

シールド掘進に干渉する既設杭の大断面シールド機による直接切削技術

大成建設(株)東京支店	正会員	○笠井 和俊	大成建設(株)東京支店	正会員	福田 隆正
大成建設(株)東京支店	正会員	足立 英明	大成建設(株)東京支店	正会員	安藤 哲人
中日本高速道路(株)東京支社		長濱 清孝	中日本高速道路(株)東京支社	正会員	呉 菲
中日本高速道路(株)東京支社		牟田 亨	中日本高速道路(株)技術建設本部		千国 洋道

1. 工事概要

(1) 全体工事概要

東京外かく環状道路 本線トンネル（北行）大泉南工事（以降、本工事と称する）は、現在施工が進められている東京外かく環状道路（関越～東名）の全長 16.2 kmのうち、関越側に位置する大泉ジャンクションから発進するトンネル延長 6.9 kmの北行本線シールドトンネル工事である。

本工事は、シールド機外径 16.1mの国内最大の泥土圧式シールド機によって施工され、セグメント外径は 15.8 m、セグメント厚さは 650mmである。

掘削土層は舎人層（粘性土、砂質土、砂礫の互層）でN値 30～50 以上、土被りは最小 7m～最大 57mで地下 40m以深は大深度地下使用法の適用を受けている。

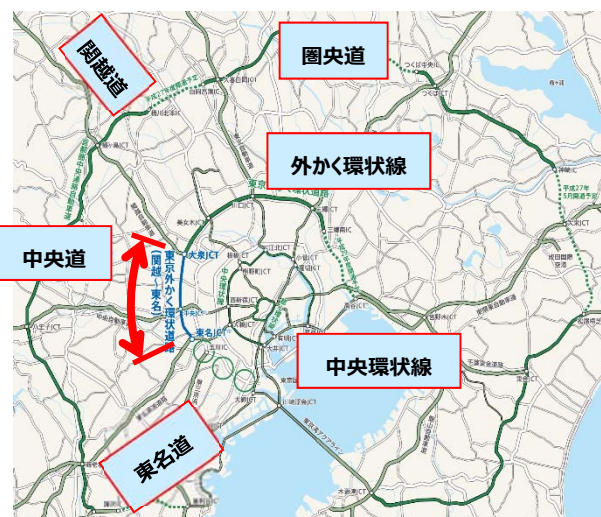


図-1 工事位置図

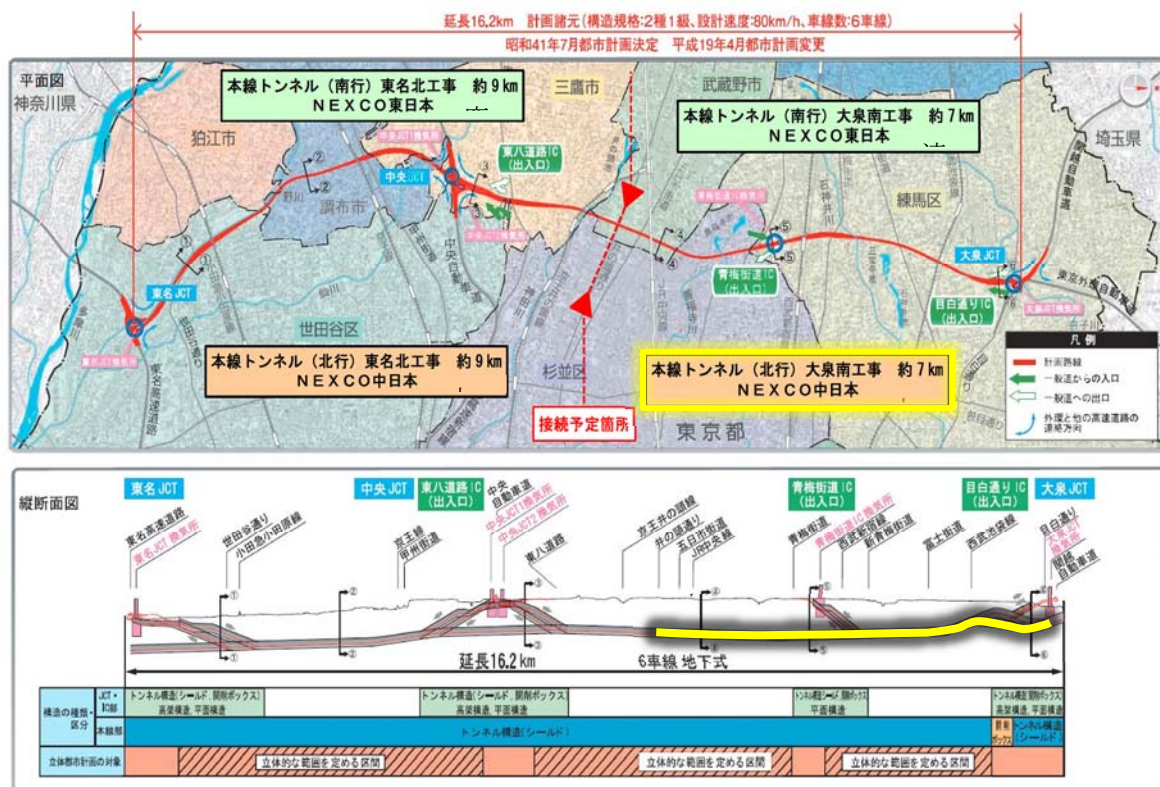


図-2 路線図

キーワード 既設支障杭、直接切削、大断面、泥土圧式シールド

連絡先 〒163-6008 東京都新宿区西新宿 6-8-1 新宿オークタワー 大成建設株式会社 東京支店 TEL03-3348-1111

(2) 既設杭概要

