

回収型掘進機「やどかり君」工法の開発と実用化

－性能実証と障害物撤去工法の開発－

Development and Practical Use of the Collection Type Digging Machine "YADOKARI-KUN" Method

－ Proof of Performance and Development of the Method to Remove an Obstacle －

木下茂樹* 柴崎貞典** 高橋淳二郎*** 福居雅也*

要 旨

シールド・推進工法では、近年「到達立坑を造らない」、「人孔や管渠等の既設構造物に直接接続する」などの特殊な到達方法での施工条件が増加してきている。従来の掘進機では、到達後に坑内での溶断解体・搬出作業が必須となり、その劣悪な作業環境と安全性の向上は改善すべき急務の課題であった。

これらの課題を解決するために、回収型掘進機「やどかり君」工法を開発した。本工法は、主要構造部をボルト接合・ユニット化して簡易解体および回収・再利用を可能としたリユース技術が特長であり、作業環境の改善とコスト縮減が期待できる。

本報では、これまでの開発経緯と実施工から得られた知見などを整理して紹介する。さらに、回収型掘進機の特長を活かして、前方の障害物を従来方法よりも安全かつ低コストに撤去する施工法について報告する。

キーワード：回収型掘進機、再利用、超大口径推進工法、地中接合、障害物撤去

1. まえがき

都市部のトンネル築造工事においては、地盤沈下や交通阻害等を防止する目的で密閉型掘進機を用いて施工するのが一般的である。また近年は、「到達立坑を造らない」、「人孔や管渠等の既設構造物に直接接続する」などの特殊到達条件下での施工事例が増加している（図－1）。

公共工事におけるコストの縮減および3R（リユース、リデュース、リサイクル）のキーワードに象徴される循環型社会の形成という社会ニーズから、従来スク

ラップ化していた密閉型掘進機の駆動部を回収・再利用する回収型掘進機「やどかり君」工法を開発し、実施工への適用を図りながら技術の改良・適用場面の拡大を継続してきた。

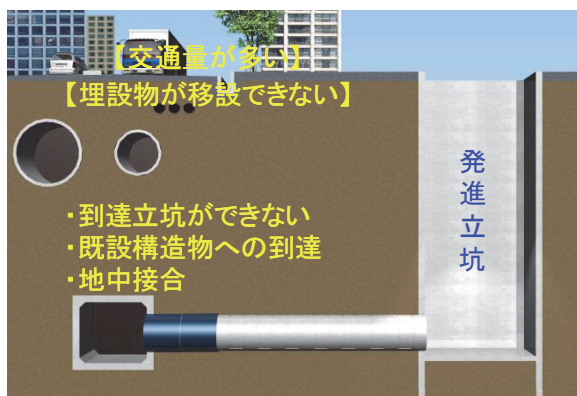
本報では、開発内容と実施工で得られた知見を報告するとともに、回収型掘進機の特長を活かした前方の障害物撤去を従来方法よりも安全かつ低コストで施工できる工法について報告する。

2. 開発概要

「やどかり君」工法は従来、到達後にガス溶断により解体・埋め捨て処分されていたシールド機、推進用掘進機（以下、掘進機）の簡易組立、簡易解体、回収、再利用を可能にする技術であり、その特性から種々の地中接合、超大口径推進工事への適用性に優れた工法である。本工法は、推進工法およびシールド工法に適用が可能である。

2.1 基本構造

回収型掘進機は、図－2に示すようにカッターヘッドと一体構造の駆動装置を設けた「内殻」、シールドジャッキを設けた「外殻」および内殻と外殻の接続、調整部材である「中殻」の3重殻分割構造である。また、



