

小口径シールド機による急曲線施工

Construction of a Sharp Curved Tunnel by Mini Shield Tunneling Method

泉 朋 哉^{*1} 西 川 学^{*2}
Tomoya Izumi Manabu Nishikawa

【要旨】

津之郷・草戸幹線は必要管径 700mm, 路線延長 1,431.4m で計画された下水管渠である。経済的な比較では泥濃式あるいは泥水式推進工法によるスパン分割施工が選択肢としてあったが、地質条件や立坑用地確保の問題から、急曲線 (R=10m) 施工を伴う仕上り内径 1,000mm の小口径シールド工法が採用された。

本文では、小口径シールドの特徴と一般的なシールド工法の相違点、仕上り内径 1,000mm クラスでははじめてとなる急曲線 (R=10 m) 施工の計画と結果について報告する。

【キーワード】 泥土圧シールド工法 小口径 急曲線 R=10m

1. はじめに

本工事は福山市を流れる芦田川の流域下水道事業の一環として、福山市山手町から津之郷町に至る延長 1,431.4 m に仕上り内径 1,000mm の下水管渠をシールド工法にて新設する工事である。

設計段階では推進工法による分割施工も検討されたが、

バス路線である県道 (幅員 4.0m 前後) と地下埋設物 (NTT10 条) により、立坑構築の制約をうけることから、1 スパンで施工可能な小口径シールド工法での計画となった。なお、ここで報告する急曲線 (R=10 m) は発進立坑から県道へ入る際、史跡 (旧山陽道一里塚) を回避するために設置されたものである。

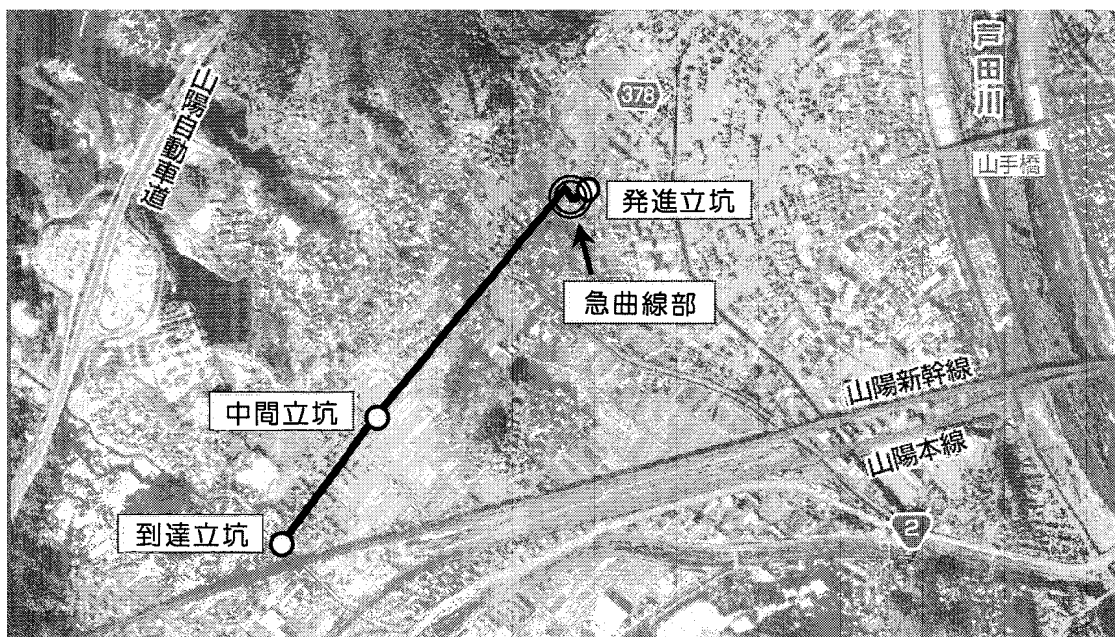


写真-1 シールド路線全景

1. 広島支店 JR 三原作業所 2. 広島支店 尾原ダム作業所

2. 工事概要

2.1 工事概要

工事件名：津之郷・草戸幹線下水道築造工事（その3）

工事場所：福山市山手町三丁目～津之郷町地内

工 期：平成16年6月24日～平成18年3月31日

発注者：福山市下水道部

施工者：飛島・岡 建設工事共同企業体

工事内容：

① シールド工 泥土圧シールド工法

延 長 L=1,431.4m
 掘削外径 φ1,404mm
 セグメント外径 φ1,140mm
 仕上り内径 φ1,000mm
 土 被 り 3.4m～10.4m
 最小曲線半径 R=10m 2箇所
 縦断勾配 1.7 ‰（上り）
 ビット交換 1回

