

シールド掘削機カッタビット交換技術の 適用実績と今後の展開

永森 邦博¹・真鍋 智¹・小林 孝志²

¹正会員 鹿島建設株式会社 機械部 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7)

²鹿島建設株式会社 機械部 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7)

シールド工事の長距離化が進む中で、掘進で摩耗するカッタビットの交換技術が重要視されてきている。従来は、中間立坑での交換作業や、地盤改良で自立させた切羽前方での交換作業が行われてきた。これに対し、交換作業の安全性向上や工程短縮を図る目的で、地盤改良を必要とせず、シールド掘削機内部からカッタビットを交換する工法が開発され、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掘削対象に適用することや、地中障害物切削対策として応用することが試みられている。本文では、実用化されているカッタビット交換工法の各種分類と、当社施工現場での適用実績について述べ、今後の適用動向を探る。

キーワード：シールド工法，カッタビット，長距離施工，大深度地下，地中障害物

1. はじめに

近年、建設工事のコスト削減を目的とした事業期間短縮への取組みが進められる中で、シールドトンネル建設においては、トンネル延長の長距離化に拍車がかかっている。シールド工事1工区あたりの掘進延長は、5kmを超える工事の実績が既にあげられており、長距離トンネル掘削を行うシールド掘削機もこれまでの複数台から1台で対応するなど、長距離対応は、シールド技術の進歩によるところも大きいものとみられる。長距離施工への対応は、シールド掘進とトンネル覆工の時間短縮を同時に要求するところとなり、長距離高速施工技術として近年のシールド技術の中でも重要な位置を占めている。また、大深度地下利用の規制緩和により、シールドトンネル建設の大深度化が今後進められるのに合わせ、これまでのシールド施工が行われてきた都市部の比較的柔らかい地盤中心の掘削から、軟岩等を含めた硬い地盤の掘削への対応も必要になるなど、掘削対象地盤の広範化が予想される。

上述の背景から、シールド掘削技術については、長距離高速施工対応としてシールド掘削機のカッタ駆動部止水シールやテールシール等の耐久性向上が進められているのと合わせ、カッタビットの耐久性向上、さらに損傷したカッタビットの交換技術の開発が盛んに行われてい

る。開発された交換技術は、カッタビット交換工法としてシールド掘削機への搭載方法や交換方法に応じて、図-1 に示すリレービット工法など様々な工法が開発され、実工事に適用されるようになった。

また、カッタビット交換工法は、掘削対象地盤が広範囲におよぶ場合に随時適切な形状、材質のカッタビットへの交換が可能であり、掘進中に遭遇する地中障害物切削や、立坑での発進、到達時に採用されることのある新素材コンクリート壁掘削への対応などに応用できる。

本文では、長距離対応や地中障害物対応、全地盤対応といった利用目的に応じたカッタビット交換工法の体系と工法概要について、工事への適用実績に触れながら整理し、今後の展開について述べる。

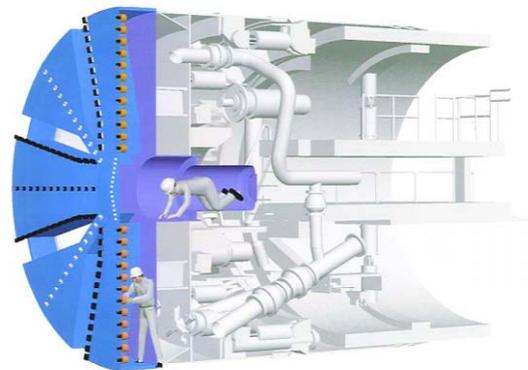


図-1 リレービット工法概要図

2. カッタビット交換工法の概要と分類体系

近年開発されているシールド工法におけるカッタビット交換工法は様々な方式のものが開発されており、いずれも地盤改良を併用せずにシールド掘削機内部から交換を実施する方法が取られており、交換期間の短縮や、交換費用の削減、交換作業の安全性向上が図られるところとなっている。実用化されている各種のカッタビット交換工法に共通する特徴は以下のとおりである。

