

土砂岩盤複合地盤における小口径長距離シールドの施工報告

Construction report of the shield tunnel in small diameter, long distance and composite ground with rock and soil

安村 秀樹*

Hideki Yasumura

木目田 浩亮*

Hiroataka Kimeda

渡邊 忠尚*

Tadataka Watanabe

村上 初央**

Hajime Murakami

要 約

本工事は、泥土圧シールド工法によりトンネルを構築し、その内部にUS形ダクタイル鋳鉄管を挿入し送水幹線を築造するものである。本工事は、土砂地盤と岩盤が交互に出現する複雑な長距離土砂岩盤複合地盤を掘進する計画であり、シールド路線直上には輻輳する埋設物があるため、シールド機ビット交換のための地盤改良が困難な厳しい施工条件である。本稿では、シールド機カッターヘッドの強化対策、綿密なビット交換計画および施工実績について報告する。また、前例の少ない小口径長距離シールド工およびトンネル内配管工における設備計画の工夫と施工実績についても報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. ビット交換計画および実績
- § 4. 坑内輸送の効率化
- § 5. トンネル内配管の効率施工
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

本送水幹線は、既設送水幹線が地震や突発的な事故等で被災した際のリスクを回避し、災害時のライフラインを確保するための既設送水幹線と別ルートの新たな幹線管路である。本工事は5工区に分割された送水幹線のうち3工区区間にあたり、国道56号線歩道の地下に延長約3.4 km、仕上がり内径 ϕ 1.744 mのトンネルを泥土圧シールド工法（シールド外径 $D = \phi$ 2.04 m）により構築するものである。その内部には、US形ダクタイル鋳鉄管（内径 ϕ 1.10 m 耐震管）を挿入する。

本稿では、土砂地盤と岩盤地盤が交互に出現する土砂岩盤複合地盤におけるシールド機ビット交換の計画および実績について報告する。また、前例の少ない小口径長距離シールドにおける工期短縮のための工夫と施工実績についても報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工 事 名：送水幹線二重化（3工区）管渠築造工事

