１．小口径・長距離シールドにおける施工の効率化とビット交換

株式会社フジタ　建設本部　土木ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞｾﾝﾀｰ　機械部　○渋谷　光男
横浜支店　土木部　西井　建比古

１．概要

本工事は，愛知県企業庁発注の送水管布設工事（延長 2,930m，セグメント外径φ2,000mm）で，泥土圧シールド工法を用い，平成 18 年 9 月から約 1 年半で一次覆工を施工した。

本工事の特色として，送水管ルートが国道直下ため，立坑用地の制限から小口径シールドではほとんど例のない，約 3km という長距離を 1 台のシールド機（写真-1）で施工したこと。そして，掘進途中において地盤改良をした砂層中で, 2 回にわたり機内から切羽に人が出てカッタビット（土砂切削刃）の点検・交換作業を実施したことがあげられる。

本稿では，小口径で長距離，機内からのビット交換という難しい施工課題を，様々な工夫と技術で解決し，工事を完遂した成果を現場実績に基づいて報告する。また，最近の総合評価方式入札での技術提案を踏まえた，今後の小口径シールド長距離化の展望を記述する。

写真-1　Φ2.13m シールド機

２．工事概要

愛知県営水道では，長期に亘る水需要への対応のほか，地震や渇水に強い水道施設づくりを目指し，より安全で安定した供給ができる施設の整備を進めている。

当事業は，緊急時対応施設等の一環となる管網化路線として，西三河地域の浄水場や広域調整池などの供給拠点を連絡し，地震災害時や渇水・事故時など非常時に広域的な水運用を可能とする施設整備として計画された。その内，本工事は西三河中心部の国道 155 線直下に, 土被り 9m から 31m の深さで，豊田市駒場町から刈谷市一ツ木町に至る 2,930m の区間に送水管を布設するものである。工事概要（表-1）と工事位置図（図-１）を示す。

表-1　工事概要

工事名	刈谷線第 4 工区（その 1）送水管布設工事
発注者	愛知県企業庁
施工者	フジタ・株木・近藤特定建設工事共同企業体
場　所	豊田市駒場町　～　刈谷市一ツ木町地内
工　期	平成 17 年 8 月 23 日　～　平成 21 年 3 月 15 日
一　次 覆　工	泥土圧シールド工法 掘削外径：Φ2,13m 掘削延長：2,930m 平面線形：最小曲線　R＝60m 縦断線形：-2.1%　～　1.48% セグメント：鋼製　外径 Φ2,000mm, 幅 750mm，3,904 リング
二　次 覆　工	Φ800mm 鋼管運搬・据付け エアモルタル充填工：7,530.7m^3
地　盤 改良工	立坑底盤改良：CJG　Φ2,000×32 本 発進防護工：薬液注入工 （二重管ｽﾄﾚｰﾅ複相） ﾋﾞｯﾄ交換部防護工（2 回）：薬液注入工 （二重管ｽﾄﾚｰﾅ復相）
立　坑 築造工	発進立坑：SMW 連続壁 ソイル Φ850，@600，L24m 芯材 H588×300，L23m，60 本
管 工事工	開削工：一般管路，排水管部
構造物 築造工	制御弁室：1 箇所，排水桝：1 箇所