② マンホール工 3号マンホール 3箇所

③ 立坑工

発進立坑 SPIII型（既設） 1箇所
 中間立坑 鋼製ケーシング φ2,500mm 1箇所
 到達立坑 鋼製ケーシング φ2,000mm 1箇所

2.2 地質概要

図-1に地層縦断面図を示す。

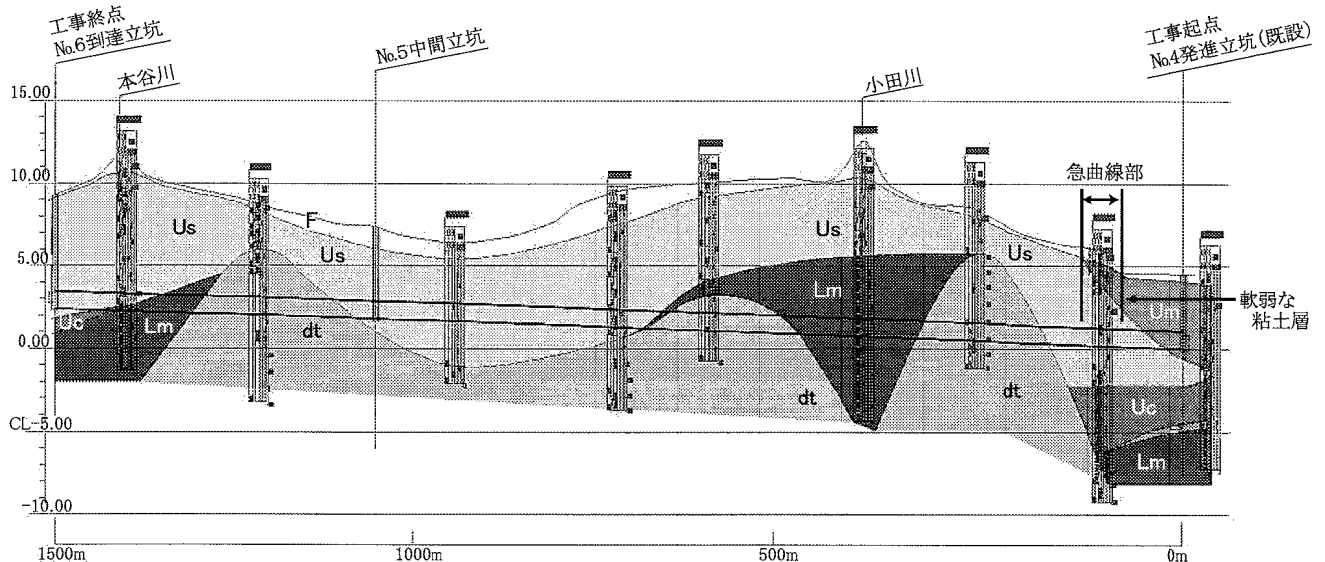
当該工区は芦田川の氾濫により形成された沖積平野の西側に位置する。シールド断面は主としてN値=5～15程度の砂礫層（沖積層）とN値30以上の砂礫（洪積層）を交互に通過する。なお、洪積層ではN値50 最大礫径300mm以上の玉石の出現が予想されるため、ビットの選定と交換時期については慎重に検討する必要があった。

3. 小口径シールド

3.1 シールド機

小口径シールド機の特徴は、仕上り内径φ1,000mmに対応するため、後続台車を設けずシールド機内に電気機器や油圧ユニットがコンパクトに組込まれている事にある。そのため、シールド機の機長は必然的にシールド機外径に比べ8.0m～11.0mと非常に長くなる。このため、曲線を小口径シールド機で掘進する場合、曲線半径に応じて中折れ装置の段数を増やす必要がある。また周面抵抗も大きくなるため、シールド機が地山に拘束された場合、前胴部のみ掘進可能な推進ジャッキと滑材注入孔を備えている。