発 注 者：高知市上下水道局

工 事 場 所：高知市朝倉東町～小石木町（図—1 参照）

工 期：平成27年3月21日～平成32年3月15日

シールド： ϕ 2.04 m 泥土圧シールド平面線形：最小曲率半径 $R = 30$ m急曲線連続施工 $R = 40$ m, 40 m, 50 m

縦断線形：下り 2.000‰, 0.662‰

施工延長：3368.507 m

土 か ぶり：13.93 m～19.06 m

セグメント：外径 ϕ 1.900 m, 内径 ϕ 1.744 m

鋼製セグメント数 4,893 R

鋼製セグメント主桁厚さ $t = 8$ mm～16 mm鋼製セグメント幅（標準部 750 mm,
急曲線部 300 mm）

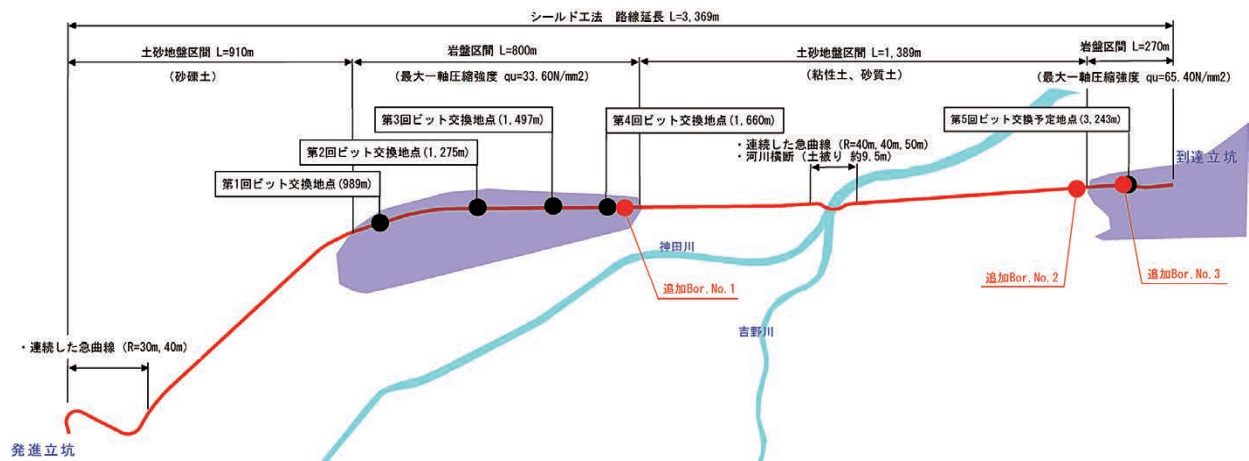
可とうセグメント数 1 R（幅 500 mm）

2-2 地質概要

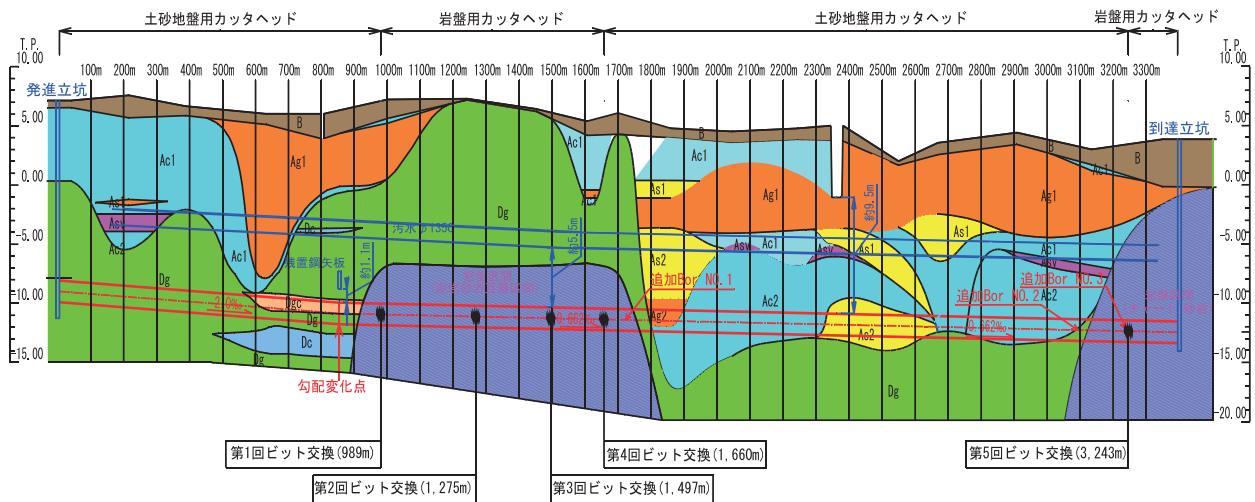
シールド掘削対象土層は、土砂地盤と岩盤が交互に出現する複雑な地盤である。図—2に地質縦断図を示す。発進位置はN値50の洪積砂礫層であり、 ϕ 100 mmを超える玉石を含んでいる。発進から900 m付近で、一軸圧縮強度 34 N/mm²の砂岩、1,700 m付近では、一軸圧縮強度 14 N/mm²の泥岩となる。この900 m～1,700 m間の800 mが泥岩砂岩互層区間となる。1,700 m以降はN値

* 西日本（支）高知送水幹線（出）

** 土木設計部設計二課



図一 路線概要図



図二 地質縦断面図

8の粘性土層，N値23の砂層と土砂地盤となる。発進から3,100 m付近から一軸圧縮強度 54 N/mm^2 のチャートとなり，到達部では一軸圧縮強度 65 N/mm^2 の砂岩となる。

