

軟弱沖積層におけるコンパクトシールドの施工報告

The report about application of the compact shield tunneling method in the soft alluvium

北本 正弘*

Masahiro Kitamoto

要 約

本工事は仕上がり内径 ϕ 1,800 mm, 施工延長 945.85 m の雨水管渠をコンパクトシールド工法（泥土圧シールド機）にて築造する工事である。N 値 0 ～ 2 の高含水で軟弱なシルト層において、4 箇所急曲線（最小曲線半径 $R = 15$ m）を施工した。

本稿は機長 $L = 10.1$ m, 2 段中折れ機構を持つコンパクトシールド機の施工について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 地質概要
- § 4. コンパクトシールド工法概要
- § 5. 施工実績および問題点
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、江東区大島六、七丁目付近の浸水被害対策のため、汚水および雨水を収容する管渠（仕上がり ϕ 1,800 mm, 延長約 946 m）を泥土圧シールド工法（溝付インバート二次覆工一体型セグメント）により新設するものである。

N 値 0 ～ 2 の高含水で軟弱なシルト層において、4 箇所急曲線（最小半径 $R = 15$ m）を含む施工延長 945.85 m の路線を、コンパクトシールド工法により築造した。

コンパクトシールド工法は、今後ますます発展するものと思われるが、現段階で施工実績は少なく、当社においても、本工事が初であった。

本稿では仮推進から到達推進までの稼働率低下とその原因、サイクルタイム向上策および課題について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工 事 名：江東区大島六、七丁目付近再構築工事

発 注 者：東京都下水道局

工事場所：江東区大島六丁目、七丁目

工 期：平成 24 年 8 月 22 日～平成 26 年 6 月 24 日

シールド形式： ϕ 3.23 m 泥土圧式シールド

（コンパクトシールド工法）

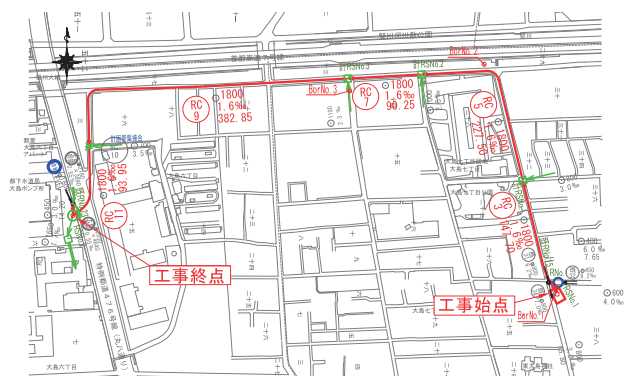
平面線形：最小曲線半径 $R = 15$ m

縦断線形：下り 1.6%

施工延長：945.85 m

土 被 り：7.27 m ～ 9.85 m（3.3 D ～ 4.4 D）

図－1 にシールド路線詳細を示す。



図－1 シールド路線詳細

§ 3. 地質概要

本工事の施工箇所である江東区大島六丁目、七丁目は東京下町地域に展開する低地に相当し、付近は盛土地で、

* 関東土木(支)大島シールド(出)(現:横浜湘南道路工事事務所)

