きな地下水圧や土圧が作用する立坑からのシールド発進・到達を省略できたため、鏡切り作業が不要となり、安全な発進・到達が可能となった（写真-3、4）。

#### b) 荷役作業を軽減

立坑がなく、地上からトンネル内へ資機材を直接搬入できるため、シールド掘進時のセグメント搬入や配管作業時の配管材搬入などにおいて、上下間の危険な荷役作業を省略できた。

#### c) 安全なシールド機の組立、解体作業

地上発進・地上到達では、立坑開口寸法等の制約がなく、シールド機を分割して組立・解体する必要がない。そのため、重量物の揚重作業や溶接・溶断作業を低減でき、作業の安全性が向上した（写真-5）。

### (3) ガス配管工事に対する効果

シールド施工後、トンネル坑内にて実施する配管工事に対しては、以下の効果があった。

#### a) 配管材料の長さの制約がない

配管用鋼管を地上から直接坑内へ搬入することができるため、立坑寸法による材料長さへの制約がなくなった。

#### b) 配管総延長を短縮

立坑での立ち上がり配管が不要となり、配管総延長が短くなった。

### (4) 環境負荷を低減

当初計画とVE提案との工事全体での掘削土量の比較を表-4に示す。当初計画では、坑内への配管材料搬入の条件から、発進立坑がシールド施工に必要な寸法に比べ大きくなっていた。VE提案では、立坑省略により掘削土量を約37%低減でき、環境負荷の低減に貢献することができた。



写真-2 発進時シールド後方設備



写真-3 シールド地上発進状況



写真-4 シールド地上到達状況



シールド搬入

シールド搬出

写真-5 シールド搬入・搬出状況

表-4 掘削土量の比較

| 項目   | 当初計画                   | VE提案                                 |
|------|------------------------|--------------------------------------|
| シールド | 3,184.6 m <sup>3</sup> | 3,872.2 m <sup>3</sup>               |
| 発進立坑 | 2,833.1 m <sup>3</sup> | 153.8 m <sup>3</sup>                 |
| 到達立坑 | 316.7 m <sup>3</sup>   | 82.5 m <sup>3</sup>                  |
| 開削*  | 197.4 m <sup>3</sup>   | 0 m <sup>3</sup>                     |
| 合計   | 6,531.8 m <sup>3</sup> | 4,108.5 m <sup>3</sup><br>【低減率:約37%】 |

※シールド延長が長くなった分のみを考慮

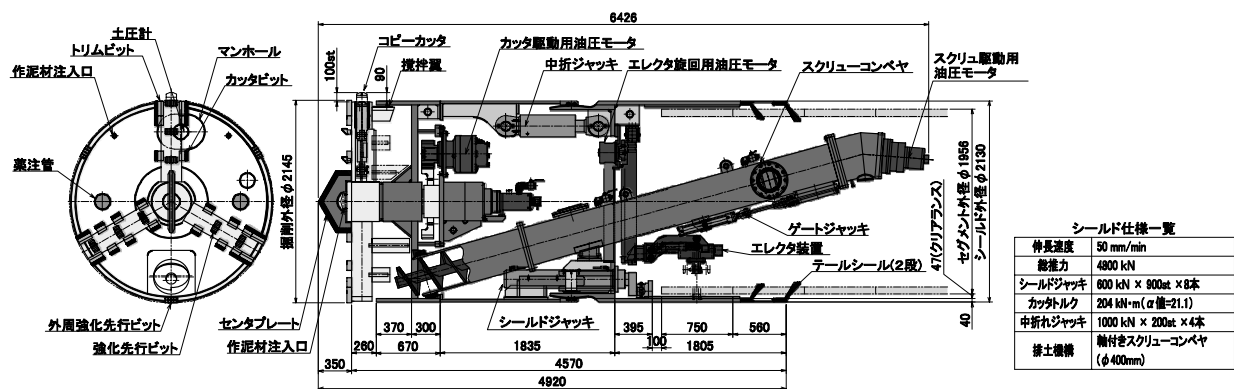


図-5 シールド機 概要図

## (5) 近接構造物への影響を低減

当初計画の発進立坑には電力の高圧鉄塔が近接しており、土留め掘削等の施工による地盤の緩みや鉄塔の変位が懸念された。これに対し、VE提案ではシールド発進部を鉄塔から離し、最近接部はトンネルで通過したため、影響なく施工できた。

## 5. 施工実績

### (1) シールド機の仕様

本工事で使用したシールド機は、URUP実証実験の成果・知見をもとに、地上発進、地上到達および小土被り施工に対応が可能な仕様とした。シールド機概要図を図-5に示す。