§3. ビット交換計画および実績

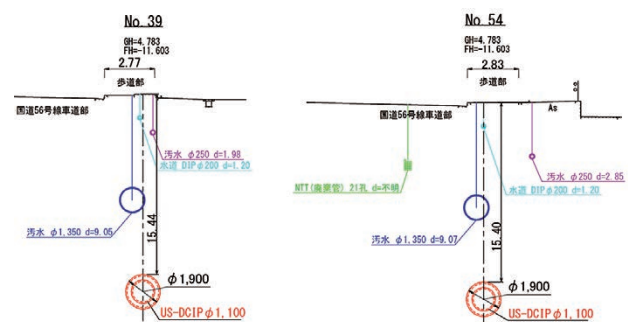
3-1 施工上の課題

長距離土砂岩盤複合地盤あり，岩盤区間以外の砂礫土・粘性土・砂質土では，シールド機ビット交換時に地盤改良を行う必要がある。しかし，シールド路線は国道56号線の歩道下であり，図-3の横断面図に示すように転換する埋設物により地盤改良が困難な状況である。このことから，安全にシールド機ビット交換を行うためには，地盤改良を必要としない湧水の少ない岩盤区間でのビット交換計画が要求された。さらに，地盤ごとに適合するシールド機カッタヘッドで施工する必要があった。

3-2 対策

(1) シールド機

写真-1 にシールド機全景を示す。以下にシールド機



図三 横断面図



写真-1 シールド機全景

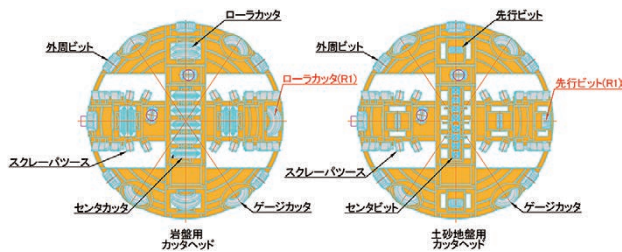


図-4 シールド機カッタヘッド図

カッタヘッドの強化対策を示す。

- ①土砂地盤区間と岩盤区間を最適なカッタヘッドで施工するため、ローラカッタと先行ビットを入替え可能な換装型とした。図-4にシールド機カッタヘッド図を示す。
- ②長距離土砂岩盤複合地盤であるため、耐久性向上を目的にカッタビットおよびローラカッタに超硬チップ (JIS E5) を採用した。また、ローラカッタは耐衝撃性に優れたチップインサート型を採用した。
- ③カッタビットの配置は、地山を均等に切削できるように計画し、最外周は耐久性を考慮し多条配置とした。さらに、外周リング保護ビットを配置した (写真-1)。

(2) 切羽添加材

土砂岩盤複合地盤であるため、さまざまな土質に対し調整することが可能であり、カッタートルクおよびカッタビット摩耗量を低減できる起泡材を使用した。

(3) シールド掘進管理

岩盤区間においてシールド装備推力 4,000 kN に対して、50%の 2,000 kN 以下で掘進管理し、シールド機の地山への押し付けによるカッタヘッドの損傷を軽減した。また、推力、カッタートルク、掘進速度の関係をリアルタイムグラフで管理し、カッタビットの交換時期を予測した。

(4) 追加地質調査

綿密なビット交換計画を行うため、表-1、図-1、図-2に示す地点にて追加地質調査を行った。なお、3,100 m 付近の追加地質調査結果では、安全なビット交換作業が困難な結果であったため 3,250 m 付近にて追加地質調査を行った。

表-1 追加地質調査地点と目的

Bor. No.	地点	目的
追加Bor. No.1	1750 m 付近	岩盤区間の出口確認 (カッタヘッドタイプ交換検討)
追加Bor. No.2	3100 m 付近	岩盤区間の入口確認 (カッタヘッドタイプ交換検討)
追加Bor. No.3	3250 m 付近	岩盤区間の入口確認 (カッタヘッドタイプ交換検討)