図-2に小口径シールド機の組立図を示す。



凡	沖積層	F 表土	粘土・シルト(潟湖末期堆積層)	Us 砂・砂質土(河成堆積層)	粘土・シルト(海進時代堆積層)
例	洪積層	Lm 砂礫(扇状地性堆積層、基盤面)	dt 砂質土(崖錐性堆積層)		

図-1 地層縦断面図

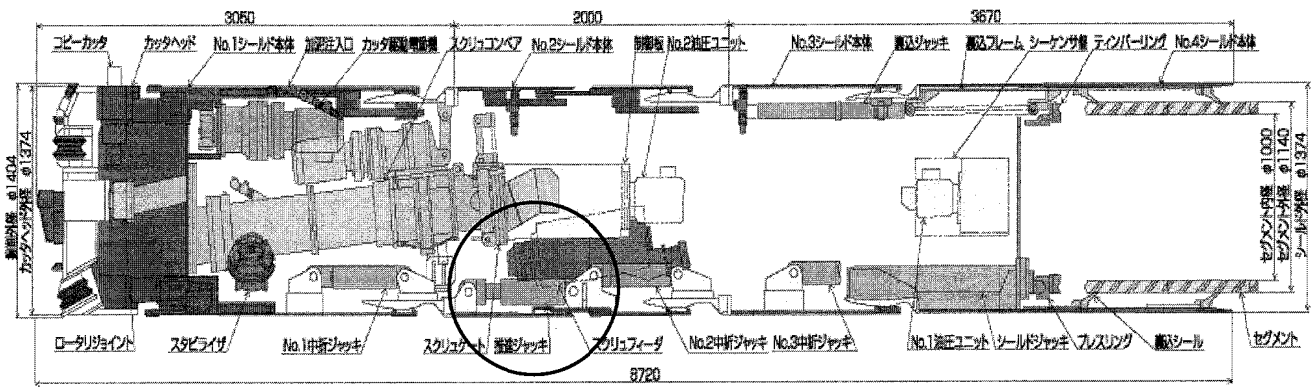


図-2 小口径シールド機組立図 (○部 推進ジャッキ)

3.2 一般的なシールド工法との相違点

小口径シールドも基本的には泥土圧シールドであり、工法的に大きな相違点はないが、断面的な制約を受けるため、セグメント組立や残土搬出、裏込注入の方法が一般的なシールドと若干異なる。また、高圧受電所や中継機器を設置できないため、1,500m を超える長距離掘進では中継基地（立坑等）が必要になる。

表-1 に主な相違点を示す。

表-1 一般的なシールド機との相違点

比較項目	一般的なシールド*	小口径シールド*
【適用工法】	泥水、泥土圧	泥土圧
【形状寸法】		
口径	1,850~10,000mm	1,000~2,000mm
機長	4,000~12,000mm	8,300~10,900mm
縦横比率	1:1~1:1.5	1:4~1:6
【機器】		
送電圧	6600V	440V
カッター駆動	油圧又は電動	電動
後続設備	台車10台前後	機内組込
【運転操作】		
操作盤	坑内又は中央制御室	地上（遠隔操作）
ジャッキ操作	ジャッキ選択又はFLEX	全ジャッキ同時操作
曲線施工	中折装置1段	中折装置2~3段
【残土搬出】		
	ベルコン→鋼車	パキューム→鋼車
	圧送ポンプ→配管	
【セグメント】		
組立装置	機内エレクター	エレクター付セグメント台車
セグメント構造	RC又はST	RC
セグメント幅	1,000~1,200	600
接合方法	ボルト	ナックルジョイント
【裏込注入】		
注入方式	同時又は即時注入	同時注入
注入機器	スライズポンプ	裏込専用ジャッキ
【二次覆工】	コンクリート、FRP	目地コーキングのみ

