

泥土圧式シールド工法による急曲線施工 Construction of Curve Driving by Mud Pressure Shield

富士川 義則* 山下 晋由*
Yoshinori Fujikawa Kuniyoshi Yamashita

要 約

中規模シールドトンネル工事において、先例のない一級河川氾濫域にあたる『全般に渡り地下水の非常に多い沖積シルト混り砂層および洪積砂礫層』下に連続して計画された急曲線に対して、中折れ型泥土圧式シールド機による施工で良好な結果を得ることができた。本文では、連続急曲線の内、最も条件の厳しかった曲線半径 $R=10\text{m}$ の施工実績を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 施工環境および土質
- § 4. シールド掘進計画
- § 5. 施工実績
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

堺市鳳浜寺地域は、一級河川石津川および支川の三光川に接する地域であり、大雨等により過去幾度となく洪水にみまわれており、地域住民の生活に支障が生じている。本工事は、これを解消するために堺市が進めている鳳浜寺排水区下水道計画の内、最上流部の堺市浜寺船尾

町西他地先に、仕上り内径 $\phi 2000\text{mm}$ の管渠を1294m築造するものである。特に、当施工区域は、道路が網の目状になっているため、工事の特徴として、全体の約30%が曲線で占められている。本文では、数多い曲線部施工の内、最小急曲線部 $R=10\text{m}$ の施工について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 全体工事

工 事 件 名：浜寺船尾町雨水準幹線下水管布設工事
発 注 者：堺市建設局下水道部
工 事 場 所：堺市浜寺船尾町西他地先
工 期：平成7年9月28日～平成10年3月31日の
内、シールド掘進期間はH8.7～H9.4の
約10ヶ月間
施 工 者：西松・村角・長太建設工事共同企業体
セグメント外径： $\phi 2,750\text{mm}$

*関西(支)浜寺(出)

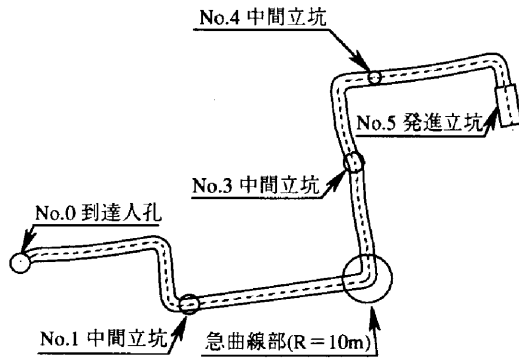


図-1 シールド路線図

路線延長： $L=1,294.049\text{m}$

一次覆工延長： $L=1,286.599\text{m}$

二次覆工延長： $L=1,282.049\text{m}$

立坑築造工：4基

人孔築造工：5基

薬液注入工：急曲線防護他一式

付帯工：1式

以上、全体工事の内、最急曲線部 $R=10\text{m}$ 区間の諸元を次項に示す。

2-2 最急曲線部

平面線形：右カーブ、 $R=10\text{m}$ 、 $IA=87^\circ 56' 20''$

$CL=15.349\text{m}$ 、 $TL=9.647\text{m}$ 、 $SL=3.895\text{m}$

縦断線形：下り勾配 $i=2.7\%$

セグメント：縮小 $\phi 2,690\text{mm} \times B300\text{mm}$

テーパ量 $\Delta t=74\text{mm}/\text{Ring}$

切羽土質：洪積砂礫層（礫径 $\phi 20\text{mm}$ ）

平均土被り $H=7.493\text{m}$

平均地下水位 GL-1.76m

曲線防護：二重管ダブルパッカー全断面改良 142m^3

主要地下埋設物：ガス中圧導管 $\phi 200\text{mm}$

水道管 $\phi 200\text{mm}$

圧送管 $\phi 1,200\text{mm}$

道路幅員：東西道路 $B=4.8\text{m}$ 、南北道路 $B=5.9\text{m}$

官民境界：管渠部離隔 $\Delta t=100\text{mm}$

（当初設計 $\Delta t=48\text{mm}$ ）

§ 3. 施工環境および土質

3-1 施工場所

(1) 立地条件

急曲線 $R=10\text{m}$ は、全体掘進延長のほぼ中間に位置し、シールド発進後、急曲線 $R=15\sim 20\text{m}$ の曲線部2箇所を掘進した後の施工となる。急曲線前半は平均幅員約 5.9m 、