3-3 施工結果

図-5にビット摩耗計画および実績グラフを示す。ビット摩耗量は、計画値より実績の方が大きくなったが、カッタヘッドの強化対策および施工管理によりカッタヘッドに損傷を与えることなくシールド施工を円滑に進めることができた。また、カッタヘッドタイプの変更位置についても追加地質調査結果を反映し適正な位置でビット交換を実施できたものと判断する。ビット摩耗予測値より大きな摩耗量となったのは、岩盤区間で使用したローラカッタの超硬チップが欠損したためと推察できる。写真-2に超硬チップ欠損状況を示す。超硬チップが大きく摩耗する前に、母材摩耗による超硬チップの欠損が確認された。今後は、ローラカッタの母材の強化および超硬チップが欠損しない構造とする必要がある。



写真-2 超硬チップ欠損状況

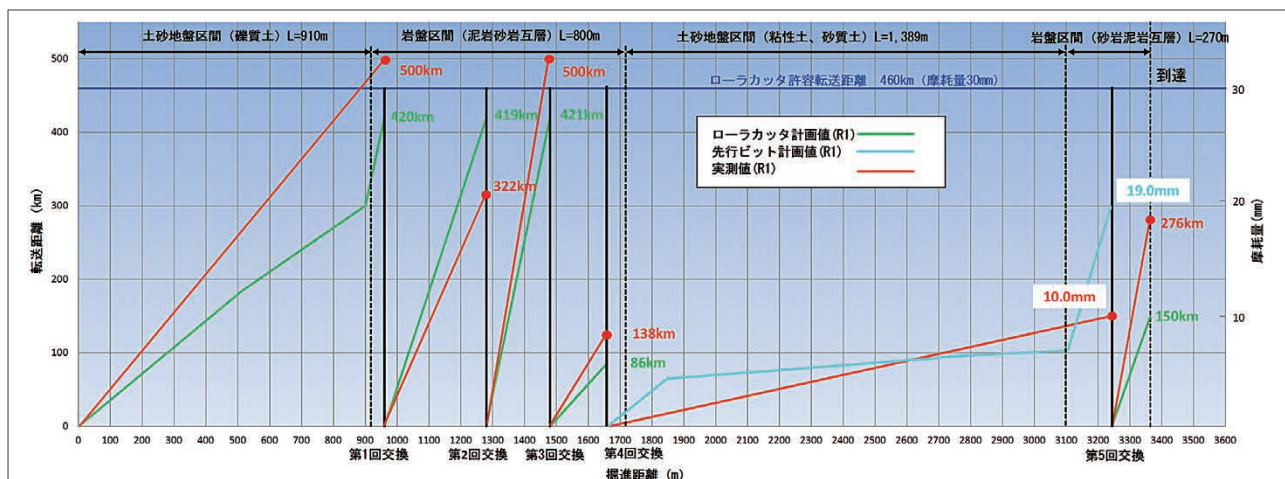


図-5 ビット磨耗計画および実績グラフ

§ 4. 坑内輸送の効率化

4-1 施工上の課題対策

本工事は、施工延長約3.4 kmと長距離かつセグメント内径φ1.744 mの小口径シールド工事である。シールド掘削位置は、土砂岩盤複合地盤であるため、シールド掘削土砂搬出方法をズリ鋼車による坑内輸送方式とした。

通常の坑内単線軌条でシールド施工を行った場合、3 km地点での掘進サイクルは、坑内往復時間（機関車平均速度6 km/h）60分+掘進時間25分+シールド掘削土処理およびセグメント積み込み時間20分で合計105分を要する。1日の作業時間を昼夜施工で休憩時間1時間考慮すると16時間（960分）で9.1サイクル（1日作業時間960分÷3 km地点での施工サイクル105分）となる。よって日進量6.8 m/日（9.1サイクル×1 Rセグメント標準幅0.75 m）となり、積算日進量8.4 m/日より大きく下回る計算結果となる。工程を遵守するためには、シールド進捗に大きく影響を及ぼす坑内輸送方法の改善が必要となった。