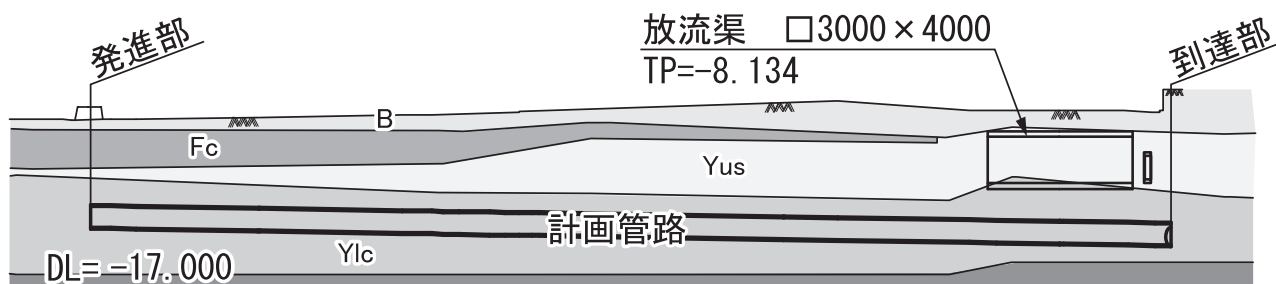


図-2 地質縦断面図

原地形は海岸平野や三角州等の低地の一般面である。

施工箇所付近は「東京谷」の谷筋にあり、上部路盤を構成する沖積層は「有楽町層」と「七号地層」の2層に分けられる。洪積層は、主体をなす「東京層群」、上総層群、および「埋没ローム層」および「埋没段丘礫層」等の埋没段丘堆積層からなる。

表層から埋土・盛土 (B)、シルト質粘土・シルト等 (Fc)、細砂等 (Yus)、シルト・砂混じりシルト・砂質シルト (Ylc) が分布している。

掘削対象土はシールド全線において、有楽町層・下部泥層 (Ylc N 値 0～8) となっている。土質は「シルト」が卓越し、上部に「砂混じりシルト」を伴う。層相は均質な塊状で、挟雑物としてごくまばらに砂の薄層や小塊、貝殻片を混ざる。

Ylc は $W_n = 37.7 \sim 59.4\%$ と含水が多く、すべての土層において $W_n > W_L$ の液性領域にある非常に軟弱なシルト層である。地質縦断面図を図-2に示す。

§4. コンパクトシールド工法概要

4-1 工法概要

コンパクトシールド工法の特徴を以下に列記する。

- (1) 溝付インバート二次覆工一体型セグメント
 - ・二次覆工を省略するとともに、インバート部の溝をタイヤ式無操舵搬送システムのガイドとして利用
 - ・平坦なインバートの活用により維持管理を効率化
 - ・4分割3ヒンジ構造による安定性の高いリング構造と分割数削減により組立時間を短縮
 - ・内面平滑構造により、防食性、止水性に優れる
- (2) 後方設備内包型3分割シールド
 - ・後方設備を運転ユニットに全て内包
 - ・発進・到達立坑での分割発進・分割回収が可能
 - ・シールド機転用性の確保により、工期短縮およびシールド機のレンタル化を実現
- (3) ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システム
 - ・レール・枕木などの軌条設備が不要

4-2 コンパクトシールド機

本工事で使用したコンパクトシールド機（写真-1、図-3）の諸元を下記の表-1に示す。

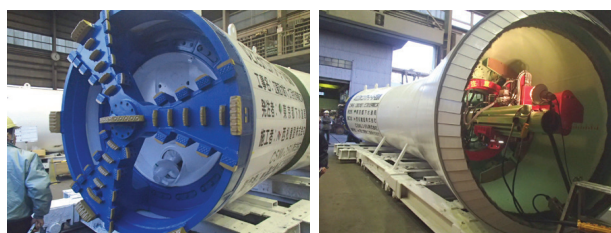


写真-1 コンパクトシールド機

表-1 シールド機諸元

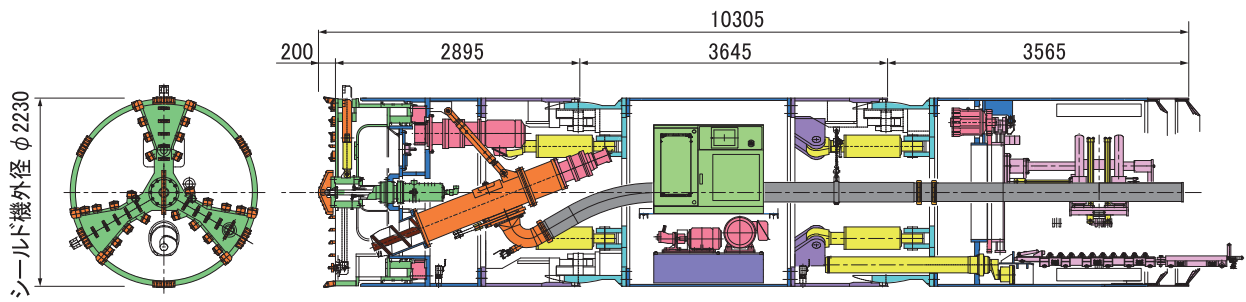
シールド	外径×機長	φ2,230 mm×10,105 m
	シールドジャッキ	600 kN×34 MPa×1,525 mmst×8本
	中折れジャッキ (1)	1,200 kN×35 MPa×235 mmst×4本
	中折れジャッキ (2)	1,200 kN×35 MPa×260 mmst×4本
	推進速度	55 mm/min
カッタ	トルク (トルク係数)	定格269 kN・m ($a=24.2$) 瞬時404 kN・m ($a=36.4$)
	回転数	2.1 r.p.m.
	コピーカッタジャッキ	110 kN×21 MPa×160 mmst×2本
スクリーナー	形式	軸付きスクリーナー
	トラフ内径×ピッチ	φ325 mm×250 mm
	排土能力	23 m ³ /h
	トルク×回転数	6,002 N・m×0～20 r.p.m.