写真-1 急曲線上部着工前

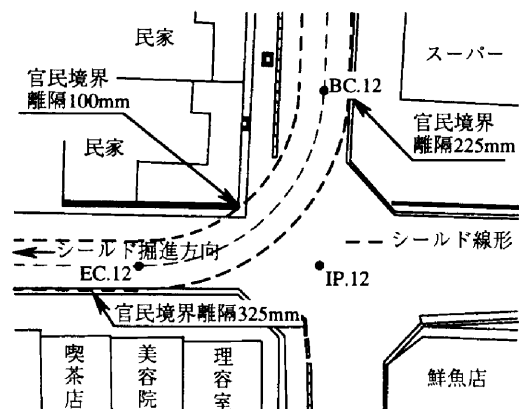


図-2 急曲線概要図（ $R=10\text{m}$ ）

後半は平均幅員約 4.8m の幅員の狭い地域住民の生活道路での施工である。掘削影響範囲に隣接家屋は全て入り、これら家屋に支障を与えない様に施工しなければならない。また、路上作業時、地下埋設物および第三者行人等に対して、災害を与えてはならない。

住宅密集地の中での地盤改良工事でも、シールド掘進工程に基づき、予め施工完了し、シールド機の接近を迎えた。急曲線地上部着工前の状況を、写真-1に示す。

(2) 地下埋設物

当区間のシールド平均土被りは $H=7.5\text{m}$ である。直上付近に中圧ガス導管 $\phi 200\text{mm}$ 、水道管 $\phi 200\text{mm}$ 、下水道圧送管 $\phi 1,200\text{mm}$ および各枝管が併走しており、シールド機との離隔は $4.8\text{m}\sim 7.6\text{m}$ である。すべて移設は不可能である。

急曲線部の施工概要を図-2に示す。

3-2 切羽部土質（土質調査に基づく）

①土質：洪積砂層～砂礫層の互層 N値7～45

②推定粒度構成：礫分（最大粒径 20mm ） 32%
砂分 55%
細粒分（バインダー分） 13% } 計 100%

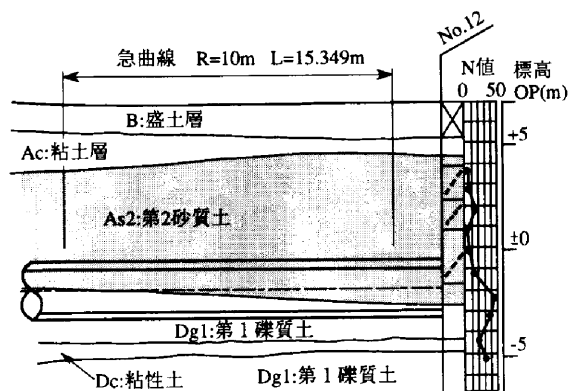


図-3 急曲線部土質想定図

③地 下 水：地下水位 GL-1.76m

透水係数 $1.4 \times 10^{-2} \sim 1.8 \times 10^{-1}$
cm/sec

④現 地 特 性：・シールドの縦断勾配は下りの $i=2.7\%$ 。
・江戸末期頃、波止場だったらしい。
・現在、横断方向左側が陸地、右側が岸となっており、地下水の流れも左より右への勾配となっていると思われる。

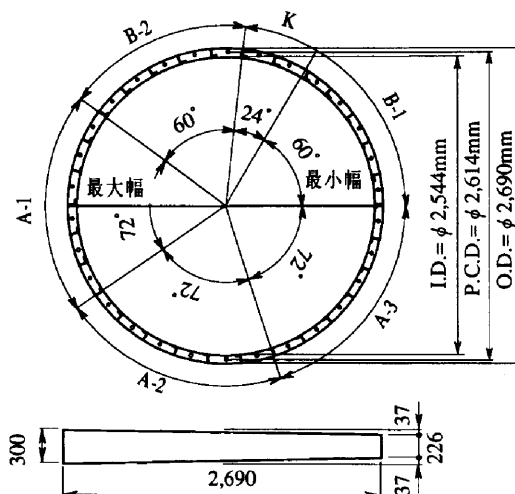


図-4 異形セグメント

§ 4. シールド掘進計画

4-1 施工検討

実際の施工性等を勘案して、企業先および社内シールド施工委員会等で種々検討を加えた。以下の内、(1)、(4)、(5)は当初設計を見直したが、(5)以外は設計変更が認められなかったため、施工承諾で対応した。