本工事の計画路線は、坑口から約 217m～273m (56m区間) の範囲において主要幹線道路(都道目白通り)および荒川水系新河岸川支流の一級河川(白子川)の直下を横断するトンネル線形となっている。白子川に架かる目白通り氷川橋橋台の基礎杭(CCP杭, $\phi 1.2\text{m} \times 27$ 本)及び白子川護岸の基礎杭(場所打ち杭, $\phi 1.2\text{m} \times 19$ 本)の計46本が連続して支障する。シールドトンネル線形は既設杭に対して掘削断面の上半部に接触する計画であり、土被りは約16m、白子川通過時は護岸底盤までの離隔が約8mである。白子川護岸の基礎杭は、コンクリート設計圧縮強度 $30\text{N}/\text{mm}^2$ 、鉄筋径D16～D32、鉄筋量 $245\text{kg}/\text{m}^3$ である。全ての基礎杭は置き換え済みである。支障する既設杭の配置平面図を図-3、既設杭の代表断面図を図-4に示す。

2. シールド機仕様

(1) 傾斜型カッターヘッド

本工事のシールド機カッターヘッドは通常のフラット形状ではなく、 5° の傾斜角を持たせた傾斜型カッターヘッドを採用した(写真-1)。カッターヘッドに傾斜角を持たせることで既設杭の切削開始時にカッターヘッドの一部が先行して接触し、掘進に伴い接触面積が徐々に増加していくため、カッターヘッドに加わる荷重を初期の段階で小さくすることが可能となり、カッタービットに急激に大きな荷重が加わって損壊することを防止できる。また、既設杭の切削面が斜めになることから杭の大割れを防止する効果もある。既設杭切削時にはカッターヘッド回転数を0.86rpmまで高速回転させ、掘進速度を1～10mm/分の微速で制御可能な仕様とした。

(2) 特殊強化型先行ビット

既設杭を直接切削するとともに掘進距離6.9kmをビット交換なしで掘進させるために特殊強化型先行ビットを装備した。このビットは、通常の支障物切削用のビットと比較してチップ体積を3倍にし、その形状を扇形にすることで耐衝撃性を持たせながら靱性も向上させている。特殊強化型先行ビットを写真-2に示す。