図－1 特殊到達条件の例

*技術本部東京土木技術部 **東京支社土木工事第1部 ***東京支社土木工事第6部

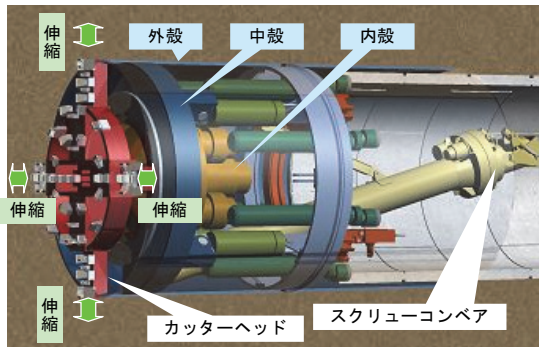


図-2 基本構造概要図

カッターヘッドも発進側への回収を可能とした分割構造または縮径機能を持つものとした。各部の取付は、組立、解体を容易にするためにボルト接合を主体としている。

2.2 特長

- 3重殻分割構造の採用により以下の特長がある。
 - i. 解体時、中殻・内殻の坑内から発進側への一体回収
 - ii. 中殻を介することで同径以外の掘進機への内殻の再利用
 - iii. 掘進機解体作業時のガス溶断作業の低減による工期短縮、作業環境改善およびCO₂の排出削減
 - iv. 3重殻分割部の各々の機能の明確化による設計の簡素化
 - v. ガス溶断箇所低減による損傷部材の低減
 - vi. 内殻部分はトレーラーに積載可能な寸法で一体運搬が可能

2.3 適用範囲

a. 用途

上下水道、共同溝、鉄道、電力洞道等のシールド工事（泥水式、土圧式）、推進工事（泥水式、土圧式、泥濃式）に適用可能である。特に到達立坑の築造が不可能な場合や既設管渠への地中接合等の特殊到達条件への適用性に優れる。また、推進工事では、従来の掘進機のような一体型構造とは異なり分割構造を基本としていることから、組立式ヒューム管との組合せで呼び径φ3,000mmを超える超大口径推進工事への適用性にも優れている。

b. 適用径

本掘進機の適用径は、機械構成上の制約、回収時の機内作業の制約上、工法別に表-1を基本としている。

c. 適用土質

軟弱地盤から硬質地盤まで広範囲の土質に対応可能

表-1 工法別適用径

No.	工法	掘進機外径	
		φ1,450mm (呼び径1,200)	φ3,520mm (呼び径3,000)
1	泥水式推進工法	φ1,450mm (呼び径1,200)	φ3,520mm (呼び径3,000)
2	土圧式推進工法	φ1,810mm (呼び径1,500)	φ3,520mm (呼び径3,000)
3	泥水式シールド工法	φ2,130mm (仕上り内径φ1,350mm)	φ6,140mm (仕上り内径φ5,000mm)
4	土圧式シールド工法	φ2,130mm (仕上り内径φ1,350mm)	φ6,140mm (仕上り内径φ5,000mm)

である。

d. 曲線半径

中殻・内殻の回収を坑内から行うため急曲線のルートでは制約を受ける。曲線半径は呼び径（または仕上り内径）φ1,500mm以下で径の30~40倍、同φ1,500mm以上で径の40~50倍程度を目安とする。

3. 適用事例

「やどかり君」工法は2008年5月末現在で8件の施工実績がある（表-2）。このうち、No.1、3、5、7および8の工事の概要を以下に示す。

表-2 「やどかり君」工法の実績

No.	用途	施工法	仕上り内径 (mm)	総延長 (m)	再利用回数
1	換気坑	土圧式推進	3,000	288	4
2	上水道	泥水式シールド	1,800	2,091	2
3	下水道	土圧式推進	3,500	188	1
4	下水道	土圧式推進	2,800	809	2
5	下水道	土圧式推進	3,500	173	1
6	下水道	泥濃式推進	1,500	279	1
7	共同溝	泥水式シールド	3,900	1,117	1
8	下水道	土圧式推進	3,000	693	2

※No.5はNo.3の掘進機の再利用

3.1 再利用によるコスト削減、省資源化（実績No.1）

φ3,000mmの超近接4連換気坑（離隔500mm）を推進工法にて施工する工事であり（写真-1）、到達部である換気所が連続地中壁までの施工状態であった。到達部での回収が不可能な従来工法では4機の掘進機が必要であったが、「やどかり君」工法の採用により、1機の掘進機で施工が可能となり、コスト削減、坑内作業環境の向上、省資源化を達成した。

3.2 大口径推進工法への適用（実績No.3、5）¹⁾

従来、呼び径φ3,000mmを超える推進管は道路交通法の規制から運搬できないため、施工方法も開削かシールド工法に限られていた。2分割タイプのヒューム管（写真-2）の開発により内径φ3,500mmの超大口径管推進工法も可能となったが、当該管に適用可能な掘進機は、ヒューム管と同様に運搬の制約を受けていた。また、本