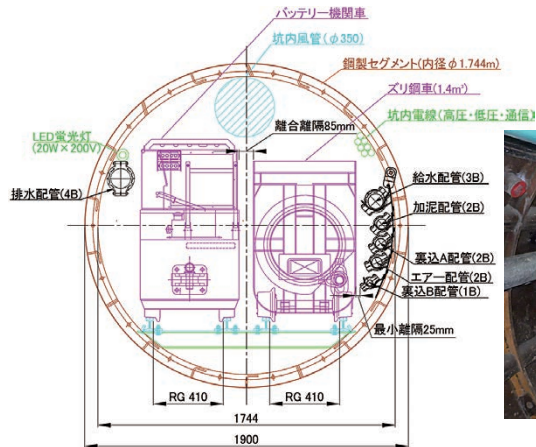


図-6 坑内離合断面図

4-2 対策

(1) 特殊幅狭坑内輸送設備の採用

坑内輸送設備としては、バッテリー機関車、セグメント運搬用台車、シールド掘削土処分用のズリ鋼車、人車がある。坑内で離合できるように軌条を特殊幅狭構造とし、2編成を計画した。図-6に坑内離合断面図、写真-3に坑内離合状況、写真-4に坑内複線区間を示す。

(2) 複線区間（離合部）設置時期・位置計画

複線区間が坑内に複数存在するとバッテリー機関車同士が接触する危険性が高まるため離合部を1箇所とし、シールド掘進進捗に合わせて移設する計画とした。設置時期については、シールド機先端が2,800 mまでは、日進量10 m/日、2800 m以上は計画条件上、日進量10 m/日を確保することが困難であったため、日進量9 m/日を下回らないように設定することとした。位置計画については、3箇所移設する計画とした。2,100 m以降においては、切羽部からの距離が近くなるため移設効果がないことより、2100 m以内の700 m、1400 m、2100 mとした。図-7に複線区間設置時期・位置計画および実績グラフを示す。