(3) 伸縮式外周切削用ビット

本工事のシールド機はスキンプレート外周に同時裏込め注入管の突起が出ていることから、既設杭の未切削部分が突起部に当たらない

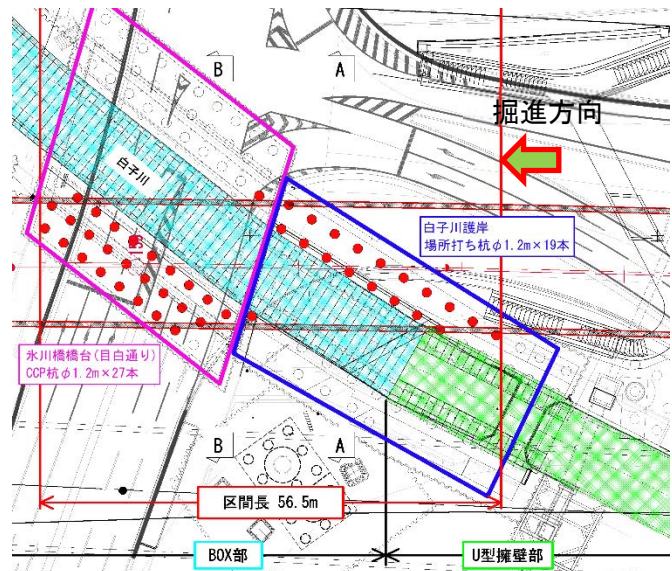


図-3 既設杭の配置平面図

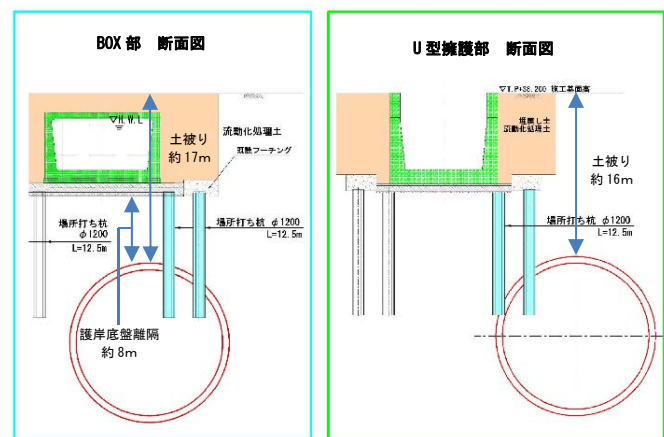


図-4 既設杭断面図

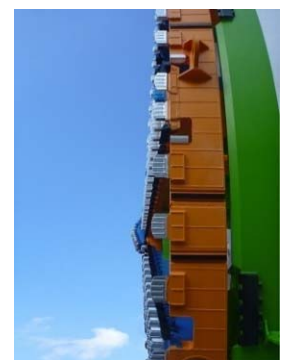


写真-1
傾斜型カッターヘッド



写真-2
特殊強化型先行ビット



写真-3
外周切削用ビット

ように伸縮式外周切削用ビットを4基装備した。これは通常のコピーカッターと同様にカッターヘッドの回転に合わせて所定の位置で伸縮させることにより必要な部分を切削することができる。ビットは既設杭の切削に対応した特殊強化型先行ビットと同材質のものを装備した。外周切削用ビットを写真-3に示す。

(4) カッタービット摩耗・温度計測

本工事のシールド機カッタービットは掘進中のビット状況をリアルタイム把握するために、超音波式摩耗検知ビットを4箇所、多段導通式摩耗検知ビットを10箇所、温度計測ビットを4箇所装備した。

(5) 大口径スクリーコンベヤ

スクリーコンベヤは $\phi 1,500\text{mm}$ とすることで、 $600\text{mm}\times 800\text{mm}$ までの大塊を取込み可能な計画とし、既設杭のコンクリートが大きな塊で割れた場合においてもスクリーコンベヤの閉塞リスクを低減できるようにした。



写真-4 切削実験状況



写真-5 杭切削後の状況

3. 支障物との接触をリアルタイムに把握する判別装置の開発

支障物切削用の特殊強化型先行ビットに加速度センサーを内蔵させ、ビットに加わる振動の微小な変化を可視化することで、支障物の種類をリアルタイムに判別することができる支障物接触判別システムを開発した。可視化した振動波形は運転室内のモニターに常時表示することで、シールド掘進中に支障物特有の振動波形を検知した場合に通常の掘進モードから、切削モード（微速掘進・カッター高速回転）へ瞬時に切替えることを可能とした。

支障物接触判別システムの開発にあたり、既設杭を模した $\phi 1.2\text{m}$ のRC杭を外径 $\phi 2.1\text{m}$ の推進機に実機同様の加速度センサーを内蔵した特殊強化型先行ビットを装備した小型実験機を製作し、実物大の切削実験をおこなった。切削実験は既設杭を模したRC杭を気中および模擬土による複合土層内にて実施した。切削実験状況を写真-4、杭切削後の状況を写真-5に示す。

本実験では計測した振動値をリアルタイムに実効値へ変換し、計測モニター上で色分け表示することで、支障物との接触をリアルタイムに可視化できることを確認した。実際のシールド機には21箇所の特殊強化型先行ビットに振動センサーを装備し支障物を明確に判別できるようにした。

4. 切削用ビットの温度・自動制御システムの開発

既設杭の切削時、カッタービットは支障物との摩擦により発熱し高温な状態になることがわかっており、この時にカッタービット温度が 100°C を超えると摩耗量が急激に増大することが報告¹⁾されている。本工事の場合、多数の杭を連続的に切削する必要があることからカッタービットの温度上昇が特に顕著となることが予想された。そこで、温度センサーを埋め込んだカッタービットでRC杭を模擬した供試体を切削する実験を実施し、カッタービット温度とカッタービット摩耗量の相関を確認した。

