

解説

—岩盤・玉石地盤掘削を可能にした推進工法— CMT工法施工報告

さかき きょうへい
榊 恭平

神戸市水道局
東部水道管理事務所

かわもと よしかず
河本 義一

北浦・関西特定建設工事
共同企業体



さかい やすゆき
酒井 泰之

(株)エイコーエンジニアリング



きのした たかよし
木下 貴義

CMT工法協会

1 はじめに

神戸市の配水管の総延長は、約4,880kmとなっており、そのうちの多くが1960年代後半から約20年の間に整備されたものである。神戸市では、近い将来、これらの管路が一斉に更新時期を迎えることに備え、管路の重要度等を考慮しながら、計画的な更新工事を進めているところである。

本工事の施工範囲は、JR神戸線より南側の灘区都賀川から東灘区住吉川までの約2万5千戸を配水区域とする篠原低層配水池の最上流部（根本）の管路である。市内でも最大規模の配水区域を有する非常に重

要な管路であるが、敷設後53年経過した経年管であり、非耐震管でもあるため、早急な更新が必要となっていた。

また、当該施工地域は、昭和13年7月3日から5日に発生した土石流等により、神戸市および阪神地区に死者616名、家屋の倒壊・流出3,623戸、埋設家屋854戸に達する甚大な被害を及ぼした阪神大水害の影響をまともに受けた地域である。

このため、当該地区の地下には現在もその爪痕ともいうべき1.5mを超える巨石および流木等が群をなして堆積している（写真－1、2）。

ここに報告する工事は、過去の災害によって巨石群および大量の流木が堆積した地層の中を呼び径1200の



写真－1 阪神大水害



写真－2 施工時に出土した巨石

鉄筋コンクリート管を用いて推進工事を行うものである。

当該地区は、阪急電鉄や都賀川（2級河川）・幹線道路の横断が発生することや、地盤自体もN値が高く、非常に硬質であったこと、過去の災害の影響で流木や巨石などの堆積物が多く点在し工事の支障になる可能性が高いこと、閑静な住宅街で道路が狭隘であること等施工条件の制約が非常に厳しい地域であった（図-1）。

工事検討の結果、岩盤推進工事に開発され、推進工事中に巨石や流木などの障害物にも対応でき、これらの工事の実績を多くもつCMT工法を採用した。

結果、推進工事中のトラブルもなく、施工精度も計画どおりの成果を得ることができたため、その概要を報告する。



図-1 推進施工場所

2 工事概要

工 事 名：篠原低層配水本管整備工事

工事場所：神戸市灘区篠原本町5丁目から
灘区将軍通3丁目地先

発 注 者：神戸市水道局

施 工 者：北浦・関西特定建設工事共同企業体

工 法：CMT工法（複合掘進機）

呼 び 径：1200

推 進 工：推進延長124.277m+322.565m（2スパン）

●区間①（124.277m）（図-2、3）

管 種：推進工法用鉄筋コンクリート管

50N/mm² 1種管、2種管

推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管

90N/mm² 1種管

曲 線：R=100m CL=40.169m

土 被 り：13.12～7.43m

縦断勾配：1.0%

地下水位：GL-6.66～-4.18m

土 質：巨礫混り砂礫層（最大礫径1.5m以上）

●区間②（322.565m）（図-4、5）

管 種：推進工法用鉄筋コンクリート管

50N/mm² 1種管

中押管

50N/mm² 1種管

推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管

90N/mm² 1種管

曲 線：R=700m CL=94.304m

土 被 り：7.59～7.49m

縦断勾配：2.7%

地下水位：GL-4.25～-5.05m

土 質：巨礫混り砂礫層（最大礫径1.5m以上）

3 本工事の課題と対応

本工事の篠原地区は、前記したように地下には現在も阪神大水害の爪痕ともいえるべき1.5mを超える巨石および流木等が群をなして堆積している厳しい土質条件である。

また、区間①（124.277m）は、巨石が点在する砂礫地盤を2級河川および阪急電鉄などの重要構造物を下越ししながらの急曲線推進施工で、区間②（322.565m）は、巨石が点在する砂礫地盤を長い延長での推進施工という難しい施工条件下となっており、安全で確実な推進施工を行うために綿密な事前検討を行った。

