

全ての口径に対応できる機械式ビット交換工法と ビット交換ロボットの開発

田村 憲

小口径から大口径まで全ての径に搭載可能な機械式ビット交換工法「THESEUS工法[®]」を2020年に開発した。本工法は、シールド機内側からカッタースポーク背面に接続可能な可動式マンホールを備えており、接続後はカッタースポーク内部と機内が一体となった空間を作業スペースとして大気圧下でビット交換ができる工法である。実工事への適用にあたり、課題として、シールド口径が大きくなるにつれ取扱うビットが重くなること、交換対象ビットに手が届かない箇所が発生することから、人力によるビット交換には限界がある。

そこで、人力に代わり、カッタースポーク内の空間を自走し、ビット交換作業をするロボットを開発した。本稿では当該工法とビット交換ロボットの開発及び実証実験について報告する。

キーワード：ビット交換、ロボット、遠隔操作、自動化

1. はじめに

近年、都市部での施工となるシールド工事では、地下構造物の輻輳、振動・騒音や交通渋滞の誘発により中間立坑の築造が困難であり、またその築造コストを削減するために掘削径を問わず長距離化する傾向にある。さらに、平成13年4月1日施行の『大深度地下の公共的使用に関する特別措置法』（以下、大深度法）により、地下30～40m以上の大深度地下利用に関する規制が緩和され、大深度シールドトンネルの需要が高まっている。立坑築造における経済性・安全性などを考慮すると、長距離化の傾向は更に続くと考えられる。

一方、大深度化により掘削対象土は従来、比較的柔らかい砂質土や粘性土の土質が多かった地盤から、砂礫や軟岩等の硬質な地盤が掘削対象となり、カッタービットの摩耗量は増大している。これに対応するため、ビットの耐摩耗性、耐衝撃性を向上させる技術が開発されているが、ビット無交換での施工には限界があり、掘進に伴い許容摩耗量を超えるカッタービットに対して、交換が必要となる。

従来のビット交換には、地盤改良等により安定化した域内にシールド機を停止させた後に人が切羽に出て交換する方法や立坑を築造して交換する方法、シールド掘進機に特殊な装置を取り付け交換する方法等がある。前者は危険作業、工期の長期化、高コストといっ

た問題があり、後者は機械設備が高額であるものや、小口径シールドに適用できないもの等がある。このような状況から、地上工事を必要とせず、補助工法の省略により経済的に、かつ安全に行える機械式ビット交換工法は、今後、益々需要が高まると考えられる。

筆者らは「小口径から大口径まで適用可能」で「地盤改良等の補助工法が不要」かつ「任意の場所で全ての先行ビットを無制限に交換可能」をコンセプトに開発した新しい機械式ビット交換技術「THESEUS工法[®]」（Taisei-Hitz Easy and Speedy bitExchange Unit Systems 以下、本工法）を開発した。

実工事への適用にあたり、シールド機の口径が大きくなるに従い、取扱うビットが重くなることや交換対象ビットに手が届かない箇所が発生することから、交換時の作業効率の低下や手指の挟まれ等の安全上の課題があり、人力によるビット交換作業には限界がある。

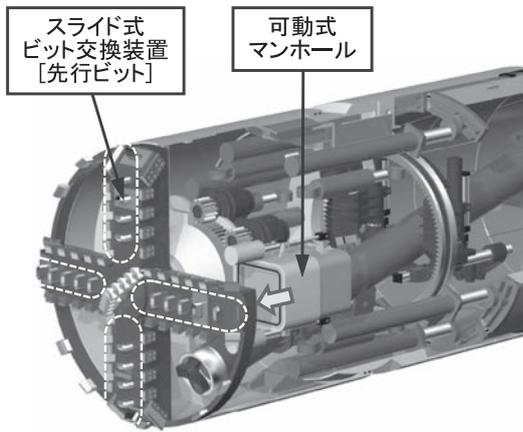
そこで、本工法を中口径以上のシールドに適用する際の要素技術として、これまでの人力作業に替わるビット交換ロボットも開発し、実大モデルによる実証実験を行った。

