

巨礫を含む砂礫地盤のシールド掘進施工実績

水害から街を守る放水路トンネル

生 形 剛

札幌市は昭和40年代以降急激に都市化が進んだことにより、河川へ雨水の流出が増加することとなった。市街地東部（豊平区、白石区）を流れる望月寒川流域においても近年、洪水被害が多発しているが、市街地での対策として考えられる河道拡幅による河川改修は困難であった。そこで大雨増水時に、望月寒川上流の流水を放水路トンネルにより豊平川へ放流することで浸水被害を軽減させる計画が実施された。

今回の放水路トンネル施工箇所は、扇状地扇頂付近のため巨礫（礫径 $\Phi 600$ mm程度）が堆積していることが想定され、想定最大礫まで積極的に取り込む仕様の泥土圧式シールド機で対応する計画にて開始した。本稿では巨礫を含む砂礫層の放水路トンネル本体工事の施工について報告する。

キーワード：浸水被害対策, 巨礫, 複合地盤, カッターヘッド交換

1. はじめに

道都である札幌の市内は、いくつかの扇状地から成り立っており、街の中心部は豊平川が作った巨大な扇状地が基盤となっている。扇頂は1972年冬季オリンピックのメイン会場となった真駒内から、扇端はJR札幌駅あたりまで長さ約8 kmのなだらかな斜面で構成されている。この扇状地は、時代を追って市内西側（大倉山ジャンプ競技場がある方向）から東側の月寒丘陵（札幌ドームがある方向）に向かって形成されてきた。その扇状地に位置する望月寒川は札幌市豊平区から白石区の住宅密集地を流れる川であるが、大雨による雨水の流入が多く、下流付近では近年においても連続して（平成12年、14年、26年）浸水被害が発生

しており、その対策が望まれた。そこで望月寒川上流に放水路をつくり豊平川に放流することで浸水被害を軽減することとなった（図-1）。施工箇所は、扇状地扇頂付近のため巨礫が堆積していることが懸念され、巨礫対策として想定最大礫まで積極的に取り込む仕様の泥土圧式シールド機で対応する計画にて開始した。

本稿では、放水路トンネル本体工事（巨礫対応の泥土圧式シールド工事）の巨礫を含む砂礫層の施工について報告する。

2. 工事概要

(1) 工事概要

工事名称	望月寒川広域河川改修工事（放水路トンネル）
工事場所	札幌市豊平区西岡（呑口部）～南区澄川～豊平区平岸（吐口部）
発注者	北海道空知総合振興局
施工者	大成・岩田地崎・豊松吉工業 特定建設工事共同企業体
工期	自）平成26年12月23日～令和3年3月29日

(2) 工事内容

放水路トンネル本体
 泥土圧シールド工法 路線延長 $L = 1,893$ m,
 セグメント外径 $\Phi 5.25$ m, 仕上り内径 $\Phi 4.8$ m,



図-1 望月寒川広域河川改修事業概要

縦断勾配 1/423, 急曲線 R=40 m (2カ所),
 R=50 m (3カ所), R=60 m (2カ所), インバート工,
 二次覆工
 トンネル吐口 落差工改良
 トンネル呑口 本体工
 中間立坑

3. 土質概要

(1) 土質資料

当初掘削地盤は、既往ボーリングデータのコア切り長の3倍から最大礫径を600mmと想定した。シールドが通過する土質は、路線延長1,893.4mのうち、発進部(吐口部)から1/3までが砂礫と腐食土からなる盛土層, 玉石混じりの砂礫層, 粘性土シルト, 西野層と言われるN値50以上の凝灰角礫岩があり複合地盤となっている。残りの2/3は野幌層と言われる巨礫混じりの砂礫層(Dg層)となっている。特にこの砂礫層については、N値が50以上を示し、礫率も60%と非常に高い。礫は安山岩主体で、強度は100N/mm²~150N/mm²と非常に硬い地質となっている(図-2)。

(2) 到達立坑掘削実績

到達部(呑口部)において、鋼矢板及び中間杭を打設する前の先行削孔砂置換工オールケーシング削孔時(ケーシング径1.0m)に砂礫層(Dg層)からΦ800mmの巨礫を確認した。さらに到達部立坑掘削時(写真-1)においてもΦ800mm以上の巨礫が確認された(写真-2, 3)。