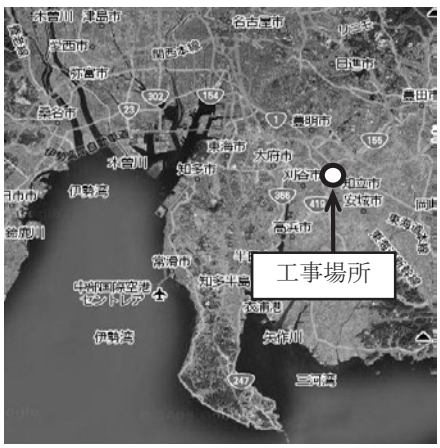

図-1　工事位置図

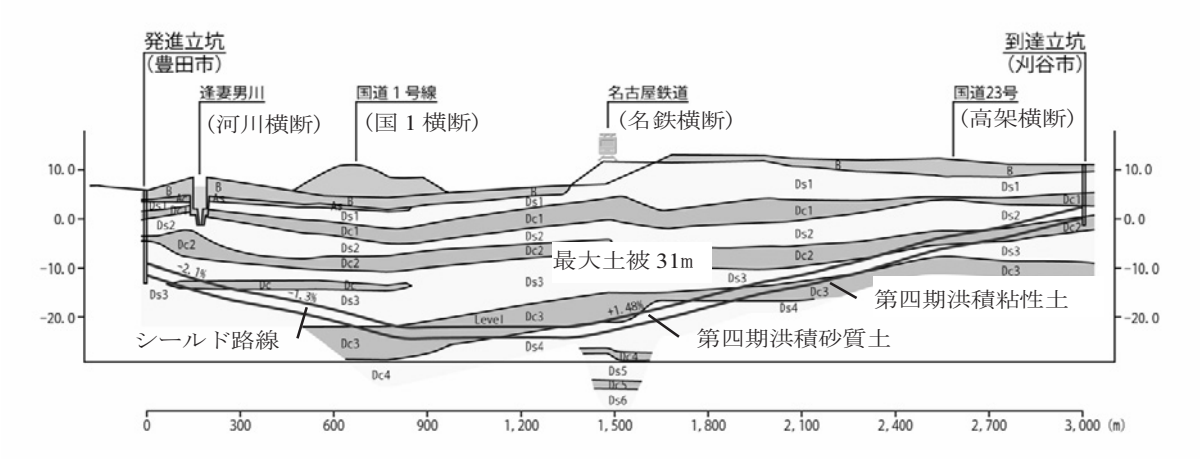

図-2　シールド縦断線形・土質柱状図

３．線形及び地質概要

シールドの縦断勾配は-2.1％～＋1.48％と変化が激しく，土被りは 9.0m～31.2m となっていて，シールド路線中に逢妻男川，国道 1 号線，名古屋鉄道，国道 23 号線が横断している。

地質の特徴として，路線断面の洪積層は砂質土と粘性土の互層となっていて変化に富む。また，主体となる砂質土は細砂にシルト分を混入し，一部でΦ10mm の礫を混在する（図-2）。

地盤強度は，粘性土層でＮ値＝10 前後，砂質土層でＮ値＝30 と中位で，透水係数は全般に 10^{-4}～10^{-5} 以下だが，一部礫分の混入が多い箇所では 5×10^{-3} と高くなっている。

４．長距離シールドの課題と対応策

4.1　坑内輸送の効率化

長距離施工にあたっては，セグメントをはじめとする資材の搬入や掘削した土砂の搬出をいかに早く行うかが課題となる。

坑内輸送設備は，バッテリー機関車による軌道方式を用いるが，2,000m 地点でずり運搬車の運行サイクルは，切羽から立坑まで搬出（20 分），立坑でずり運搬車をクレーンで吊上げ土砂ホッパへ回収（15 分），再び空のずり運搬車が切羽に搬入（20 分）と，合計 55 分かかることになる。一方，切羽で土砂搬出中に行うセグメント組立作業などは 30 分で完了するため，ずり運搬車待ちの時間（25 分）が発生し，1 日の掘進出来高が 3m ほど減少することになる。

そこで，小口径では前例のない坑内複線化を計画し，離合ポイントの配置等について，事前に綿密な検討を行い次の 3 つの対策を実施した。

（1）特殊バッテリー機関車採用

延長距離1,200m地点で坑内軌条に複線区間を設け，この複線部から切羽側に特殊幅狭バッテリー機関車を採用し，小口径でのずり運搬車 2 編成の離合を可能として，ピストン運行を行った（写真-2）。