2. 従来のビット交換工法との比較

従来の機械式ビット交換は、カッタースポーク内に人が入り交換する方法や、カッターヘッド内部に機械式の交換装置を装備する方法等が取られてきた。これ

らは、カッター自体が大きい大口径シールド機には比較的容易に適用可能であるが、中小口径シールド機の場合は、形状寸法の制約から、全ての先行ビットの交換に適用することは困難である。

一方、上記課題の解決を目指し開発した本工法は、シールド機隔壁（バルクヘッド）に設けた可動式マンホールをカッタースポーク背面に接続することで、シールド機内と連続したビット交換用の作業スペースを確保することができる。地山を先行切削しティースビットの保護を担う「先行ビット」を全て交換することを可能としている（図—1）。



図—1 本工法の構成

ここで、可動式マンホールは、バルクヘッドに設けられるカッターモーターや排土装置（土圧式：スクリーコンベヤー 泥水式：送排泥管）に干渉しないように配置することが必要であり、ビット交換時の作業性からは、水平直径位置に配置することがよい。また、可動式マンホールとカッタースポーク背面との接続箇所は、機械的な凹凸の噛み合わせ構造である印籠継手で構成することと、カッタースポークにシャッタースライド機構（図—2）を装備することで、止水性を確保している。

本工法の優れた特徴は、以下の通りである。

(1) 任意の場所でビット交換可能

ビット交換を非開削で行うための地盤改良や、交換用の立坑の構築が不要となるため、地下構造物や沿道環境に左右されることなく、任意の位置でビット交換が可能である。このため、予め交換位置を定めることなく、摩耗状況に応じてビット交換を行うことも可能になる。

(2) 全ての先行ビットを繰り返し交換可能

中口径以上のシールド機では、可動式マンホールから手が届かない位置の先行ビットもあるが、後述する「ビット交換ロボット」を用いることで、全ての先行ビットを交換することが可能となる。簡便で耐久性が高い交換機構を採用することで、繰返しビット交換を行うことも可能である。

(3) 小口径シールドへの適用が可能

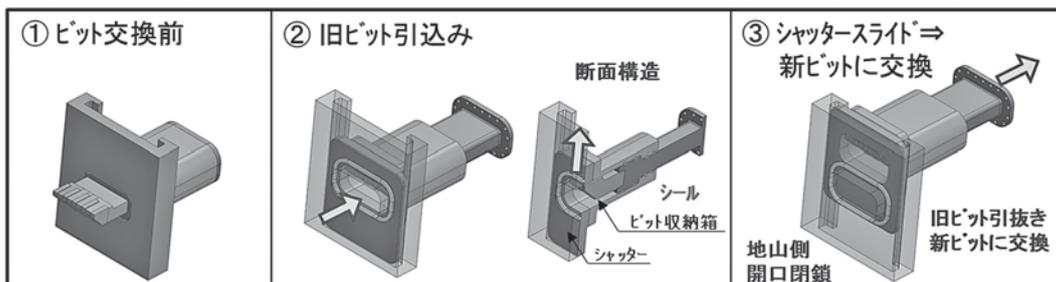
外径3mを超えるシールド機であれば、シールド機駆動部と干渉せずに可動式マンホールを配置可能であり、本工法は小口径シールド機にも装備可能である。

