

# ドーナツTBM工法(DTBM工法)

—月進500mを目指す改良型TBM—

(概要版)

ドーナツTBM工法施工検討会

(一財)先端建設技術センター

## 1. はじめに

我国の山岳トンネル施工法は、1980年代頃から一般工法として普及してきたNATM工法が現在では標準になっている。一方、TBM工法はそれより古く1960年代末頃から高速施工技術として導入されてきた。その内訳は、表-1に示すように大部分が小断面口径で施工されている。φ7mを越すTBM施工は、4箇所だけで道路では高速道路に適用した飛驒トンネルの1箇所である。

このように、我国ではTBMでの施工は小口径に片寄っていて、大口径には本格的な取り組みが行われていない。その理由として、以下の二点が挙げられる。

- ・日本の地質は不良地質が交互に出現するなど変化が複雑のため、たびたび掘進がストップして本来の高速施工の利点が生かされない。
- ・TBMを1現場で償却することが多く、その場合には工事費が高くなり、標準のNATM工法より割高になる。

表-1 TBM国内施工実績

TBM国内施工実績集計(1964~2010年)		
TBM:径別	施工箇所数	適用
2.0~4.9m	128	φ7m以上 発電所導水路 3箇所 高速道路 1箇所(飛驒T)
5.0~6.9m	28	
7.0m~	4	
計	160	

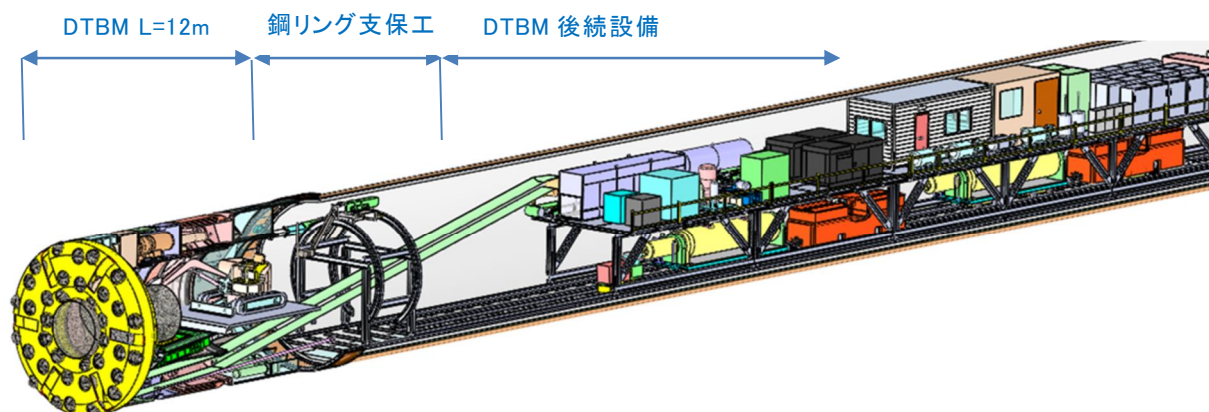


図-1 DTBM工法の概要図

従来からのTBMの課題に対して、中央部に開口を設けて複雑な地山変化に対応できるように改良した「ドーナツTBM工法(DTBM工法)」(図-1)について、(一財)先端建設技術センターの中に施工検討会が設けられ、さらに高速施工を目指したトンネル施工システムの構築が研究された。以下に、DTBM工法施工検討会で得た施工システムの概要について、φ6mの小断面モデルを例に紹介する。

## 2. DTBM工法の概要

### 2-1 DTBM工法の検討方針

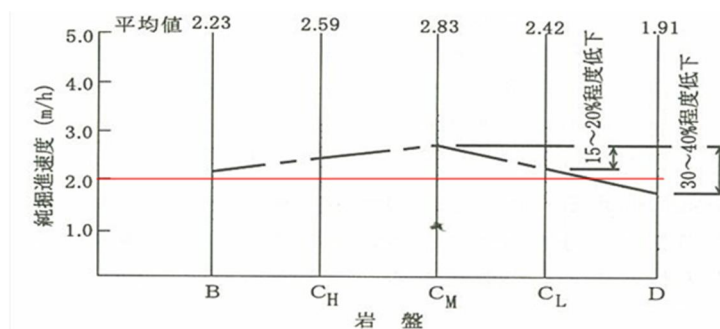
山岳トンネルの高速施工の目標として、具体的な月進速度を経済性などから平均で500mとした。これを実現するためには、最高月進では800m程度を確保できる施工法が必要である。そのために、次の二つの基本方針で検討を行った。

- ① 良好地山では、1000m/月以上も可能な施工法であること。
- ② 不良地山に遭遇しても、掘進がストップしない施工法であること。

### 2-2 検討結果

#### (1) 良好地山の場合

地山が自立している標準地山の場合、DTBMの掘進速度は地質により若干異なるが2m/h程度となる(図-2)。



出典:TBMハンドブック、日本トンネル技術協会、2000.2

図-2 実績純掘進速度と岩盤等級の関係

1000m/月以上確保するには、マシンの掘進速度を妨げない一次支保工との組み合わせが必要であり、適切な組み合わせを比較検討した結果(表-2)、品質確保と高速性を求めるには、鋼リング支保工方式が有利であるとの結論を得た。

