

# パドル式矩形掘進機の開発

## － R & C工法における箱形ルーフの施工技術－

稲葉金正\* 伊達 博\*\*  
田中秀和\*\*\* 庄司和矢\*\*\*\*

### 1. まえがき

R & C工法<sup>1)</sup>は鉄道路線下等にアンダーパスを構築する工法であり、営業中の列車運行や自動車走行に対して支障を与えずに地下構造物を築造することができる。

本工法は、断面が矩形のパイプルーフ（箱形ルーフ）を仮設施工した後、構造物となるボックスカルバートを突合せ、推進ジャッキによりボックスカルバートを前進させながら箱形ルーフと置き換える工法である。

ところで、R & C工法における箱形ルーフ施工では、コスト低減の観点からアンダーパスの取付道路の長さは短くすることが望ましく、より浅い土被りへの対応が求められている。それに伴って、地下浅層部には玉石や地中障害物などが出現する頻度も高く、このことが箱形ルーフの機械化施工を阻害する要因になっている。

障害物への対応を考慮した機械化施工技術として、当社は既にスイング式矩形掘進機<sup>2)</sup>を開発している。この掘進機は地中障害物への対応が可能であり、加泥材を注入しながら一対に設けられた左右のバケットを上下にスウィングさせ掘削を行う。その後の掘削土は塑性流動化してからスクリーコンベヤを介して、バキュームによって坑外へパイプ搬送する。しかし、箱形ルーフ施工の多くは、浅い土被りに集中していることや帯水地盤が少ないこと、掘削残土処理費の低減などの観点から、掘削方法並びに搬出方法はウエット方式よりも加泥材を使用しないドライ方式とすることが求められた。

このような背景から、ドライで掘削し、ドライで残土搬出可能な矩形掘進機として横2軸型のパドル式掘削機（写真－1）（以後、パドル式矩形掘進機と呼ぶ）を開発した。

本技術を現場適用した結果、以下のことが確かめられた。

- ①切羽状況が直接モニターで確認でき、遠隔で掘削操作ができるようになり、施工の安全性が向上した
- ②障害物への対応が可能になった
- ③地盤への適応性が向上した
- ④機械・設備コストの低減に繋がった

本報告では、パドル式矩形掘進機の概要と性能確認実



写真－1 パドル式矩形掘進機

### 2. パドル式矩形掘進機の概要

#### 2.1 箱形ルーフ施工技術

R & C工法における箱形ルーフ施工技術は、切羽の安定性、掘削安全性、施工スパン、施工精度、経済性などを考慮して選定する。

開発したパドル式矩形掘進機は、掘削方式の種別としてはドライ方式に位置付けられ、掘削土の搬出はベルトコンベヤによって行なう。また掘削上支障となる障害物については、機内から撤去できることが特長である。表－1に当社が保有する箱形ルーフの施工機械の分類を示す。

表－1 箱形ルーフの施工機械

掘削方式の種別	掘削機構	掘削土の排出設備
ドライ方式	a) 手堀式推進	トロ台車、ベルコン
	b) 水平オーガ式推進機	スクリーコンベヤ
	c) パドル式矩形掘進機	ベルトコンベヤ
ウエット方式	a) スイング式矩形掘進機	真空排土システム
	b) 泥水式矩形掘進機	泥水環流システム