3.1 巨石対応

(1) 巨石の破碎

区間①と区間②ともに、1.5mを超える巨石が堆積し

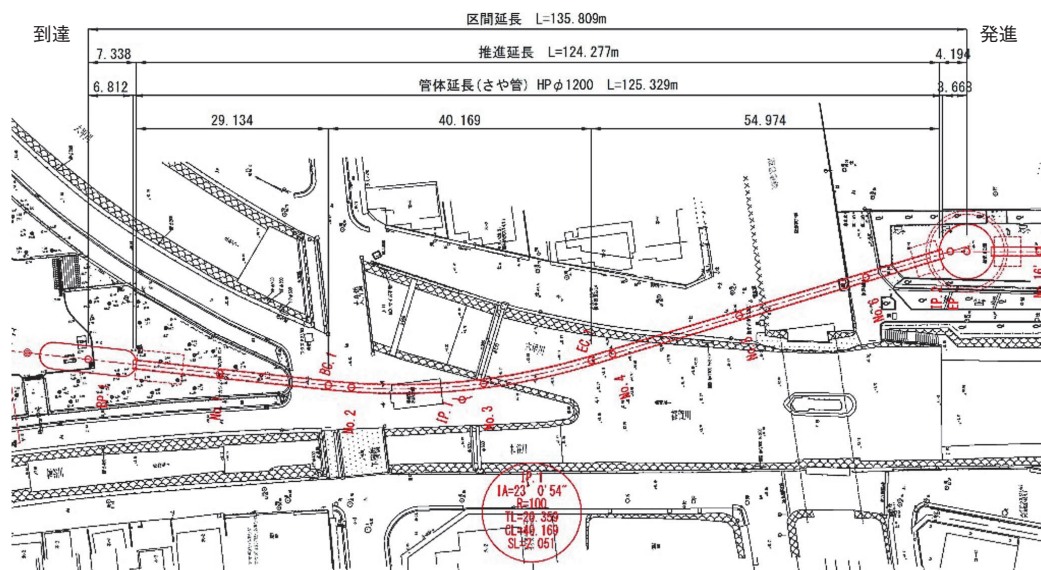


図-2 施工平面 (区間①)

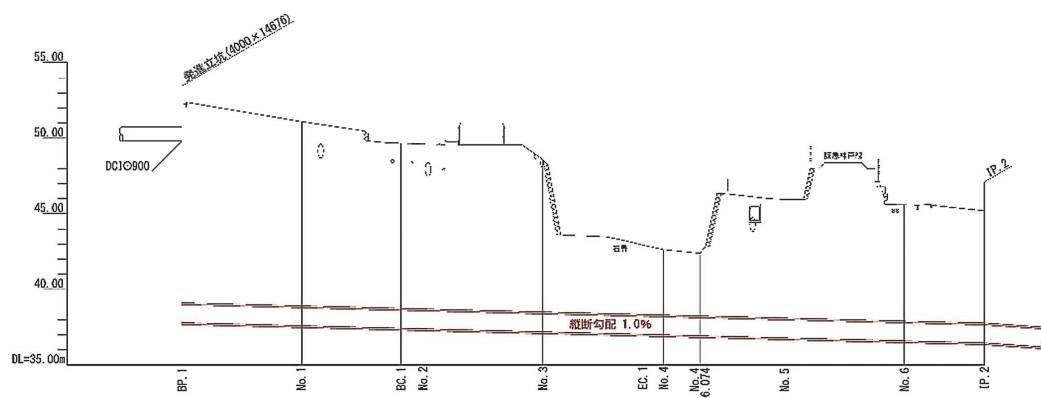


図-3 施工縦断 (区間①)