コンパクトシールド機最大の特徴は、通常のシールド機のような後続台車設備を持たず、制御台車・油圧ユニットを機内に内蔵していることである。

そのため機長が長く、急曲線施工 ($R = 15$ m 以上) に対応する2段式中折れ機構を持っている。

チャンバー内から坑内への排土は、狭く長い機内を通過させるため、短いスクリーコンベヤに直結した低摩擦ホース（呼び径φ200 mm）により行う。

カッタ駆動方式は機内空間の制約上、小口径シールドには珍しい電動駆動となっている。

図-3 ϕ 2,230mm コンパクトシールド機

4-3 セグメント

コンパクトシールド工法では、4分割構造で、3つのナックル継手を持つ(残り1つは嵌合継手)溝付インバート二次覆工一体型RCセグメントを標準で使用する(図-4)。

RCセグメントは $R = 100$ m 以上の線形に対応し、 $R = 30$ m 未満の急曲線では鋼製セグメントを使用する。

鋼製セグメント区間では、プレキャスト製のインバートブロックを用いてガイドローラー付きタイヤ式搬送装置に対応した(写真-2)。

表-2 にセグメント諸元を示す。

表-2 セグメント諸元

種別	RC セグメント	ST セグメント
外径×内径	$\phi 2,100$ mm × $\phi 1,800$ mm	$\phi 2,050$ mm × $\phi 1,900$ mm ($\phi 2,100$ mm × $\phi 1,900$ mm)
幅	1,000 mm	300 mm (1,000 mm)