(1) セグメント

当初設計では、セグメント外径 $\phi 2,650\text{mm} \times$ 標準幅 $300\text{mm} \times$ テーパー量 $\Delta t=86\text{mm}$ の組合せで計画されていたが、シールド機テール内でのクリアランスが $\Delta t=80\text{mm}$ と異常に大きく、テールシールによる止水効果に問題があった。そこで、以下の検討によって、セグメント仕様を見直した。

a) 曲線半径、セグメント外径、セグメント幅、異形セグメント使用率に応じた、適正なテーパー量を設定した。異形セグメントを図-4に示す。

$$\begin{aligned} \text{テーパー量 } \Delta &= \frac{(n/m \cdot B + B_T) \cdot D_0}{R + D_0/2} \\ &= \frac{(0/1 \times 300 + 300) \times 2,600}{10,000 + 2,690/2} \\ &= 71.1 = 74\text{mm} \end{aligned}$$

ここに、標準セグメント幅： $B = 300\text{mm}$

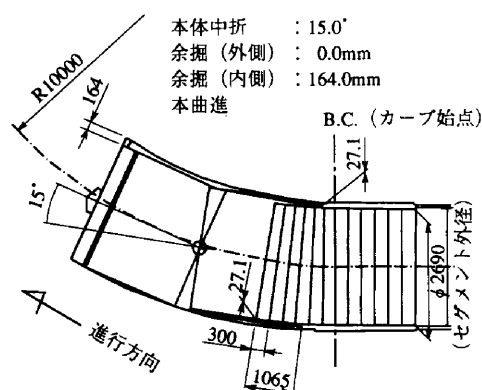


図-5 急曲線 (R=10m) シミュレーション

異形セグメント幅： $B_i = 300\text{mm}$

曲率半径： $R = 10,000\text{mm}$

セグメントの外径： $D_0 = 2,690\text{mm}$

標準型と異形型の組合せ比率： $n/m=0/1$

b) シールド掘進機とセグメントの軌跡を図化し、テール内でセグメントが競らないように、十分なクリアランスを確保できていることを確認した。急曲線部でのテールとセグメントの競りをシミュレートした結果を図-5に示す。

c) セグメント一般部より縮小部への外径差 ($30\text{mm} \times 2 = 60\text{mm}$) の移行を、スムーズに行うために、特殊セグメントを現場で作成した。特殊セグメントの概要を図-6に示す。

(2) シールド掘進機仕様

シールド掘進機の仕様を表-1に示す。

(3) セグメントシール仕様

以下の点に留意し、ピノンハイドロタイト SS-0220を採用した。

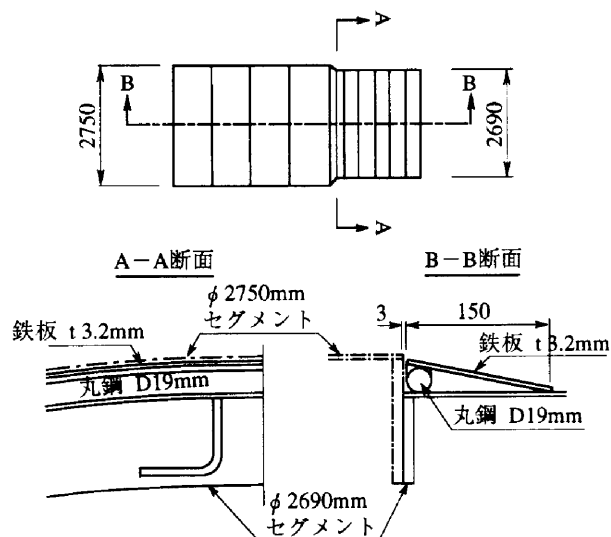


図-6 特殊セグメント

- ①セグメント継手部目開きに対して、シール材が追従し止水効果が十分に得られること。
- ②シールドジャッキ推力の繰り返し荷重に耐える弾性復元性を有すること。
- ③剥離や脱落が起こり難いこと。
- ④塑性化等劣化防止および耐久性に優れ、施工性の良いこと。