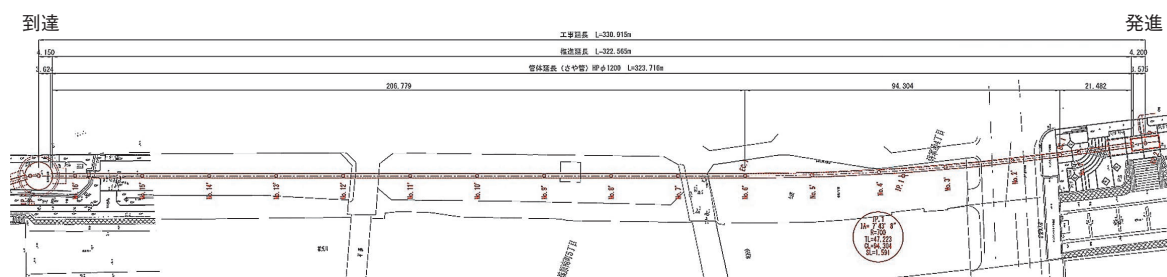


図-4 施工平面 (区間②)

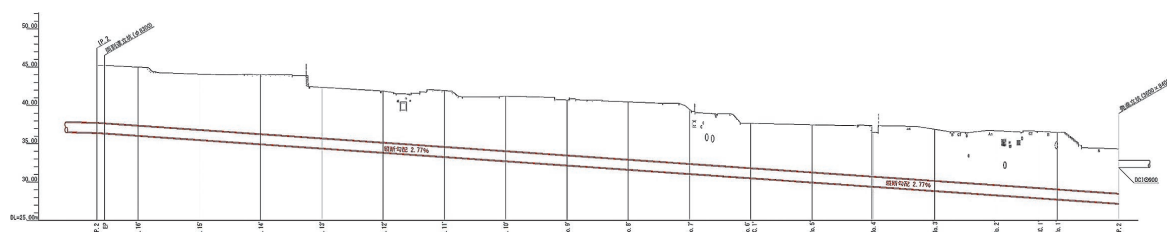


図-5 施工縦断 (区間②)

ているのが立坑築造時に確認された。巨石は、同じ造岩鉱物で構成される岩盤と比べて高い強度を有していると考えられる。

巨石群の中での推進施工で最も重要なことは、「巨石の揺動（踊り）を如何に抑えることができるか」である。一度踊り始めた巨石には掘進機の破壊力に対抗する反力がなくなるため、巨石の破碎が非常に難しくなる。また、踊り始めた巨石は、連鎖的に周りの巨石の安定を崩すこととなり一挙に切羽は乱れる。

このような悪い連鎖を避けるために、常に切羽部を大きな力で切羽面に押し付けて、しっかりと切羽の巨石をホールドしながら破碎しなければならない。切羽を保護して巨石を破碎する方法としては、掘進機の後方に4台の推力点ジャッキを左右対称に装備した推力点機構により行う（写真-3）。推力点ジャッキにより先行して所定の押付け力でカット面板を加圧し、地山を圧密状態にして巨石を固定・ホールドする。ホールドした巨石は作為的に岩盤状態となり、その巨石等をローラビットで削りながら切削・掘進していく。カット面板を加圧する切羽押付け力は、CMT工法では管呼び径や土質条件によって規定されており、本工事では呼び径1200、玉石・砂礫地盤(D土質)であることから 500kN/m^2 に設定された。