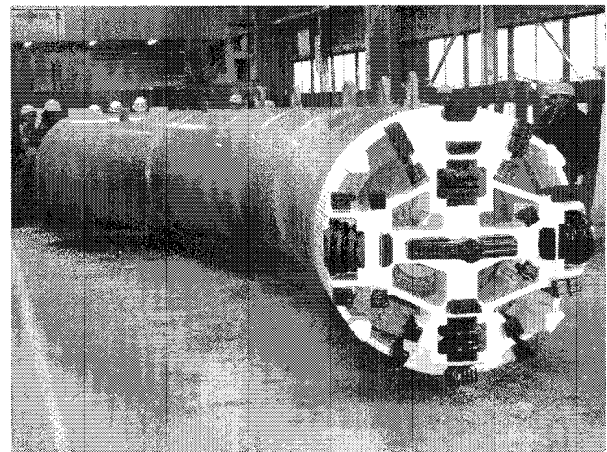


写真-2 小口径シールド機全景

4. 急曲線の施工

4.1 線形

シールドの線形は、R=10m~500m までの曲線が合計18箇所となっている。そのうち R=10mの急曲線区間は発進立坑より約70m地点の比較的交通量の多い交差点部に位置し、一機長分の直線を挟む R=10m のS字急曲線となっている。図-3に急曲線部の線形を示す。

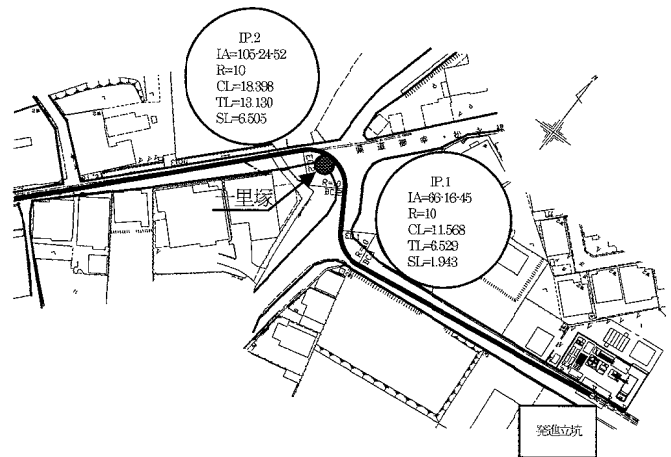


図-3 急曲線部線形図

4.2 中折れ角とシミュレーション

中折れ装置は、曲線半径と機長から3段で計画し、シミュレーションにより、R=10m施工に必要な余堀量と中折れ角度を算定した。

図-4にシミュレーションの一例と表-2に算定中折れ角度を示す。

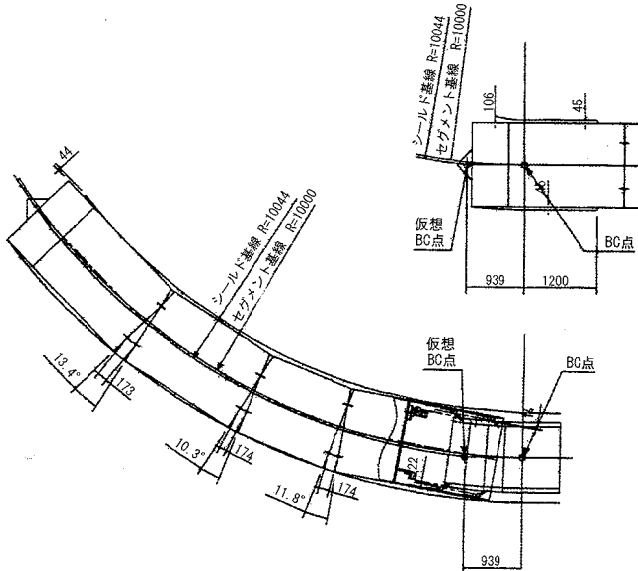


図-4 シミュレーション例

表-2 中折れ角度

中折れ装置	NO.1	NO.2	NO.3
装備能力	13.9°	10.9°	12.6°
R10m時	13.4°	10.3°	11.8°

※1V 形中折方式

※2 装備能力 R9.6mに対応

4.3 補助工法の適用

4.3.1 急曲線部の地質条件

急曲線部の土質はN値20~30と中程度に締まった砂質土であるが、地下水位は高く、透水性は透水係数 10^{-2} cm/sec オーダーと比較的高い。また上部にはN値=10以下の軟弱で不安定な粘土層が存在することから、シールド掘進時の出水や圧密沈下が予測された。(図-1参照)