(4) カッタースポーク寸法の変更不要

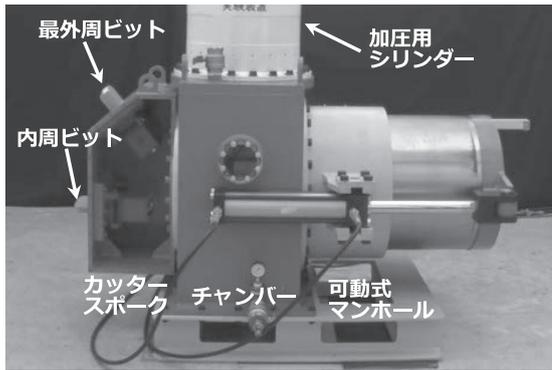
本工法ではビット交換時にカッタースポーク内に作業者が立ち入る必要がないため、小口径シールド機の場合でも、スポーク形状寸法（幅および厚さ）を大幅に変更する必要がない。

(5) 地上からの工事が不要

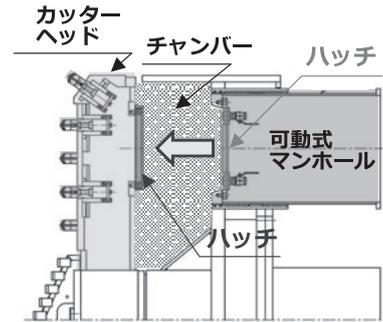
ビット交換時には、予めチャンバー内を高粘性可塑性充填材に置換するとともに、先行ビットを引き込む際には、引き込んだビットの空間に固化材を注入して、発生する空隙を充填することで、泥水式シールドの場合でも切羽面に空洞を生じさせることなく交換できる。



図—2 シャッタースライド機構

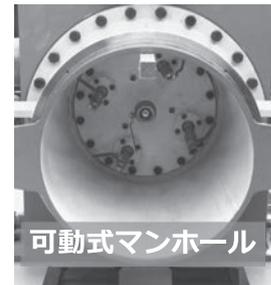


写真一 試験装置



(6) 交換時間の短縮

ビット交換のための準備作業は、可動式マンホールをカッタースポーク背面に接合し、それぞれのハッチを解放するのみである。このため、シールド機の部品撤去・復旧や交換装置の取付け・取外しに要する時間が不要となり、ビット交換期間の短縮に寄与する。



写真二 可動式マンホール接続前状況

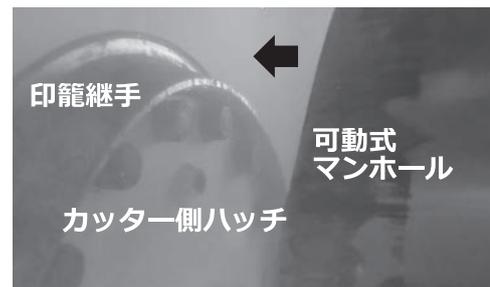
3. 実証実験

外径3mのシールド機のカッタースポークを模擬した試験装置(写真一)を製作し、可動式マンホールとカッタースポーク背面との接合部の止水性、ビット交換の効率を確認した。試験装置は、カッタースポーク部、チャンバー部、可動式マンホール部からなり、チャンバー部には水を封入し、その上方に設けたシリンダーにより加圧可能としている。

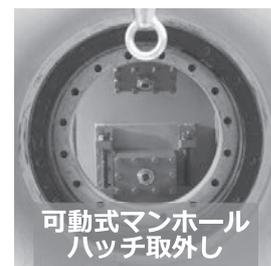
実証実験は以下の手順で実施した。

(1) 可動式マンホール押し出し ⇒ カッタースポークと接合

チャンバー部を0.5 MPaに加圧した後、可動式マンホールを押し出し、カッタースポーク背面と接合する。接合後、両者のハッチを取り外し、加圧下においても止水性が確保できていることを確認した(写真二～四)。



写真三 可動式マンホール接続中状況(水中)



写真四 可動式マンホール接続後状況

(2) 内周側ビット交換

内周側のビット交換は、①旧ビットをビット収納箱に引込み(写真五)、②ビット収納箱を上側にスライドさせてビットを地山と分離(写真六)、③ビット収納箱の背面蓋を外し、旧ビットを機内に回収(写真七)、④ビットをビット部、台座部、収納箱背面蓋に分解(写真八)した後、ビット部を新品に交換し、回収と逆の手順で戻す(写真九)。一連の交換作業に約20分を要した。