（2）複線ポイント設置

この複線区間で 2 編成車輌を 5cm の離隔ですれ違いさせるため，レールや枕木を嵩上して有効内空を確保し，電気ケーブルや給排水，裏込配管等全てを枕木下へ格納し接触防止を図った（写真-3）。

（3）安全対策

万が一にも車輌と作業員との接触災害を起さぬよう，離合箇所に退避所や警報設備を設置，分岐切替え操作をバネ式割込型にして省力化し，離合作業手順のルール厳守を徹底した。

写真-2　バッテリー機関車離合状況

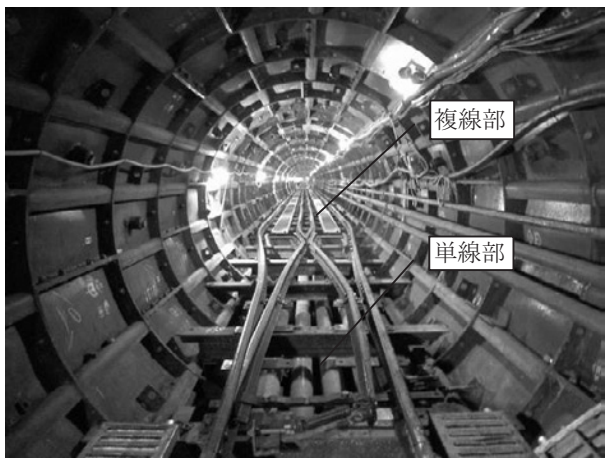

写真-3　坑内複線ポイント部

これにより，切羽でずり運搬車に掘削土の積込が終わってから，空のずり運搬車が切羽に来るまでの時間を短縮し，延長 2km を過ぎても土砂搬出時間を 30 分以内として，最後まで計画日進量を確保できた。

4.2　坑内測量の効率化と精度向上

長距離施工でもう一つの大きな課題は，3km 到達時の位置誤差をいかに少なく収めるかである。シールドの基線と方向をチェックする毎日の坑内測量は，精度を上げるために施工距離に比例して測量回数が増える。しかし，この測量は坑内作業の休憩中や昼夜勤交替時の間で行うため，長距離になるほど入坑に費やす時間が長くなり測量者の負担が大きくなる（写真-4）。

そこで今回，改良を重ねた当社開発の遠隔測量システム「FRS」を導入した。本システムは，すべて事務所からの遠隔操作で，測量器とカメラを搭載した測量台車を測量用基準点まで自走させてシールド機の位置測量を行うものである（写真-5）。

（1）遠隔測量システム（FRS）の特長

・画像認識による自己位置算出方式(従来ダボ使用)
・自走式測量台車による測量(作業中は台車格納)
・遠隔操作による測量作業（坑内通信用ケ-ブル）

（2）FRS 導入の成果

①測量作業の省力化

今回は従来測量作業と並行して本システムを活用した。これにより，とくに職員が手薄となる夜勤時の測定データを，昼勤の職員が朝礼前に事務所からの遠隔測量で再確認しチェックできた。省力化率は 87.5%（従来：坑内 2 人×1 時間　⇒ 改善：事務所 1 人×15 分）となった（写真-6）。

②高精度なデータを有効活用

従来と本システムを比較した結果，測量精度の誤差±10mm 以内（図-3）となり，実用に供した。また，シールド機内の複数の計測点を測量することで，本体のピッチングやローリング，方位角等が計算でき，シールドの挙動解析が可能となった。