実験の結果より、カッタービット温度を 100°C 以下に保つことで、カッタービットの異常摩耗を抑制した杭切削をすることが可能であり、 6.9km の長距離掘進をビット交換なしで掘進した場合の計画摩耗量に対して安全率1.5倍以上を確保できることを確認した。

掘進中は、ビットに埋め込んだ温度センサーによりカッタービット温度をリアルタイムに監視し、カッタービット温度が管理温度（ 100°C ）を超える場合にはカッターヘッドに設けた注水口から自動的に切羽へ注水してカッタービット温度を強制的に低下させられるよう切削用カッタービットの温度自動制御システムを開発した。

5. 掘進計画

(1) 切羽土圧管理

切羽の土圧管理は重要構造物直下および低土被り区間の掘進であることから全土被り荷重×80%を基準として管理土圧を設定した。本工事の掘削断面は超大断面であることから、土圧管理は掘削断面を高さ方向に11分割する位置に取り付けた土圧計にて行う計画とした。既設杭切削は低土被り下で行うことから掘削断面最上部の土圧計にて管理を行うことを計画した。

(2) シールド掘進管理

3次元 CIM による既設杭とシールド機位置を図-5 に示す。3次元 CIM 情報によりシールド機の位置と既設杭までの離隔を把握しながら10～15mm/分程度の掘進速度で掘進し、支障物との接触をリアルタイムに把握する判別装置により、既設杭とカッタービットの接触が確認されたら掘進速度を1～5mm/分に減速し、カッター回転速度を0.60～0.86rpm に上げて掘進する。加泥材には鉱物系（ベントナイト）と水溶液高分子系（高分子系）を使用することを計画した。

(3) 同時裏込め注入装置損傷対策

伸縮式外周切削用ビットにより既設杭の切削範囲拡大を行い同時裏込め注入装置の損傷対策を行う計画とした。切削ストローク長はシールド機掘削外径から70mm と設定し、同時裏込め注入装置の突出量50mm に対して杭下端が干渉しない長さとした。切削範囲の拡大は既設杭接触想定位置毎に3次元CADにて詳細設定し、切削範囲を最小とすることによりシールド機外周の余掘り部を最小とする計画とした。

(4) 余掘り部充填管理

微速掘進によりシールド機外周の余掘り部や伸縮式外周切削用ビットによる余掘り部（切削範囲拡大）が長時間解放され、裏込め注入前に周辺地盤が沈下する懸念があった。掘進中、シールド機前胴部に配置した注入孔からシールド機外周余掘り部へゲル状の可塑性充填材を即時充填することで周辺地盤沈下の抑制を計画した。

(5) 切削金属回収

事前の実物大切削実験にて排出された鉄筋切削片を写真-6 に示す。切削片は長さ10cm 程度のものが多く排出され、先端が鋭く尖った形状の切削片も排出される傾向であった。そのため、排出土砂の異物混入による排出用ベルトコンベヤ損傷を防止するために、スクリーコンベヤ排出部付近に磁選機および金属検知器を配置し切削片を回収する計画とした。