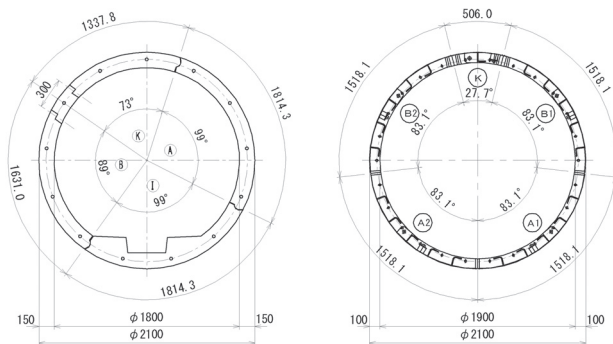


図-4 RCセグメントおよび鋼製セグメント

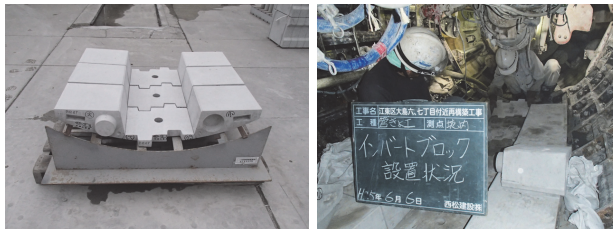


写真-2 インバートブロック

4-4 坑内設備

図-5 に坑内標準断面を示す。今回工事では可燃性ガス発生懸念があり、換気用の排気管($\phi 250$ mm スパイラル管) × 2 条を配置した。

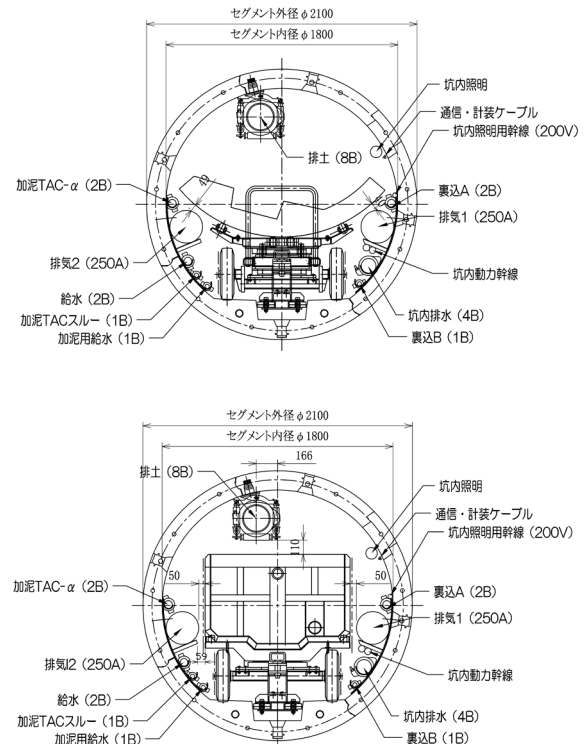


図-5 坑内標準断面図

配管やケーブル等は専用のラック、排土ホース(呼び径 $\phi 200$ mm)は専用受けローラーを製作して狭隘な坑内に対応した。

§ 5. 施工実績および問題点

5-1 発進～到達施工フロー

(1) シールド投入・組立

コンパクトシールド工法では、シールド機全長に対し立坑内空が短く、シールド機は標準で3分割構造となっている。

本工事では、シールド機寸法(外径 $\phi 2.23$ m × 全長 10.3 m)に対し、発進立坑内空は $W4.86$ m × $D8.86$ m × $H9.93$ m(鋼矢板内面寸法)、到達立坑内空が $\phi 5.046$ m × $H14.5$ m(鋼管ケーシング内空)であった。

シールド投入・組立・仮推進時の発進部地上設備配置を図-6に示す。配置時に留意した点は、以下のとおりである。

①施工段階毎の設置位置変更や容量変更を容易とするため、土砂ピットを鋼矢板土留式から角水槽に変更

②シールド機を5分割とし、投入用クレーンを160 t級→70 t級に小型化

上記により、シールド仮設備設置後、防音建屋内へのシールド投入用クレーン配置を可能とした(図-7)。

(2) シールド仮推進

コンパクトシールド工法では、シールド機テールがエントランスパッキンを通過するまで、前胴→中胴→後胴の順にシールド機の投入・組立と仮推進を交互に繰り返す。

仮推進設備として、推進用ストラット(B=400 mm)および、元押しジャッキ(st1,050 mm)を使用し

た(写真-3, 4)。

(3) 段取替え

本工事では、仮推進状態でわずら銅車の引き上げやセグメント投入作業による施工性、安全性の悪化を最小限とし、仮推進期間を短縮するため、シールド機テールがエントランスパッキンを通過した直後に段取替えを行った(写真-5)。

シールド機停止状態で押輪(反力枠)と立坑土留鋼矢板を溶接して仮反力をとった後、ストラット、元押し設備の撤去を行った。その後、本掘進用の作業床、トラバーサ、昇降設備を設置し、シールド推力を受けるストラット(H300山留め材×4本)を設置した(写真-6)。