形式は、実証実験と同様、切羽の安定管理ができるとともに、小土被り部においても掘削土砂等が地上へ噴発する恐れのない「泥土圧シールド」を採用した。

また、小土被り掘進における地表面変位を抑制するため、切羽土圧を的確に把握・管理できるように土圧計を隔壁上部と中段部に2台設置した。

### (2) シールド発進

シールド発進部は、法面形状の掘削構造とし、地上から直接掘削して構築した。またシールドの掘進反力を確保するため、H鋼杭による反力受設備を設置した(図-6および写真-6)。

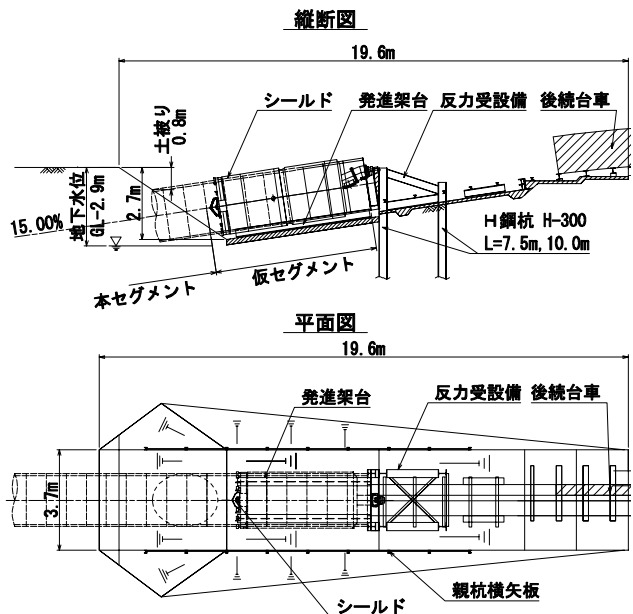


図-6 発進方法概要図

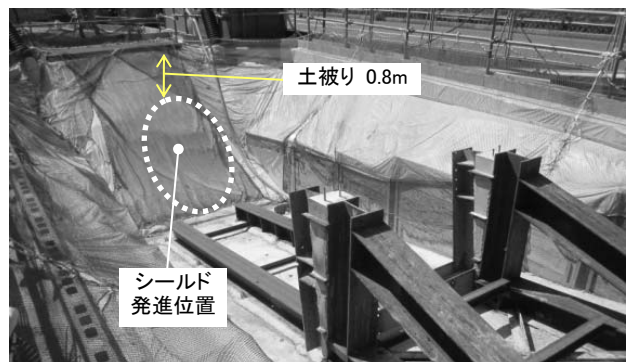


写真-6 発進部掘削構造



① 法面掘削時に添加材の注入状況・土砂の塑性流動状態を目視で確認しながら掘進する。



② 法面・地表面を監視しながら仮セグメントを順次組立て掘進を継続する。



③ 土被り増加に伴い推力が上昇するため、仮セグメントの浮上がり防止しながら掘進を継続する。



④ テールボイドを裏込め材で充填し坑口を仕上げる。

写真-7 発進施工ステップ



シールド発進の施工ステップを写真-7に示す。

前述のとおり、地下水位は発進時のシールド下端付近であったため、出水や法面・地表面の崩壊もなく、速やかに発進することができた。

### (3) 小土被り掘進

以下に述べる各管理項目について、その管理値および管理方法を事前に設定し、掘進中は地表面変位をリアルタイムに計測しながら、管理値の見直し・再設定にフィードバックした。

#### a) 適切な切羽管理

##### ① 管理土圧

管理土圧は、上限値を「土被り圧」、下限値を「静止土圧＋地下水压＋予備圧」と設定した。

##### ② 掘削用添加材

切羽への添加材は、掘削対象範囲が広く切羽の安定が難しい沖積砂礫層への対応を基本として計画し、事前の試験練りによってベントナイト系増粘材と高分子系凝集剤を選定した。また海底下の掘進であるため、塩分対策として効果のある分散系添加材を併用した。施工においては、排土状態を確認しながら、添加材の組合せや注入率を調整することで、チャンバー内土砂の良好な塑性流動状態を確保した。

#### b) 掘削土量管理

坑内の土砂搬送は、土砂運搬車を使用しバッテリー機関車により搬送した。掘削土量は、発進基地における運搬車内の土砂の体積計測とロードセルによる重量計測により管理した。また、切羽土圧やスクリー回転数等の掘進管理データと照らし合わせながら、総合的に管理した。

