

13. シールドのビット交換技術『リレービット工法』

鹿島建設株式会社：○佐々木 哲也、永森 邦博、辻井 孝

1. はじめに

近年、建設工事のコスト縮減を目的とした事業期間短縮への取り組みが進められている中で、シールドトンネル建設工事においては、トンネル延長が長距離化する傾向にある。

また、大深度地下の利用の規制緩和により、シールドトンネル建設工事の大深度化が今後進められて行くことに合わせ、掘削対象の地盤も今まで施工が行われてきた都市部の比較的柔らかい粘性土や砂質土から礫、軟岩に至るまで多様化して行くことが予想される。

このような背景から、カッタビットの摩耗や欠損に対する耐久性がさらに重要となっている。カッタビットには、特殊超合金材料が使用され、長距離掘削への耐摩耗性や硬い礫層、軟岩掘削などに対する耐久性も、使用材料の開発とともに向上しているが、厳しい条件下では、カッタビットの交換が必要となる工事もあり、カッタビットの交換技術の開発が盛んに行われている。

従来の技術では、構築した中間立坑でのカッタビット交換作業やシールド機の掘進を停止させて地盤改良などの施工を行い、シールド機前面に地山を自立させた作業空間を設け、作業者が進入しカッタビット交換を行ってきたが、交換作業の安全性向上や工程短縮を図れるカッタビット交換技術の開発は重要な課題であった。

当社で開発、実用化したリレービット工法は、地盤改良などの補助工法を必要とせず、シールド機内部からカッタビットを交換する工法であり、現在では複数の工事に適用されている。

さらに最近では、カッタビット交換工法の応用により、掘削地盤に応じて最適なカッタビットに交換しながら広範囲の地山に適応することや、NOMS T切削対策、地中障害物切削対策として応用されている。

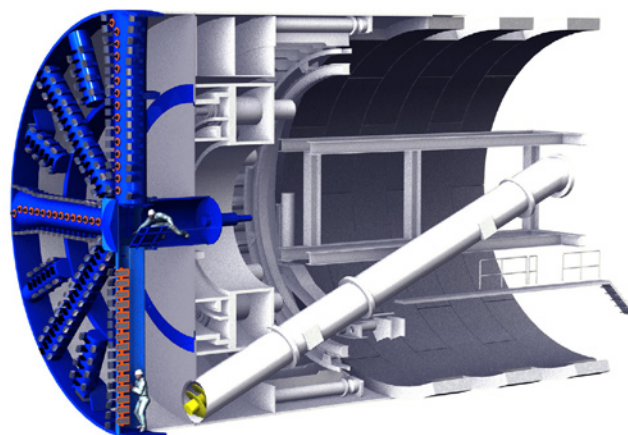


図-1 リレービット工法概念図

本文では、リレービット工法の概要と施工現場での適用実績及び経済効果について報告する。

2. リレービット工法

リレービット工法は、作業者がカッタ面板の回転軸であるシャフトを通じてカッタスポーク内部の作業空間に移動し、内側から摩耗したカッタビットを引抜き、新しいカッタビットを差し込むことでカッタビットの交換ができる工法である。

リレービット工法のビット交換装置は、装置内部を回転させるボールバルブ式、ゲートバルブを開閉するセーフティゲート式、バルブプレートと称する円形プレートを90°回転させるバルブプレート式などがあり、交換時に止水性を保つ構造となっている。図-1に本工法概念図を、図-2にボールバルブ式のリレービット交換手順を示す。