#### 2.2 パドル式矩形掘進機の開発目的

開発目的は、「障害物対応が可能な機械的掘削技術により、箱形ルーフ施工時の施工安全性の向上を図る」ことである。

開発コンセプトを以下に記す。

- i. 矩形断面の隅角部を掘残さない
- ii. 掘削土はドライな状態で連続的に排土する
- iii. 浅い土被り特有の障害物に対応し易くする

\*機電研究室 \*\*東京支社機械部 \*\*\*東京支社土木設計部 \*\*\*\*技術開発部

iv. 構造の簡略化とメンテナンス性の向上を図る  
 ドライ掘削を基調に本掘進機の開発では、対象土質を粘性土から砂礫土までとした。

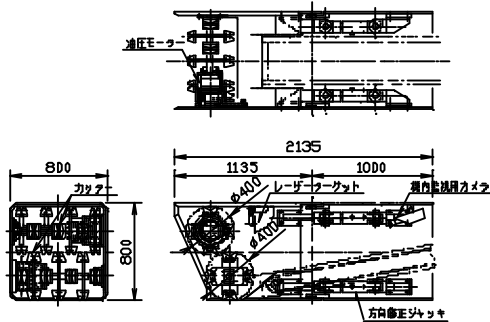


図-1 パドル式矩形掘進機

### 2.3 パドル式矩形掘進機

開発したパドル式矩形掘進機を図-1に示す。本掘進機は掘削装置と方向修正装置から構成され、施工距離が短い場合には方向修正装置を外し、掘削装置だけの使用も可能である。カッターの駆動は2台の油圧モーターを、方向修正には4本の油圧ジャッキを使用している。本機の仕様を表-2に示す。

表-2 パドル式矩形掘進機の仕様

項目	仕様	
矩形掘削機の外形寸法	h800×b800×L2135	
油圧モーター	モーター容量	27/33L/min×1372N/cm <sup>2</sup> ×2台
	駆動トルク	常用 519N・m×2台 最大 784N・m×2台
	駆動回転数	30~100rpm
油圧ユニット	ポンプ容量	55L/min×1372N/cm <sup>2</sup> ×2台(可変容量型)
	電動機	15kw×4P×200/220V×2台
供給電源	AC 50/60Hz 3φ 200/220V	

以下に、パドル式矩形掘進機の特徴を記す。

- i. 回転切削とベルトコンベヤにより掘削土をドライな状態で連続的に排土可能である
- ii. 未掘削部分が少なく、全断面を有効掘削できるため刃口抵抗力が軽減され、方向性が良い
- iii. 切羽の掘削状況をモニター確認しながら掘削が可能になり、安全性が向上する
- iv. カッター軸の取外しが可能になっており、障害物撤去への対応が機内から行える
- v. ビットの形状を代えることで、広範囲な地盤に対応が可能である

## 3. 性能確認実験

### 3.1 実験概要

#### a. 実験装置

矩形掘進機の機械性能の把握を目的に、模擬地盤を使用した性能確認実験を実施した。実験装置は、掘削装置、供試体、ベルトコンベヤ及び元押し装置から構成されている。実験装置を図-2に、元押し装置の仕様を表-3

に示す。

掘削実験は、供試体の全長 1500mm に対して行い、推進ジャッキのストローク不足はストラッド(700mm)を使用して補った。掘進中の計測項目は、カッタートルク、ジャッキ速度(ストローク)、ジャッキ推力である。

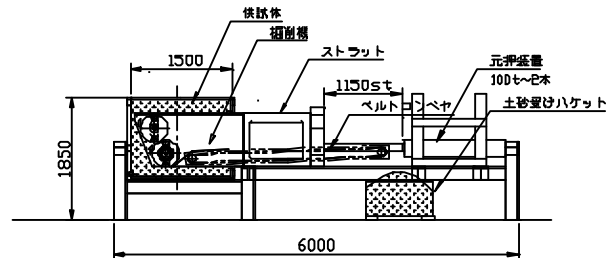


図-2 実験装置

表-3 元押し装置の仕様

ジャッキ	980kN油圧ジャッキ×2 ストローク 1050mm	
油圧ユニット	ポンプ	25.1L/min×2940N/cm <sup>2</sup> ×1台
	電動機	11kw×4P×200/220V×1台(インバータ可変)
供給電源	AC 50/60Hz 3φ 200/220V	