4. シールドトンネル工事の施工

(1) 路線概要

延長約1.9kmの路線の大半は、住宅地の市道直下を掘進する(図-3)。

主な掘削地盤は、巨礫混じりの砂礫層であるため、技術的には巨礫を破碎して掘進するタイプのシールド機の選定が妥当であるが、発進部(吐口部)から1/3の掘削地盤は前述した通り、粘性土シルト、凝灰角礫



写真-1 呑口部掘削・山留施工状況

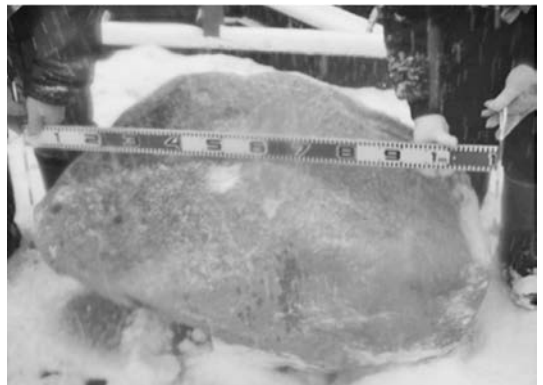


写真-2 巨礫 1,100mm×650mm×650mm



写真-3 巨礫 850mm×500mm×500mm

岩を主体とする複合地盤となっているため、巨礫を破碎して掘進するタイプのシールド機は不向きであると考えられた。巨礫混じりの砂礫層を掘削する前にビット交換用立坑を構築し、ビット交換をしてから掘進する方法は、民家が隣接していること、重要な埋設管が

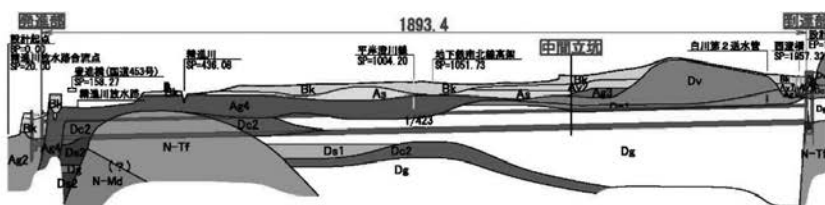


図-2 土質縦断面図

時代	地層名	地質	記号	時代	地層名	地質	記号
新 第三紀	盛土・腐土	砂	Dv	新 第三紀	安山岩	凝灰角礫岩	Dv
	腐食土	砂	Ab		安山岩シルト	腐食土	砂
第四紀	安山岩層	砂	Ar1	第四紀	野幌層	砂	Da2
	砂礫	砂	Ag1		野幌層	砂	Da2
第四紀	凝灰角礫岩	砂	Ar2	第四紀	野幌層	砂	Dg
	安山岩	砂	Ar2		野幌層	砂	Dg
第四紀	砂	砂	As	第四紀	野幌層	砂	N-TF
	砂	砂	As		野幌層	砂	N-Md
第四紀	砂	砂	As	第四紀	野幌層	砂	N-TF
	砂	砂	As		野幌層	砂	N-Md