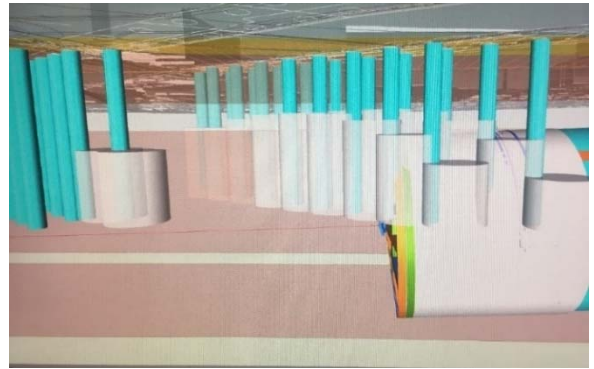


図-5 CIMによる既設杭とシールド機位置の確認



写真-6 杭切削後の鉄筋切削片

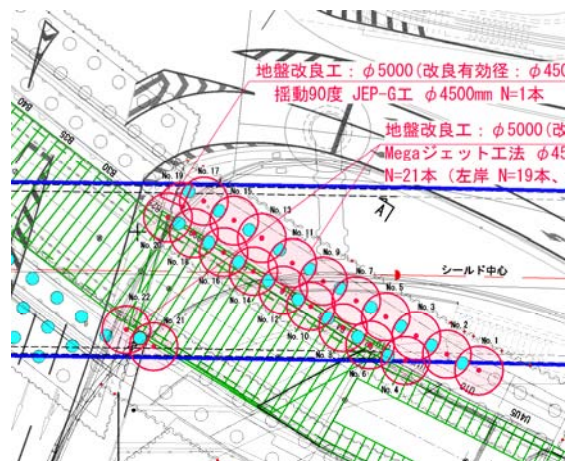


図-6 既設杭周り地盤改良平面図

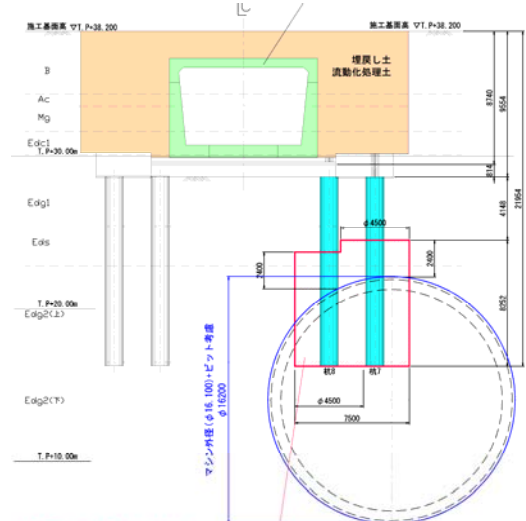


図-7 既設杭周り地盤改良断面図

(6) 白子川護岸既設杭周辺の地盤改良

白子川護岸杭周りの地盤改良平面図を図-6に、地盤改良断面図を図-7に示す。既往の研究²⁾により、支障物切削時の必要反力は反力が比較的大きくなる鋼材の切削において、 3N/mm^2 以上の抵抗が必要であることが明らかとなっている。白子川護岸周辺の事前調査において、護岸工事にてウォータージェットを併用した鋼板打設を実施していることが判明した。そのため、既設杭周辺で地盤反力の低下が想定されたことから、切削する白子川護岸基礎杭の背面に対して地上から高圧噴射攪拌工法にて地盤改良を施し、杭背面の地盤強度確保を行った。改良強度は設計強度 3N/mm^2 に対し、改良体の効果確認で 6N/mm^2 の結果を得た。

(7) 近接構造物計測管理

本工事で既設杭切削中に近接する構造物として、白子川護岸、目白通り、埋設ガス管が挙げられる。それぞれの管理者と事前協議の上、管理基準、管理方法、計測頻度を定めた。なお、白子川護岸、目白通りの計測はリアルタイム自動計測とした。特に管理基準については、1次管理値、2次管理値、3次管理値（＝工事中止基準）を定め、各管理値に達した場合の対策内容等についても管理者と協議して具体的な対応を計画した。