リレービット工法の特徴として次のことがあげられる。

- ①カッタスポーク内に作業空間(広さ約80cm四方)を設けたことにより、無圧気でビットの交換が可能である。

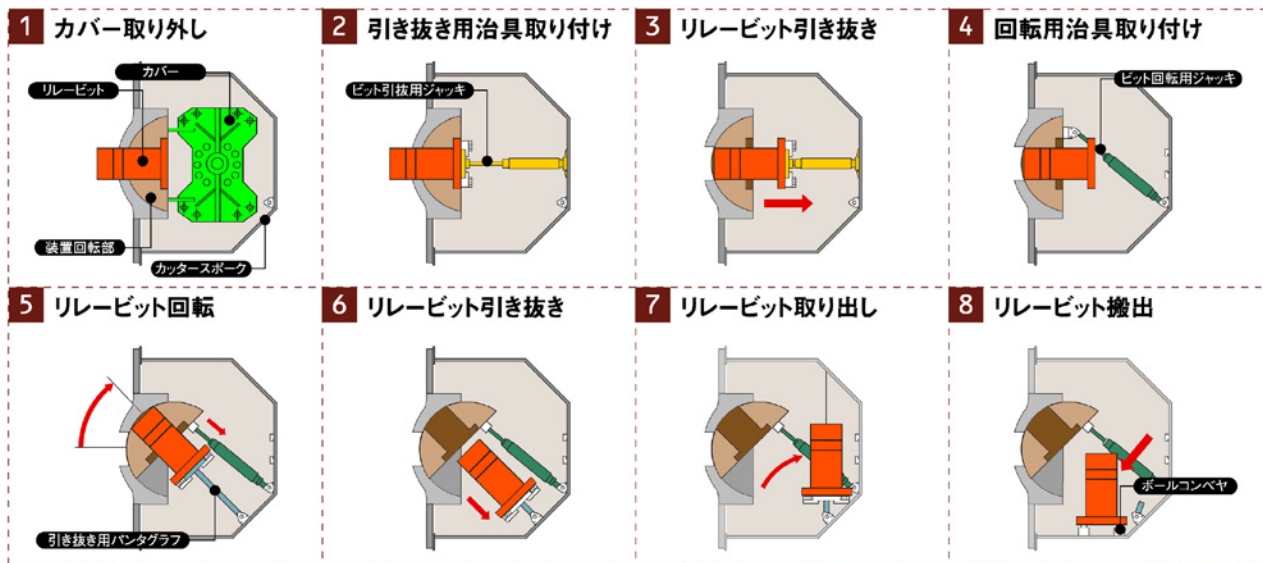


図-2 リレービット交換手順（ボールバルブ式）

- ②ビット交換は土質条件に関係なく、『いつでも、どこでも、何回でも』可能である。
- ③カッタビットの摩耗状況を目視確認できる。
- ④掘進中に土質が変化した場合、土質に適したカッタビットに交換できる。
- ⑤NOMS T壁の切削や既設洞道のセグメントの切削など、カッタビットに負担のかかる工事において、掘削対象物に応じたカッタビットへの交換や摩耗したカッタビットを交換できる。
- ⑥泥水式、泥土圧式の両方のシールド機に適用できる。

3. リレービット工法の適用実績

カッタビット交換工法が適用される状況は、施工条件により、次にあげるような用途分類ができる。

- ①長距離掘進におけるビット摩耗対策
 - ②地中障害物切削におけるビット交換
 - ③新素材コンクリート壁掘削におけるビット交換
- これらの施工条件に応じて選定されるカッタビット交換工法のうち、当社施工現場で使用したリレービット工法の適用実績を以下で述べる。

3.1 長距離掘進における適用実績

(1) 工事概要

春日井共同溝は、愛知県春日井市大泉寺町と勝川町4丁目を結ぶ大泉寺工事（1工区：3,420m）と瑞穂工事（2工区：3,400m）の延長6,820mを、外径φ4,800mm



写真-1 φ4,800mm 春日井共同溝シールド機

の泥土圧式シールド機1台により施工する国内最長級のシールド工事である。掘進対象地盤は、礫径300mm程度の玉石混じりの砂礫層である。

シールド工事の概要は下記のとおりである。

- ・発注者：国土交通省中部地方整備局
- ・トンネル延長：6,820m
- ・掘削機外径：φ4,800mm
- ・トンネル外径：φ4,650mm
- ・仕上がり内径：φ4,200mm
- ・掘削対象土層：玉石混じり砂礫層