このため、急曲線掘進時の外周地盤の反力とともに、補助工法の検討を行った。

4.3.2 地盤反力の検討

急曲線部の施工に先立ち曲線外周部の必要地盤反力の検討を行った。

(1) 設計条件 (Bor No.3)

- シールド機外径 $D : 1,374\text{mm}$
- 単位体積重量 $\gamma : 18.0\text{kN/m}^3$
- 内部摩擦角 $\phi : 33^\circ$
- 粘着力 $C : 0.0\text{kN/m}^2$
- 曲線半径 $R : 10\text{m}$
- 土被り $H : 3.271\text{m}$
- N値 $: 26$ (平均)

(2) 必要地盤反力の算定

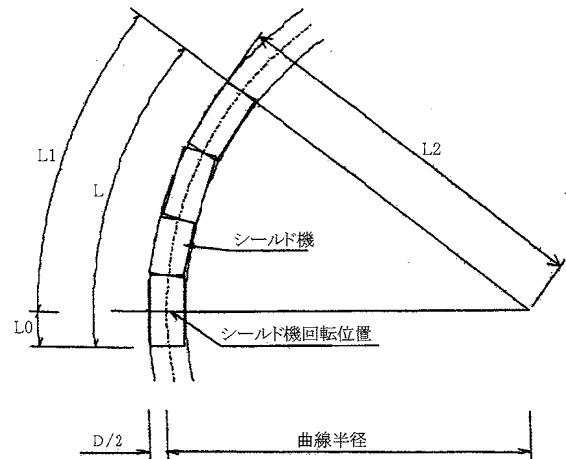


図-5 シールド機の回転位置

L : シールド機長=8.52m

L0 : シールド機回転位置より後部長さ=1.2m

L1 : シールド機回転位置より前部長さ=7.32m

L2 : シールド機全面外側までの回転半径

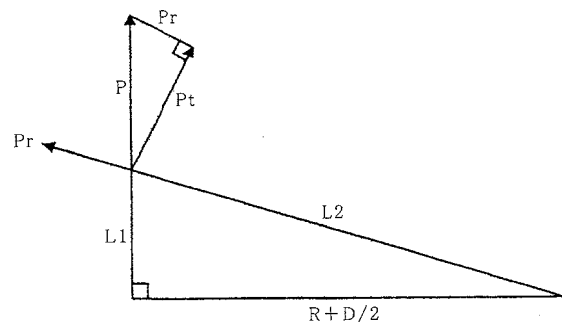


図-6 シールドジャッキの分力

P : シールドジャッキの推量=1600 kN

Pt : シールドジャッキの水平分力

Pr : 外側壁に作用する垂直分力

Pd : 地盤反力度

Fs : 安全率=1.5

$$Pr = \text{外側壁に作用する垂直分力}$$

$$= L1/L2 \times P > Pd \times 1/Fs$$

$$R+D/2=10.687\text{m}$$

$$L2=12.954\text{m}$$

$$Pr = (7.32/12.954)$$

$$\times 1600$$

$$=904.122\text{kN}$$

$$Pd = Fs \times Pr / (D \times L1)$$

$$= 1.5 \times 904.122 / (1.374 \times 7.32) = 89.9\text{kN/m}^2$$

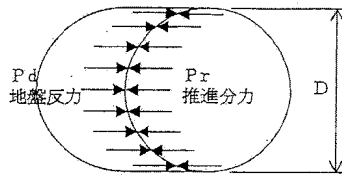


図-7 力のつりあい

(3) 当該地盤の地盤反力の算定

地盤反力については、道路橋示方書（I 共通編，IV 下部構造編）に示す式に基づいて算定する。

$$k = P/\delta$$

k : 地盤反力係数 (kN/m³)