写真-3 坑内離合状況

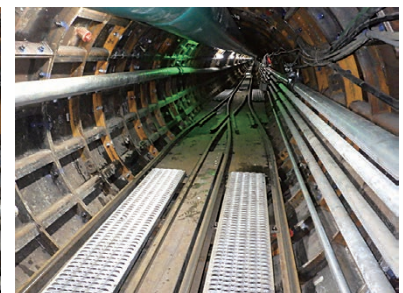


写真-4 坑内複線区間

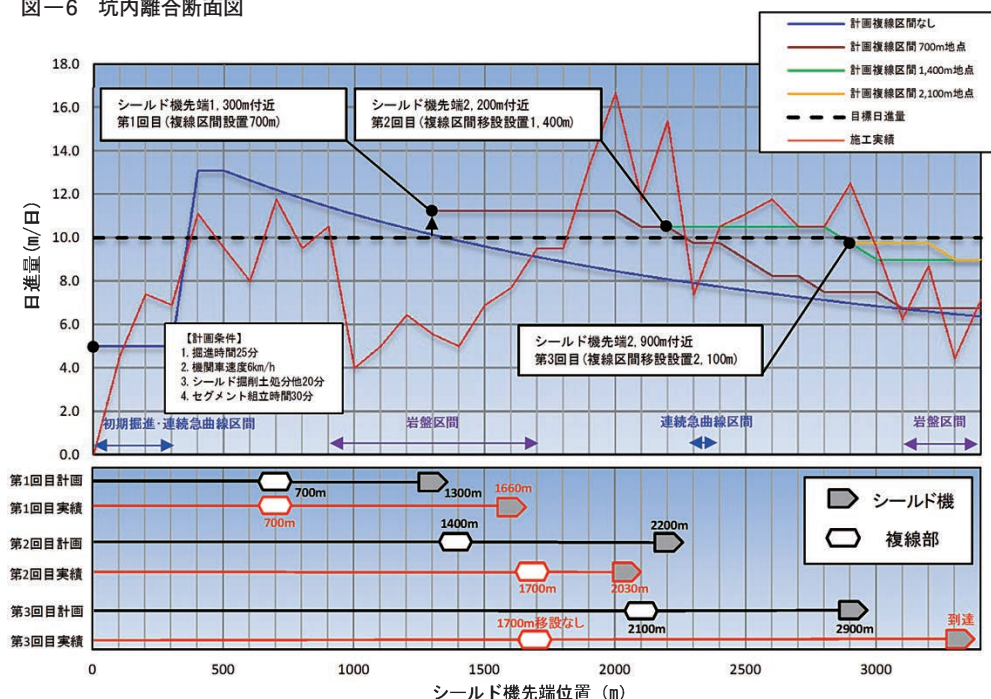


図-7 複線区間設置時期・位置計画および実績グラフ

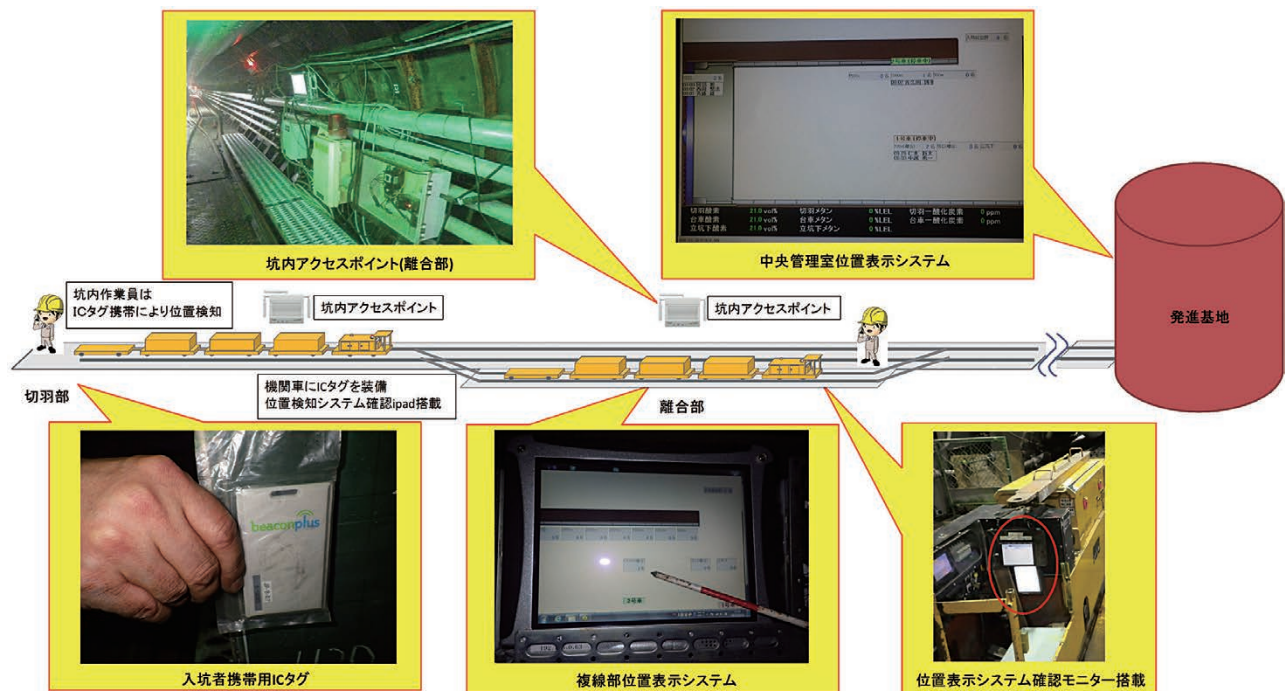


図-8 坑内輸送設備位置表示システム

(3) 安全対策

坑内一部が複線区間であり、その他大部分が単線軌条であるため、坑内での接触事故が懸念された。また、急曲線部（ $R=30\text{ m}$ 、 40 m 、 50 m ）においては、視界が狭く接触事故の危険性が増す。そこで、発進立坑部、離合ポイント部、切羽部、バッテリー機関車部、中央管理室にリアルタイムで位置が把握できる坑内輸送設備位置表示システムを採用した（図-8）。さらに、入坑者にはICタグを携帯させ、現在の位置情報が検知できるようにした。また、複線区間で一時停止し、すれ違うまで発車しない様に坑内運行ルールの厳守を徹底した。