(2) シールド機の構造

カッタビットの摩耗や損傷が懸念される条件であり、掘進途中でのビット交換回数が増えることが見込まれ

たことから、リレービット工法が採用された。当該工事のシールド機は、作業スペース確保も配慮し、写真-1に示すように6本のスポークのうち、2本のスポークに合計9個のボールバルブ式のリレービットを装備した。

(3) リレービット交換実績

シールド機前面での作業が可能なEB5（中間立坑：820m地点）、EB3（オーバーホール部：3,400m地点）においては全種類のビット交換を、EB4（1,848m地点）ではリレービットのみの交換を実施した。表-1に各交換地点での摩耗係数を示す。摩耗係数に多少のばらつきはあるが、全体的には当初想定値を下まわり、良好な結果が得られたと判断する。

表-1 リレービット摩耗係数

地点	掘進距離 m	摩耗係数 $\times 10^{-3} \text{mm/km}$ (当初予測の)
当初予測	—	80 —
EB5	820	22.8 (29%)
EB4	1,848	42.2 (53%)
EB3	3,400	43.2 (54%)

また、EB4（区間摺動距離：513km）のリレービット交換時には側面硬化肉盛部の大きな摩耗（えぐれ）が確認されたが（写真-2）、その後側面の超硬チップを延長した強化型リレービット（図-3）を採用した（2,405m地点）ことから、EB3到達時にはチップ脱落・ビット折損を招く危険性があるリレービット側

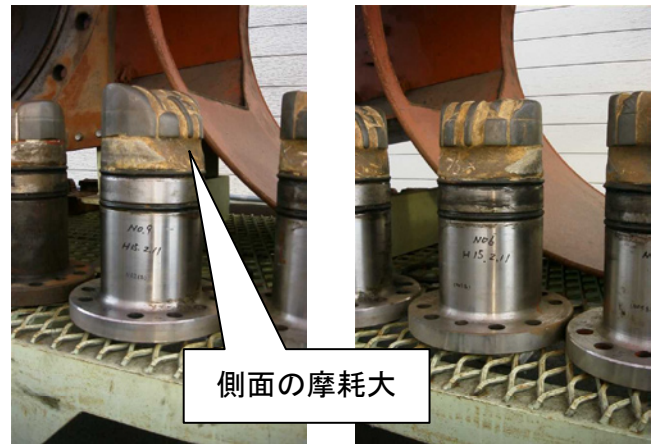


写真-2 リレービット側面摩耗状況

面の摩耗（えぐれ）は軽減され、強化型リレービットの効果が確認された。

一方、摩耗量/ビット摺動距離で算出される摩耗係数（mm/km）は、カッタ切込み量によって摺動距離が変動するため、ばらつきが発生し、定量的な評価が難しい。リレービットの場合、EB5、EB4、EB3における摩耗係数は、図-4に示すように $23 \times 10^{-3} \sim 43 \times 10^{-3}$ （mm/km）となるが、掘削地盤・掘進距離から判断するとビットの耐久性に大きな違いがあるとは考えにくい。そこで、ビット1個あたりの掘削土量と摩耗量の関係に着目し、グラフ化したものを図-5に示す。各々の勾配（摩耗量/ビット1個あたりの掘削土量=mm/m³）は、ほぼ一定となり、ビットの耐久性が同等であることが分り、ビットの耐久性評価の指標として適用可能と考える。