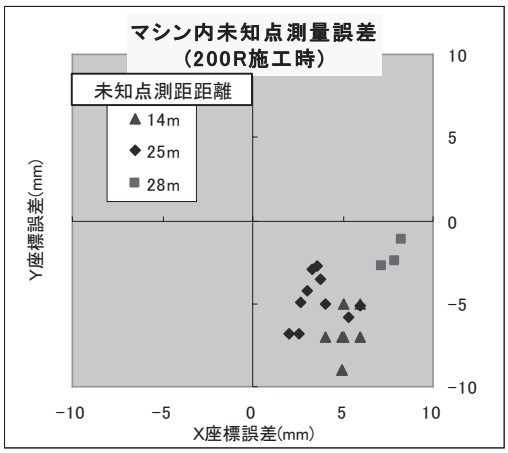

図-3　従来－FRS 測量誤差

③到達高精度を達成

測量データのチェックが倍増したことで，約 3km 到達時の施工誤差を上下 9mm 左右 14mm という高精度に収められた（写真-7）。

写真-4　従来の坑内測量状況

写真-5　遠隔測量システム

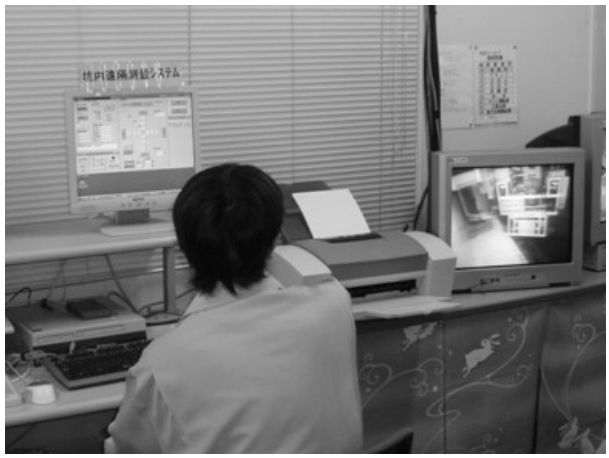

写真-6　事務所にて遠隔操作

写真-7　シールド到達状況

4.3　ビット交換作業の改善

本工事では延長約 3km のシールド掘削にあたり，途中 2 回のカッタビット交換が計画された。この作業は，シールド機外の地山へ作業員が出てカッタ面板のビットを交換する方法（図-4）で，設計の補助工法は薬液注入工法であった。薬液注入は，ビット交換時の切羽の自立と止水を目的として，シールド機の前面と周囲を複相式二重管ストレーナ工法で地盤改良するものである。

しかし，ビット交換作業は，昼夜で 4 日程度の日数がかかり，その期間の止水効果が十分に発揮されていないと，経時とともに湧水が増加して地山の崩壊，坑内への土砂流入等が発生し，大事故の危険性がともなう。このような危険に対し，地盤改良として信頼性の高い（改良強度の高い）高圧噴射攪拌工法が優位だが，現場施工ヤード等の条件から採用できなかった。

そこで，補助工法の施工計画と実施にあたり，次の手順で薬液注入工の段階確認と効果検証を行うことで，発注者の承諾を得て，より安全な施工法に変更改善することとした。

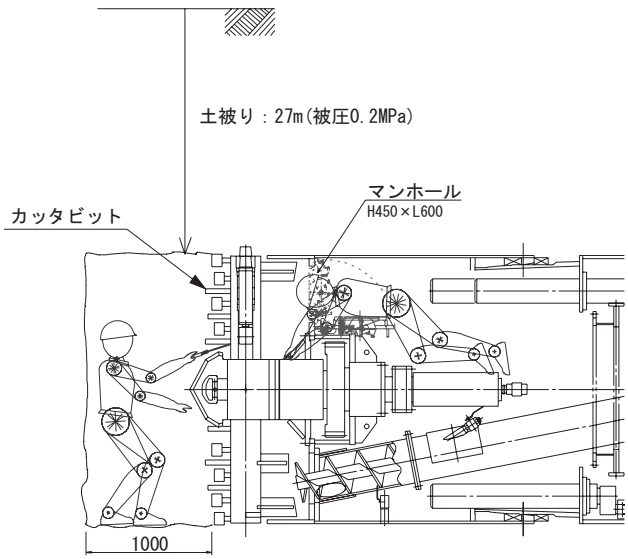

図-4　ビット交換概要図

（1）薬液注入工の設計照査

①注入量の変更

設計の注入量は改良地盤から 190m 離れた土質データを基に算出されたが，実施工にあたり現地でのボーリングを行った結果，当初想定したものより砂質土の比率が高かった。このため，注入率を砂質土対応の 31.5%（設計 24%）に変更し，注入材は止水性と強度に優れ，砂質土で有効的な溶液型グラウト材を選定し，ピッチ 1m で 101.5m^3（合計 60 本）の地盤改良を実施した。