- ・シールド掘削機内部から圧気なしで交換を実施
- ・交換は土質に関係なく任意の地点で実施可能

また、各工法の方式に応じて以下の特徴を有するものがあげられる。

- ・ビット交換回数の制限のないもの
- ・泥水加圧式、泥土圧式のいずれにも対応可能なもの
- ・交換時にカッタビットの状態を目視確認できるもの
- ・掘削対象に応じてビットの種類を変更できるもの
- ・機械装置を使って交換作業を省力化したもの

以上の特徴をもとに実用化された各種ビット交換工法を既往文献の調査結果から、表-1のように分類した。

表-1 カッタビット交換工法の分類体系

区分	工法名称	概要	交換範囲
交換回数無制限型	リレービット	カッタスポーク内に作業者が入り、カッタビットを交換	全断面
	クルン	隔壁部に球体を設け、回転させシールド掘削機内で交換	全断面
	トレール	連結したビットを外周から中心にスライドし、機内で交換	センタカッタ以外の全断面
	テレスポーク	ジャッキ操作でスポーク内から中心へビットを引出し交換	センタカッタ以外の全断面
交換回数制限型	スポーク回転式	スポークの前後にビットを配置し、スポークを回転し交換	スポーク部のみ
	リボビット	同上（ただし回転力は、カッタの回転駆動力を利用する）	スポーク部のみ
	予備カッタ方式	カッタディスク内にビット列を配置し、ジャッキで押出す	外周部
	レスキュー方式	カッタディスク内から交換用ビットをジャッキで押出す	外周部

(1) リレービット工法¹⁾²⁾

前頁の図-1 に示したように、交換作業者がシールド掘削機内からカッタスポーク内に進入し、止水機構をも

つ交換装置を用いてビットの交換を行う。ビット交換は交換地点の地盤条件によらず、いつでも、どこでも、何回でも可能であり、交換時にビットの摩耗、損傷状況を直接確認することができる。

(2) クルン工法³⁾

図-2 に示すようにシールド掘削機本体内部に球体を組み込んでおり、カッタ駆動部全体をシールド本体内部方向に反転収納可能な構造とし、カッタヘッドを後方へ回転させ、機内でビット交換を実施する。ビット交換回数の制限がなく、保護ビットを含めて全てのカッタビットの交換が可能である。

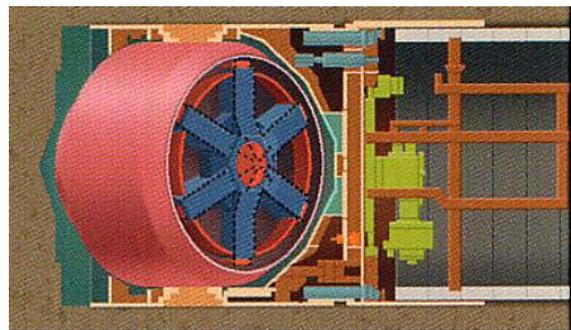


図-2 クルン工法の概略図

(出典；プロジェクトリサーチ講習会，1994.9)

(3) トレール工法⁴⁾

図-3 に示すようにリンク機構を用いて連結したカッタビットをスライド装置により機内へ引込み、ビット交換後に再びカッタヘッドへ押し戻す方法を採用している。ビット交換回数の制限はない。

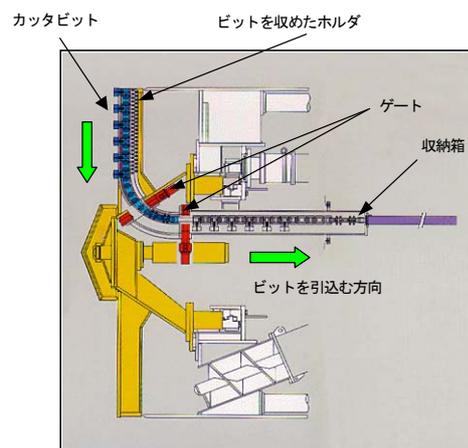


図-3 トレール工法の概略図 (出典；飛島建設(株)，三菱重工業(株)工法紹介パンフレット)