#### b. 供試体とツース形状

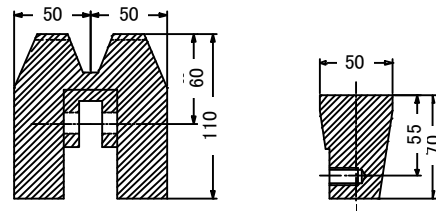
供試体の物性を表-4に示す。供試体には粘性土系と砂礫土系を使用した。粘性土系の供試体(A)と(B)は粉末粘土とセメントをベースに、砂礫土系の供試体(C)と(D)は碎石(40~0mm)をベースに製作した。各供試体に対する実験目的は、実用機製作上のツース形状の適正化と最大カッタートルクの把握である。

図-3に、各土質に適合したツース形状を示す。粘性土用は、ドラム1回転に対して掘残しがないことを、砂礫土用は切削抵抗の低減を考慮して形状決定した。

なお、実験時の材質は磨耗量検知の観点からSS材を使用した。(実機はWC系超硬合金を予定)

表-4 供試体の物性

供試体	対象土質	試料土質の物理的特徴
(A)	粘性土(沖積粘土)	模擬粘土( $q_u=9.8N/cm^2$ )
(B)	粘性土(洪積粘土)	模擬粘土( $q_u=49N/cm^2$ )
(C)	礫混じり粘性土	模擬粘土( $q_u=9.8N/cm^2$ ) + 碎石(40-20mm) 30重量%
(D)	砂礫土	碎石(40-0mm) + 栗石80mm(10重量%)



粘土土用 砂礫土用

図-3 ツース形状

#### c. 実験ケース

性能確認実験で扱った実験ケースの一覧を表-5にま

とめて示す。実験は供試体毎にツース形式、カッター回転数、掘進速度を変えて行なった。

表-5 実験ケース一覧

実験ケース	供試体	ツースの形式	カッター回転数	掘進速度
			(rpm)	(cm/min)
case I-1	(A)	粘性土用	30	6
case I-2			60	6
case I-3			90	6
case II-1	(B)	粘性土用	30	3
case II-2			60	3
case II-3			90	5
case III-1	(C)	砂礫土用	30	6
case III-2			60	6
case III-3			90	10
case IV-1	(D)	砂礫土用	30	2
case IV-2			60	2
case IV-3			90	2~12

### 3.2 性能確認実験の結果と考察

#### a. カッターの回転方向

ドライ掘削におけるカッターの回転方向は、掘進方向に対し上段が下向き削り（downward cutting）で、下段が上向き削り（upward cutting）で実施した。決定理由は、以下の事柄による。（図-4 参照）

- i. 上段カッターを“上向き削り”した場合、羽口フードの上端内壁に礫石などの固形物が噛み込み易くなり、カッター駆動停止することが多い
- ii. 下段カッターを“下向き削り”した場合、羽口フードの底面に掘削土が圧密されることから掘り残し状態が生じ、推進と共に先導管が乗り上げ、上方に浮き上がる
- iii. 下段カッターを“下向き削り”するとベルトコンベヤへの掘削土の取込みが悪い
- iv. 上段カッターを“下向き削り”で、下段カッターを“上向き削り”で同期させることで周速度の相乗効果が得られ、ベルトコンベヤへの掘削土の乗込みが向上する

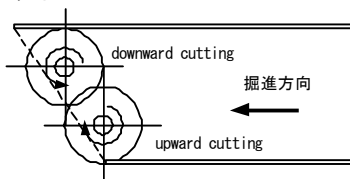


図-4 回転方向

#### e. カッター回転数

カッター回転数は、一般に切削速度（被削材と工具間で決定される経験定数）から算定され、工具寿命と密接な関係がある。しかし、本掘削機における工具寿命の問題は、1スパン当たりの推進距離が短いことからツース交換で対応することとし、以下の点に重きを置いてカッター回転数を決定した。