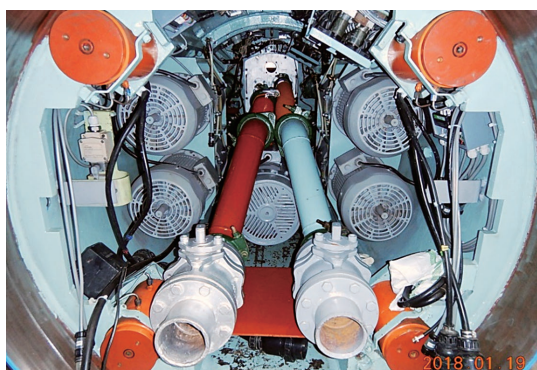


写真-3 推力点機構



写真-4 CMT工法複合掘進機

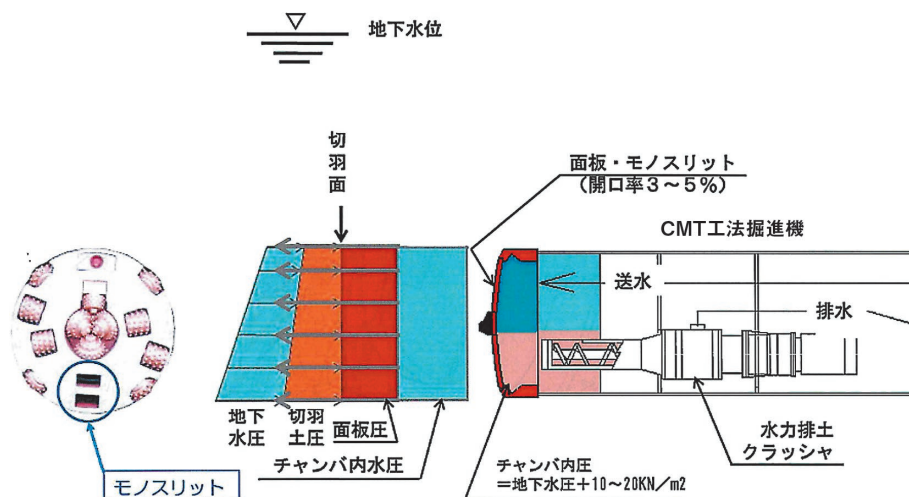


図-6 CMT工法の切羽安定原理

また、巨石破碎時に地山の細粒分を過剰に取り込まないように、取込口を1箇所だけに設置したモノスリット方式を採用して対応した。複合掘進機のモノスリット方式とは、開口率を3～5%に絞った土砂取込口を1箇所だけに設けることで、細粒分の取込みを制御する（写真-4、図-6）。

ここに、モノスリット方式の理論について説明する。

通常の泥水工法（水力排土方式を含む）の面板には、土砂取込口（カッタスリット）が中心対象に2～4箇所ついている。例えば図-7のように、カッタスリットが面板に2箇所装備されていると、面板の回転により交互にどちらか1つのカッタスリットが上にきて、他のスリットが下にくる。チャンバ内の水圧をいくら高くしても、水の流れは圧力の低い方へ流れるので、水は上のスリットから切羽に出ていき、切羽の土砂は水とともに下のスリットからチャンバ内に流入する。

しかし、モノスリット面板では、**図-8**のように、カッタスリットが面板に1箇所しかないので、チャンバ内水圧をカッタフェイスの最下部の水圧よりも高くしておけば、モノスリットが面板の回転によって真下に来た時は、他に水圧の逃げ道がないので下に来たモノスリットから水は切羽に向かって流出する。モノスリットが最上部に来た時も、チャンバ内の水圧が高いのでモノスリットから水は切羽に向かって流出する。モノスリット方式によれば、水の流れによって砂分がチャンバ内に過剰に取り込まれることはない。

本工事では、諸条件を考慮して開口率2.0%に設定した。

さらに、掘進機と元押ジャッキが長距離になると、管列の各推進管に設置された緩衝材は元押ジャッキにより圧縮・応力の開放が繰り返され掘進機の速度や切羽の押付力が不安定になる。掘進機面板やローラビットの切羽への押付力の変化が間欠的に作用すると、面板・ローラビットへの過度の衝撃が加わり変形破損を引き起こし、また切羽が緩み崩壊につながる。

このため本工事の区間②では、発進立坑より何百メートルも前方の掘進機を安定して制御することが難しいことから、掘進機の直後にセミシールド機構を設置して掘進機を直接推進することとした。セミシールド機構で掘進機を直接推進することにより、掘進速度を安定させ、カッタトルクや切羽押付力を直接監視・制御することで面板、ローラビットの損傷を防止し、切羽を安定させることができる。掘進機は、セミシールド機構により掘進するので管列全体は移動しません。元押ジャッキにより常時管列全体に推進力をかけ続けることが避けられるので推進管の破損やストレスが低減できる。セミシールドジャッキの設置は、500kN×4台で計画した（写真-5）。