4-3 施工結果

第1回目複線区間設置は、シールド機先端が1,300 m付近で700 m位置に複線区間を設置する計画に対して、岩盤区間で掘進に時間を要し、掘進中にブリ鋼車入れ替え作業が可能であったため、シールド機先端が1,660 m地点の岩盤施工が終了し、今後進捗が向上されると予想される地点にて、第4回目ビット交換作業と合わせて複線区間を700 m位置に設置した。

第2回目複線区間移設設置は、シールド機先端が2,200 m付近で1,400 m位置に複線区間を移設設置する計画に対して、進捗低下を確認したシールド機先端が2,030 mで1,700 m位置に複線区間を移設設置した。

第3回目複線区間移設設置については、シールド機先端が2,900 m地点においても日進量10 m/日であること、計画においても移設設置効果が得られないため行わなかった。

岩盤区間・急曲線区間で日進量低下があったものの、全体としては積算工程通りシールド施工を完了すること

ができた。また、発進から3 kmの区間では、岩盤区間・急曲線区間以外で日進量10 m/日を概ね確保することができた。

安全についても、坑内輸送設備同士の接触事故なくシールド施工を完了した。

§ 5. トンネル内配管の効率施工

5-1 施工上の課題

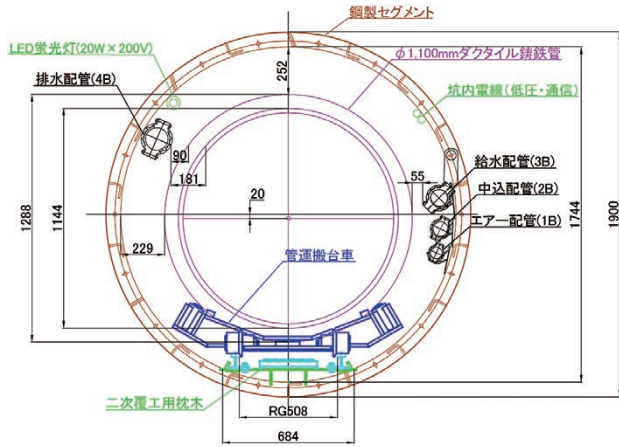
シールド施工完了後、トンネル内にUS形ダクタイル鋳鉄管（内径 $\phi 1.1\text{ m}$ 耐震管）を挿入する。US形ダクタイル鋳鉄管は標準 $L=6\text{ m}$ であり、急曲線 $R=30\text{ m}$ は通常の管運搬台車では運搬時の施工余裕に課題がある。図-1の路線概要図に示すように、発進部直後に急曲線 $R=30\text{ m}$ があり、通常の施工計画では到達基地にトンネル内配管設備を設置し、片側からの施工となる。本工事は、施工延長約3.4 kmであり、シールド工事同様、資材運搬に時間を要し、工程余裕を確保できない。

発進部・到達部ともに、トンネル内配管設備基地を設置できる用地がある。急曲線 $R=30\text{ m}$ にて6 mダクタイル鋳鉄管を運搬できる管運搬台車を製作し、発進到達部の両側から施工することによる工程短縮計画が必要であった。