(3) 最外周ビット交換

最外周ビットも内周側と同様の手順で交換するが、交換時のスペース確保のために、ビット引込み方向を斜め下方にした(写真十)。交換時の滑落防止措置が必要となるため、一連の交換作業に約20分を要した(写真十一)。

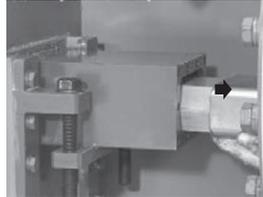
従来工法と比較して、交換時間を大幅に短縮できることを確認した実証試験により、以下の内容を確認す



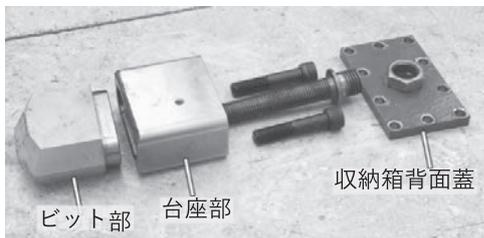
写真一五 旧ビット収納箱引込み



写真一六 前方シャッター開



写真一七 旧ビット機内へ回収



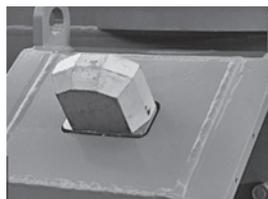
写真一八 ビット分解



写真一九 新ビット交換完了



写真一十 旧ビット引込み



写真一十一 新ビット交換完了

ることができた。

- ①本工法によるビット交換作業は、直径3mの小口径シールド機においても適用可能であり、従来の機械式ビット交換工法と比較しても、短時間で交換が可能である。
- ②地下50mを想定した加圧下においても止水性が確保でき、シールド機内から大気圧下での交換が可能である。

4. 実工事への適用

総合評価落札方式における技術提案において本工法を提案し、地方公共団体の下水道工事を受注した。現在、計画中のシールド機は、掘削外径D=5.56mのシールド機で、可動式マンホールから手が届かない範囲にもビットが配置されることから、遠隔操作によりビットを交換可能とするロボットを考案した。

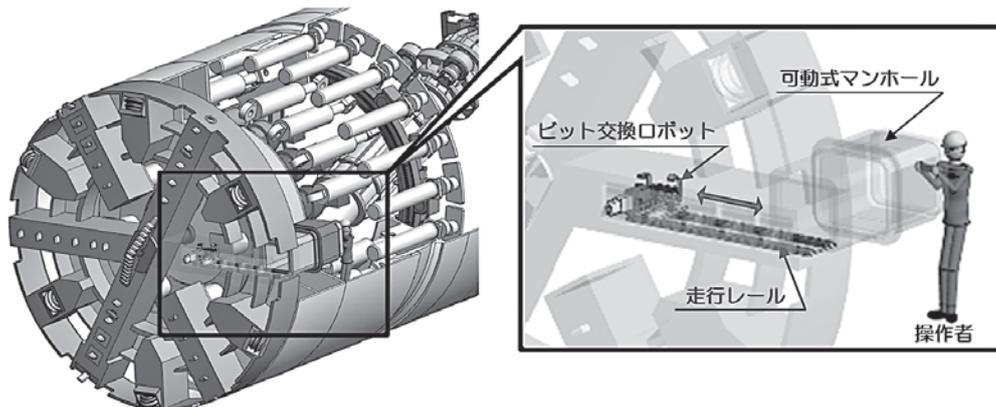
これにより、外径5mを超えるシールド機であっても、全ての先行ビットを交換することが可能となり、特に大口径シールドでは可動式マンホールを複数箇所に配置することで、作業効率の向上が見込まれる。