写真-1 4連換気坑の施工状況（実績No.1）

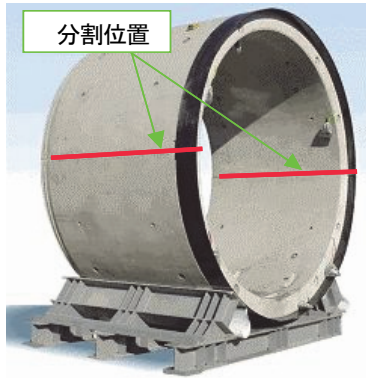


写真-2 分割型PC推進管
(内径φ3,500mm 外径φ4,050mm)

工事では到達立坑への大型クレーンの搬入が難しく到達後、重量物であるカッター駆動部は発進立坑側へ引き戻す必要があった。このため、「やどかり君」工法を計画、設計、適用し、良好な結果を得た(写真-3)。また、実績No.3からNo.5へと掘進機を再利用し、再度その役目を果たした。これにより超大口径管推進工法において、再利用を考慮した「やどかり君」工法が適していることを実証した。さらに、内殻を再利用する際、土質によってはトルク不足が懸念されるため、設計段階で装備可能な最大トルクを計画すべきであるとの知見が得られた。

3.3 中口径シールド工法への適用(実績No.7)²⁾

延長約1.1kmの共同溝をシールド工法で築造する工事である。到達立坑は主要幹線道路下にあり、他工事として内部構築まで完成していた。地上で占有できるヤード面積がほとんど無く、交通に影響を与えない工法が求められたため、カッター駆動部を発進立坑側に一体に回収できる「やどかり君」工法を適用した。

シールド工事では初の坑内回収型で、運搬に軌条を利用して回収を行った事例である(写真-4、図-3)。

軌条を残置しての解体になったため、以下の課題が明らかになり対応を行った。

- i. 足場板の盛替え、照明盛替え、手摺撤去・復旧作業といった運搬時のスペース確保による追加作業の発生
- ii. 駆動部運搬台車の車輪増設により、駆動部の重量の分散化
- iii. 駆動部の形状を考慮した駆動部運搬用台車製作によるコストアップ
- iv. 油圧モータを取り外して重量軽減し、既存の運搬、吊上げ、搬出用設備の利用

掘進機的设计製作段階において、周辺設備も含めた解体施工を十分に検討し、よりコスト低減を図ることが重要である。

3.4 地中接合への適用(実績No.8)³⁾

大口径・長距離推進工法による掘削後、上流側では既設管路への側面地中接合、下流側では残置シールドへの正面地中接合が計画されており、技術的にハードルの高



写真-3 坑内引戻し状況(実績No.3)

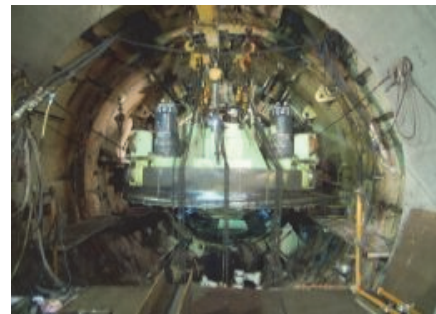


写真-4 内殻解体状況(実績No.7)