(4) 作泥・裏込め注入

当初設計では、作泥材と裏込め材が別々のプラントで計画されていたが、発進基地スペースの有効利用および経済性の観点から、両方を同一プラントで作成できる配合とした。また、当初設計では、急曲線部での作泥材の添加、余掘り部への裏込め充填数量を考慮していなかったが、急曲線の円滑な施工のために、チャンパー内への作泥材の添加、シールド機から余掘り部への作泥材の充填、裏込め材の確実な充填を実施した。以下に各仕様を示す。

a) 裏込め注入材仕様

テールボイドに地山と同等以上の強度がある注入材を充填し、地山の緩み防止、セグメントの早期安定および漏水の防止を目的とする。裏込め注入材の配合を表-2に示す。

b) 加泥材仕様

掘削土砂に注入～攪拌することで、掘削土砂を塑性流動化させ、適度な流動性と止水性を持たせることを目的とする。チャンパー～スクリーコンベア内土砂を塑性流動化させ、掘削～排土を円滑に行うことで、切羽土圧を一定に保った安定した掘進が行える。当該地盤は地下水の非常に多い洪積砂礫層であるため、噴発防止対策も講じた。加泥材の配合を表-3に示す。

表-1 シールド掘進機仕様表

条 件	特 性	装 備 内 容	仕 様 ・ 他
線 形	平面 (R=10m) 縦断面 (i=2.7%)	中折れ角度(左右)	計算=15.0° 装備=15.0° 実折可能=16.0°
		— (上下)	縦断及び蛇行=1.0°
		コピーカッター	計算=164.0mm 装備=230.0mm
		スクリー コンベア	水平移動可能とすべく 球面支持構造
		テールシール	止水性・耐久性に優れていると同時に、縮小セグメント対応としてブラシ長を長くしたワイヤーブラシタイプ2段 ブラシ長：内側200mm 外側300mm 裏込め注入逆流防止板 (バネ付)
		方向制御 面板(カッターフェイス)	ジャッキ・リフト・内蔵 Y字スポークタイプ 開口率64%
土 質	洪積 砂礫層	スクリー コンベア	φ370mm×L6.24m 機径150mm対応 リフト・リフト・外周駆動方式 噴発防止対策としてゲート 開閉方向を全面とした。
		加泥材・ 中間充填材注入口	φ50mm(8-16mm付) シールド機内に10箇所装備
		裏込め注入口	7箇所同時注入装備は不可 セグメントよりの即時注入
その他	地中存地 障害物	人用マンホール	□-450mm×600mm:1基装備 チャンパー内に入出可能
	縮小 セグメント	リフト・リフト調整用	16mm×730mm帯ゲート 両下段に溶接止
	組立	吊具調整	エレベーター調整器具を使用
	後方装備	坑内台車連結	各台車間連結ピン一時取り外し、けん引専用ピン及びワイヤーで再連結
		坑内各設備	ベルトコンベア、軌条、各種配管等急曲線加工した物を使用
		安全設備	各後方台車脱線防止 (ワイヤ等で転倒防止) 掘削時、後方台車間通行不可故に、通信システム 完備

表-2 裏込め注入材配合表 (1m³あたり)

A 液					B 液
硬化剤	助剤	気泡剤	安定剤	水	空気量
270kg	130kg	0.5kg	2.2kg	630t	13.5%

ゲルタイム 7秒 1時間強度 0.17N/mm²
24時間強度 1.22N/mm² 28日強度 3.08N/mm²

表-3 加泥材配合表 (1m³あたり)

助剤	水	比重	粘 性	使 用 目 的
520kg	800t	1.3	500～1000cp	掘削土砂防止及び塑性流動化
650kg	750t	1.4	3000～4000cp	〃

注) 噴発防止対策として、TACスルー原液～100倍液を使用した。

c) 中間充填材仕様

急曲線施工時には、両サイドに余掘りが発生する。この余掘り部の地山の崩壊を如何にして抑えるかが、急曲線施工の成否を決定する。シールド機内からシールド機周囲に、中間充填材を注入する。中間充填材の配合を表-4に示す。

(5) 急曲線防護

当初設計では、二重管ダブルバッカー工法で、シールド上半の門型断面を地盤改良する計画であったが、当該急曲線部は余掘り量が大きいため、余掘り部の自立性～近接家屋への沈下の影響、軟弱地盤でのより確実な地盤反力の確保について問題提起した結果、図-7に示すように全断面改良に設計変更となった。なお、地下埋設物の移設が不可能であったため、注入材の廻り込みによる地下埋設物の隆起が発生しないように、地下埋設物間にはガイドパイプを使用した。