(4) テレスポークビット工法⁵⁾

ビット交換装置は、カッタスポーク内部に装備されており、図-4 に示すようにインナーチューブ、スライド

フレームを内包する三重構造のカッタスポークを採用している。交換時には、油圧ジャッキでカッタビットをスポーク内に引込んだ後、スライドフレームが組み込まれたインナーチューブを 180° 回転することにより、土砂と水の流入を防ぐ構造としている。

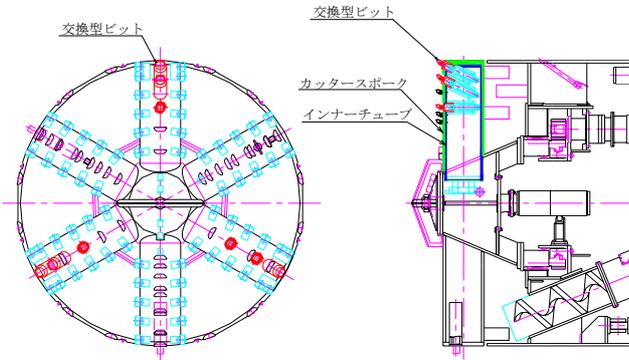


図-4 テレスポークビット工法の概略図

(出典；土木学会第 57 回年次学術講演会，pp. 121-122, 2002. 9)

(5) スポーク回転式カッタビット交換工法⁶⁾

図-5 に示すように、カッタスポーク背面に予備のカッタビットを配置しておき、カッタスポークを回転させることによりビットの更新を行う。予備のカッタビットは、円形スポークの背面に数セット装備することができ、掘進途中で装備数分だけのビット交換が可能である。また、交換作業は、機内から迅速に行うことができる。

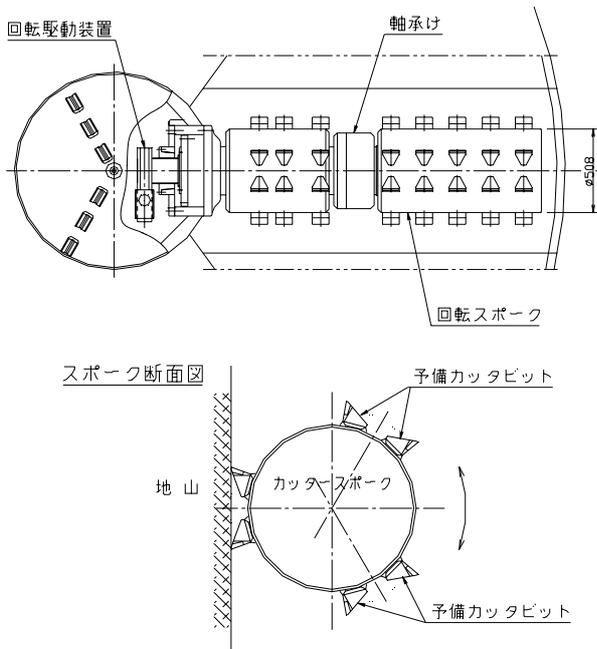


図-5 スポーク回転式カッタビット交換工法の概略図

(6) リボビット工法⁷⁾

交換用の予備ビットをカッタスポーク背面に装備しており、スポークを回転させてビットの更新を行う。写真-1 に示すように、スポークの回転は、シールド掘削機バルクヘッドに設置した可動式のラックとスポークに配した歯車を噛み合わせ、カッタヘッドを旋回して行う仕組みになっている。



写真-1 リボビット工法の概略

(出典；清水建設(株)ホームページ)

(7) 予備カッタ方式⁸⁾

図-6 に示すように、シールド掘削機カッタディスクのスリット部（開口部）に配置した予備ビットを油圧ジャッキとのリンク機構で縦列状に押し出す構造をもつ。摩耗したカッタビットのバックアップとして複数のカッタビットを短時間で設置することができる。