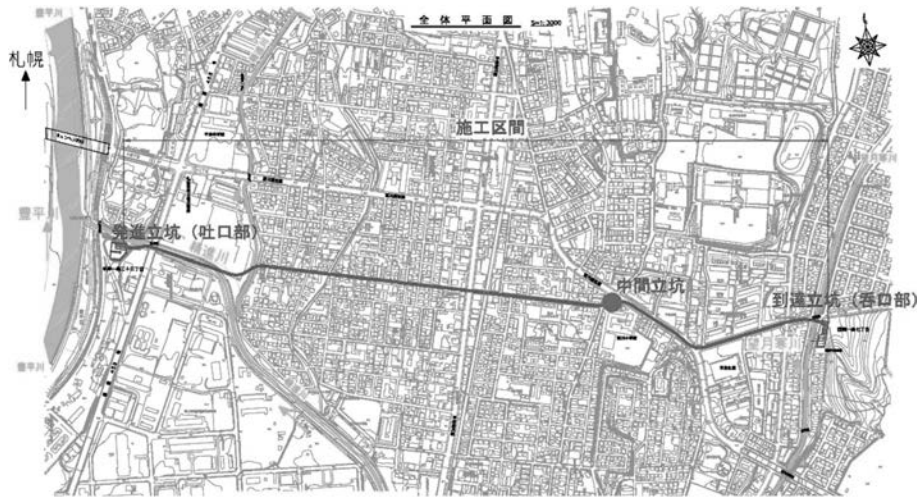


図-3 路線平面図

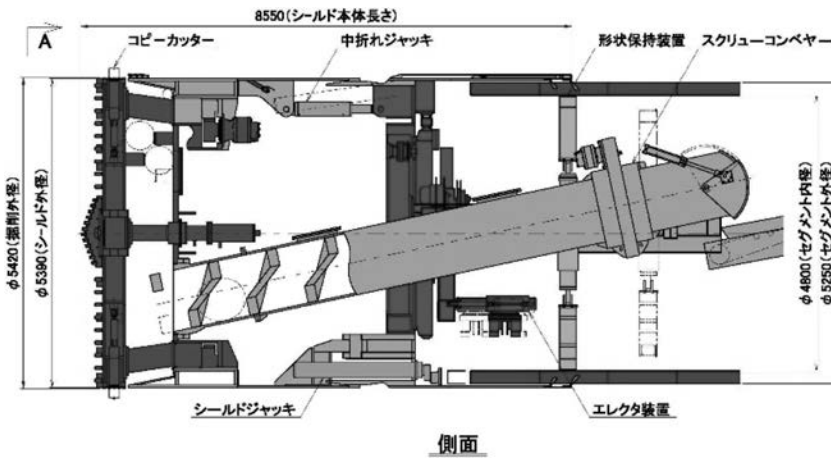


図-4 シールド機の内部構造

多数あることを理由にビット交換用の立坑を設けることは難しいと考えられていた。

(2) 泥土圧式シールド機

路線概要で記載した施工条件を基に、本工事において

て採用したシールド機を図-4、カッターヘッドの構造を図-5、シールド機全景を写真-4、シールド機の仕様を表-1に示す。

施工の留意点として、本シールド機は土質変化が激しく、砂礫層に含まれる玉石(巨礫)を積極的に取り込み搬出する掘削思想のもと、巨礫を含む砂礫層掘進及び長距離掘進の対応として以下の対策を講じた。

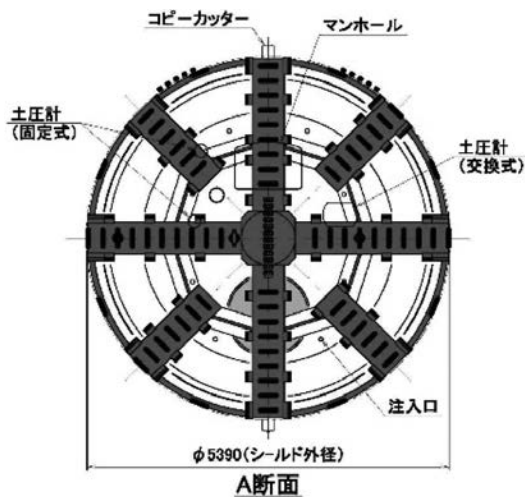


図-5 カッターヘッドの構造



写真-4 シールド機全景

表一 シールド機の仕様

項目	仕様
掘削外径	5,420 mm
シールド機長	8,550 mm
シールドジャッキ	21 @ 1,200 kN
最大推力	25,200 kN
カットトルク (高)	4,472 kN・m (a = 28.6)
最大中折れ角度	7.7°
コピーカッター	200 st×4 基 (予備 2 基)

(a) 巨礫を含む砂礫層掘進対策及び長距離掘進対策

- ①強化型先行ビットと多層メインビットを主体とするスポークタイプの採用
- ②耐摩耗鋼板 + 硬化肉盛による耐摩耗対策
- ③ビットの割欠け防止対策 (靱性の高い E5 種の採用・チップの大型化・ビット形状・段差配置)
- ④最大礫径 $\Phi 800$ mm の巨礫を破碎せず安全に機内へ取り込む機構として大型スクリーコンベヤーの装備, リボンスクリューの採用
- ⑤油圧式摩耗検知ビットの装備