- i. 推進速度を速くする
- ii. 1回転当りのツースの仕事量を軽減する

- iii. 掘削土のベルトコンベヤへの乗込み性の向上
- iv. 回転慣性を大きくし、地山粉碎効果を期待する

#### c. カッタートルク

カッタートルクは、切削モデルからある程度推定できる。設計上は、被削材の切削メカニズム（破壊性状）を引張り型破壊であるかせん断型（裂断型）破壊であるかに分けて検討し、いずれか必要トルクの大きい方の値に裕度を乗じてトルクを決定する。

#### d. カッタートルクの比較

粘性土系の供試体である(A)と(B)は引張り型破壊として、砂礫土系の供試体である(C)と(D)はせん断型破壊の代表と見なされる。

図-5にはCASE I-3の粘性土系のカッタートルクを、図-6にはCASE IV-3の砂礫土系のカッタートルクを示す。両図は共にカッター回転数は90rpmで、推進速度は6 cm/minの結果である。図-5と図-6の比較から、平均的なカッタートルクの大きさは、推進速度が同じであれば粘性土系の方が若干大きく現れる。粘性土系のカッタートルクの最大値は、約600Nmであった。

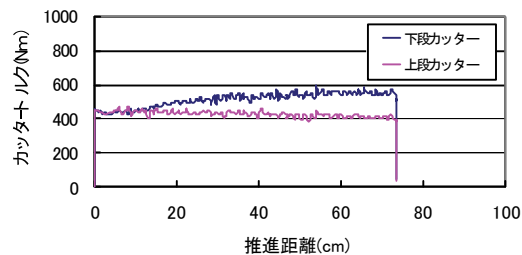


図-5 粘性土系のカッタートルク

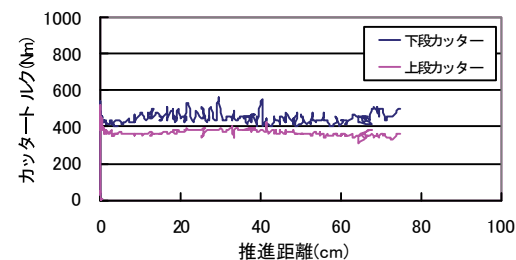


図-6 砂礫土系のカッタートルク

一方、砂礫土系は粘性土系に比べ切削性が良く、カッタートルクの平均値は粘性土系より低く現れる。しかしトルク変動が激しく、瞬時的なピークトルクは粘性土系を上回ることがある。

粘性土系および砂礫土系のカッタートルクの増加要因は、粘性土系がせん断抵抗力（粘着力）の大きさで、砂礫土系は栗石の存在および部分的な地山崩壊に伴う切込み量の増加が考えられる。

なお、本掘削機の無負荷時のカッタートルクは、油圧配管の抵抗が大きく、420Nm（最大トルク 784Nm）で

あった。

また、上段カッターと下段カッターのトルク比較では、供試体に関係無く3割ほど下段カッターの方が大きな値を示す。理由は、上段カッターに対して下段カッターは、重力に逆らって掘削回転していることが考えられる。

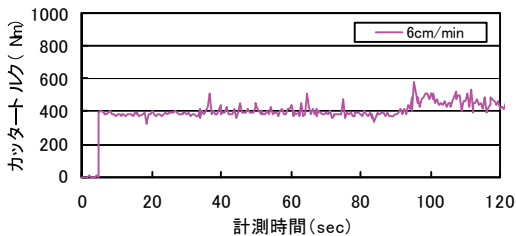
b. 推進速度とカッタートルク

図-7に、推進速度が異なる場合のカッタートルクの比較結果を示す。(a)は推進速度6cm/minで、(b)は10cm/minの場合を表している。共に下段のカッタートルクを表しており、回転数は90rpmである。供試体は(d)を使用した。