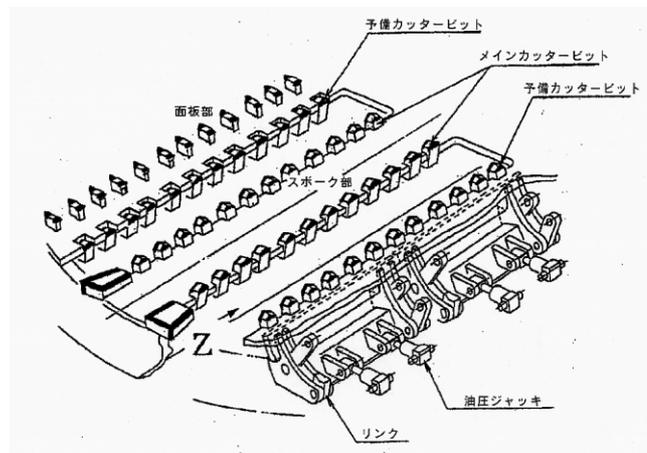


図-6 予備カッタ方式概略図（出典；コマツ提供資料）

(8) レスキュ方式⁹⁾

レスキューカッタビットを油圧ジャッキと連結してカッタヘッド内に収納しておき、機内からの油圧操作により油圧ジャッキを伸長させ、レスキューカッタビットをカッタヘッド前面に押し出す方式を採用している。

3. カッタビット交換工法の適用実績

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。

- ・長距離掘進におけるビット摩耗対策
- ・地中障害物切削におけるビット交換
- ・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とスポーク回転式カッタビット交換工法の適用実績を以下で述べる。

(1) 長距離掘進における適用実績

a) 適用工事の概要

当該工事は、共同溝建設工事において、約 3,400m を直径φ4,800mm の泥土圧シールド掘削機で掘進するものである。掘進対象地盤は、礫径 300mm 程度の玉石混じりの砂礫層であり、特にカッタビットの摩耗や損傷が懸念される条件であった。そこで、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。シールド工事の概要を表-2 に示す。

表-2 シールド工事概要

項目	内容
トンネル延長	約 3,400m
掘削機外径	φ4,800mm (シールド掘削機)
トンネル外径	φ4,650mm (セグメント)
仕上がり内径	φ4,200mm
掘削対象土層	玉石混じり砂礫層

b) シールド掘削機の構造

当該工事のシールド掘削機は、図-7 に示す 3次元 CAD での検討による交換装置設置による作業スペース確保も配慮し、写真-2 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 個のリレービットを装備した。

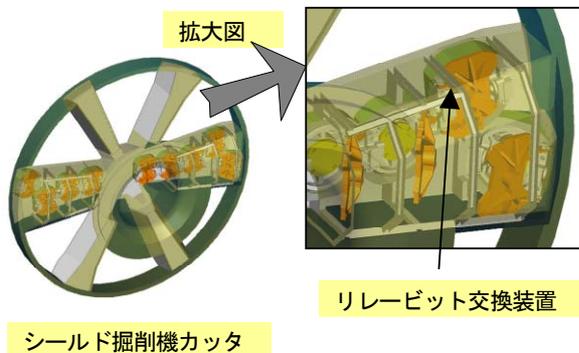


図-7 シールド掘削機カッタへのリレービット搭載検討



写真-2 リレービットを搭載したシールド掘削機

カッタビットの交換は、図-8 に示す手順で、カッタスポーク内にてボールバルブと同様の止水機構を持つ交換装置の回転バルブに装着しているカッタビットを回転させて回収する方法を採用している。事前に実機規模で実施した作業性評価実験で確認した作業状況を写真-3 に示す。