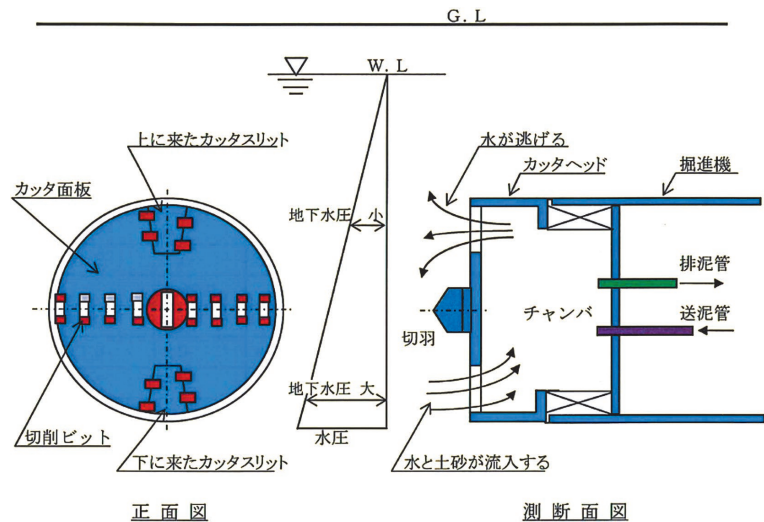


図-7 従来のカッタヘッドのチャンバ水の流れ

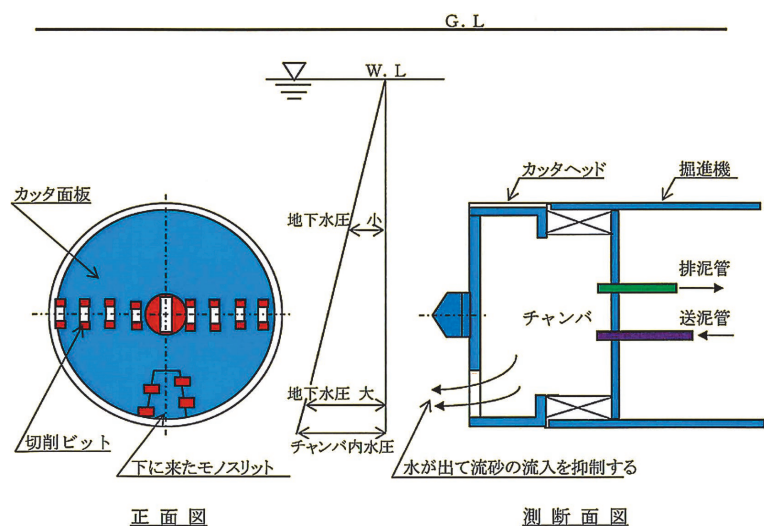


図-8 CMTモノスリット・カッタヘッドのチャンバ水の流れ

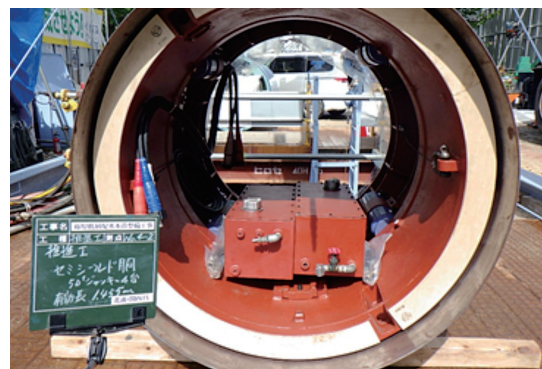


写真-5 セミシールド機構設置状況

(2) ビット交換

CMT工法の複合掘進機は、機内の点検扉からビット交換を可能にしたことが最大の特長である。このことにより、非常に硬い岩盤・巨石地盤の推進においてもビットの摩耗による推進延長の制限から解放され、推進管の耐荷力がもちこたえる限り岩盤・巨石地盤でも長距離推進が可能となった。