(3) シールド掘進工

本工事の泥土圧式シールド機における砂礫地盤の掘進は、先行ビットで巨礫の周りの土砂を掘り上げ、礫が移動できるスペースを作ることにより礫を掘り起こしチャンバー内に取り込み、スクリーコンベヤーにて排出する掘削思想で掘進を開始した。砂礫層に入って 1,100 m 付近までは順調に進捗したが、1,100 m 以降は、排出される掘削土を確認すると非常に礫の割合が多く (写真一5)、割れた巨礫が排出され (写真一6)、カッターロック (カッター圧高) も繰り返された。1,300 m 付近でスクリーコンベヤーから排土される土砂に混じって欠落したビットが発見されたため、カッターヘッドが著しく損傷していることが想定され、到達までの残り約 600 m を掘り進むことは難し

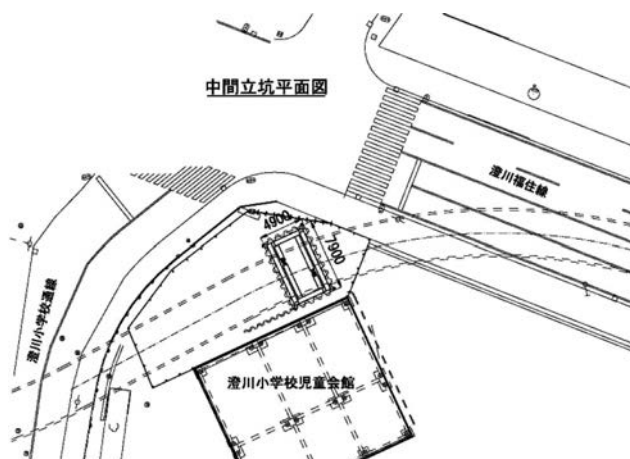
いと判断し、カッターヘッドの交換を実施した。

(4) シールド機カッターヘッド交換

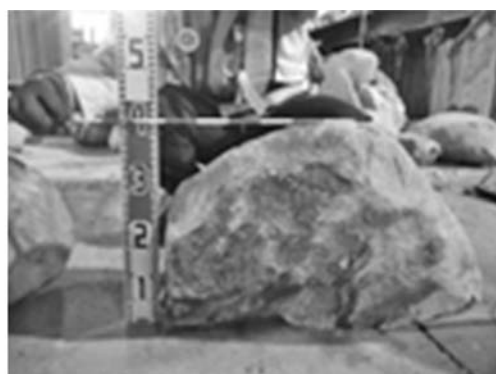
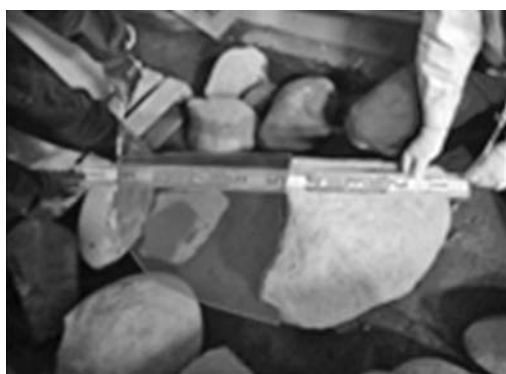
路線上の制約条件で、唯一影響の少ない小学校の狭隘な用地に深さ 16.0 m の中間立坑を築造し (図一6)、カッターヘッドの交換 (写真一7) を実施した。この立坑掘削時に $\Phi 800$ mm 以上の巨礫が 9 個出現し (写真一8, 9, 表一2)、礫率も 70% 以上と確認された。これは、到達部で出現している巨礫と同等であることから、今後も砂礫層の中には $\Phi 800$ mm 以上の巨礫が