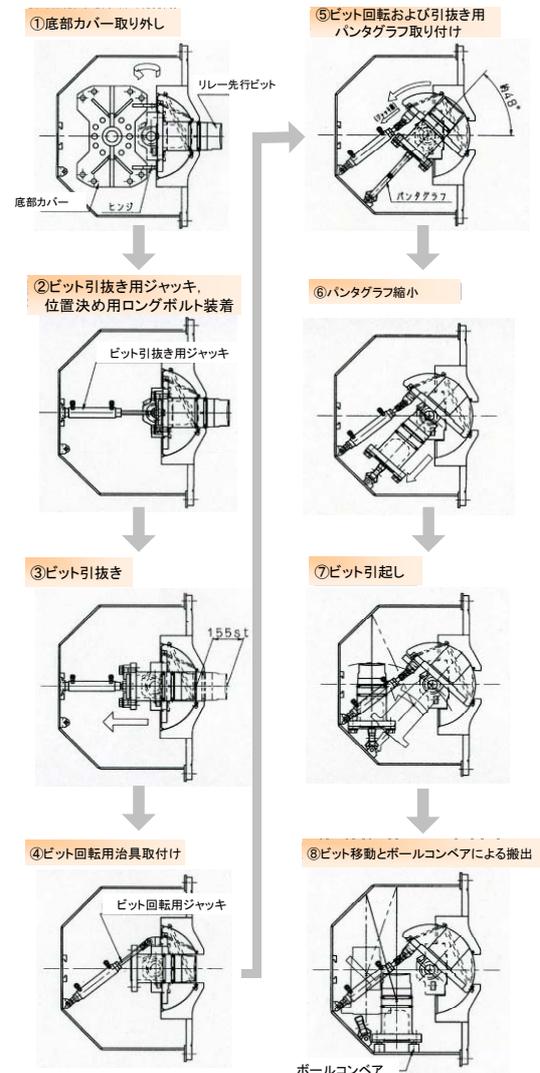


図-8 リレービット工法におけるカッタビット交換手順

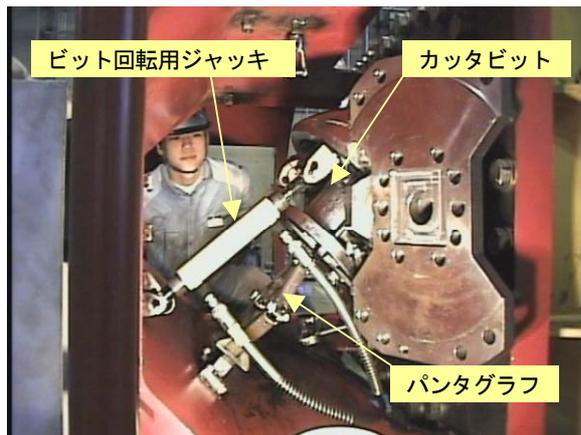


写真-3 カッタビット交換作業状況 (作業性評価実験時)

c) カッタビット交換実績

シールド掘削機カッタビットは、リレービットによる交換に対応したリレー先行ビット、先行シェルビット、メインビットの3種類の構成とした。

初回のカッタビットの交換は、掘進開始後約 820m 進んだ地点に唯一ある中間立坑にてカッタディスク全体の状況を目視確認しながらビットの摩耗調査と合わせて実施した。ビット交換時に確認したカッタビットの摩耗状態は、外周部付近のビットにおいて写真-4 に示す状態であり、交換したリレービット 9 個の摩耗係数 $22.8 \times 10^{-3} \text{mm/km}$ (平均) で、当初設定した予測値 ($80 \times 10^{-3} \text{mm/km}$) の 29%であることがわかった。当初予測値より摩耗進行が抑制された要因は、ビット先端部の体積に対してチップ体積を十分に確保したことと、加泥材選定に留意して掘削土砂の適度な流動性を確保したことによるものであると考える。初回のビット交換は中間立坑で実施したが、以後の交換は途中の地盤内で行う計画であり、現在順調に掘進を継続している。



写真-4 リレー先行ビットの摩耗確認状況

(2) 地中障害物対策における適用実績

a) 適用工事の概要

当該工事は、トンネル延長約 770m の地下鉄工事で、砂質土層掘進において、地中障害物 (H 型鋼杭, RC 杭) に多数遭遇することから、スポーク回転式カッタビット交換工法が採用されたものである。シールド工事の概要を表-3 に示す。