考案したビット交換ロボット（以下、ロボット）を図一3に示す。

5. ロボットの特徴

カッタースポーク内をロボットが容易に移動できるように、横行するためのガイドレールをカッタースポーク内に取り付けておき、交換対象のビットが配置されたカッタースポークを水平にするため、可動式マンホールは3時もしくは9時の位置に配置することとした。

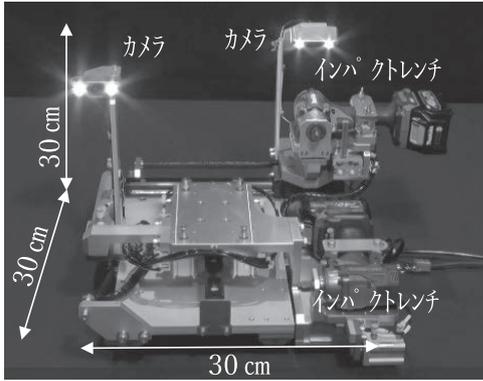
ロボットの特徴は以下の通りである。



図一三 ビット交換ロボット

(1) ビット交換時に後施工で容易に設置可能

ロボットはビット交換が必要となった際、可動式マンホールからカッタースポーク内に設置できるように、コンパクトな形状寸法（長さ 30 cm×幅 30 cm×高さ 30 cm）とした（写真—12）。