写真一5 礫排出状況



図一6 中間立坑平面図



写真一6 排出された礫 h=350 mm ⇒推定最大礫径 1,050 mm



写真一七 新規カッターヘッド投入状況



写真一八 中間立坑巨礫 1,000 mm×850 mm×450 mm



写真一九 中間立坑巨礫 1,000 mm×580 mm×470 mm

表一 二 中間立坑 巨礫数量

巨礫数量	長径寸法			合計
	400 mm 以上～ 600 mm 未満	600 mm 以上～ 800 mm 未満	800 mm 以上	
五次掘削	12	1	0	13
六次掘削	13	1	1	15
七次掘削	50	20	8	78
合計	75	22	9	106

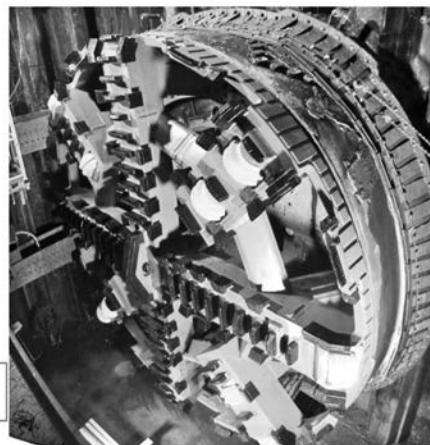
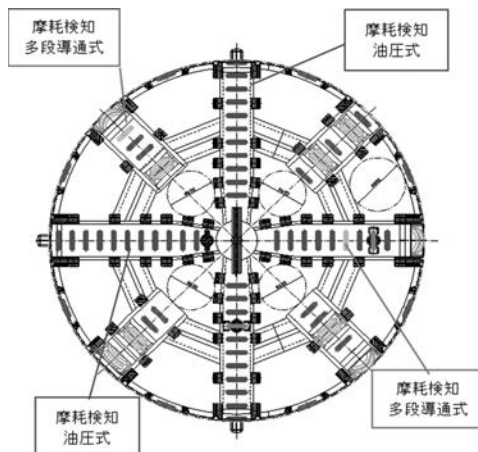
単位：個

出現する可能性が高いと判断し、図一七のカッター形状に変更した。カッターヘッド交換後の掘削思想は、最大礫径Φ800 mm までの礫は取り込み、最大礫径Φ800 mm 以上の場合は、破碎して取り込む「取込型」+「破碎型」方式とし、前回特に損傷が激しかったカッターヘッド外周部にディスクカッターを配置した。また、先行ビットの摩耗量を確認するため、多段導通式摩耗検知先行ビットをカッターヘッドの内周部と外周部に各1カ所、油圧式摩耗検知先行ビットを同じく内周部と外周部に各1カ所配置した。

(5) シールド再掘進工

再掘進時、排土中の礫の状況は、再掘進区間全域において礫の割合が非常に多く、礫の形状も400 mm 以上の割れた礫が多かった。割れた礫が多い状況は、カッターヘッドに取り付けたディスクカッターにより破碎されて排出されたことが想定できる。ベルトコンベヤーで排出された礫の状況を写真一十に示す(ベルトコンベヤー下幅650 mm)。ズリ鋼車搬出状況を写真一十一に示す(ズリ鋼車1,265 mm×3,370 mm)。

再掘進にあたり、表一三のビット摩耗管理を実施した。定期的に計測することにより計算による推定摩耗量と実測摩耗量を比較、到達までの掘進管理は有効であった。



図一七 新規カッターヘッド形状



写真-10 割れている巨礫



写真-11 割れて排出した礫

先行ビット摩耗量の結果を図-8、表-4に示し、ディスクカッター摺動距離と掘進速度の結果を図-9、表-5に示す。掘進距離600mについて、掘進速度とカッター回転速度を管理することによりディスクカッター許容摺動距離以下で施工することができた。

到達時のカッターヘッドの状況から、配置したビットが礫地盤から受けた負担は非常に大きく、掘進時に酷使していたことが分かる(写真-12)。しかしながら、外周部に礫破碎を目的としたディスクカッターを取付け、巨礫を破碎したことにより、礫を掘り出す役目である先行ビットへの負担を軽減したことから、外周部の先行ビットは、チップが摩滅して母材まで摩耗した内周側の先行ビットに比べて摩耗量が少なく、ディスクカッターが有効に働いた(保護した)と考えられる。また、ディスクカッターを装備した交換後のカッターヘッドであってもほぼ限界の掘進距離であったと考えられる。