表-3 シールド工事概要

項目	内容
トンネル延長	約 770m
掘削機外径	φ 5,440mm (シールド掘削機)
トンネル外径	φ 5,300mm (セグメント)
仕上がり内径	φ 4,300mm
掘削対象土層	洪積砂質土

b) 適用実績

地中障害物 (H 型鋼, RC 杭) に多数出現し、カッタトルク上昇に伴って掘進速度が低下したことから、交換作業を実施した。スポーク回転によるビット交換作業は、2 本のカッタスポークに対し 3 時間で終了した。スポーク回転に要した回転トルクは、装備トルク $44 \text{MN} \cdot \text{m}$ に対して、 $4.9 \sim 13.2 \text{MN} \cdot \text{m}$ であった。また、カッタビットを交換したことにより、同一掘進速度 ($10 \sim 12 \text{mm/min}$) でのカッタモータ油圧が $9.80 \sim 11.18 \text{MPa}$ から、 $2.94 \sim 3.92 \text{MPa}$ に下がり、その結果、掘進速度 $25 \sim 30 \text{mm/min}$ での掘進が可能になり、その後順調な掘進を継続できた。

工事で使用したシールド掘削機へのスポーク回転式交換装置の搭載状況を写真-5 に示す。

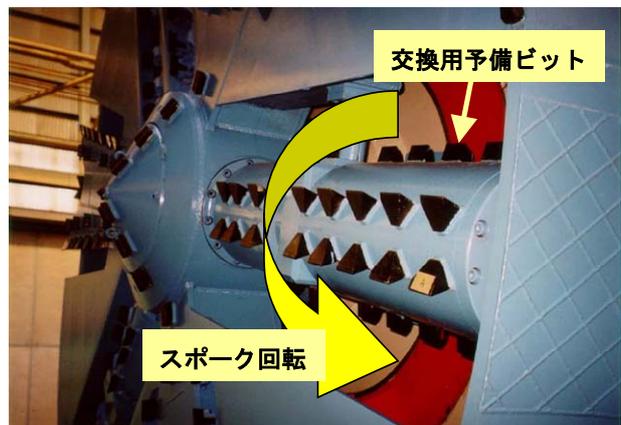


写真-5 スポーク回転式カッタビット交換装置のシールド掘削機への搭載状況

4. 今後の展開

リレービット工法やスポーク回転式カッタビット交換工法などのビット交換工法は、シールド施工の長距離化への対応技術のひとつとして適用実績を重ねてきている。一方で、今後の大深度地下空間利用技術の需要が強まる中で、これまでシールド工法では対応が困難であった岩盤地質などの硬質地盤への対応が必要になるものと考えられ、従来のシールド掘削機に広く一般に搭載されるツールビットから、岩盤対応ビット（ローラカッタ）への交換を行い、シールド工法の適用地盤を広げる技術の需要が見込まれる。

現在でもシールド工法による硬質地盤掘削への対応策として、シールド掘削機にローラカッタを搭載する事例が既にあるが、ローラカッタは、粘性土を主体とする軟弱地盤には、土砂取込み部への土砂の付着による閉塞や、粘性土付着によってローラカッタの回転が妨げられ、カッタの偏摩耗を招くなどの弊害が生じている。そこで、長距離掘進におけるビット交換工法として実用化されている交換工法に、岩盤掘削対応のローラカッタとの交換機構を搭載し、軟弱地盤から硬質地盤に1台のシールド掘削機で、いつでも、どこでも、何回でも対象地盤に応じて掘削に最適なカッタビットに交換できるユビキタス工法を開発し、図-9に示すようなシールド掘削機設計を進めて全地盤シールド工法としての実用化を目指している。