#### c) 裏込め注入管理

裏込めの目標注入率は130%以上と設定し、注入圧力の上限値は切羽圧＋100kPaとした。小土被り区間において、圧力管理の上限値が土被り圧よりも大きくなる場合は、地表面の変状や注入材噴出の有無を監視しながら注入を実施した。

### (4) シールド到達

シールド到達部は、発進と同様、トンネル設計高さや勾配にあわせた掘削構造とした（図-7、写真-8）。

シールド到達の施工ステップを写真-9に示す。

到達においても発進と同様、出水や法面・地表面の崩壊もなく確実な施工ができた。

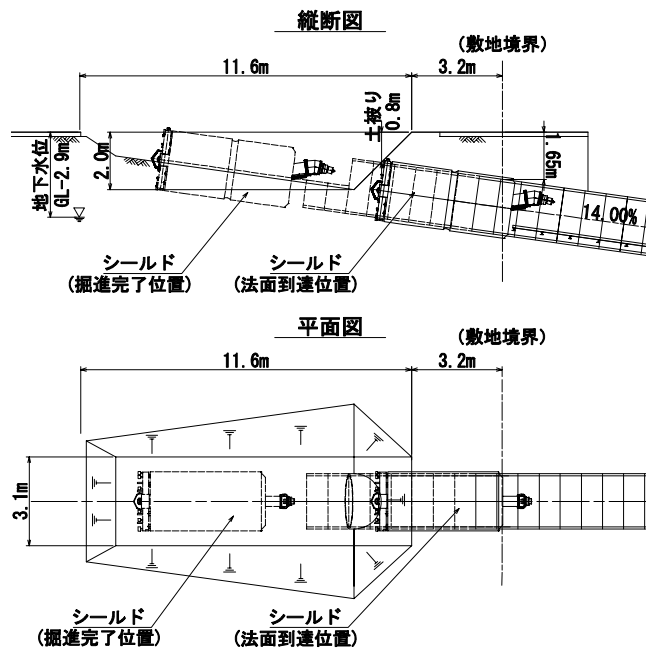


図-7 到達方法概要図

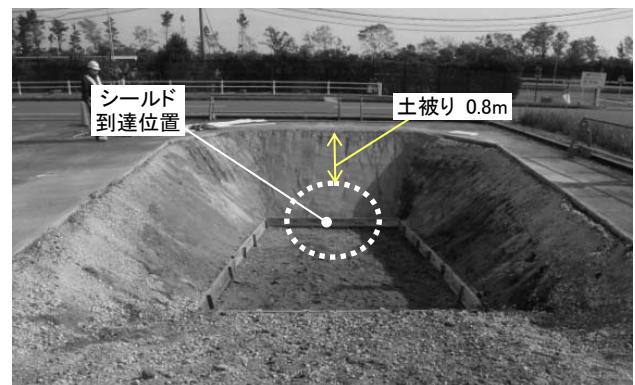


写真-8 到達部掘削構造



① シールド上部が法面に到達する。



② 地表面・法面を監視しながら掘進を継続する。



③ シールド通過により発生したテールボイドに裏込め材を充填し、坑口を仕上げる。



④ シールド解体位置まで掘進（空押し）して完了する。

写真-9 到達施工ステップ

## (5) シールド施工歩掛

シールド掘進は昼夜（2 交代）にて行った。施工歩掛の実績を表-5 に示す。勾配区間（特に施工延長が長くなった到達側）においては、他の水平区間に比べて日進量が少なくなったものの、全体を通して、下水道積算基準における標準日進量以上の進捗を確保できた。

## 6. URUP工法適用における課題と対策

### (1) 変化する土質と土被りへの対応

本工事では、VE 提案の線形変更により急勾配かつ小土被りの区間が存在し、掘進に伴い土質と土被りが変化していくため、これらに対応して安定した掘進を行う必要があった。このためには、前述のように、事前設定した管理方法・管理値をもとに掘進を行い、地表面変位の計測結果を以降の掘進管理に常にフィードバックしていくことが重要であった。

以下に、発進側および到達側での地表面変位の計測結果と、それに基づいた主な管理方法について述べる。

発進側および到達側における地表面変位の計測結果を、それぞれ図-8 および図-9 に示す。各図は、土被り 2.0m および 4.0m の地点でのシールド先端との離隔と、地表面変位量の推移を示したものである。計測位置はシールド直上の点で、計測方法はレベル計測器を用いた人為測量にて行った。

発進側の地表面変位は、事前に設定した管理土圧に基づき掘進した結果、土被り 2.0m、4.0m ともにシールド先端到達付近から沈下傾向が表れた。シールド後端の通過後は、裏込めが適切に充填されたと思われ、経時変化はほとんど見られなかった。最終変位量は、土被り 2.0m で-5mm（沈下）であった。