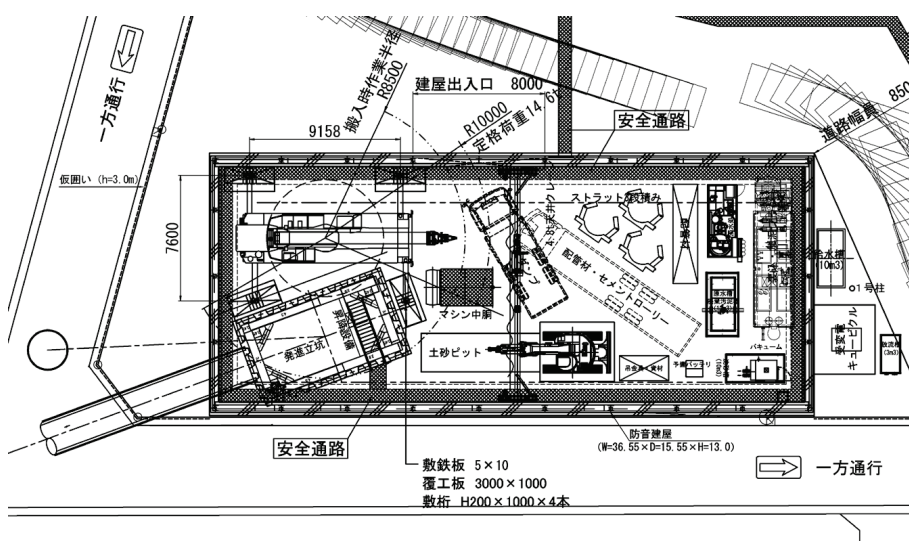


図-6 仮推進時地上設備配置

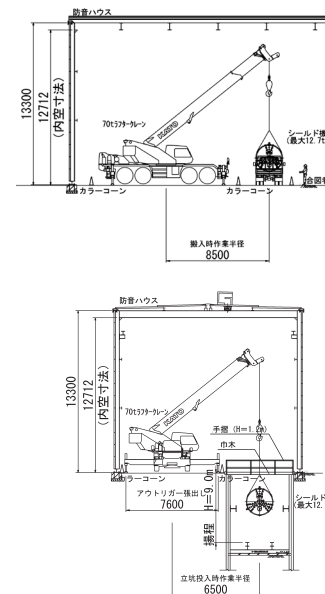


図-7 シールド機投入時断面図



写真-3 ストラットおよび元押しジャッキ



写真-5 仮推進後段取り替え状況



写真-4 仮推進状況



写真-6 仮推進段取り替え完了

(4) 初期掘進

立坑内には反力受けストラットがあり、トラバーサが使用できないため、セグメント台車、ずり鋼車、バッテリーロコをそれぞれ1台使用して初期掘進を行った。

(5) 段取替え・本掘進

所定の初期掘進完了後、ストラット×4本の撤去を行い、ずり鋼車×4台、セグメント台車×2台、バッテリーロコ×1台を投入し、本掘進を行った。

(6) 到達

到達坑口にエントランス装置を設置し、到達立坑(φ5.0 m 鋼管ケーシング ケコム工法により施工)内への到達・引抜きを行った(写真-7)。

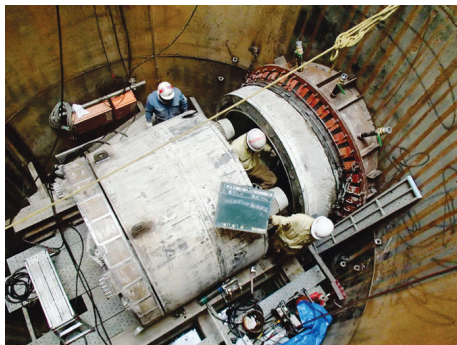


写真-7 シールド機到達・引抜き状況

5-2 進捗実績

本工事での概略実施工程表および、進捗実績を図-8 および、表-3に示す。

比較データとして、コンパクトシールド工法積算資料

工種	数量	単位	平成25年											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
シールド仮設備工	1	式												
防音工	1	式												
立坑内設備設置	1	式												
坑外設備設置	1	式												
シールド機投入・組立	1	式												
シールド仮掘進工	11	m												
段取替え	1	式												
シールド初期掘進	32	m												
シールド本掘進	927	m												
シールド機到達・引抜き工	1	式												

図-8 シールド実施工程

表-3 日進量実績

項目	施工区分	直線	急曲線① (15m≤R<20m)	急曲線② (20m≤R<30m)	仮掘進	初期掘進	到達掘進	到達掘進	段取替え
		(m/日)	(m/日)	(m/日)	(m/日)	(m/日)	(m/日)	(m/日)	(日)
日進量	積算資料 (標準工法)	8.4	2.52	2.52	—	8.4	—	—	—
	積算資料 (コンパクト工法)	8.4	1.68	2.52	2.3	4.5	—	—	10
	実 施	11.62	2.68	3.84	2.08	4.00	4.06	1.4	5
	実 施 / 積 算	138.3%	159.5%	152.4%	90.4%	88.9%	90.2%	—	50.0%
区間長	積算資料	—	—	—	10.00	33.00	8.00	—	—
	実 施	818.00	49.50	19.50	11.45	32.00	8.10	9.85	—
備 考			R=15mおよび R=19m	R=25m	地山掘削開始から チール押込み 完了まで	実施はR=29mの 施工含む	実施はR25施工 中の実績	到達立坑内への マシン空押し・ 引抜き	実績日数