4-2 シールド施工管理基準

(1) 施工基準

①シールド機が急曲線掘進する場合、計画曲線手前より順次余掘りが必要となる。

②この余掘部が崩壊しないよう、中間充填材を注入する。

③急曲線施工シュミレーションに基づき、掘進施工する。

(2) シールド掘進管理要素

掘進管理要素の骨格を図-8に示す。

(3) 測量管理

①基本管理方法

座標管理方式（地上設置主要点座標は予め測量済み）、およびYEWMACシールド工法管理システム（スタッフ方式）

②坑内実施測量

2R～3Rに1回（0.6m～0.9mに1回）

③中心線の変更

当初、曲線内側の最も狭い官民境界離隔が48mmであった。外側に対してはかなり余裕があったため、企業先と協議し共に平均100mm前後取ることとし基線を外側へ72mm全体的に移動した。この結果、最も狭い曲線内側の官民境界離隔は100mmで出発することとなった。

(4) 施工管理

①以上に述べた「施工・管理両基準」に基づき、シールドを掘進管理するが、使用材料等受払管理も十分に行い、施工に支障なきよう努める。

②坑内外の安全管理も十分に行い、作業員および第三者に対する各種災害を防止する。

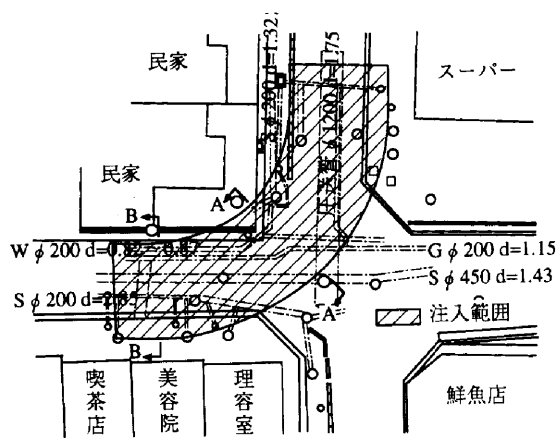
③昼夜間連続作業につき、作業間連絡、調整を確実に行う。

(5) 管理基準

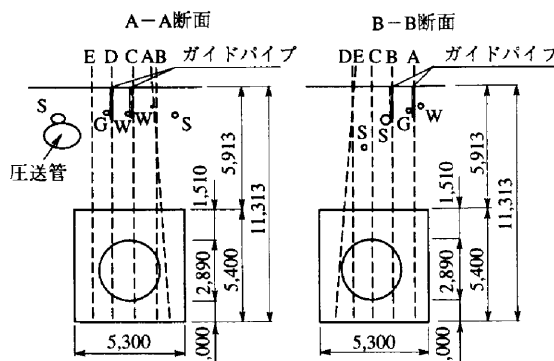
掘進管理基準を表-5に示す。

表-4 中間充填材配合表（1m³あたり）

A 液		B 液
助剤	水	塑強調整剤
520kg	800t	50t



a) 平面図



b) 断面図

図-7 地盤改良計画図



図-8 掘進要素骨格図

表－５ 掘進管理基準表

種 別	管理諸元	算定基準・他	管理基準値	管理頻度
シールド掘進	中折れ角度および 余掘り量	シールド機，急曲線施工のシミュレーションに よって設定.	図－10～11参照	1 回/R
	チャンパー内土圧	主働土圧 1.3kgf/cm^2 ，静止土圧 1.7kgf/cm^2 を基に 設定.	$1.5\sim 1.8\text{kgf/cm}^2$	
	排土量	$V = \{ \pi BD^2/4 + \text{余掘量(長方形で近似)} + \text{加泥量} \} \times \text{フケ率}$ $= \{ (\pi \times 2.89^2/4 + 2.89 \times 0.16/2) \times 0.263 + 0.1 \} \times 1.15$	$= 2.17\text{m}^3/\text{R}$	
裏込め注入	注入量	$V = \pi B(D_o^2 - D_i^2)/4 + \text{余掘量(長方形で近似)}$ $= \{ \pi \times (2.89^2 - 2.69^2)/4 + 2.89 \times 0.16/2 \} \times 0.263$	$= 0.29\text{m}^3/\text{R}$	
	注入圧	土被り圧 2.4kgf/cm^2 を基に設定.	2.0kgf/cm^2	
作泥注入	注入量	チャンパー内固着防止のため，必要に応じて注入.	—	
	注入圧	管理土圧に準じた.	2.0kgf/cm^2	
中間充填注入	注入量	余掘りにより変化するため，注入圧管理とした.	—	1 回/日
	注入圧	管理土圧に準じた.	2.0kgf/cm^2	
地表面沈下	路面	レベル測量	$\pm 10\text{mm}$ 以内	1 回/日
	各種人孔蓋	同上	同上	
近接構造物 への影響	家屋調査	目視観察	特になし	事前事後 1 回/日
	ブロック塀	倒れ測量	同上	
	電柱	同上	同上	
安全	坑内各設備	軌条，各種配管，電気，安全通路他	—	1 回/片番
	後方台車	シールド後方設備の脱輪，脱落等	—	1 回/R
	路上	シールド掘進区間地表面影響等の路面巡視	—	1 回/片番