表-2 DTBM工法の一次支保工方式の比較

項目	鋼リング支保工方式	RCライナー方式	NATM方式	ECL方式
概要 (施工順序)	①1次繊維吹付けコンクリート(全周360°) ②H形鋼製支保工(全周360°) ③2次繊維吹付けコンクリート(全周360°)	①インバートライナー布設 ②RCライナー布設・拡大 ③天頂キーライナー布設 ④裏込め注入	①1次吹付けコンクリート ②インバートライナー布設 ③H形鋼製支保工 ④溶接金網設置 ④2次吹付けコンクリート ⑤ロックボルト打込み	①内型枠を最後尾から移動・設置(全周360°) ②シールドジャッキを内型枠に当てる ③掘進に合わせ連続コンクリート打設(全周360°)
施工性	通常地山	◎	○	○
	不良地山	○	◎	△
経済性	◎	×	○	△
評価	◎	△	○	△

## (2) 不良地山の場合

平均月進速度500mを確保するためには、低強度地山に遭遇しても掘進をストップさせないことが必要である。そのためには、本技術の特徴である中央部の開口を利用し、地質ごとに適切な事前対策をとることとした。開口部があることにより、次のような利点が得られる。

- ・従来のTBM工法に比べて、切羽を常に直接目視観察できるため、適切で遅滞のない対策を切羽開口部から講じることができる。
- ・核を残してリングカット状に分割掘削することで、マシン本体が先受け的な役割を果たす優位性があり、地山を傷めないTBM掘削と相まって補助工法を減ずることができる。
- ・開口部の分だけ地山との設置面積が小さくなり、推力に余裕が生じ、地山拘束に対するリスクが低減できる。

## 2-3 トンネル掘削方法の検討

### 2-3-1 DTBM仕様

φ6mのDTBM用のマシン概要(図-3)、マシン機械仕様(表-3)を示す。

マシン外径 φ6,000mm    マシン内径 φ3,860mm    マシン長さ L12,000mm

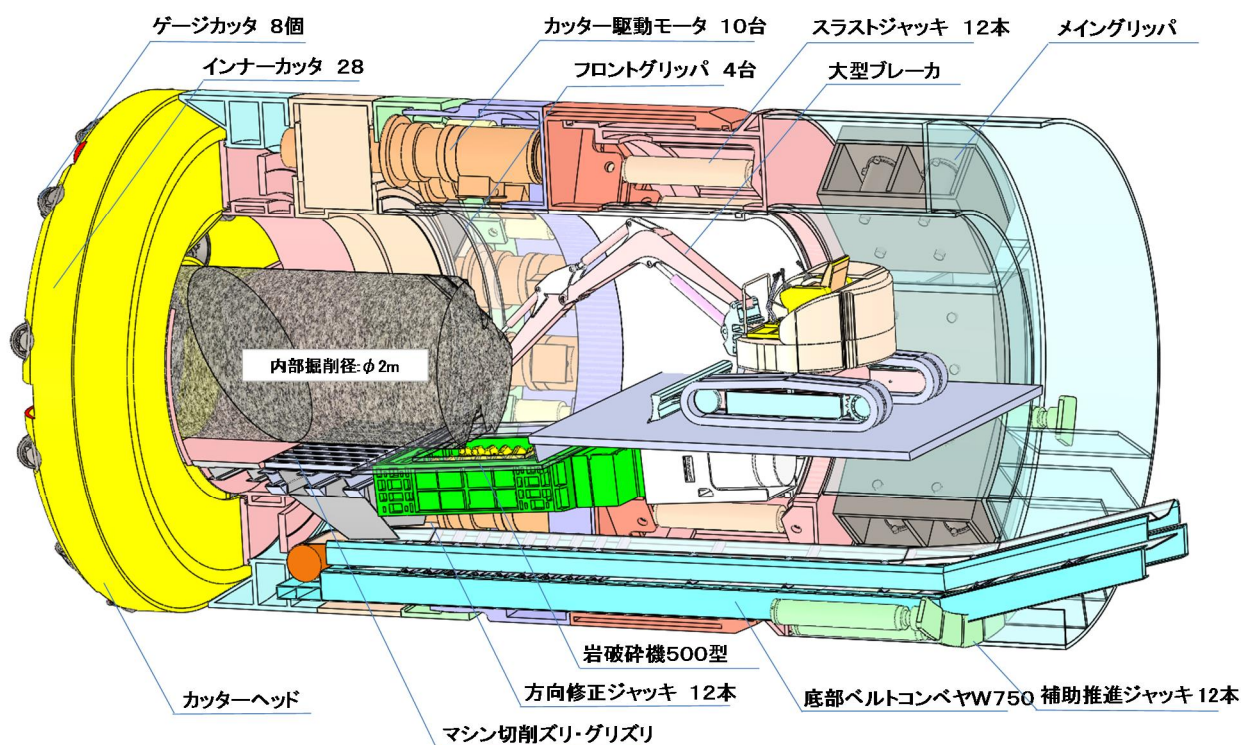


図-3 φ6mDTBMマシン概要

### 2-3-2 トンネル掘削

#### (1) トンネル掘削フロー

DTBM工法の掘削は、ディスクカッタによる外周部掘削(φ6m)が先行し、開口部の切羽押さえの役目をする中央部(φ2m)の掘削は、岩破砕機と補助的な大型ブレーカにより掘削する。外周部のマシン切削ズリと中央部の岩破砕機によるズリはそれぞれセパレータされて、底部のベルトコンベヤで一緒になり、伸縮ベルトコンベヤから坑内ベルトコンベヤを経由して坑外に搬出される(図-4)。