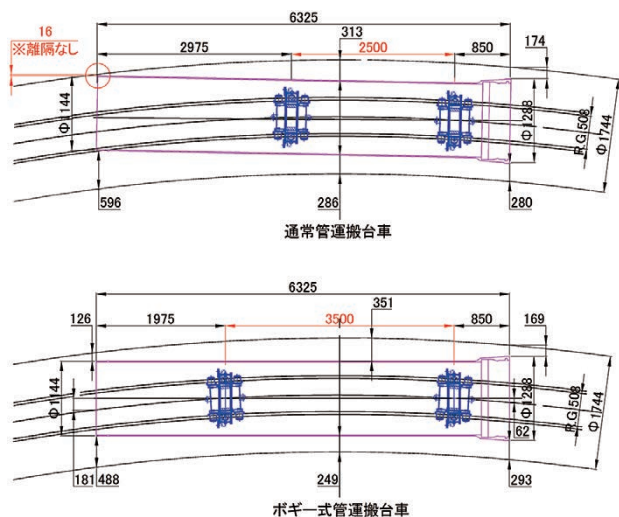
5-2 対策

図-9に管運搬時断面図、図-10に急曲線区間における管運搬台車の比較図を示す。通常使用されている管運搬台車では、急曲線 $R=30\text{ m}$ を6 mダクタイル鋳鉄管が通過することに課題がある。車輪間隔を3.5 m以上に広げた場合は、ダクタイル鋳鉄管の振れ幅が小さくなるが、

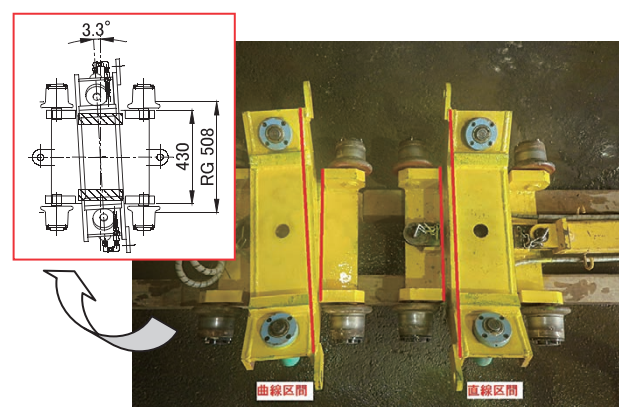
管運搬台車の車輪がレールから脱線する。そこで、車輪間隔を広げた状態で管運搬台車が脱線しないように、管を置く受け台と車輪が上部と下部で 3.3° 回転するボギー式管運搬台車を採用することとした。図一11にボギー式管運搬台車図を示す。



図一9 管運搬時断面図



図一10 急曲線区間における管運搬台車の比較図



図一11 ボギー式管運搬台車図

5-3 施工結果

発進部・到達部にトンネル内配管設備基地を設け、ボギー式管運搬台車を使用して実施工を行った。片側からの施工では、3.4 km 長距離施工となるため管運搬に時間を要し、12 ヶ月の施工となるが、両側からの施工により半分の 1.7 km 施工となり 5 ヶ月でトンネル内配管施工を終えることができた。また、急曲線 $R=30$ m も接触することなく施工を完了できた。トンネル内配管設備費用が 2 倍となるが、トンネル内配管作業において時間を要する管運搬時間が短縮され、片側からの施工工期 12 ヶ月の半分の 6 ヶ月より 1 か月少ない、5 ヶ月で配管を完了したことによる費用対効果は大きかった。

§6. おわりに

本工事は、土砂地盤と岩盤が交互に出現する複雑な長距離土砂岩盤複合地盤であった。さらに、シールド路線直上には輻輳する埋設物があり、シールド機ビット交換のための地盤改良が困難な厳しい施工条件での工事であった。シールド機カッターヘッドの強化対策および綿密なビット交換計画により、地盤改良なしで無事施工を完了した。

前例の少ない小口径長距離シールド工およびトンネル配管工においても、設備を工夫することにより工期短縮を図ることができた。

最後に、本工事を施工するにあたり貴重な指導助言をいただいた各位に深く感謝の意を表すとともに、本稿が同種工事の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 木目田浩克：小断面・長距離・岩盤土砂複合地盤における泥土圧シールド機のビット交換計画および施工，土木学会第 73 回年次学術講演会，第 VI 部門，VI-112