到達側については、先行した発進側の沈下傾向を考慮し、土被り 6.0m（3D）付近から浅い部分について切羽土圧管理値を「土被り圧＋水圧＋予備圧」と再設定して掘進を行った。その結果、一部シールド先端到達前や先端通過後に隆起傾向が見られたが、発進側よりも全体の変位量を抑制することができた。最終変位量は、土被り 2.0m で+2mm（隆起）、土被り 4.0m で-2mm（沈下）であった。

また、発進側および到達側における、土被りと切羽土圧管理結果の推移を図-10 に示す。管理値の見直しにより、土被り 6.0m 以浅では到達側の土圧を高く管理した結果が表れている。

表-5 シールド施工歩掛（実績）

| 項目      | 対象区間<br>(m) | 日進量(m/日) |       |
|---------|-------------|----------|-------|
|         |             | 実績値      | 参考値※1 |
| 発進側勾配区間 | 159.0       | 9.1      | 4.5※2 |
| 水平区間    | 767.1       | 14.3     | 8.2   |
| 到達側勾配区間 | 160.6       | 8.0      | 4.5※2 |
| 全 体     | 1,086.7     | 11.9     | —     |

※1 下水道用設計積算要領（シールド工法編）2010 年版 に示された値

※2 上記要領における初期掘進あるいは到達掘進の値

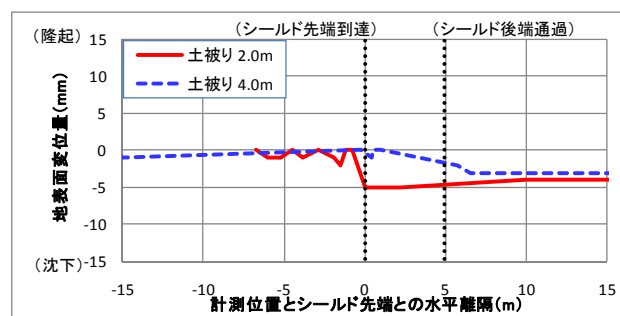


図-8 発進側 地表面変位計測結果

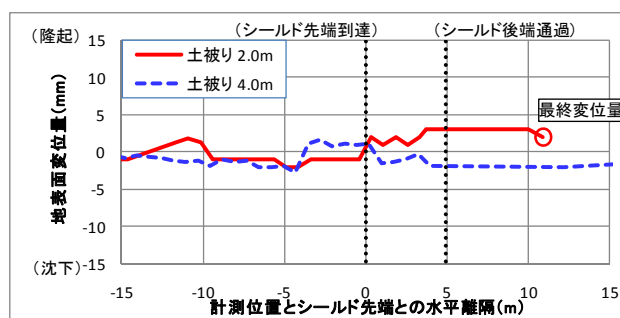


図-9 到達側 地表面変位計測結果

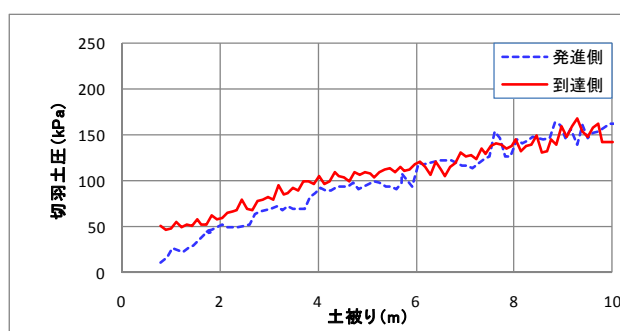


図-10 切羽土圧の管理結果

発進側と到達側とでは土質条件が若干異なるが、設計水圧や計算上の静止土圧および土被り圧はほぼ同等であり、両者を直接比較評価しても問題ない。したがって、本工事の対象地盤では、切羽への作用土圧を「土被り圧」で評価することが適切であり、掘進管理においては切羽土圧管理値の見直しが有効であったと考える。

裏込め注入の実績を図-11 に示す。発進側・到達側ともに、注入率 100%を下回ることなく、目標注入率である 130%以上を概ね確保することができた。また注入材の地表面への噴出も見られず、事前の設定管理値は適切であったと考える。