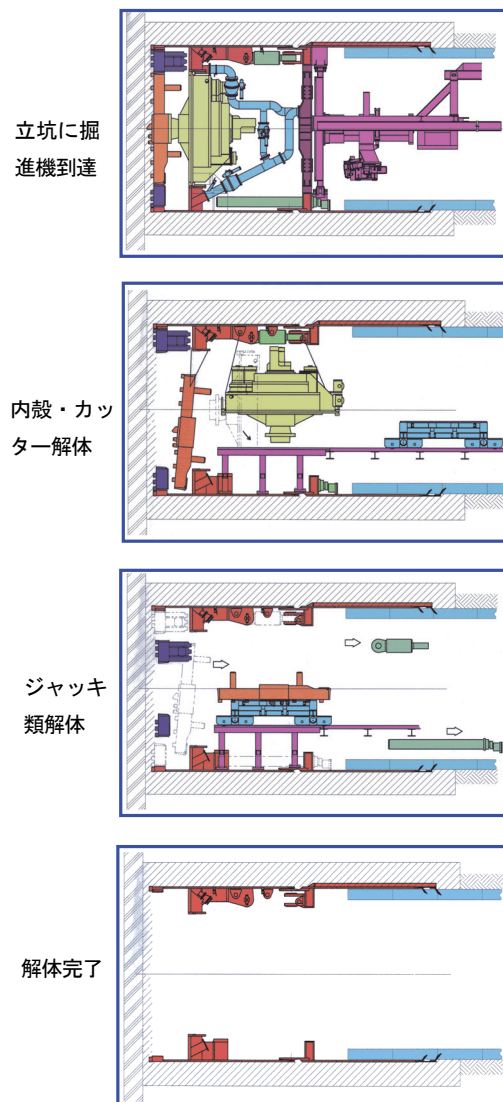


図-3 駆動部等の解体手順(実績No.7)

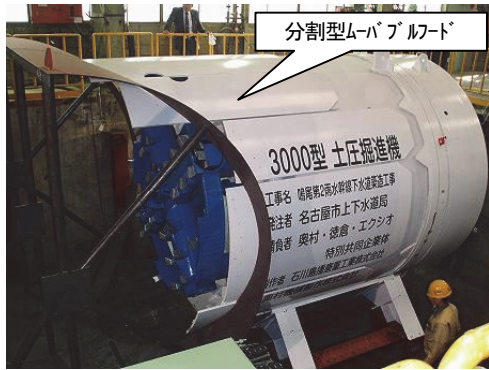


写真-5 側面接合用掘進機 (実績No.8)



写真-6 側面接合完了状況 (実績No.8)

い工事であった。この地中接合の手段として、「やどかり君」工法を適用した。「やどかり君」工法では、まず正面地中接合を行った後に内殻を再利用し、側面地中接合を行った。

既設管路への側面地中接合工事と残置シールドへの正面地中接合工事では、外殻の径が異なっていたが、「やどかり君」工法の特長である中殻を調整することにより駆動部である内殻を再利用することが可能になった。

側面地中接合では、既設管路接合面への密着性を増すために外殻に分割型のムーバブルフードを装備し、接合を行った (写真-5、写真-6、図-4)。

本工事により「やどかり君」工法の既設管路への側面地中接合の適用性、残置されたシールドへの正面地中接合の適用性を実証した。

本現場は引戻し延長が 500m 以上で、急曲線が多く通常のワイヤー延長による引戻しでは困難であった。アンカーと多段ジャッキを併用した方法が有効であった。

4. 障害物撤去工法の提案

回収型掘進機「やどかり君」を用いて、今まで困難であった未知の障害物を何度でも撤去でき、また既知の障害物撤去もより安全に、短期間、低コストで実施できる障害物対応工法「やどかり君NEO」を考案した。

4.1 障害物撤去の実態

回収型掘進機を用いた障害物撤去工法の開発条件を定めるに際し、シールド工事における地中障害物の実態を調査した⁴⁾。その結果を以下に示す。

- i. 障害物発見時期は遭遇時 44%、着工前 38%、着工から遭遇前 17%
- ii. RC、PC杭は90%以上が遭遇前に確認済み
- iii. 鋼管杭は遭遇時発見が50%で、シールド機で切削または地上からの掘削撤去が多い
- iv. 木杭も鋼管杭と同様の傾向である
- v. RC地下構造物は事前発見がほとんどである
- vi. 鋼矢板は残置物がほとんどで60%が遭遇時に発見、地上からの引抜き、掘削撤去が多く、シールド機による切削がこれに続く

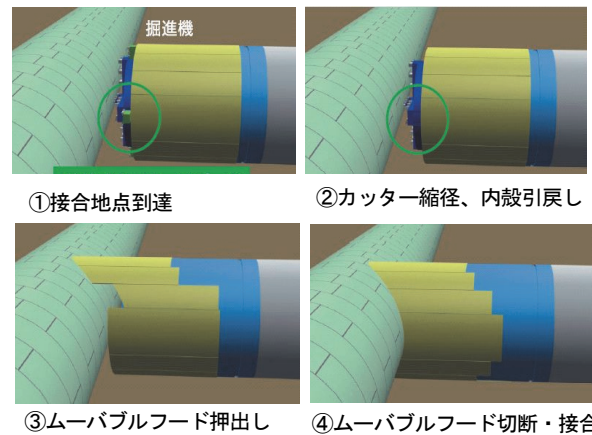


図-4 側面接合施工手順 (実績No.8)