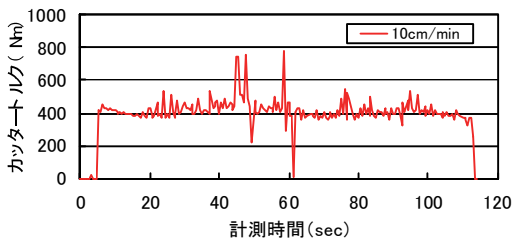
図より、推進速度6cm/minのカッタートルクは、400Nm前後で比較的安定して推移していることが分かる。一方、推進速度10cm/minの平均的なカッタートルクは推進速度6cm/minの場合と変わらないが、不規則なトルク変動を伴うことが分かる。時々、油圧モータの最大駆動トルク(784Nm)を超える場面も認められる。

推進速度に伴うカッタートルクの増加理由として二つのことが考えられ、一つは推進速度に伴う切込み量の増加が、もう一つは地山崩壊に伴う突発的な切込み量の増加が考えられた。自立性の悪い地盤では、推進速度の増加と共に後者の頻度が多くなる傾向にある。

また、切羽が大きく崩壊する場面ではカッター停止するが、カッター停止後の回復は、推進を停止しカッターの正転逆転で比較的に対応できた。



(a) 6cm/min



(b) 10cm/min

図-7 模擬砂礫土掘削時のカッタートルク

なお、実掘削では表層に粘性土が介在していることが多く、切羽の自立が確保されていると考えられるので、推進速度10cm/minでも、実用上支障無く安定して掘進できるものと思われる。

c. 推進速度と最大カッタートルク

図-8に、砂礫土系の推進速度とカッタートルクの最大値をプロットした結果を表す。カッタートルクの最大値は、下段に現れており、その大きさは500Nm~700Nmで、掘進速度に依存する。また、上段と下段のカッタートルクの割合は前項と同様に、下段が3割ほど高く現れる。一般に路線下を推進する際の掘進速度は3~10cm/min程度であり、10cm/minとした場合のカッタートルクは700Nm以上必要である。

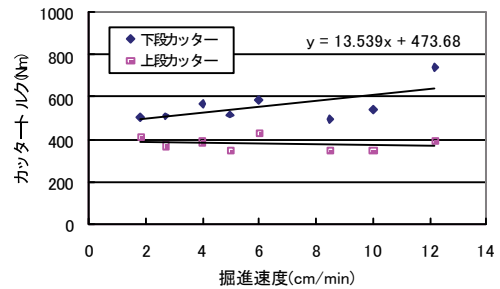


図-8 推進速度とカッタートルクの最大値

d. 推進距離と推進力

図-9に推進距離と推進力の関係を示す。推進長が最大1500mmと限られた中での実験であるが、図より推進距離の増加に伴って推進力が徐々に増加する傾向が確かめられる。この実験の刃口貫入時の初期抵抗力は粘性土系が約20kNで、砂礫土系が約40kNであった。その後の貫入抵抗力は、単位長さ当りについて粘性土系が20kN/mで、砂礫土系が80kN/mで増加する。

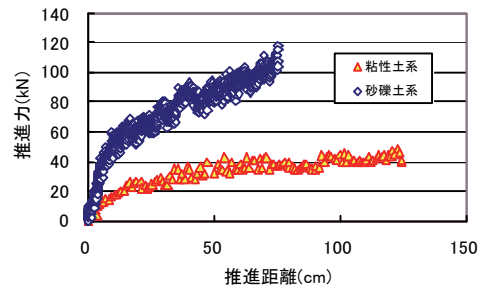


図-9 推進距離と推進力

4. 現場実証実験

4.1 適用現場の概要

表-6 工事概要

において夫地上を行なつた。相形ループ地上においては、従来型のオーガ式と開発したパドル式矩形掘進機の両方を使用した。ただし、基準管の施工は、人力掘削で行なった。R&C工法を適用した工事所の工事概要を表-6に、箱形ループ施工の縦断面を図-10に、同施工状況を(写真-2)に、同施工設備(横断面)を図-11に表す。