②改良効果の予測

改良効果を透水性で考えると，改良前の透水係数は土質調査から 1.5×10^{-3}cm/s であり，これに対し改良後は，（図-5　薬注協会資料）から 1×10^{-5} cm/s ～5×10^{-4}cm/s に変化すると推定できる。また，改良後に切羽でビット交換作業ができる条件は，不透水層と評価され地山の自立を確保できる 1×10^{-4}cm/s 以下とすれば，計画通りの薬液注入で改良後の透水係数は（図-6）のとおり，ほぼ不透水層の領域となり安全に切羽作業ができると判断した。

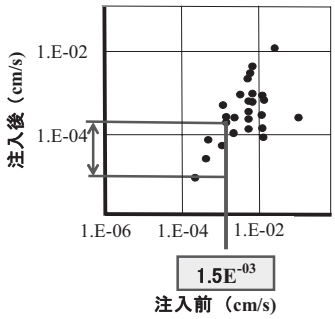

図-5　注入前後の透水係数変化（λ＜30）

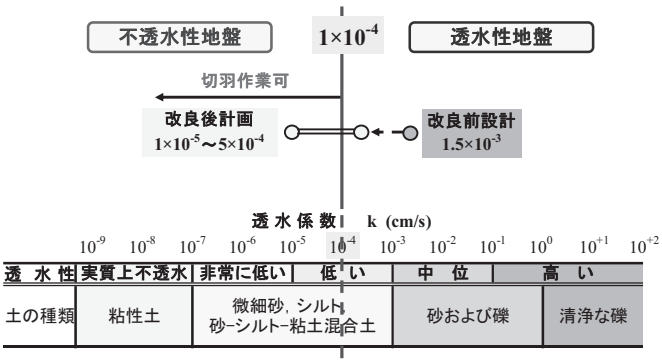

図-6　透水係数変化 k＝1×10^{-4}cm/s 以下を不透水層とした判定図

（2）改良結果の検証と湧水

ビット交換にあたり，地盤改良をした所定の位置でシールド機を停止させ，切羽へ作業員が出る隔壁マンホールを開放するため，マンホール横 φ 50mm バルブを開け，チャンバー内地下水の排水を行ったが，切羽からの湧水は止まらないため，次の 3 つの確認を行った。

①排土した地山の薬注効果を試薬にて検証し，改良の品質に問題がないことを確認。

②マシン外周と後方セグメントから，止水材と裏込の注入でマシン後方部の止水を実施し，この区間の湧水がないことを注入孔から目視で確認。

③この時，湧水量は 5L/min であった。ビット交換作業は昼夜で 4 日程度の日数がかかり，総湧水量が約 29m^3 となり，経時と共に湧水量も増加する危険性が高い。また，この湧水量を透水係数に換算すると 1.17×10^{-4}cm/s となり，当初に設定した条件の 1×10^{-4}cm/s よりやや高いため，安定地盤といえず地山崩壊を起す可能性がある。また，切羽土圧については，隔壁のバルブ排水で一時的に土圧を 0MPa に落しても，4 時間程度で元の静止土圧 0.2MPa に復元するため，地下水は溜まり水ではなく満水になれば高い被圧状態になることがわかった。