また、硬い岩盤・巨石地盤を掘削・破碎しなければならない推進工では、「ビットの摩耗」が最大の問題であり、岩質・岩強度によっては数十メートルの掘削でビットが摩耗し掘削が不能になることがある。ビット交換の目安は、掘削トルク、切羽への押付反力、推進速度、方向修正の効き具合等の変化からビットの摩耗度合いを判断することが重要である。

CMT工法協会において、ビットの標準交換延長は、土質、岩質、ビット形状により標準交換延長を経験、実績より参考値として記載しているが、ローラビットを使用するようなハードな地盤では、ビットの摩耗は推進中の切羽の異常、岩質、礫質、強度、RQD値などにより大きく変化することから、常に点検扉から点検確認をする必要がある。本工事では、区間②の推進延長が322.565m、巨石混り砂礫地盤、礫率が60%以上であることから、協会参考値から1回（ゲージカット4箇所）の交換を計画した。

このような条件下での推進施工では、ローラビットの損耗や破損ばかりではなく回転する面板や外周部分の損耗も激しいと想定したため、従来よりもさらに頑強な補強を下記のとおり施した。

- ①切削部の面板および外周はハードフェーシングに加えて数多くの超硬チップを埋め込み摩耗対策した。
- ②巨石の破碎には、硬い岩盤掘削での経験から低反力型のローラビットを採用して巨石から受ける反力を抑えて切羽面を保持することとした。

CMT工法は岩盤掘進を基本に設計された工法であり、巨石群の中では、面板を強烈な力で切羽に押付けての切削となるため、掘削トルクは非常に大きくなるが、一般的な掘進機より大きなカットトルクを有しているため、通常の複合掘進機で対応することが可能となっている。

また、過去の災害によって大量の流木が堆積している

ことが想定され、推進中に流木の木片によってスリット閉塞が発生した時は、推進工を一旦中断して機内の点検扉から障害物の目視確認を行い、スリット閉塞を効率よく解除する対策を計画した。

地下水位下での作業は、「CMT圧気システム」の採用により、地下水の侵入を防ぎ安全を確保してからビットの交換を行う。

(3) 推進管の破損

通常、推進管の管種は、推進力計算および曲線中の側方土圧により決定され、N値30以上の巨石が点在する砂礫地盤では、推進管外周で巨石が転動（カム作用）し、そのカム作用で推進管に突然孔が開くことが多々報告されている。孔が開くまでには至らなくても、推進管にひび割れが発生することもある。経験によると、推進管の破損は、切羽先端からおおよそ35～60m範囲で多く発生し、それより後方の推進管では曲線区間を除いてほとんど発生していない。試験研究の結果と実績からガラス繊維鉄筋コンクリート管（G90N/mm²）が硬い巨石の集中荷重に対する耐荷力をもっていることが確認されているため、本工事では区間①と区間②ともに、掘進機後方から20本目までの推進管に対しG90N/mm²管を採用した。

3.2 曲線対応

CMT推進システムで使用する曲線推進用伝達材は、平断面の幅を全幅とする近似的台形をしているので、推進管の端面の曲率中心側の大きな端面が利用できる。また、曲線中の推進管の端面が近似的台形の斜辺部分に当たるので、目地開き角度が一定し安定した推進力伝達が行える。

従って、区間①は、巨石群の中でR=100mの急曲線推進が含まれており、掘進機は計画曲線の造成が可能な構造となっており、正確な曲線造成と後続する推進管列の曲線形成を可能とした。