表-3 ビット摩耗管理

施工管理基準

管理工程	管理項目		管理方法			計測(測定)方法 (自動/手動)	管理基準外の処置
	管理特性	管理基準	管理方法	時期	頻度		
ビット 摩耗管理	ビット推定摩耗量	許容摩耗量 45 mm	掘進速度	掘進中	毎リング	手動	ビット交換の判断
	摩耗検知装置	許容摩耗量 45 mm	多段導通式	掘進後	1回/日	手動	ビット交換の判断
		油圧が抜けないこと	油圧				
掘進管理	ジャッキ推力	25,200 kN 以下 (理論上 10,961 kN)	圧力計	掘進中	毎リング	自動	ジャッキ速度減速・余掘の検討
	カッタートルク	トルク：高 4,472 中 3,712 低 2,754 kN-m 圧力：高 23.6 中 19.6 低 14.5 MPa	トルク計	掘進中	毎リング	自動	ジャッキ速度減速
	カッタ回転数	ディスクカッタ摺動距離との比較	カッタ回転計	掘進中	毎リング	自動	ビット交換の判断
	ジャッキ速度	0 ~ 40 mm/min	スピード計	掘進中	毎リング	自動	オペレーターに指示

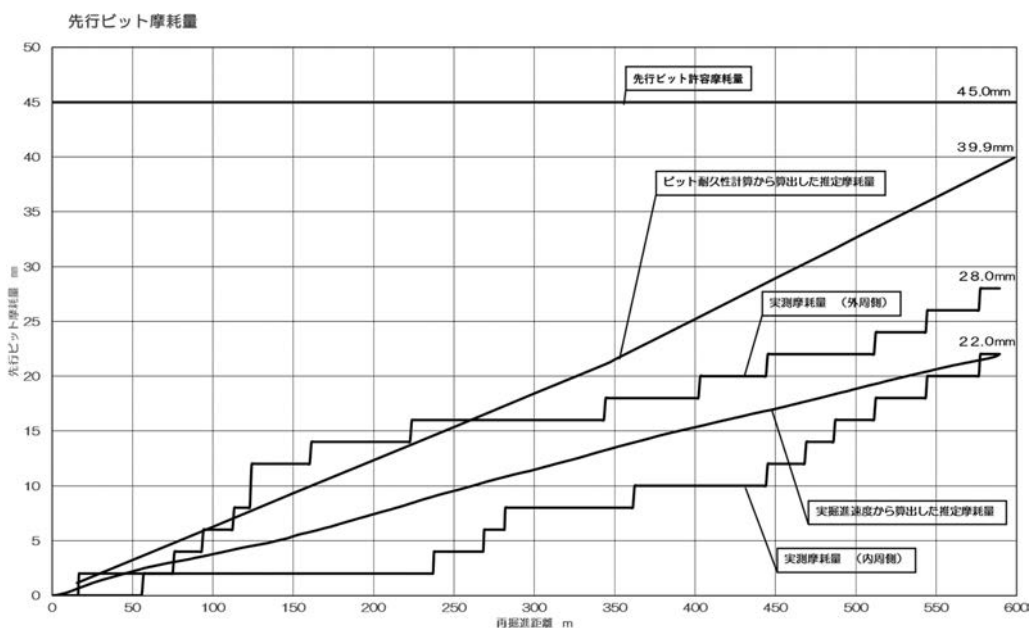
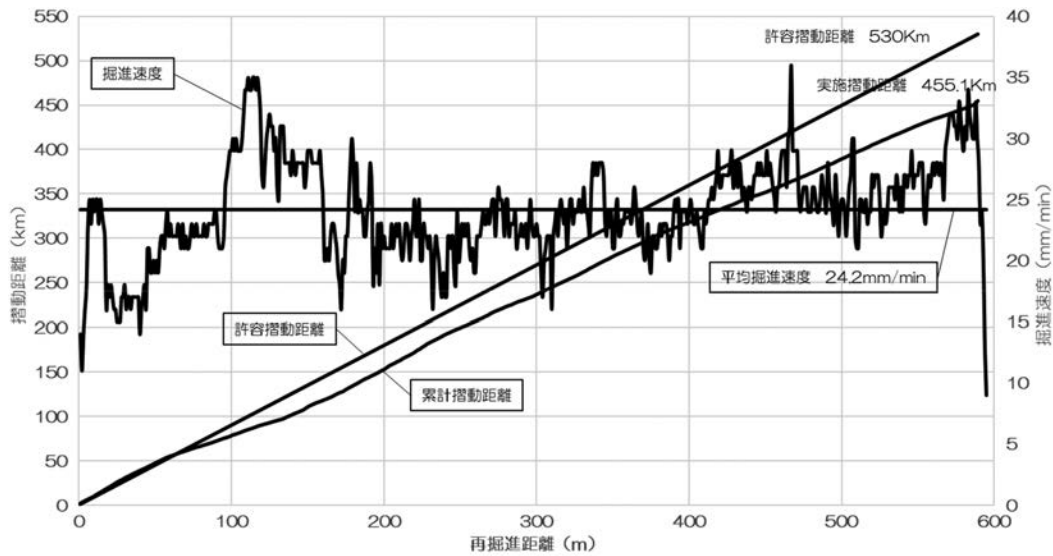