写真—12 ビット交換ロボットの形状

(2) シールド機内から遠隔操作可能

スポーク内移動時に交換対象となるビットとの相対位置を調整できるように、ロボットに2台のカメラを搭載した。

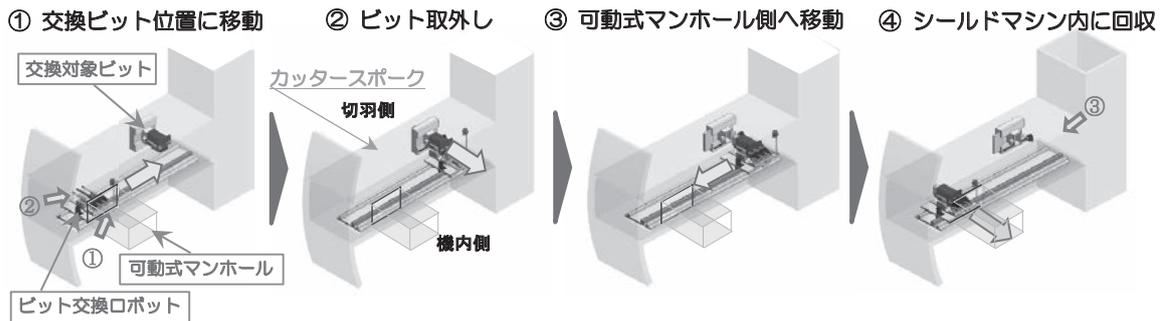
また、ロボットの操作は、シールド機内からの遠隔操作を可能にした。

(3) 市販のパーツを使用し破損時の早急な対応が可能

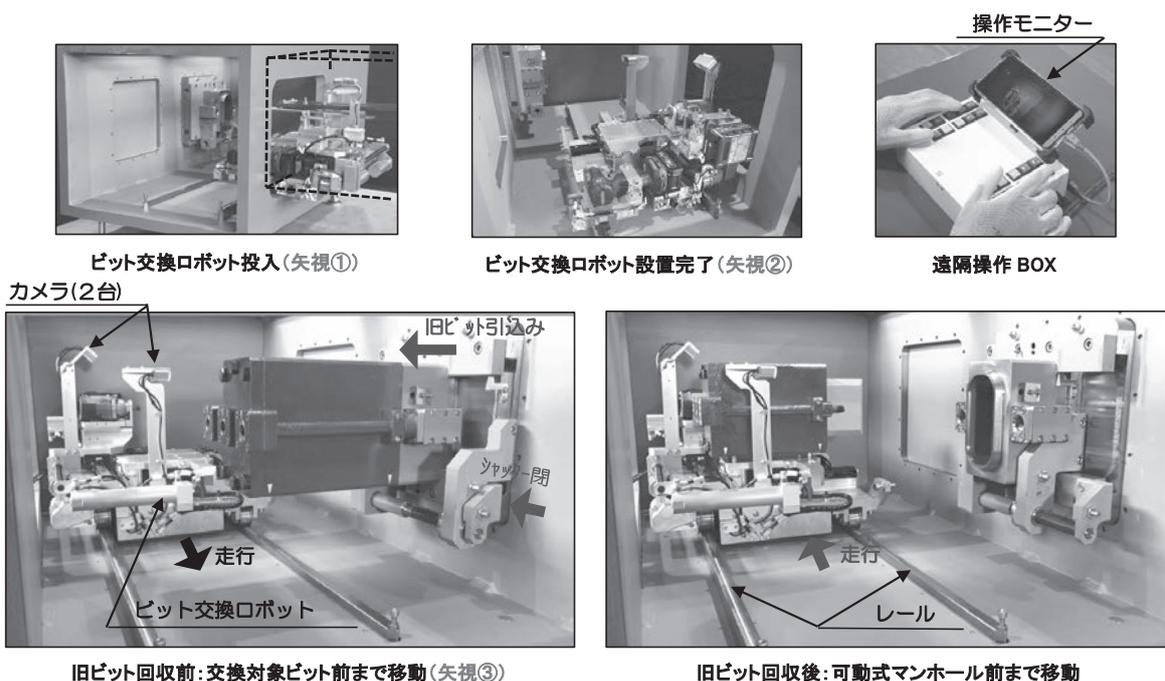
ロボットのパーツにはインパクトレンチをはじめギヤードモーターやエアシリンダーなど、市販品を使用しているため、部品の調達が容易であり、破損時の早急な対応が可能である。

6. ロボット実証実験

実証実験では、ロボットを可動式マンホールからカッタースポーク内に据付けた後、一連のビット交換



図—4 ロボットによるビット交換手順（回収時）



写真—13 実証実験でのビット交換ロボットの作動状況

手順を再現した（図—4，写真—13）。ロボットによるビット交換手順を以下に示す。

- ①ビット交換ロボットが交換対象となる旧ビット位置まで移動（遠隔操作）
- ②旧ビットをスポーク内部に引き込んでスライドシャッター閉鎖した後に取り外し，ロボット本体内に回収（遠隔操作）
- ③旧ビット回収後，ロボットが可動式マンホール位置まで移動（遠隔操作）
- ④可動式マンホールまで移動したロボットから旧ビットをシールドマシン内部に回収（人力）

なお，新しいビットの取付けは，上記と逆の手順で実施した。実証実験は，従来の本工法と比べ交換時間を約40%（20分⇒12分）短縮でき，人力作業をなくすることで，安全性も大幅に向上した。

7. おわりに

本工法は，可動式マンホールをカッタースポークに接続して作業スペースを確保するため，小口径シール

ド機でもカッタースポークの厚みや幅を極端に大きくする必要がなく，掘削土のチャンバーへの円滑な移動が可能となる。このため，安定した掘削性能と安全なビット交換機構を兼ね備えたシールド機を実現することが可能である。また，中口径以上のシールド機においては，先行ビットの交換を遠隔で可能にするロボットを開発し，これを利用することで，ビット交換作業の効率化，更には自動化をはかることもできる。

今後は実証試験により得られた知見を改善し，実施工にフィードバックしていくとともに，更なる作業の効率化と安全性の向上に努めていく所存である。

JCMA

【筆者紹介】

田村 憲（たむら けん）
大成建設㈱
土木本部 機械部 機械技術室
次長