上記の点から，このままではマンホール開放によるビット交換作業が危険で困難と判断した。

(3) 切羽湧水の原因

改良後の透水係数が 1×10^{-4}cm/s より高く，湧水が発生した原因としては，改良地盤が粘土混り砂層という不均質性であったことに伴い局所的に存在していた粘性土や流木の影響で，やや止水効果が低下し，10^{-5} オーダーの不透水層レベルまで減少させられなかったと考えられる。

(4) 圧気工法の適用

工法比較の結果，工期，信頼，経済性の全ての面で優位な，薬液注入施工＋圧気工法という併用補助工法とし，圧縮空気で問題の湧水を遮断する方法を提案し採用された。

本工法は，坑内に隔壁とマンロックを設置して，地上から圧縮空気を隔壁内部へ送ることで湧水を止める工法（図-7）で，所要空気圧は切羽上部砂層 13ｍの間隙水圧に対し，薬注工による透水係数低減を加味し 60%程度の，0.08MPa（0.13MPa×0.6）を上限値とした。圧気設備は圧気推進用のブロワ（39KW，18m^3/min）2 台とマンロック 1 基を使用し，隔壁は坑口から 100m に設置することで、短期間で交換作業にかかれた（写真-8，写真-9）。この結果，地下水を完全遮断し 2 日間で安全にビット交換を実施できた。

当初の薬液注入工法では地山自立と止水性は困難で，圧気工法を併用して止水性を確実にして安全性を高めたことは有用であったと考える（写真-10，写真-11）。

圧気設備一覧表（ビット交換工1回当り）

機械設備、資材名	仕　　様	単位	数量
ブロワユニット	18m^3/h，0.08MPa	基	2
マンロック(ユニット型)	Φ1,300mm推進用	基	1
隔壁（ロック取付）		基	1
隔壁取付リング		基	1
ロック移動台車	ｾｸﾞﾒﾝﾄ台車代用	基	1
圧気用送気管	Φ100mm鋼管	m	200
排気管	Φ300mm鋼管	m	200