工事名称	狭山市～新狭山間 7k670m 付近、地下道 新設工事（土木その1）		
	工種	掘削方式	施工数量
工事内容	水平部	人力施工	1列
		パドル式	10列
		オーガ式	19列
	鉛直部	パドル式	14列
施工延長	1列当り	4@3.0m=12.0m	

#### 4.2 実証実験の結果と考察

##### a. 施工サイクル

水平部 10 列をパドル式矩形掘進機により施工した。施工サイクルを表-7 に示す。箱形ルーフ施工は、終電から始電までの制約時間内に、一日 1 本のペースで実施した。

推進速度は、計画時 6cm/min であったが、ベルトコンベヤ等の敷設準備に時間が掛かり、施工時間が更に制約され約 3.5 時間に短縮された。推進速度は平均で 7.6cm/min、最大で 12cm/min であった。

##### b. 推進距離と推進力及び推進速度

箱形ルーフ施工時の推進距離に対する推進力と推進速度の関係を図-12 に示す。図は、パドル式矩形掘進機で施工した管列 No. 4 を施工した結果である。土質は、

力は推進距離に伴って増加する。最大推進力は最大推進長の 9.0m 時に現れ、この場合約 680kN であった。

更に、最大推力値から刃口貫入時の初期抵抗値を差引き、推進中の単位長さ当りの貫入抵抗力として表すと 60kN/m であることが確かめられた。この値を性能確認実験で得られた貫入抵抗力の大きさと比較した結果、砂礫土系の特性に酷似していることが分かる。

なお、推進力は、土被りや上載荷重の大きさ、推進距離の長さ、土質性状によって変化する。

##### c. 振動測定

箱形ルーフ施工中の振動測定を行った。測定点毎の振動レベルの最大値を、従来のオーガ式とパドル式とを比較し表-9 にまとめて表す。

振動値は、パドル式がオーガ式に比べ、全般的に 30dB ほど低く収まっていることが分かる。この理由として、パドル式は切羽前面に対して掘残しが少なく推進抵抗が小さいこと、掘削方式が回転型の連続掘削であり、振動発生源となる無駄な動作が少ないことが挙げられる。一方、オーガ式はオーガがケーシングと擦れ合う時の振動やオーガの正逆回転時の回転ガタが振動発生源に

表-7 施工サイクル

作業内容	20時	21時	22時	23時	24時	1時	2時	3時	4時	5時	6時
1. 段目の施工											
2. 推進設備段取り											
3. 箱形ルーフ接続											
4. 鏡切断（発進坑口）											
5. 推進工											
6. 到達・空押し											
7. 鏡切断（到達坑口）											
8. 掘削機の回収											
9. ルーフ内設備の撤去											
10. 元押装置・架台撤去											
11. 測量											
12. 元押											
13. 片付											
14. その他											



写真-2 箱形ルーフ施工状況

ローム層で表層部に若干碎石混入が認められた。

なっている。

図より、平均推進速度 11cm/min（カッタートルクは 750Nm）で順調に掘進していることが分かる。また、推

表-9 振動測定結果

施工状態	計測点	単位:dB	
		ドライカ式 (roof No.3)	オーガ式 (roof No.29)
鏡切面	ルーフ直上	71	99
	上線	52	86
刃口先端上線到達	下線	40	60