- vii. H鋼は90%が残置物であるが70%が遭遇前に発見できている
- viii. 転石はほとんどが遭遇時発見、シールド機からの撤去が最も多く、地上からの掘削撤去が次に続く
- ix. 流木はほとんどが遭遇時発見、シールド機による切削撤去が多い

障害物については事前に確認ができれば、事前対策ができ、撤去可能である。しかし、未知の障害物に遭遇した場合には、障害物の撤去を安全に短期間かつ低コストで実施することは容易ではない。

4.2 開発条件の設定

調査結果を踏まえ、開発条件を以下のように定めた。

- i. 対象障害物：未知の転石 (900mm 程度)
- ii. 地盤改良：機内より地盤改良
- iii. 地質：砂質地盤
- iv. 掘進機：泥土圧掘進機で外径φ3,500mm 回収型
- v. 地下水圧：掘進深度10mを想定し0.1MPa程度

4.3 障害物撤去、カッタービット交換の課題

機内から障害物を撤去する場合、その情報が事前に得られておれば、障害物周辺の地盤改良を行い掘進機が障害物に達した時点でシールド隔壁を解放し人力にて障害物を撤去する方法が一般的である。通常、地盤改良は地上部から行われており、地盤改良材には「超微粒子シリカゾル注入材」等が用いられている。地上部からの地

狭い注入削孔範囲（中央の青い範囲）

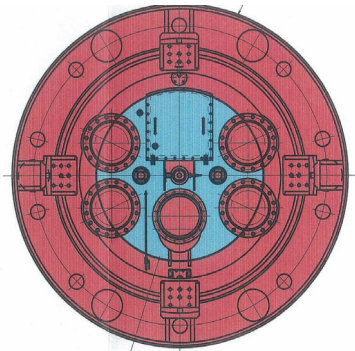


図-5 注入削孔可能範囲(隔壁部)



写真-7 削孔状況写真

盤改良が何らかの理由で行えない場合は、機内に削孔機を持ち込み、地盤改良を行う必要が生じる。

また、地中にてカッタービット交換を行うための地盤改良を機内から行った施工事例があり、そこから多くの知見が得られ、課題が明らかになった。それらを以下に示す。

- i. 削孔機をセットするためにスクリーコンベアやエレクターなどを撤去する必要がある
- ii. 駆動部等の干渉から注入削孔が可能な範囲（図-5の中央青い範囲）が非常に狭くなり、また注入管の角度も大きく振れないため、図-6に示すように障害物手前 10~20m 付近から注入し改良する必要が生じる。そのため削孔長が長くなるとともに削孔抵抗が増え高性能の大きな削孔機が必要となる
- iii. 駆動部等があるためスペースが狭く大きな削孔機は1セットのみとなり、設置時間、削孔時間が長くなる（写真-7）
- iv. 実績では、削孔機搬入3方、搬出3方を要し、セット45分、削孔0.4m/分、注入8ℓ/分、引抜き1.2m/分である

以上より、既知の障害物撤去は従来機を用いる機内注入でも可能であるが、従来の方法では注入に長時間を要し、掘進停止が長期間になることや、狭い作業空間で安全性の低い作業となることなどの課題が判明した。また、この工法では、未知の障害物にシールド機が遭遇した場合には、機内注入による障害物撤去は難しいと考えられる。