P : 地盤反力度

δ : 変位量 (m) = 0.010m

水平方向の地盤反力係数については、以下の式により求める。

$$k_h = k_{h0} \times (BH/0.3)^{-3/4}$$

k_h : 水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

k_{h0} : 直径 0.3mの剛体円板による水平載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

$$k_{h0} = (1/0.3)^\alpha E_0$$

E₀ : 2800×N 値

α : 1.0

$$k_{h0} = 242667$$

BH : 加重作用方向に直交する基礎の換算積載幅 (m)

$$BH = (D \times L1)^{1/2}$$

$$= (1.374 \times 7.32)^{1/2} = 3.171$$

$$k_h = 242667 \times (3.171/0.3)^{-3/4}$$

$$= 41,395.63 \text{ kN/m}^3$$

$$Pd = k_h \times \delta = 41,395.63 \times 0.010$$

$$= 414\text{kN/m}^2$$

判定 9.9kN/m² < 414kN/m²

したがって、ジャッキ推力以上の地盤反力が現状地盤期待できる。

4.3.3 補助工法の適用

(1) 工法の適否

地盤反力の検討により、シールド外側部への補助工法の適用は不要となったが、急曲線施工時の余堀（設計値 W=106mm）と地下水による地山の崩落や上部の軟弱粘土層への影響を考慮して、補助工法を適用することにした。

(2) 工法の選定

急曲線部の土質条件から補助工法の検討を行った結果、最も経済的で仮設規模も小さい薬液注入工法（二重管ストレーナ工法单相溶液型）を実施した。

(3) 適用範囲

薬液注入工法の適用範囲は急曲線部及びオーバーカットを実施する直線部とした。図-8に適用範囲を示す。

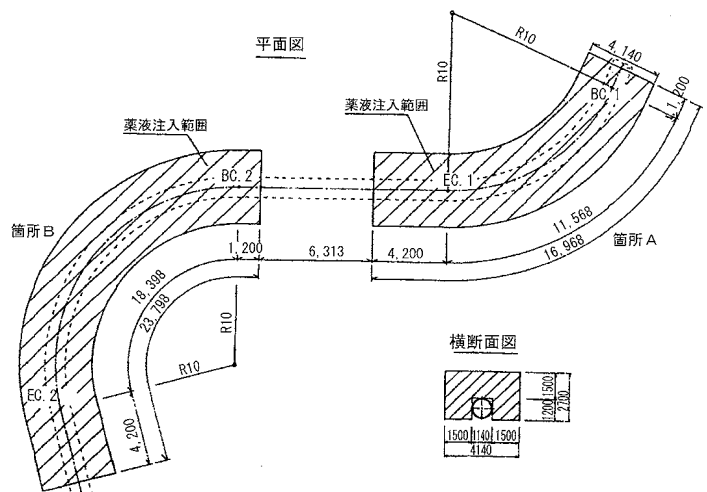


図-8 補助工法の適用範囲

4.4 急曲線の施工

急曲線施工で重要なことは余堀部の確保とセグメントリング間の剛性，確実な裏込注入の実施である。

4.4.1 余堀の確保

コピーカッターの配置が面版の構造上制約を受けるため，かなり後方の配置となり，余堀部掘削土の取込不足が懸念されたため，カッタースリットの幅を下部だけ10cmに拡幅した。また余堀部の崩落を防ぐため前胴に設置した加泥注入工からクレーショックを注入した。