総推力の管理結果を図-12 に示す。特に到達側においては、上り勾配である上、切羽土圧を高め管理することで推力が上昇すると想定されたが、土被り 4m 以浅の小土被り区間では、発進側と到達側とで推力の大きな相違は見られなかった。切羽土圧およびチャンバー内土砂の塑性流動状態を適切に管理でき、掘進時のシールド摩擦抵抗等を抑制できた結果であると考え。なお、発進側の土被り 4～8m 区間においては、到達側に比べて推力が大きい傾向が見られた。この際の排土性状を確認したところ、事前の土質調査結果よりも細粒分の少ない砂礫であった。添加材の種類・注入量を調整しながらも、最適な塑性流動状態を確保しにくい状態であったことが要因であると考え。しかし、切羽土圧を適切に管理したことで、掘削土量の変動はほとんどなく、地表面への影響も見られなかった。

## (2) 急勾配区間における土砂・資機材の運搬

発進側（勾配 15%）および到達側（同 14%）の急勾配区間に対応するため、坑内運搬設備としてピンラック式バッテリー機関車（3t×2 台連結）を採用した（写真-10）。これにより勾配区間での運搬速度が低下するが、地上部にトラバーサーを 2 基設置し、2 編成の運搬用台車を速やかに入れ替えて交互に運行することで、運搬効率の向上を図った。

## (3) 地下埋設物、障害物への対応

URUP 工法によるシールド地上発進あるいは地上到達では、土被りが小さく地表面に近い地盤を掘進することとなる。特に、地表面近くの盛土層については、従来シールドで掘進することは少なく、また埋設物や障害物が存在する可能性が高いため、工事開始前に入念に調査を実施することが重要である。

本工事においては、過去に当該地域の埋立工事を行った際の事前調査結果や工事記録、ボーリングによる土質調査結果、掘削部施工時の調査結果をもとに、事前に埋設物や障害物がないことを十分確認した。その結果、掘進前ならびに掘進中においても特別な対策は必要とせず、無事に掘進を完了することができた。

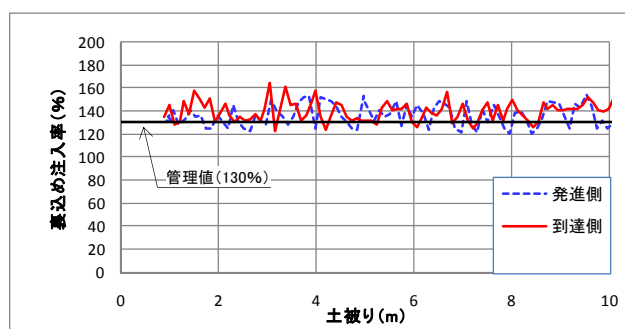


図-11 裏込め注入率の管理結果

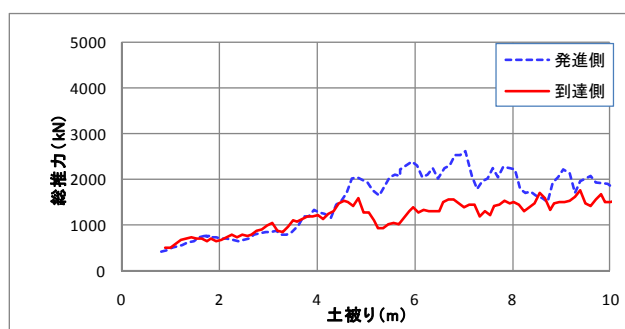


図-12 総推力の管理結果

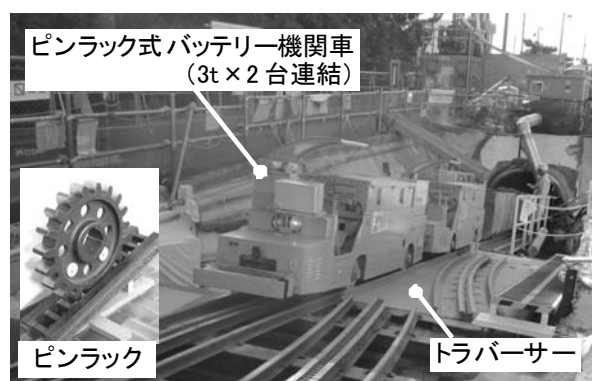


写真-10 ピンラック式バッテリー機関車

## 7. おわりに

以上のように、ガス導管シールド工事に URUP 工法を適用することで、多くの効果を得られることが実証された。また課題となる小土被り部での地表面への影響についても、チャンバー内土砂の塑性流動化を図り、切羽管理を適切に行うことにより、影響を最小限に抑制することが可能であった。

シールドトンネルの急速施工のニーズが高まる中、URUP 工法は今後様々な工事へ適用できる技術であると確信している。

## 参考文献

- 1) 藤木仁成, 井澤昌佳: 地上発進・地上到達シールドの施工, 基礎工, 2011 年 3 月号