図-10 R&C工法（箱形ルーフ施工）要綱面

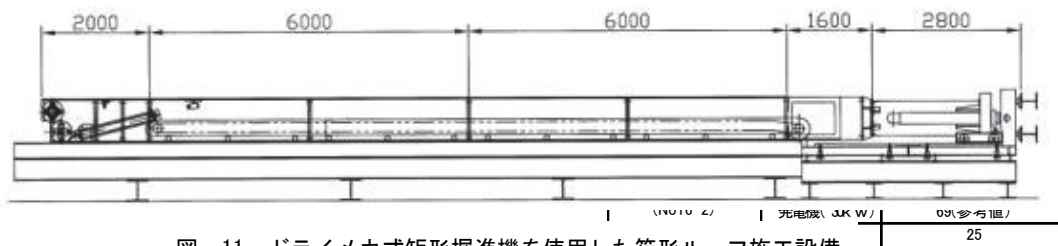


図-11 ドライメカ式矩形掘進機を使用した箱形ルーフ施工設備



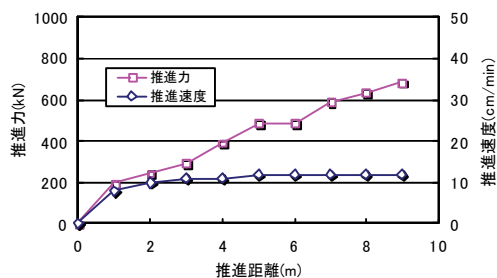


図-12 No. 4 スパン時の施工データ

## 5. まとめ

ドライで掘削し、ドライで土砂搬送が可能なパドル式矩形掘進機を開発した。性能確認実験を行ない、現場実証実験を行なった結果、以下のことが確かめられた。

### 5.1 パドル式掘削機の性能確認実験

- i. 上下2軸の回転方向は、上段が下向き削り、下段が上向き削りが好ましく、切削土のベルトコンベヤへの乗込みも良い
- ii. ドラムの回転数は、油圧モータの許容するトルク範囲内で増加させる方が良い(90rpm以上)
- iii. カッタートルクは施工スピードと障害物粉碎効果を期待し、800Nm以上とすることが好ましい
- iv. カッタードラムに取り付けられたツールは、粘性土と砂礫土の使い分けが必要である

### 5.2 パドル式掘進機の現場実証実験

- i. 切羽状況が直接モニター確認できるようになり、遠隔で掘削操作できるようになった
  - ii. 従来方式に比べ地盤への適応性が向上し、良好な掘進性能が得られた
  - iii. オーガ方式に比べ、施工中の振動が低減された
- なお、実証実験はプロトタイプのパドル式矩形掘進機を中心に構成した仮設備であったため、後続のベルトコンベヤや仮管設備などの設営には施工毎に苦慮した。今後、これら後続設備の改善が必要であり、使い勝手の良い専用の施工システムに改める必要がある。

## 6. あとがき

R&C工法では、箱形ルーフの施工精度がその後の函体推進の施工品質に直接影響する。施工精度に向けた一連の開発では、オーガ式を始め、泥水式<sup>3)</sup>、スイング式を開発した。

アンダーパスの施工においては、R&C工法は土被りが浅く、取付け道路のアプローチ量が短くなるのが工法上のセールスポイントになっている。しかし、表層部には不均質な埋土等が多く、箱形ルーフ施工では度々このことが障害になっていた。開発したパドル式矩形掘進機は、上下横2軸のドラムを油圧モータで回転掘削する方式を採用しており、ドライで掘削しドライで掘削土が搬送できること、掘削途中で障害物の出現があれば機内から障害物が撤去できることが大きな特長となっている。

今回の現場実証実験では、1日1スパンの掘削能力として最大掘進速度12cm/minを達成し、パドル式矩形掘進機の優れた性能を明らかにした。しかし、施工サイクルの短縮で問題になっていたベルトコンベヤ設備への盛り替え時の不具合については、今後、専用設備を検討し、より良いシステムに改めて行く所存である。

開発機の現場適用では、西武鉄道(株)殿、西武建設(株)殿のご理解の下で実施した。また、本掘削機の開発に際しては、奥村機械製作(株)の設計スタッフの方々にご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

### 【参考文献】

- 1) アール・アンド・シー工法協会「アール・アンド・シー工法」工法カタログ 2000.8
- 2) 司、和田、「矩形掘進機による推進工法の解説」月間推進技術 Vol.14 No.9、2000
- 3) 染谷、小座間、熊沢、「矩形シールド機械を使用したR&C工法の施工」第43回施工体験発表会-最近注目される都市トンネル技術-、(社)日本トンネル技術協会、p91~100、1998.11