6. 施工実績

既設杭切削時の掘進データを図-8、カッタービット温度を図-9に示す。

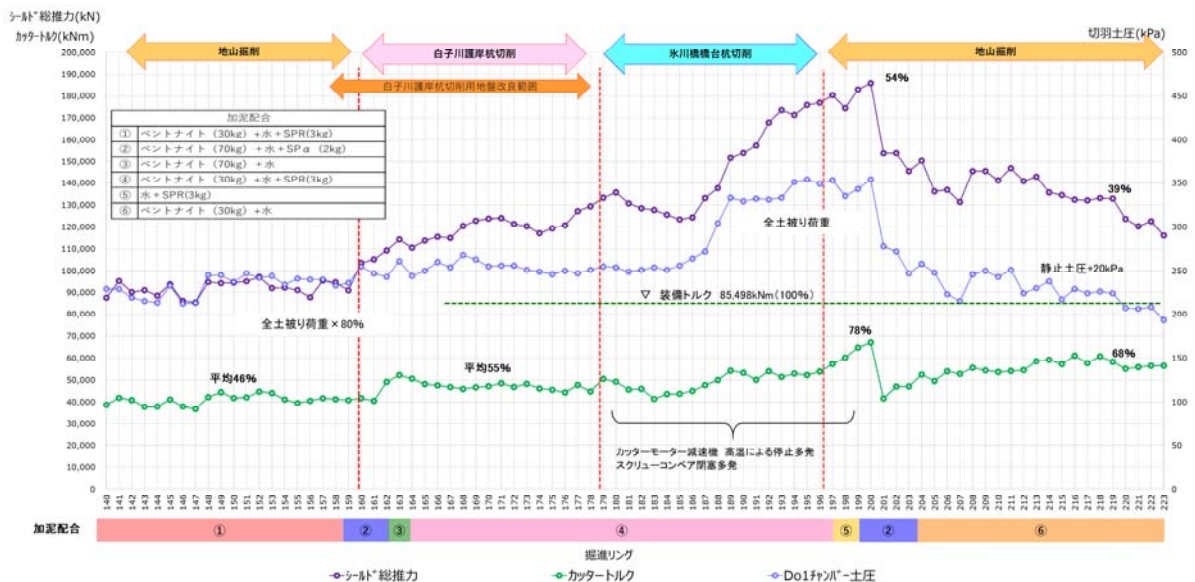


図-8 掘進データ（切羽土圧，推力，カッタートルク）

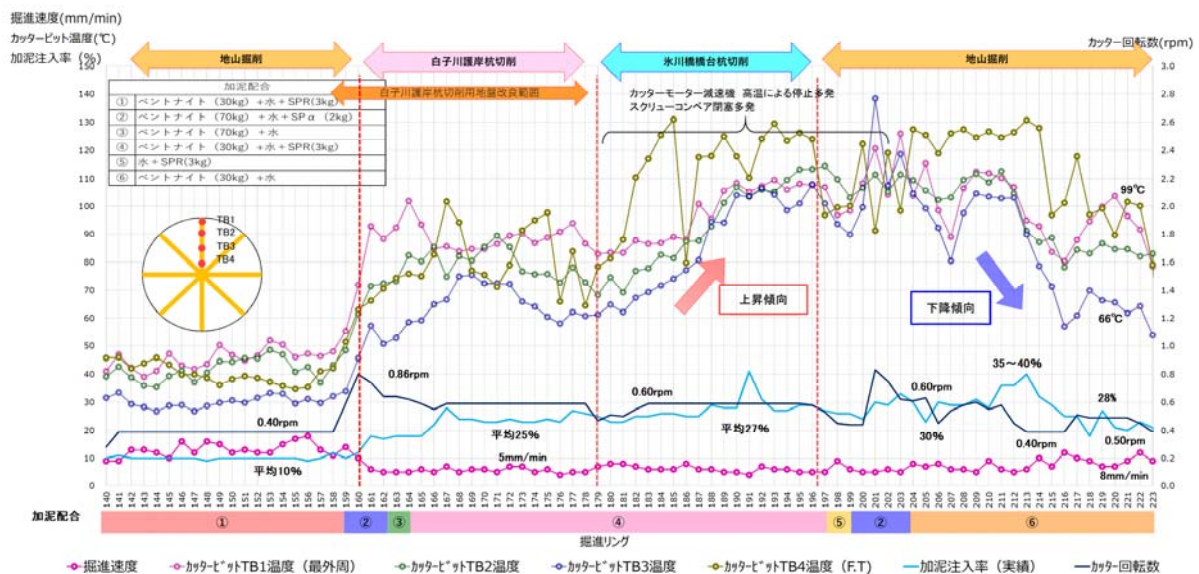


図-9 カッタービット温度（温度，加泥注入率，カッター回転数）

2019 年 11 月 4 日に既設杭の切削を伴う掘進を開始し、同年 12 月 2 日に 46 本すべての既設杭の切削を完了した。実稼働日は 24 日間であり、平均掘進速度は約 2.5m/日（昼夜 2 方施工）であった。既設杭の切削が無い区間は、掘進速度 10～15mm/分程度で掘進し、既設杭への接触が想定される位置では接触の 100mm 程度手前から掘進速度を 5mm/分まで落とした。既設杭の切削中はカッタートルク、推力、カッタービット温度及びカッタービット摩耗量を監視しながら掘進速度を 1～5mm/分の範囲で掘進を続けた。

(1) 白子川護岸の基礎杭切削

既設杭の周辺を事前に地盤改良して杭背面地盤を補強した白子川護岸の基礎杭切削は、掘進に伴いカッタートルクやカッタービット温度の上昇が見られたものの、スクリーコンベヤ閉塞等のトラブルもなく順調に掘進し、1 リング当たりの掘進時間は約 5 時間程度であった。

カッタービットで切削された鉄筋の切削片は長さ 10～20cm 程度のものが多数回収され、稀に 40 cm 程度の鉄筋を回収した。白子川護岸基礎杭区間で回収した鉄筋片を写真-7 に示す。

カッタービット温度は効果的に高温箇所へ注水したことで 70℃～100℃の範囲に抑えることができ、掘進を止めることなく続けた。



写真-7 白子川護岸区間の回収鉄筋片



写真-8 氷川橋橋台区間の回収鉄筋片

(2) 氷川橋橋台の基礎杭切削

当初、氷川橋橋台の基礎杭は CCP 杭と想定されていた。しかしながら、シールド掘進を進めるうちに鉄筋片が継続して回収されたことから、基礎杭は想定外の RC 杭であると考えられた。