※実施データはすべて実績日数あたりを日当りに換算
※施工中の支障物等による不可抗力のトラブルを除く

(第3版 平成23年3月), および下水道設計積算要領(管路施設(シールド工法)編 2010年版)を用いた。

本工事では、仮掘進の他、現場の事情により片番施工とした区間があったため、データはすべて日当たり(両番施工)に換算した数字とした。さらに、すべて実働日当たりとし、日祝日等の休止日数を含んでいない。

データから、直線部、急曲線部①(15m≤R<20m)、急曲線部②(20m≤R<30m)のすべてにおいて、積算資料を超える日進量を記録している。

一方で、仮掘進、初期掘進、到達掘進では積算資料の約90%の進捗にとどまった。実績については、工事により土質条件、仮設備条件等が大きく異なるため、一概には言えないが、概ね積算資料に近いデータとなった。

月進量は直線区間のみであった平成25年7月に最大317 m/月を記録した。平均日進量では掘進日あたり11.62 mとなった(図-9, 表-3)。

また、稼働日当たり掘進率は平均で80.3%と一般的なシールド工法よりも低い数字となった。

図-10にトラブル別損失日数(方数)を示す。

支障物等の不可抗力によるトラブルを除いたデータでは、掘進不能となった方数は全体で22方であった。そのうち約40%が金属片やコンクリート片等の異物取込みによるスクリー閉塞で、次いで約30%がローリング等、急曲線施工時の姿勢制御のための対策に費やした。

掘進停止には至らないものの、全体で74方のトラブルによる進捗低下が見られた。このうちコンパクトシールド工法特有と思われる要因は、動力幹線・計装配線の断線、およびエレクターに関するトラブルである。狭隘な坑内でバッテリーロコによる配線との接触や、二次覆工省略型セグメントを取り扱うためのエレクターへの負荷の大きさによるものと思われる。