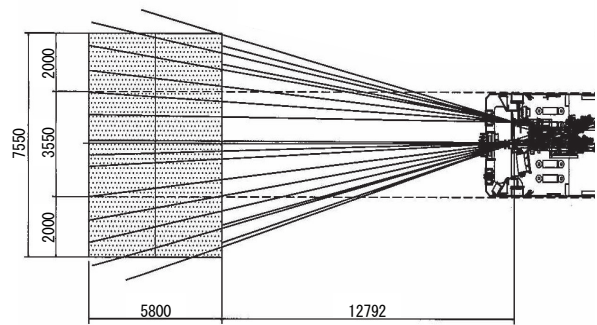


図-6 地盤改良位置図

4.4 掘進機改造に関する検討

開発条件として事前に把握できていない障害物を対象としているため、障害物に遭遇しない可能性があることを考慮すると、掘進機の改良に投じるコストとその回収の考え方が難しい。また、数度の遭遇も考えられることから、迅速で安全性が高い障害物撤去工法が求められることにもなる。この難易度の高い条件を回収型掘進機の特長を活かすことで解決する工法に取り組んだ。施工事例から得られた課題を参考に掘進機改造という観点から次の項目についての検討を行った。

- i. 機内からの地盤注入改良の工程短縮と確実性
- ii. 隔壁内作業の安全性確保
- iii. 掘進機前方上部の地山崩落防止
- a. 機内からの地盤注入改良の工程短縮と確実性

前述の施工事例からも分かるように、掘進機の駆動部等が邪魔になりシールド前面の広範囲の削孔注入ができなくなることが一番の問題点である。これを解決するために、掘進機をセンターシャフト方式として隔壁を残したまま駆動部を容易に後方へ移動できるように一体化した二重隔壁方式（図-7）を考案した。これにより障害物から近距離で広範囲に削孔注入改良が施工できることから、工程短縮および地盤改良の確実性が大幅に向上する。
- b. 隔壁内作業の安全性確保

シールド前面の形状をスポークタイプではなく面板タイプとすることで、より安全に隔壁内での作業が行えるようにする。
- c. 掘進機前方上部の地山崩落防止

障害物に遭遇し掘進停止が長期間にわたる場合、掘進機前方上部の緩んだ地山が崩壊し、地上部に悪影響を及

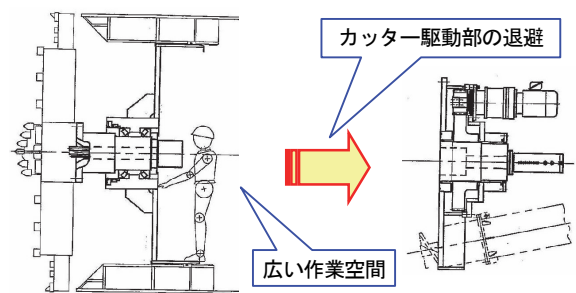
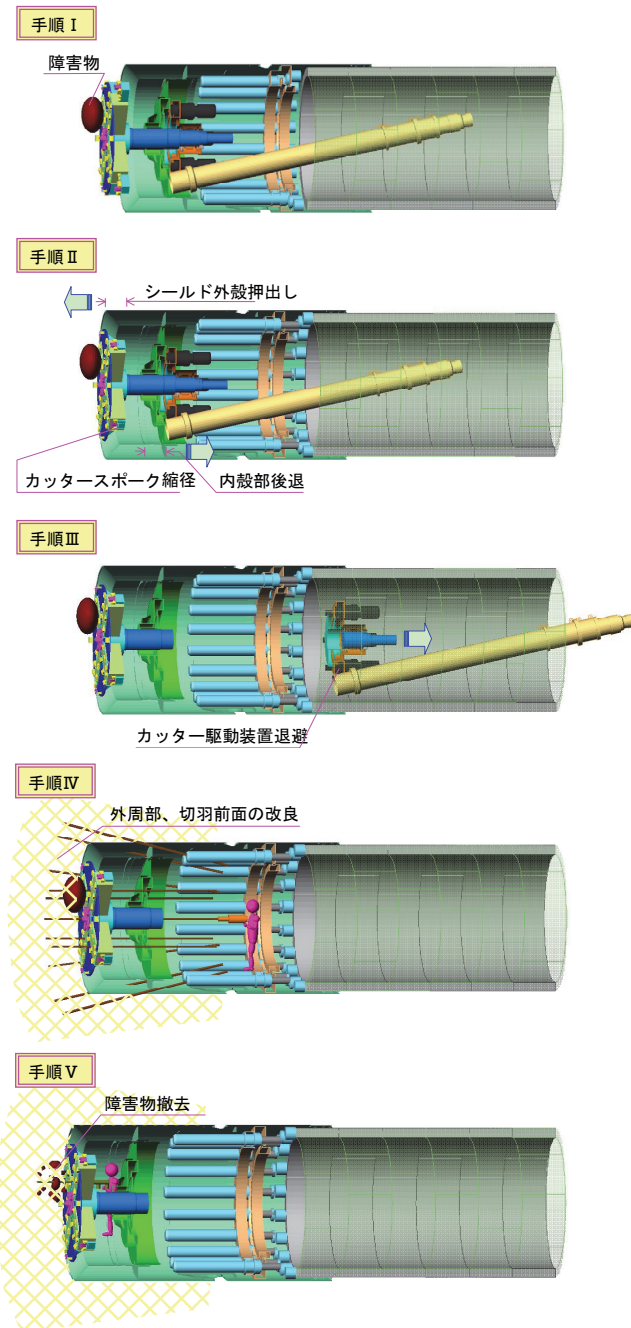