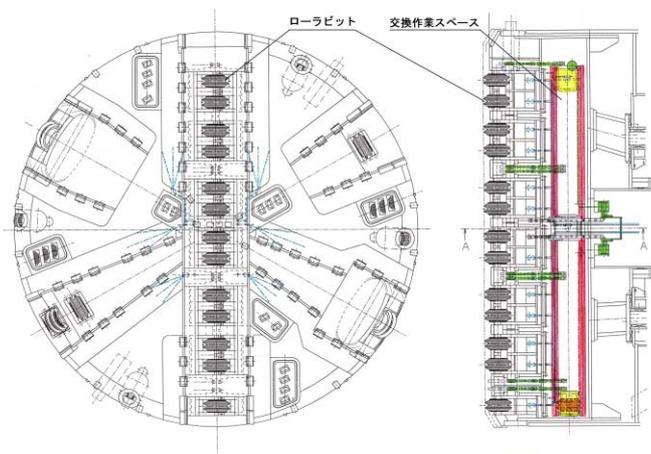


図-9 ユビキタス工法の概略図

5. おわりに

シールド掘削機のカッタビットは、これまで掘進中の交換が容易でなかったことから、設計時のビット選定の工夫と、施工中のカッタトルク管理をはじめとする掘進管理により、ビット摩耗計測を併用した慎重な管理が要求されてきた。地盤改良を必要とせず、かつシールド掘削機内部からビットの損傷状態を確認しながら交換できる工法の実用化は、作業期間短縮や安全性向上だけでな

く、ビット摩耗量を直接確認できることから施工中の掘進管理の良否を判断する一助にもなっており、その導入効果は大きいものといえる。

今後も、長距離対応、地中障害物対策、新素材コンクリート壁掘削対応や、さらに全地盤に対応できるシールド工法として、カッタビット交換技術をさらに向上させ、長距離、大深度地下利用に合理的に適応する技術として充実させたいと考える。

参考文献

- 1) 真鍋智, 五十嵐寛昌, 玉井達郎, 永森邦博, 石丸裕: シールド掘削機カッタビット交換技術の開発, 土木学会第 55 回年次学術講演会, VI-56, pp. 112-113, 2000.9
- 2) 中川雅由, 真鍋智, 永森邦博, 石丸裕, 小坂彰洋: 補助工法不要のカッタビット交換工法「リレービット工法」の施工実績報告, 土木学会第 56 回年次学術講演会, VI-68, pp. 136-137, 2001.10
- 3) 「シールドトンネルの掘進管理」連載講座小委員会編: シールドトンネルの掘進管理(5), トンネルと地下, 第 28 巻 10 号, pp. 77-84, 1997.10
- 4) 杉山雅彦, 赤木朋宏: スライド式カッタビット交換システム(トレール工法)の開発, 三菱重工技報, Vol. 36 No. 4, pp. 180-183, 1999.7
- 5) 宮清, 北岡隆司, 上田尚輝, 北原健太, 田中淳一, 山田浩史: シールド掘削機内からカッタビット交換が可能なテレスポークビット工法の開発, 土木学会第 57 回年次学術講演会, VI-61, pp. 121-122, 2002.9
- 6) 宇賀田康男, 白井伸一, 花見和則: 超長距離シールド掘削機用カッタビット交換機構の開発, トンネルと地下, 第 25 巻 1 号, pp. 69-75, 1994.1
- 7) 古川裕, 小林芳夫, 高木律, 久原高志, 南雅史: シールドのスポーク回転式カッタビット交換工法の開発と実施, 土木学会第 56 回年次学術講演会, VI-69, pp. 138-139, 2001.10
- 8) 田中一雄, 大道武治, 深海仁司, 山本享, 坪内範和, 脇田雅之, 小倉嵩敬: 超長距離・高速掘進シールドにおけるビット摩耗特性について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, VI-70, pp. 140-141, 2001.10
- 9) 永森邦博, 真鍋智: カッタビット交換技術の展開, 日本プロジェクトリサーチ第 47 回シールドトンネル工法施工技術講習会報文集, pp. 73-88, 2003.3