§ 5. 施工実績

5-1 施工実績

施工実績をグラフで整理した結果を図－9～10に，施工状況を表－6に示し，施工結果を以下にまとめる．なお，グラフではリングNo.0（実No.981）がB.C.を，リングNo.61（実No.1041）がE.C.を示している．

（1）裏込め注入

①平均注入圧 $P=3.22\text{kgf/cm}^2$

②平均注入量 $V=0.51\text{m}^3/\text{R}$ （注入量率176％）

（2）作泥注入

①スクリーコンベアより出てくるズリの状態を目視しながらの注入であった．

②全体的には全断面地盤改良域でもあったため，作泥材使用は少なかった．

③平均注入量 $V=0.08\text{m}^3/\text{R}$

（3）中間充填注入

①余掘部の地山の崩壊を防ぐため中間充填材を注入した．中間充填材は余掘りによって所要注入量が変わるため，量管理が困難なことから，注入圧で管理した．

表－6 急曲線施工結果

セグメント No.	曲線 区間	組立セグメント	シールド機掘進
981R	BC手前 15cm	・BC手前15cmより異形 セグメント使用	計画に基づく掘進 良好
987R / 1006R	BC +1.6m / +6.6m	・曲線曲がり大きくなり， 計画より全体的に右（曲線内側） に位置． 平均右 28mm ・計画に戻すべく1001R で標準セグメント使用	計画に基づく掘進 良好
1007R / 1028R	BC +6.6m / +12.5m	・その結果，計画より 左（曲線外側）へオーバー ランした． 平均左 34mm	計画に基づく掘進 シールド機とセグメントとの 追従曲線軌跡にズレが生じた しセグメント左面（曲線外側） とテールとのクリアランスが なくなり，セグメントが生じた
1029R	BC +12.5m	・シールド機曲線軌跡と調整 させるべく特別異形セグ メント（テール・重200mm） 加工，組立行なった．	全上の現象が大きくなり， シールド機とセグメントの 曲線軌跡を調整させるため 特別措置（全左）を取った．
1030R / 1040R	BC +12.7m / +15.3m	・その結果，当初通りの 異形セグメントが組立可 能となった． ・曲線EC付近で計画中心 へ戻った． 平均左 26mm	計画に基づく掘進 良好