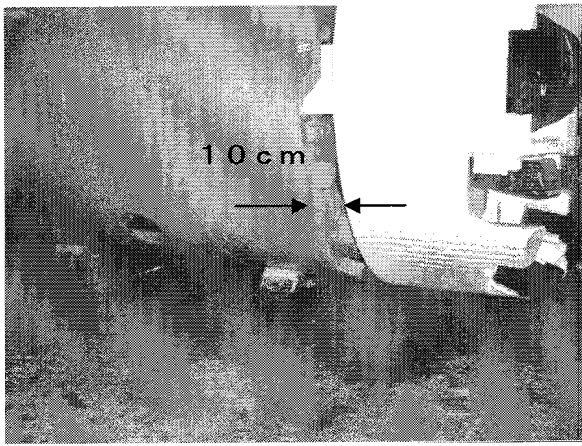


写真-3 カッタースリットの拡幅

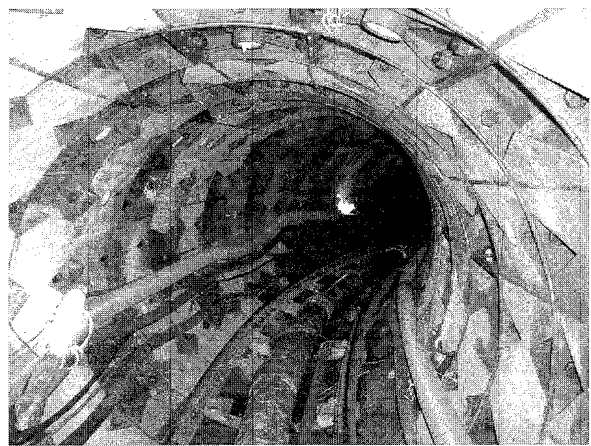


写真-4 急曲線部スチールセグメント

4.4.2 セグメントの割付

設計では2曲線間の直線部は、一部ナックルジョイントのRCセグメントであったが、シールドジャッキの垂直分力に対して、より剛性の高いスチールセグメントによるボルト結合とした。なお、急曲線部におけるシールド機テール部とセグメントのせりに対しては修正セグメント(スチールW=125mm、テーパ量25mm)を準備した。

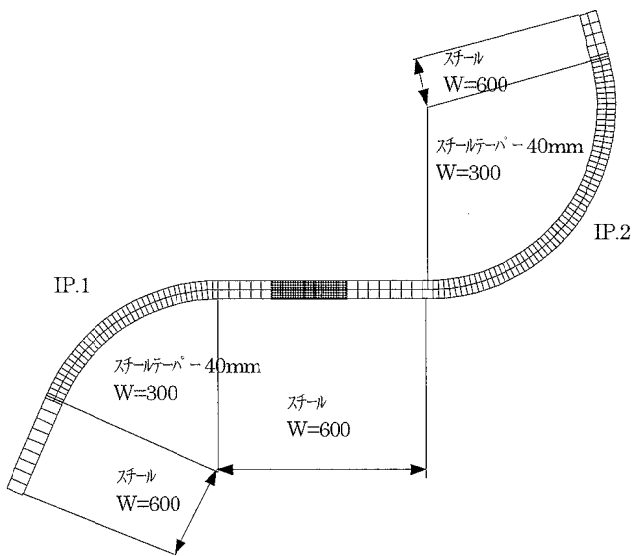


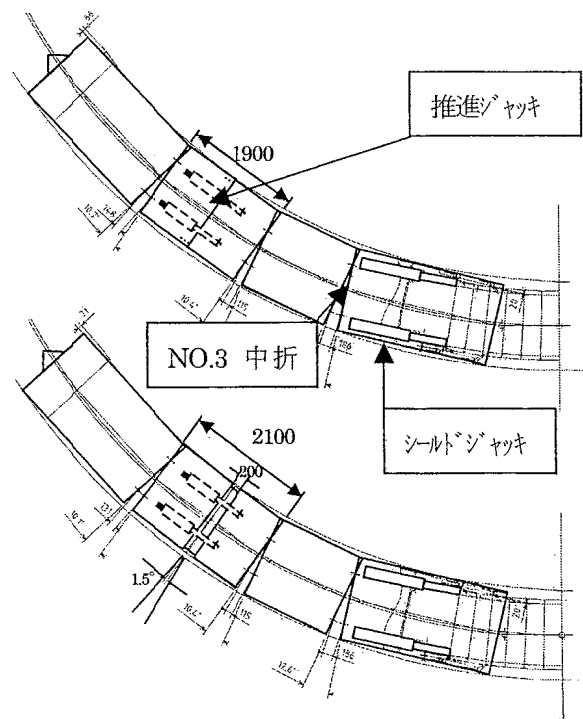
図-9 セグメント割付図

表-3 セグメントの割付

位置	セグメント	ジョイント	幅 (mm)	テーパ量 (mm)
R=10m部	スチール	ボルト	300	40
修正セグメント	スチール	ボルト	125	20
直線部	RC	ナックル	600	—
曲線出入口部	スチール	ボルト	600	—

4.4.3 推進ジャッキによる掘進

急曲線部においてシールド機が地山に拘束された場合を考慮し、推進ジャッキを装備した。推進ジャッキは中胴部に設けられたジャッキで、地山に拘束された場合、前胴部のみで推進することで周面の摩擦抵抗を減らし、地山との縁切を可能にしたものである。この場合、比較的余裕のある No.3 中折れを限界まで曲げ、推進ジャッキで 200mm まで掘進しストローク差をつけて 1.5° 曲げる。この時 No.1 中折れ角に余裕ができるため、上下方向の不陸修正が可能となる。