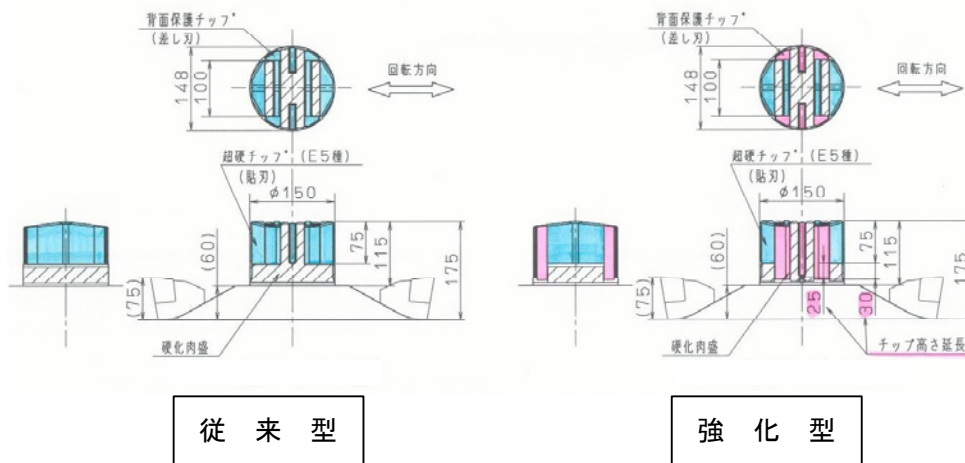


図-3 強化型リレービット

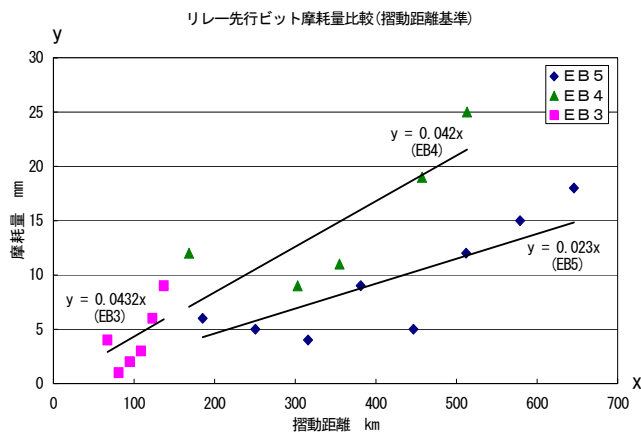


図-4 リレービット摩耗係数

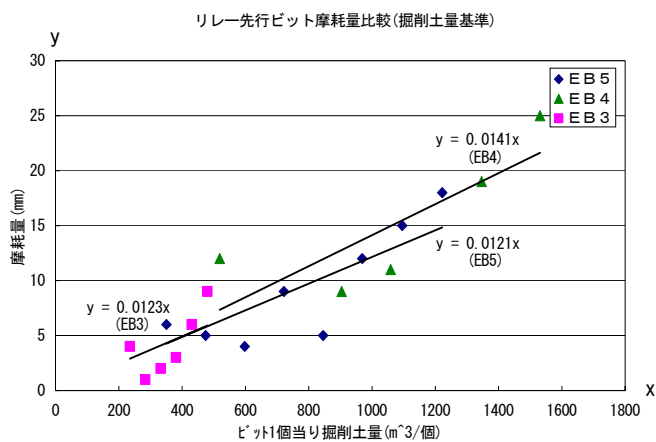


図-5 ビット1個あたりの掘削土量一摩耗量

3.2 地中障害物対策における適用実績



写真-3 φ8,990mm 勝島ポンプ所シールド機

(1) 工事概要

東京都勝島ポンプ所連絡管渠工事は、品川区勝島1丁目地先と品川区東大井1丁目13番地を結ぶ勝島ポンプ所と鮫洲ポンプ所間の延長387mに、外径φ8,990mmの泥水式シールド機により管渠を構築する工事である。掘削対象地盤は粘性土層であるが、路線途中には既設構造物のNOMST壁(計2枚)の切削、基礎杭(松杭×37本、鋼管杭×1本)切削とシールド機の到達で

表-2 専用ビット形状比較

	NOMST切削ビット	松杭切削ビット	鋼管杭切削ビット
形状			
刃型	<ul style="list-style-type: none"> V刃 NOMST切削実験から有利な平面すくい角を有する平刃バイトカッターを採用 	<ul style="list-style-type: none"> V刃(舟底) 木杭性状から食込み性、切削性を考慮してV刃バイトカッターを採用 	<ul style="list-style-type: none"> 平刃 低速回転によるスチール切削実験により平刃での切削性を確認
切削方向	両回転	両回転	片側回転
切削幅	60mm	40mm	50mm
取付ピッチ	100mm	50mm	50mm