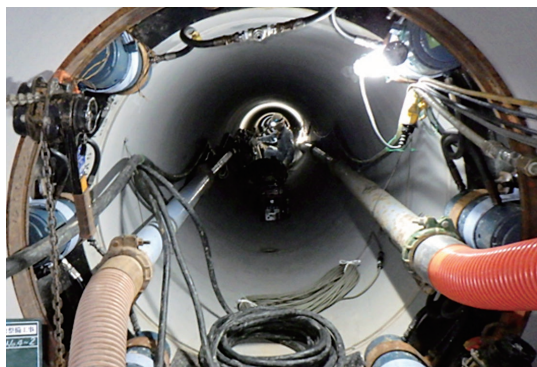
3.3 推進力対応

推進延長が長くなると、掘進機の先端抵抗と推進管列の外周抵抗の総推進力を元押ジャッキだけで押し切ることは難しく、発進立坑での推進力と管の許容耐荷力との比較等を行い満足しなければ中押を採用する。中押管は、S管およびT管摺動部からの漏水や元押設備と

の連動および日進量の低下等で採用を避ける傾向にあるが、長い管列を分割して押していくことは推進管のストレスを軽減し、計画推進力の変動係数を減らすことにつながる。中押の設置は、下記を考慮して最適な位置で計画する。

- ①曲線内では作動させない
- ②作動延長が長い区間に設置する
- ③中押以降の使用管種が経済的になる
- ④中押油圧設置が経済的である

本工事の区間②では、推進延長が322.565m、礫率60%以上で巨石が点在する砂礫地盤での推進施工であり、総推進力が管の許容耐荷力を上回ることから、中押を1箇所（41本目）設置して推進力を分散する計画とした。また、初期発進時から管外周部に滑材を連続注入することにより、推進力の低減を図り、中押ジャッキの設置は、500kN×6台の装備とした（写真－6）。



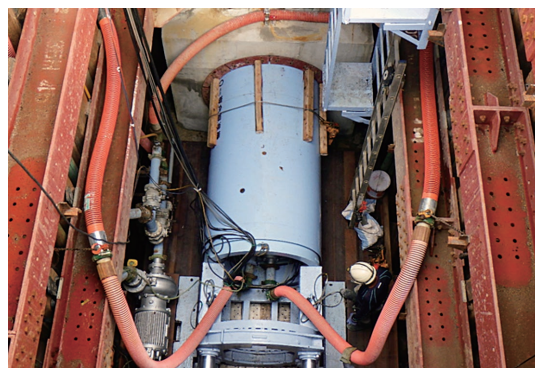
写真－6 中押装置設置状況

4 施工結果

発進立坑の構築順によって、区間②より推進施工を開始し、初期発進時から推力点機構により面板を所定の押付力（500kN/m²）で切羽面に加圧し、常に地山を圧密状態にして巨石を固定・ホールドできるように心がけ、チャンバ内水圧、掘進速度、取込土量などを日々継続して管理することで、切羽の安定に努めた。

状況に応じてセミシールド機構を稼働させて掘進機を直接推進することとした。掘進速度を安定させ、カットルックや切羽押付力を直接監視・制御することで、切羽を安定させることができた。

発進当初からカットルックを示す数値が最大値付近で大きく振れていたことで、巨石の出現を確認していたが、機内のクラッシャにかかる負荷がさほど大きくないことから、ローラビットによる破碎が順調に行われていることと判断した。また、推進施工は、ベテランオペレータを配置したことにより、地山の状況により推進速度・切羽押付力等をこまめに調節・管理したことによって、巨石の踊りだし防止に努めた。その後も巨石は頻繁に出現したが、推力点機構およびモノスリット方式等の対応で安定した巨石推進が行えた（写真－7、8）。



写真－7 初期発進状況



写真－8 破碎された巨石片を含む排土

計画された推進位置において、掘削トルク、切羽への押付反力、推進速度、方向修正の効き具合等に変化が見られたため、ビット摩耗と判断し、推進を中断し複合掘進機内に装備した点検扉を開き、ローラビットの摩耗状況を調査した。当初の計画通りゲージカット4箇の摩耗を確認し、面板の裏面からビットの交換を計画通り行った（写真－9）。