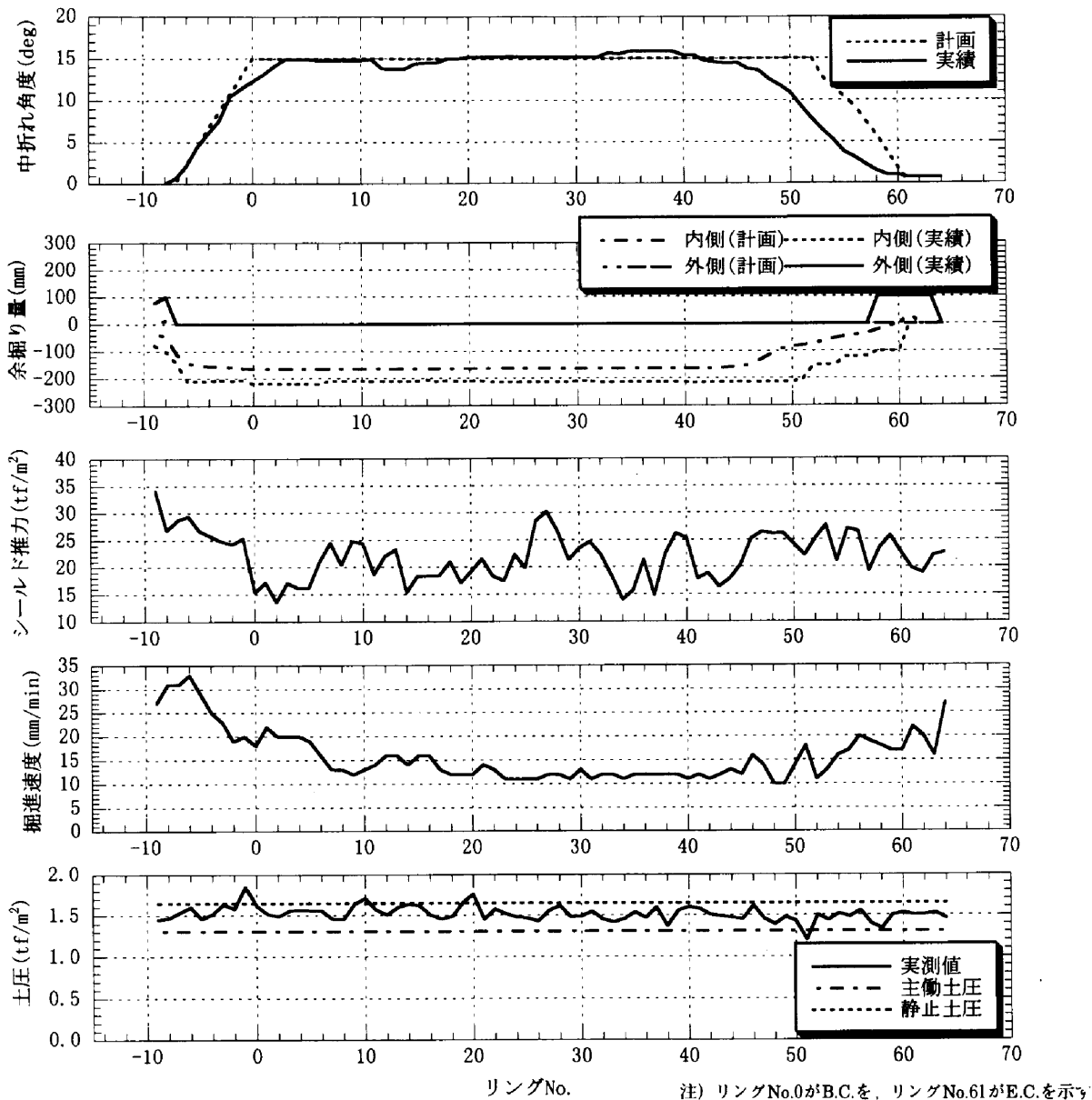


図-9 施工実績 (その1)

②注入効果の確認はできなかったが、掘進結果より良好であったと思われる。

(4) 地表面沈下

沈下はなく、裏込注入による隆起が若干生じたが、隆起量は2～5mmと問題ない値であった。

(5) 構造物への影響

変状はなかった。

(6) 安全

①1,029R付近の蛇行が大きい場所においては、軌条設備修正を行った。

②坑内外共に、作業関係者および第三者災害なしで、当該施工を終了した。

5-2 施工上の留意点および今後の課題

前項でも述べた様に、厳しい悪条件の中、先例のないR=10mという急曲線施工にも拘わらず、全体的に良好な成果を上げることができたが、今後の同種の工事に対する提言として、本工事で得られた施工上の留意点および今後の課題を以下に列挙する。

(1) シールド掘進機

a) 中折れ角度

シールド機の方角制御をシールドジャッキで行うのは困難なため、中折れ角度の調整によって行う場合が多い。蛇行修正も考慮して、中折れ角度は計算値よりも1°位大きく設定しておく必要がある。