はNOMS T壁の切削を行う必要があった。掘削対象物にあった効率的な掘削を行うために、リレービット工法を採用した。

シールド工事の概要は下記のとおりである。

- ・発注者：東京都下水道局
- ・トンネル延長：387m
- ・掘削機外径：φ8,990mm
- ・トンネル外径：φ8,800mm
- ・仕上がり内径：φ7,200mm
- ・掘削対象土層：粘性土層

(2) シールド機の構造

シールド機には写真-3のカッタスポークにセーフティゲート式リレービット交換装置を71個装備させた。掘削対象物に合わせた専用ビットの形状を、表-2に示す。

(3) リレービット交換実績

掘削対象物の直前においてリレービットの交換を合計4回実施した際の実績を表-3に示す。回数を積み重ねる度に時間は短縮され、4回目を行う時には1個あたり30分のペースで交換することができた。

表-3 リレービット交換実績

	1回目	2回目	3回目	4回目
交換目的	NOMSTビット 摩耗確認	松杭切削 ビット交換	鋼管切削 ビット交換	NOMSTビット 交換
交換個数	2	10	71	5
平均所要時間 (min/個)	120	40	30	30
交換場所	連壁土留内	地山	地山	地山

3.3 その他の適用実績

リレービット工法はこの2工事以外にも、表-4に示すように国内外5工事、6台のシールド機に適用しており、シールド機外径φ3,080mm(写真-4)が適用最小径となっている。

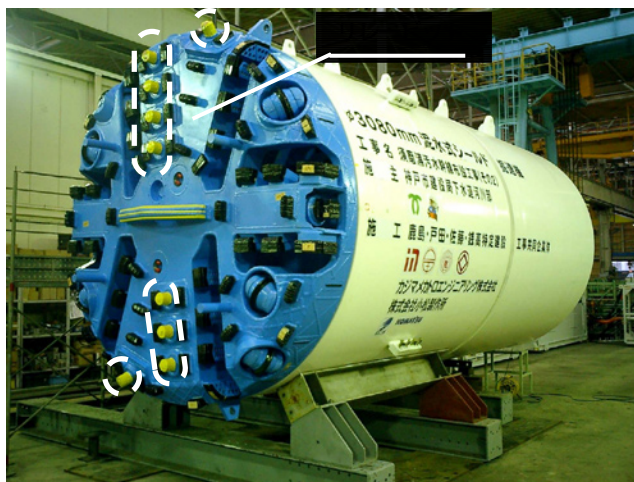


写真-4 φ3,080mm 須磨浦汚水幹線シールド機

4. 経済的効果

リレービット工法の経済的効果は、シールドトンネル延長の長距離化による建設工事コスト縮減である。さらに、ビット交換の簡便化による工期短縮及び中間立坑省略によって地上交通への影響を最小限に抑制することによる社会的便益が期待できる。

リレービット工法の適用要否による工事費及び工事工程を、トンネル延長5,000m、シールド機外径φ4,000mmの泥水式シールド機で掘削した場合において想定比較した。

比較対象とする従来技術では、トンネル延長の中間

表-4 リレービット工法適用実績

工事名	企業者	シールド機 外径	トンネル 延長	台数
11号線隅田川工区土木工事	帝都高速度交通営団	φ9,900mm	1,258m	1台
SJ11工区(4)~SJ31工区(外回り)トンネル工事	首都高速道路公団	φ13,070mm	1,700m	1台
台湾龍門原発循環冷却水放水路JV工事	台湾電力	φ8,300mm	1,250m×2	2台
石岡トンネル(第2工区)新設工事	国土交通省関東地方整備局	φ4,040mm	5,000m	1台
須磨浦汚水幹線布設工事	神戸市	φ3,080mm	4,394m	1台