図-7 二重隔壁方式構造



図－8 障害物撤去の施工手順

ばす懸念がある。この対応として「やどかり君」の特長である中殻の後退機能を利用し、障害物に遭遇した時点で掘進機の外殻を押し出し、崩落防止を図る方法を考案した。

4.5 障害物撤去の施工手順

「やどかり君 NEO」による障害物撤去工法を具体的に示すために、障害物に遭遇し掘進が停止してから障害物を撤去するまでの施工手順を図－8に示す。各施工手順を以下に記す。

- 手順Ⅰ 障害物に遭遇し、掘進停止
- 手順Ⅱ カッタースポークの縮径、シールド外殻押し出し、内殻部後退
- 手順Ⅲ カッター駆動部の退避

- 手順Ⅳ 小型削孔機による外周部・切羽前面改良
- 手順Ⅴ 隔壁内の土砂回収、止水等の確認、障害物の撤去

なお、同様の手順で転石以外の障害物（例えば、杭、鋼矢板等）撤去やカッタービット交換が可能である。

4.6 障害物撤去の工程と施工費

既知の障害物撤去を機内注入で施工する場合を想定し、通常の掘進機と「やどかり君 NEO」について工程および施工費を試算、比較した。掘進機外径 3,480mm の泥土圧シールド（図－6、写真－7）を対象とした。

その結果、撤去工程は通常の掘進機では昼夜 40 日を要するのに対し、「やどかり君 NEO」では昼夜 13 日と 1/3 以下に短縮できる見通しを得た。また、施工費も機械損料も含め 1/2 以下に低減できることが判明した。

5. あとがき

「やどかり君」工法は、作業環境改善、工期短縮、再利用による省資源・コスト削減を目的に開発を行ったものであり、施工事例が増加している。地中接合、側面接合などの特殊到達条件下での施工事例も今後ますます増加していくものと思われる。

また、「やどかり君」工法の特徴を活かしたシンプルでかつ実行可能性が高い障害物撤去工法「やどかり君 NEO」工法も考案できた。本工法では、今まで困難であった未知の障害物を何度でも撤去することが可能である。既知の障害物を撤去する場合でも、今までは道路の占有を行って地盤改良しなければならなかった地上工事を回避でき、安全、短期間、低コストで施工できる目処が得られた。

「やどかり君」工法を用いることで、省資源かつ安全性が高いトンネル工事が可能になるものと考えている。今後とも、積極的に現場への適用を目指して行きたい。

【参考文献】

- 1) 伊藤和芳、藪ノ和洋、「超大口径管（内径3500mm）推進工事の計画と施工」、月刊推進技術、Vol. 20、pp. 35-40、2006. 1
- 2) 正源司寛、山内智晴、星 智久、「簡易解体・回収型シールド機の既設構築到達への適用」、(社)日本建設機械化協会、建設施工と建設機械シンポジウム、pp. 147-152、2007. 10
- 3) 廣野和正、高橋淳二郎、「長距離推進における同径側面地中接合推進工事」、(社)日本建設機械化協会、建設施工と建設機械シンポジウム、pp. 153-158、2007. 10
- 4) JTA施工技術委員会都市トンネル小委員会、「シールド工事における地中障害物」に関する実態調査報告書、トンネルと地下、第28巻7号、pp. 583-593、1997. 7