※ 推進ジャッキ使用後はシールドジャッキ連動運転で 200mm 戻す

図-10 推進ジャッキ模式図

4.4.4 ローリング防止

小口径シールドの場合、急曲線部ではローリングを起こし、前胴部が下がる傾向にある。このため、前胴部にローリング防止のスタビライザーを装備し、中折れを上向き 0.5° から 1.9° 使用してローリングによる前胴部の下がり防止した。(計画では 1.0° を予想)

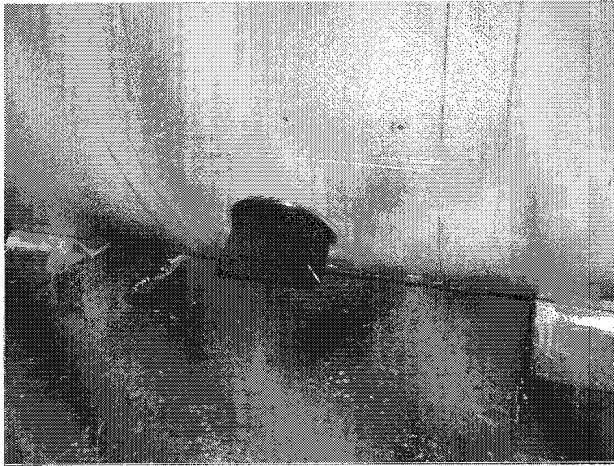


写真-5 前胴部のスタビライザー

4.4.5 急曲線部の掘進実績

急曲線部の施工では、一般のシールドと同様、スクリーコンベアや軌条、配管の段取り換えの他、プレスリングのストローク調整や裏込ジャッキの調整が必要になる。なお、実施工では局部的な玉石の出現もあり1ヶ月弱の期間を要した。表-4に急曲線部の施工実績を示す。

5. おわりに

津之郷・草戸幹線下水道築造工事(その3)は平成17年2月3日に発進後、1,000m地点の中間立坑でビット交換を実施し、平成17年11月20日約9ヶ月の工程で到達した。

表-4 急曲線部の施工実績

■期間	平成17年3月22日~4月16日
■稼働日	23日
■掘進日	17日/27方
	裏込ジャッキ調整0.5方×4回含む
■トラブル他	6日(玉石除去)
■平均日進量	2.9m/day
	1.8m/方
■最大日進量	16R/day
	4.8m/day
	2.4m/方
■平均推力	500~700KN
■最大推力	1,480KN (装備推力1,600KN)
■余堀量	直線出入口部 120mm (5時~7時方向)
	10R部 120mm (1時~5時方向)
■中折角	水平方向 NO.1 12.77° (13.4°)
	NO.2 9.9° (10.3°)
	NO.3 12.0° (11.8°)
	上下方向 NO.1 1.9°
■ローリング	$-3.1^\circ \sim 9.9^\circ$
■推進ジャッキ	2回使用
■線形	R=9.96m~10.05m

急曲線施工で改良したカッタースリットの拡幅やローリング対策、推進ジャッキによる掘進と修正セグメントの使用等は一定の成果をあげることができた。

今回報告した小口径シールドによるR=10mの急曲線施工は国内でははじめての試みであったが、本社及び大阪支店シールド専門委員会や広島支店の方々のご指導をいただき、線形計画からシミュレーションまで幾度も検討を重ね、無事竣工することができた。この実績により小口径シールドの適用範囲がさらに広がるものと思われる。この紙面をお借りして謝意を表します。

Summary : The Tsunogo-Kusado Trunk Line is a sewer culvert planned with a length of 1,431.4 m and required minimum diameter of 700 mm. There were other choices of construction methods from the economical aspect, such as construction of separate spans by slurry jacking or thick slurry jacking. However, the mini-shield tunneling method with a finished bore diameter of 1,000 mm involving sharp curve tunneling ($R = 10$ m) was adopted to cope with the ground conditions and difficulties in securing the shaft sites.

This paper reports on the characteristics of mini shield tunneling, the differences from general shield tunneling, and the planning and results of the sharply curved tunnel with a curve radius of 10 m, which is unprecedented for a tunnel with a finished bore diameter level of 1,000 mm.

Keywords : mud pressure shielding, small diameter, sharp curve, $R = 10$ m