表-5 リレービット工法要否による工事費比較表

項目	リレービット工法によるビット交換					従来技術によるビット交換				
	仕様	数量	単位	単価	金額	仕様	数量	単位	単価	金額
φ4.0m泥水式シールド機	ビット交換装置あり	1	式	490,000,000	490,000,000	ビット交換装置なし	1	式	370,000,000	370,000,000
ビット交換費用(ビット代、労務費ほか)	中間地点作業	1	回	28,000,000	28,000,000	中間立坑内作業	1	回	23,000,000	23,000,000
ビット交換費用(ビット代、労務費ほか)	到達立坑前作業	1	回	28,000,000	28,000,000					-
ビット交換用中間立坑構築工					-	中間立坑構築工	1	式	370,000,000	370,000,000
中間立坑発進・到達防護工					-	薬液注入、鏡切工ほか	1	式	70,000,000	70,000,000
到達立坑到達防護工					-	薬液注入、鏡切工ほか	1	式	23,000,000	23,000,000
合計					546,000,000					856,000,000

※コスト比較結果：(1-546,000,000円/856,000,000円)×100 ≒ 36%

地点に立坑外径φ10m、深さ41m、壁厚1mのビット交換用中間立坑を構築する。また、カッタビットの摩耗により中間立坑、到達立坑でのNOMST壁切削ができないため、到達防護工及び鏡切工を実施する。

対するリレービット工法では、発進及び到達立坑にNOMST工法が適用されており、トンネル延長の中間地点及び到達直前の計2回ビット交換を実施する。

リレービット工法要否による工事費比較結果を表-5に示す。この結果によるとリレービット工法を採用することでシールド機本体価格は30%程度割高にはなるが、全体工事費で約36%のコスト削減が可能となった。また、表-6の工事工程によると、全体で約57%の工期短縮が可能である。今回の比較は、シールド掘進工に影響する部分についての比較であり、中間立坑構築工や発進・到達防護工によって、シールド掘進工期が延びる場合には、更なるコスト削減、工期短縮が期待できる。

表-6 リレービット工法要否による工事工程比較表

項目	リレービット工法によるビット交換			従来技術によるビット交換		
	適用	数量	単位	適用	数量	単位
中間立坑到達掘進工		-			10	日
ビット交換工	中間地点	5	日	中間立坑内	5	日
中間立坑発進準備・掘進工		-			10	日
ビット交換工	到達立坑前	5	日		-	
到達立坑到達掘進工		3	日		3	日
到達立坑鏡切工		-			2	日
合計		13	日		30	日

※工程比較結果：(1-13日/30日)×100 ≒ 57%

5. おわりに

これまで8台のシールド機に適用されたリレービット工法の実績から、シールド機掘削能力を最大限に発揮させるために、摩耗したカッタビットの交換や地盤に適したカッタビットへの交換だけではなく、到達立坑のNOMST壁切削や松杭、鋼管杭などの既設障害物切削などにも本工法の有効性を確認することができた。また、砂礫層や岩盤掘削に使用されるローラビットについても、リレービット工法の要素技術を応用して開発を完了しており、1台のシールド機で軟弱地盤から硬質地盤に至る全地盤対応シールド工法が確立された。

従来のカッタビット交換技術では、立坑構築や地盤改良などの工事費の増大、また、シールド機外でのビット交換作業の安全性、周辺環境及び地上交通設備への影響などが課題となっていたが、今後はシールドトンネル工事にリレービット工法を適用することですべてが解決でき、長距離化・大深度化の施工が実現可能と考える。

参考文献

- 1) 永森邦博・小野大我：ビット交換技術「リレービット工法」、大深度化に対応する地下空間建設技術と建設機械、2004.9
- 2) 辻井 孝, 白井 徹弥：『リレービット工法』による玉石混じり砂礫地盤の長距離掘進, 日本プロジェクト・リサーチ講習会, 2004.3