氷川橋橋台の基礎杭切削において、回収された鉄筋の切断片は長尺（1.0m 以上）のもののやねじ曲ったものが多数回収された。氷川橋橋台基礎杭区間で回収した鉄筋片の一部を写真-8 に示す。掘進時は鉄筋片がシールド機の一次スクリーコンベヤ（φ 1.5m）に噛み込んで、その除去に時間を要するトラブルが一日に数回発生した。さらに氷川橋橋台基礎杭の切削後半からは推力、カッタートルク共に上昇傾向になり、カッターモータ減速機の温度上昇も顕著となったことから冷却のために掘進を一時停止する時間を定期的に設けた。カッタービット温度は切削前半からカッター中心部付近の温度上昇が顕著となり 110℃～130℃で推移し、切削後半にかけてはカッターヘッド全体の温度が上昇し 110℃～120℃の高温で推移した。そのためスクリーコンベヤからの排土温度は約 60℃と高温であった。

1 リング当たりの掘進時間は白子川護岸の基礎杭切削とほぼ同程度であったが、カッターモータ減速機やカッタービットの冷却、スクリーコンベヤの閉塞解除等のトラブル対応時間に平均 2.5 時間を要した。

氷川橋橋台基礎杭切削は白子川護岸杭切削と比較して、長尺の鉄筋が回収されたことや各掘進データが高い数値を示したことから、基礎杭付近の地盤反力が小さかったと想定される。

(3) 既設杭切削後

推力、カッタートルク、カッタービット温度は、既設杭 46 本を切削完了した 197R 以降の地山掘削においても杭切削前の地山掘削時の状態へ戻ることはなく、いずれも高い状態で推移した。鉄筋片回収量は徐々に減少したものの 223R まで排出された。201R 以降、掘進状況の改善を図るためにカッター回転数、加泥材配合や注入率を変更した。切羽土圧は全土被り荷重から静止土圧＋水圧＋変動圧（20kPa）へ徐々に下げた。