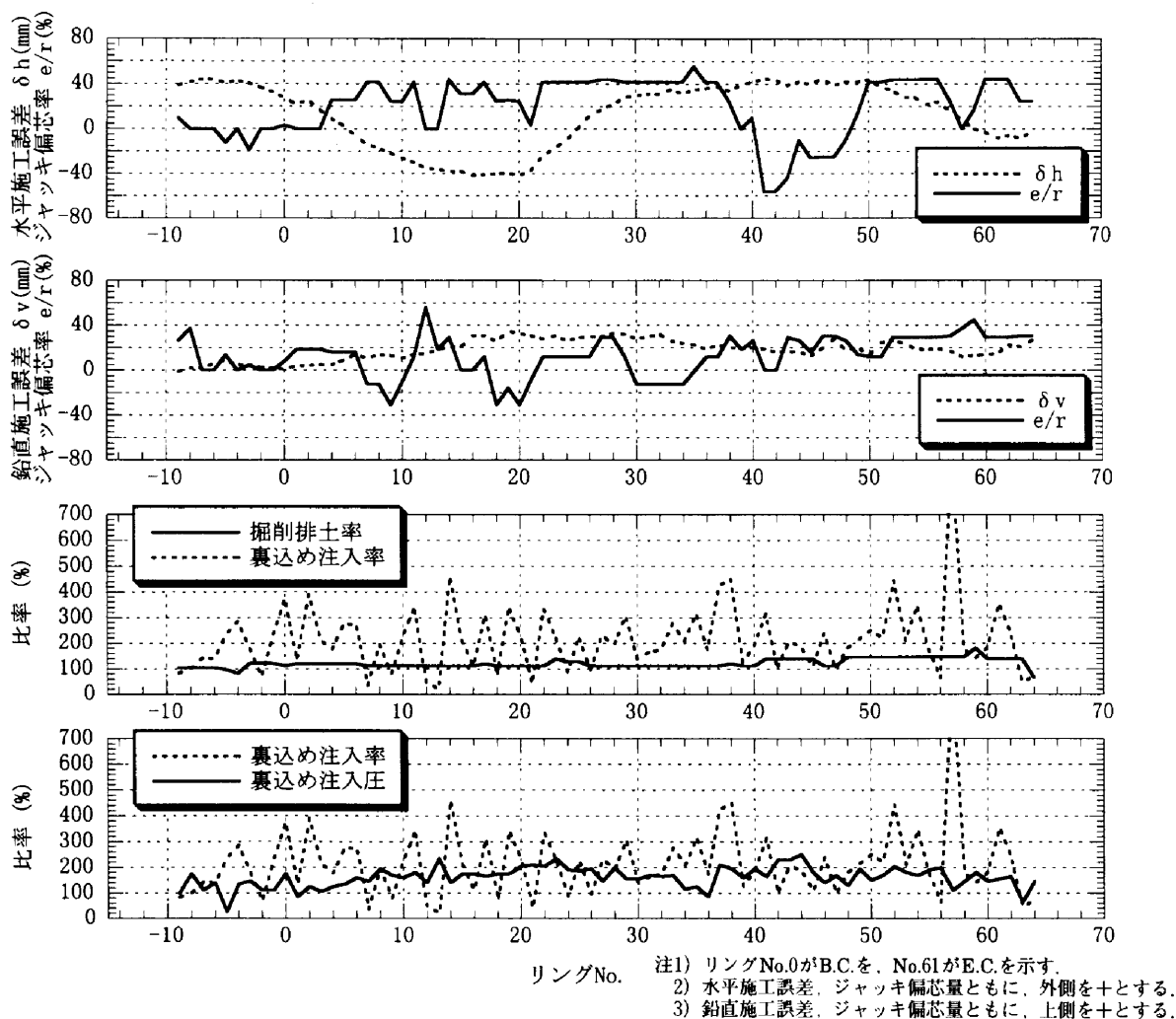


図-10 施工実績 (その2)

b) ローリング

シールド機のローリング修正が, 断面線形に大きく影響する傾向があると思われる。また中折れ角度が大きくなるにつれローリングの修正が困難となるため, BC手前でローリングをできるだけ0付近に修正し, 急曲線施工中も, カッター正逆回転等行いながら常にローリング0の姿勢に戻す様に心掛ける必要がある。

(2) 異形セグメント

今回使用した異形セグメントはテーパ量74mmの1種類であったため, シールド機の蛇行への対応が困難であった。今後, 急曲線部セグメントの計画にあたっては, テーパ量の異なる2種類以上の異形セグメントを準備する様心掛ける必要がある。

§ 6. おわりに

平成8年7月にシールド機が発進し, 当初最も危惧していた軟弱地層下の最急曲線施工も同年12月に全て所定の成果を得て, 発進より約10ヶ月を経た平成9年4月に

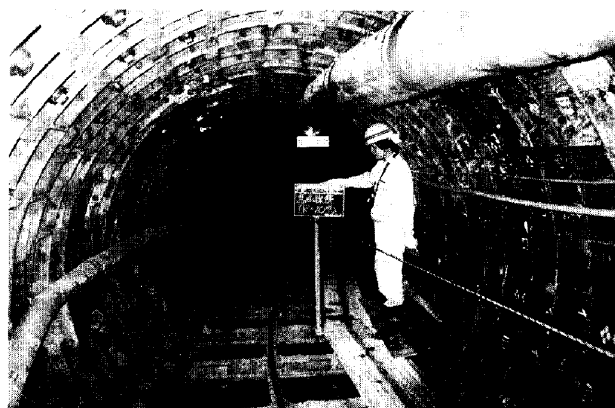


写真-2 曲線部坑内

無事到達した。本文が今後の同様な施工に際し, 少しでも参考になれば幸いである。

最後に, 当工事の計画・施工にあたり, 御指導頂きました関係各位に深く感謝致します。