写真-9 ゲージカッタ交換状況

また、推進管106本目で総推進力が管の許容耐力に近づいたので、中押装置の稼働を開始し、推進力の分散を図るため、到達まで中押を稼働しながらの安定した推進施工が行えた。

区間②の推進施工が完了し、直に区間①の推進施工を開始したが、この区間は、巨石が点在する砂礫地盤を河川および阪急電鉄などの重要構造物を下越ししながらの急曲線推進施工であることから、より慎重な推進施工管理を行った。

急曲線区間は、BC点の通過後から取込土量を管理しつつ推力点機構の切羽押付力を少し抑えながら慎重な曲線推進に努めた。推進中も区間②と同様に巨石の出現があり、切羽押付力がやや不安定になると一旦推進を停止して切羽押付力等を微調整することにより、巨石のホールドを確実にして切羽の安定を図った。

曲線の造成は、複合掘進機本体を計画曲線にあった角度で屈曲させることにより、正確な曲線造成が行えた。また、追従する推進管列は、各推進管の継手部に設置した曲線用推進力伝達材が掘進機の造成した計画曲線に沿って変形しながら追従し、確実に曲線形成が行えた。

掘進機後方から20本目までに採用したG90N/mm²推進管列は、前記した推力点機構およびモノスリット方式等の対応策により、安定した巨石等のホールドによって転動が抑えられたことや、ガラス繊維鉄筋コンクリート管の集中荷重に対する大きな耐力によって、推進管列のひび割れ等の発生はなかった。

流木対策は、区間①および区間②ともに想定したほどの流木が出現することはなく、出現した流木は慎重な

掘進操作により、ビットで細かく切削された木片がスリットからカッタチャンバ内に取り込まれて、大きな障害にはならなかった。

最終推進精度は、

- ・1スパン目区間
- ・センター：左3mm
- ・レベル：-24mm
- ・2スパン目区間
- ・センター：右17mm
- ・レベル：+9mm

と高精度に竣工できた。

最終推進力は、

- ・1スパン目区間
- ・総推進力：2600t
- ・2スパン目区間
- ・総推進力：4350t

と低推進力で竣工できた（写真-10）。

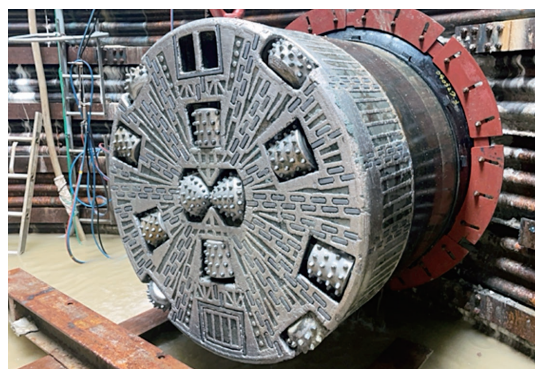


写真-10 区間②の到達状況

5 おわりに

本工事は、区間①は、巨石が点在する砂礫地盤を河川および阪急電鉄などの重要構造物を下越ししながらの急曲線推進施工で、区間②は、巨石が点在する砂礫地盤を長い延長での推進施工という難しい施工条件下であった。厳しい施工条件となっていたことから、詳細な事前検討と慎重な施工の結果、安全で確実な推進施工が実施できた。

今後も、市街地での厳しい施工条件や周辺環境による制約等の多い工事が想定され、設計および施工にお

いて予測されるリスクを取り上げ十分な検討・協議を行い、確実な施工方法が求められる。今回の経験を活かすとともに、これからも積極的な情報収集と詳細な事前検討を行い、より安全で確実な施工に努めたい。

最後になりますが、本工事に関してご協力いただいた協力業者の皆様方には、誌面をお借りして御礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 「阪神大水害の爪跡、巨石群を穿つ」有馬栄一、矢口征勇、高畠祐一、月刊推進技術 Vol.27 No.9 (2013年9月)
- 2) 「CMT工法 玉石・砂礫地盤推進システム」磯部健、森本正敬、木下貴義、月刊推進技術 Vol.35 No.12 (2021年12月)