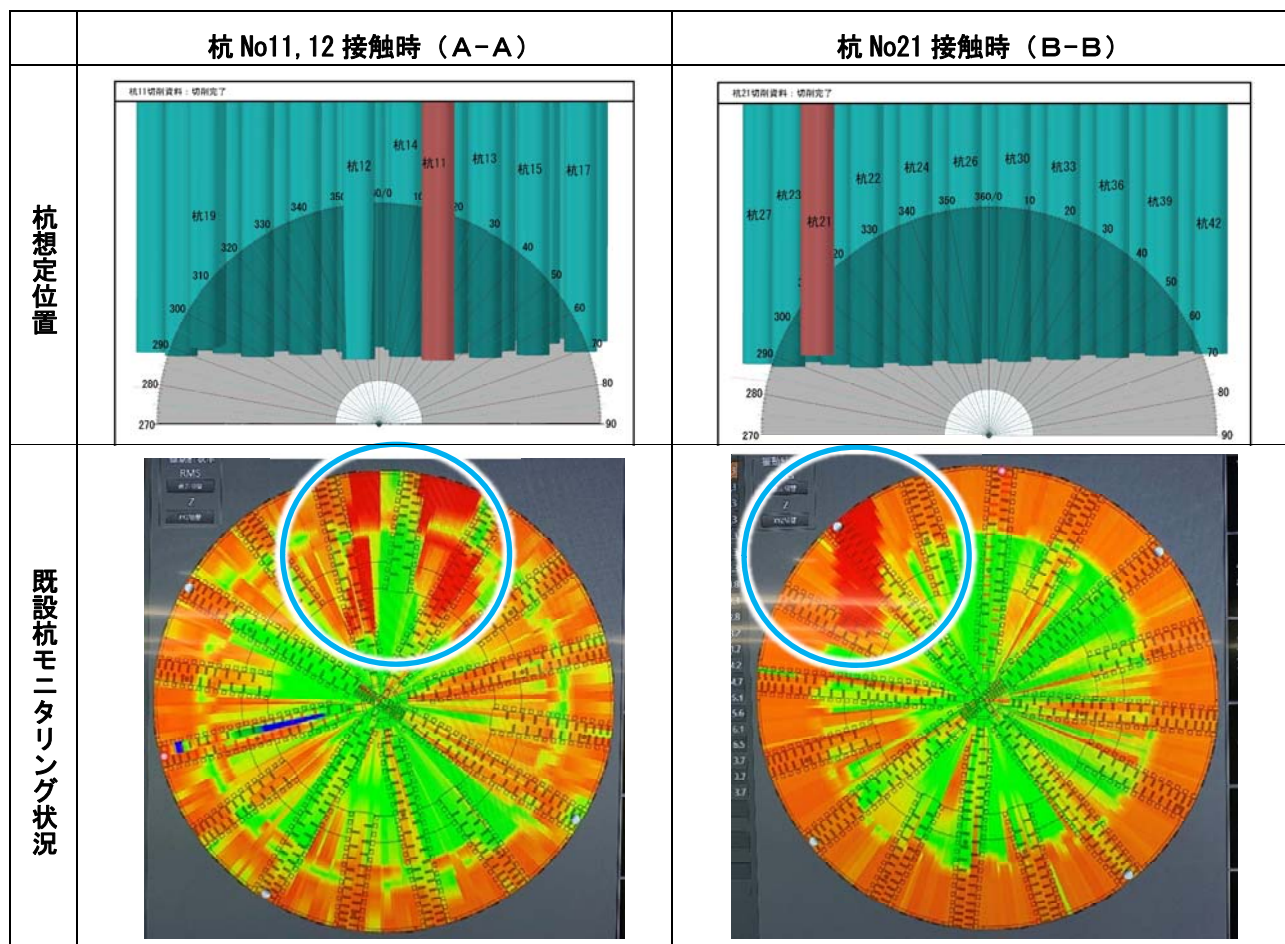


図-10 支障物判別装置による切羽モニタリング

排土温度が高温であったため、加泥注入率を 30～40%程度まで上げてカッターヘッドやチャンバー内の土砂温度を下げる対策を講じた。

結果として、回収される鉄筋片が少なくなるにつれてカッタービット温度の下降傾向が見られ、既設杭切削前の状態に近づいたことを確認した。

(4) 支障物接触判別装置の有効性

杭 No11, 12, 杭 No21 とカッタービットが接触した時の支障物判別装置による切羽モニタリング状況を図-10 に示す。切羽モニタリング状況の平面位置図は図-3 に示しており、A-A 断面は杭 No11, 12 接触時を、B-B 断面は杭 No21 接触時を示す。図-10 に示すように、切羽モニタリング状況と杭想定位置を比較すると赤色で示されている箇所が既設杭の接触位置であると判別できる。本装置により既設杭との接触を瞬時に判別できることが可能となった。

図-10 に示す切羽モニタリング状況と杭想定位置を比較するとモニタリングされた既設杭の位置は、想定された杭位置と概ね合致していることから本装置の有効性が分かる。開発した支障物接触判別装置を使用することで支障物接触を明確に可視化することが可能となった。

(5) カッタービット摩耗量

カッタービットの摩耗状態は、氷川橋橋台の基礎杭仕様が RC 杭と想定外ではあったが、カッターヘッドに装備した摩耗検知ビット（超音波式×4 個、多段導通式×10 個）の摩耗量より当初計画と同程度の摩耗の進行が確認されており、既設杭切削区間以降の残り約 6.6km の掘進を計画通りに進められることを確認できた。

(6) 近接構造物計測

白子川護岸の変位、目白通りの地表面沈下は大きな変状なく 1～2mm 程度であった。また、白子川護岸杭切削時の地表面振動は、暗振動に対して+10dB 程度であったことを確認した。

7. まとめ

主要幹線道路及び河川直下に残置された 46 本の既設杭をシールド機外径 $\phi 16.1\text{m}$ の泥土圧式シールド機で大きなトラブルなく直接切削できた。しかしながら既設杭周辺の地盤強度が小さかったと想定される区間については、推力及びカッタートルクの上昇がみられた。また、この区間では既設杭の鉄筋を当初計画通りに小さく切断することができず、鉄筋の噛み込みによるスクリーコンベヤが回転不能となるトラブルがあったことから、支障物切削時における周辺地盤の強度評価は極めて重要であると考ええる。

支障物接触判別装置を装備することは、シールド掘進において干渉する支障物との不意な接触を瞬時に判別し、迅速に掘進モードの切り替えが可能となることから、不測の支障物との接触による切削用ビット等の破損防止に有効性を発揮すると考えられる。

2020 年 9 月現在、掘進距離 1.0 km までを順調に掘進を継続している。今後に残りの約 6 km を到達迄トラブルなく掘り進んでいく所存である。

8. 参考文献

- 1) 竹内啓介：シールドマシン用カッタービットの摩耗特性に関する基礎研究，九州大学 平成 22 年度卒業論文
- 2) 杉山雅彦：基礎杭切削装置の開発に関する基礎実験，三菱重工業株式会社 1993 年度技術報告