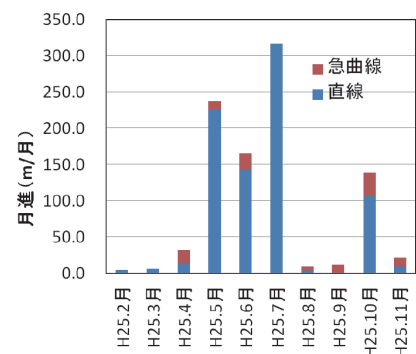


図-9 シールド進捗実績

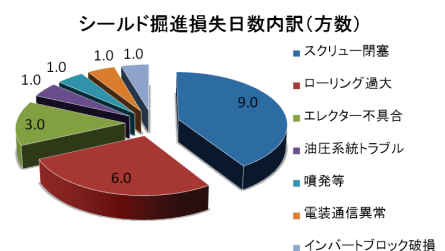


図-10 トラブル別損失日数内訳

5-3 実施工での課題と対策

(1) 排土サイクル向上

コンパクトシールド工法の排土方式はずり鋼車による(写真-8)。

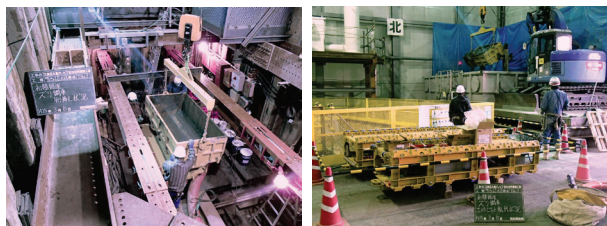


写真-8 ずり鋼車による排土状況（初期掘進時）

当初計画では1Rの掘進当たり、セグメント台車×2台+ずり鋼車（1.5m³積み）×4台を1編成としていた。

トラバーサによりセグメント台車、ずり台車の入替えを行っていたが、立坑内が狭隘であるため、台車の入替えに想定以上の時間を要した。

そこで、安全性や作業性を考慮し、セグメント台車×2台+ずり鋼車×2台を1編成として、1リングで2回の排土・資材搬送を行った。

掘進途中で排土待ちによるロスが発生したが、立坑内での複雑な台車入替えを行うよりも平均で8.0 min/リング早く掘進サイクルが10%向上した(表-4)。

表-4 リングサイクル比較（直線部）

項目	単位	実測サイクル (ずり鋼車2台)	比較サイクル (ずり鋼車4台)	備 考
① セグメント幅	mm	1,000	1,000	
② 平均掘進速度	mm/min	68.7	68.7	実測平均
③ 坑内運行時間	min	23.6	11.8	実測平均
④ ずり鋼車 転倒サイクル	min	21.8	41.6	実測平均
⑤ セグメント 積込サイクル	min	20.8	20.8	実測平均
⑥ 掘進時間	min	14.6	14.6	実測平均 ①+②
⑦ セグメント 組立時間	min	39.2	39.2	実測平均
⑧ 排土待ちロス	min	27.0	35.0	実測値から比較値を推定 ③+④+⑤-⑦
計	min	80.8 (100%)	88.8 (110%)	

※データは587R～850R（平均延長610m）の実績に基づく

今後同様の施工を行うにあたっては、立坑内空の変更を含めて、工程や経済性を総合的に勘案して計画する必要がある。

(2) インバートブロック破損

急曲線施工においては、一般的な鋼製セグメント（B＝300mm）、およびインバート部にプレキャストブロックを使用した。

プレキャストブロックは、台車が頻繁に往復を繰り返すことから、急曲線部の損傷が激しかった(写真-9)。



写真-9 インバート
ブロック損傷状況

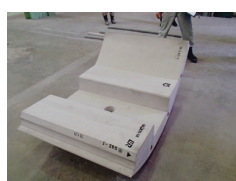


写真-10 RCセグメント
（インバートピース）

次回以降の施工では、インバートブロックの代わりとなる仮設の金物を設置し、シールド掘進完了後にインバートを現場打ちすることが良策と思われる。

(3) セグメント

コンパクトシールド工法で使用する溝付二次覆工一体型のRCセグメントは、直線用、蛇行調整用、ローリング修正用の3種類に大別され、軸方向挿入式である。

円形の一般的なセグメントと異なり、直線用は甲、乙の2種類が存在する。蛇行調整用には上向き（TU）、下向き（TD）、右向き（TR）、左向き（TL）の4種類が存在し、上下が7mm、左右が21mmと上下左右専用のテーパ量を持ち、左右のテーパ量が大きい。

一般的な円形セグメントと異なり、インバート溝を持つため、組立位置変更によるテーパ量調整は不可能である(写真-10)。また、蛇行調整セグメントはすべて甲組で制作されており、テーパセグメントを連続して使用することができない。

上記の制約上、現場で発生した問題点は以下のとおりである。

- ・蛇行修正を即座に行いたい場合にも、連続してテーパセグメントが組めない。
- ・左右の蛇行調整テーパ量が大きく、微調整ができない。

次回施工では、蛇行修正用にセグメントテーパ量を小さく設定することが望ましいが、既製型枠以外の新規製作による大幅なコスト増が見込まれ、セグメントの製作数量や製作時の転用回数を見極めて判断が必要である。

§6. まとめ

コンパクトシールド工法は、機長以下の立坑での施工やトンネル断面積の縮小が可能で、長距離や急曲線にも対応できる。

一方で、新しい工法であるためまだまだ実績が少なく、コスト削減とサイクルタイム向上など改良を行うことで、工法の更なる発展が期待できる。

本工事での実績や経験が今後の発展に寄与できれば幸いとする。

最後に、本工事の施工にあたり、ご指導、ご協力を頂きましたコンパクトシールド工法協会、本社土木設計部、本社機材部、関東土木支社、および関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) コンパクトシールド工法研究会：コンパクトシールド工法技術説明書 第5版，2009年。
- 2) コンパクトシールド工法研究会：コンパクトシールド工法積算資料 第3版，2011年。