図-8 先行ビット (多段導通式) 摩耗量実測推移



※許容掘削距離：ディスクカッター許容掘削距離530kmを掘削距離に配分した場合の値
 ※累計掘削距離：カッター回転数を基にディスクカッターの掘削距離を算出した累計値

図-9 ディスクカッター掘削距離と掘削速度

表-4 先行ビット (多段導通式) 摩耗量実測結果

単位：mm

	許容 摩耗量	推定摩耗量 (ビット耐久性)	推定摩耗量 (実掘削速度)	実摩耗量
外周部	45.0	39.9	22.0	28.0
内周部				22.0

表-5 ディスクカッター掘削距離結果

許容掘削距離	実施掘削距離	率
530 km	455.1 km	85%

5. おわりに

本工事は、特に砂礫層に含まれる巨礫により、シールドの掘削が計画通りに進まなかったが、様々な対策工事を安全かつ慎重に行いながら、発注者、施工者、関係業者が一体となって、2020年5月、到達することができた。

本工事は、最近の異常気象に伴う水害に備える施設として、地域住民からの期待度も高い中で、2021年3月末で竣工を迎えるが、地域住民からの期待に応えるべく、竣工まで無事故・無災害で品質の高いトンネルの完成を目指している。

謝辞

最後に、本工事にご尽力いただいている発注者、関係者の皆様に心より深く感謝いたします。

JICMA

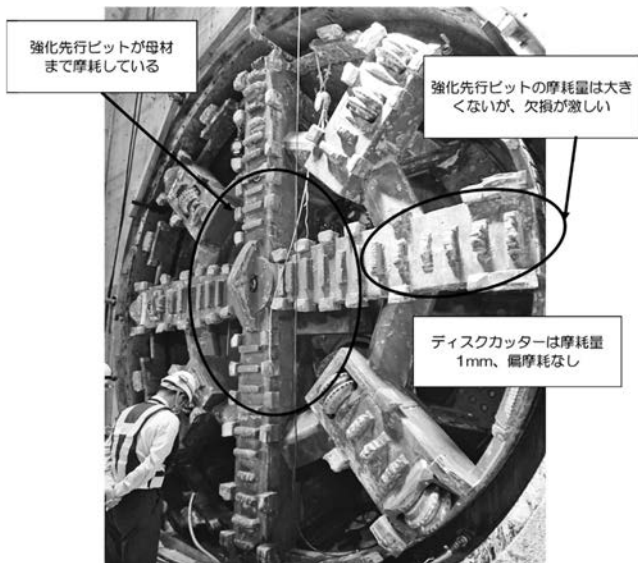


写真-12 到達後 カッターヘッド状況

【筆者紹介】
 生形 剛 (うぶかた たけし)
 大成建設(株)
 札幌支店土木部
 課長