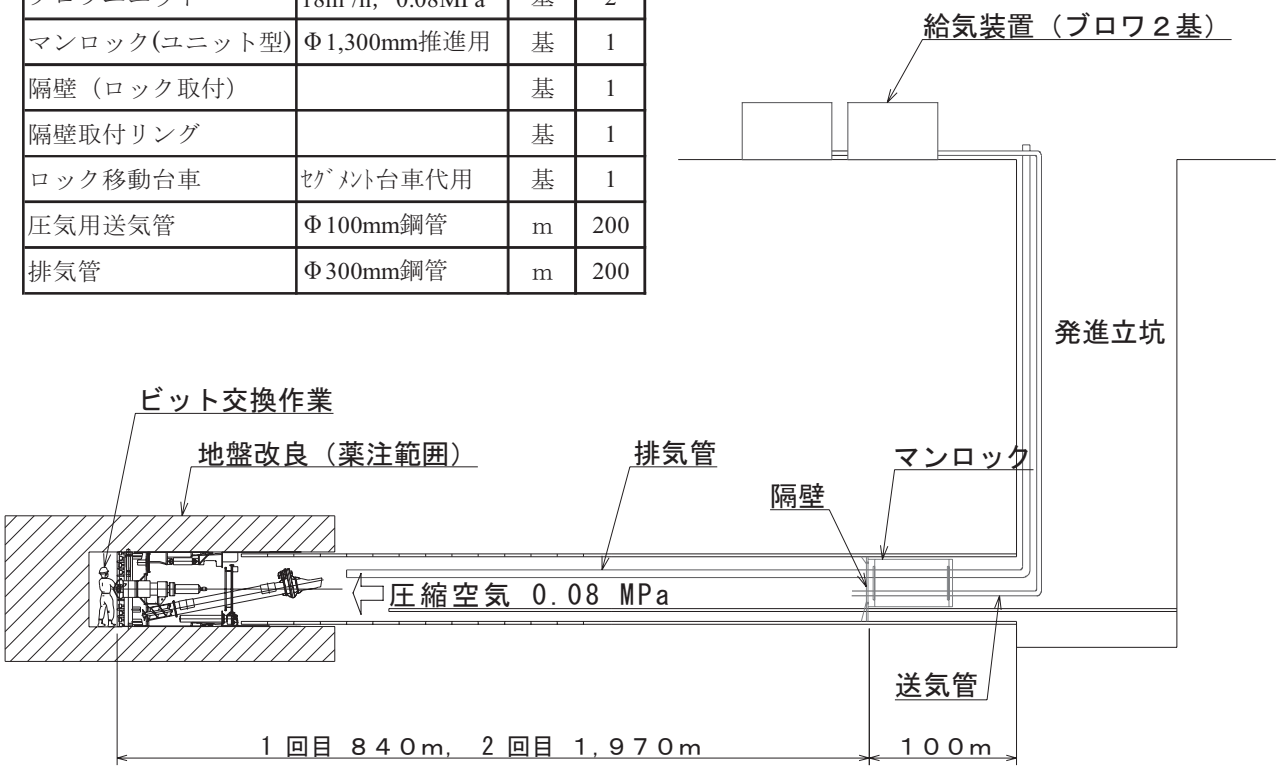

図-7　圧気補助工法の概要図

写真-8　ブロワ設置状況

写真-11　カッタビット交換前状況

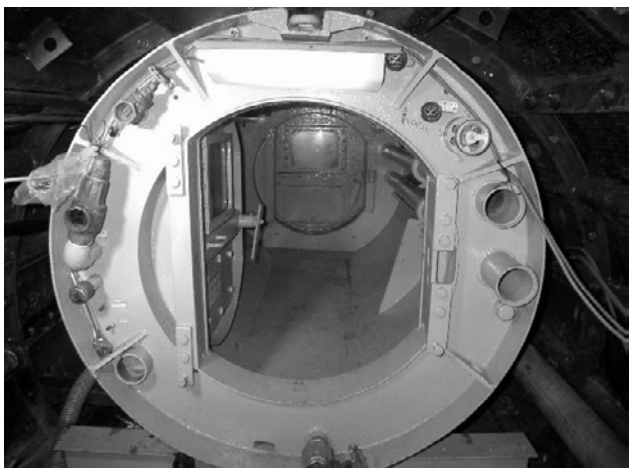

写真-9　坑内マンロック設置状況

写真-10　ビット点検交換状況

５．長距離掘進実績

長距離掘進については，シールドのテールブラシやシールの耐久性といった機械設備上の問題はなかった。ビットの摩耗量は，約 3km を一度も交換しなかったもので先行ビットが実測最大 30mm（許容 30mm），ツールビットが実測最大 10mm（許容 20mm）であり，ビット数の増加や多段配置の効果で少なかったものと判断され，交換しないでも 3km の掘進が可能であったとも考えられる。月進は最大 328m，平均 213m（初期，到達除く）で，当初の工程を 1.5 ヶ月短縮して到達した。

６．小口径シールド長距離化の展望

現在，総合評価方式が採用されるシールド入札は，長距離化に伴う経済性がキーワードとなり，工期短縮，高速施工が技術提案の柱となるケースが多い。高速施工というと，シールド機のジャッキ速度向上や掘進とセグメントの同時組立が注目され，技術開発もこの分野に集中しているが，小断面においては作業空間が狭く労働条件が厳しいため，これらの技術導入は困難なのが現状である。今後，工期短縮という発注者のニーズに応えるには，掘進の停止期間を極力短縮する手段として，1 日 3 交代制の作業形態に取組むケースがある。この場合，とくに設備に対しては今回のような新システムや工夫改善の効果的な組合せで稼働率を上げ，余裕のある作業環境造りが重要と考える。

おわりに，今回の対策と提案に協力して頂いた関係者の方々に心から，感謝の意を表します。