表-3 機械仕様

部 位	仕 様	
DTBM 本体	本体外径	φ6.00m
	本体内径	φ2.10m
カッタヘッド	カッタヘッド外径	φ6.10m
	カッタヘッド内径	φ2.00m
	回転方向	1方向(機内側から見て右回転)
ディスクカッタ	カッタ径	17インチ(φ432)
	取付構造	スライドウェッジロック
	装備ピッチ	80mm以下
	インナーカッタ	28個
	ゲージカッタ	8個
カッタ仕様	カッタトルク	2,939(常用)/4,408(150%)KN-m、定トルク
	カッター回転速度	1.0~6.5min <sup>-1</sup>
	カッターモータ	200kW×10台
	カッタートルク	24.8kN-m定トルク
スラストジャッキ	総推力	22,200kN
	シリンダ本数	1,850kN×1,150st×34.3Mpa×12本
方向修正ジャッキ	総推力	18,000kN
	シリンダ本数	1,500kN×200st×34.3Mpa×12本
補助推進ジャッキ	総推力	9,000kN
	シリンダ本数	1,850kN×1,150st×34.3Mpa×12本
ローリング修正ジャッキ	総推力	2,400kN
	シリンダ本数	1,200kN×200st×34.3Mpa×2本
メイングリッパ	総推力	48,000kN
	装備数	2,000kN×250st×34.3Mpa×4本×6力所
フロントグリッパ	総推力	10,000kN
	装備数	2,500kN×150st×34.3Mpa×4力所

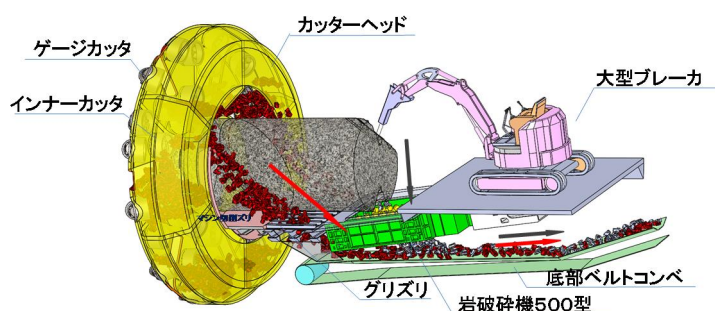


図-4 掘削イメージ図

## (2) 外周部掘削

マシンによる切削は、17インチディスクカッタを8cm間隔に配置し、回転力とスラストジャッキの推進力とで剥ぎ取るように掘削する。切削ズリは仕切られたカッタヘッド内部に溜めこまれ、頂部120°範囲の排出口から動力を使わずに自然排出される(図-5)。



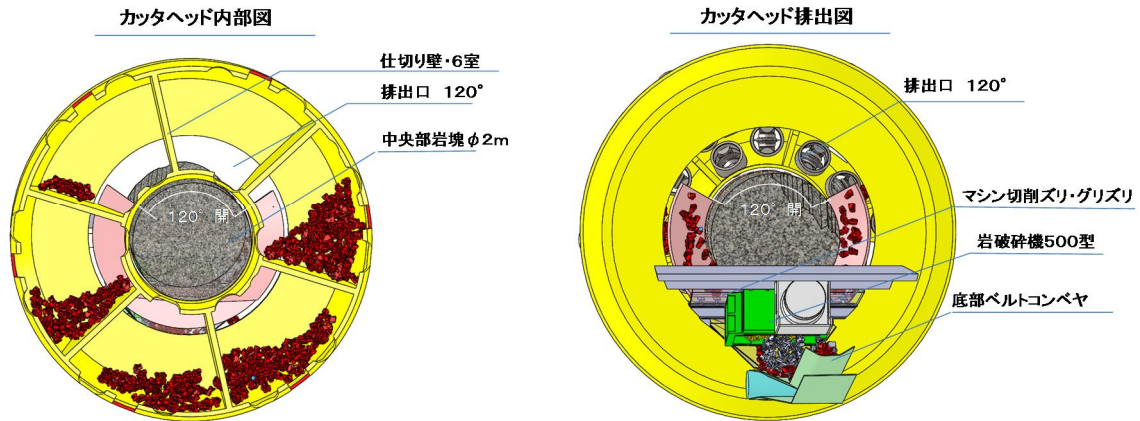


図-5 切削・ズリ出しのしくみ

### (3) 中央部岩塊

中央部の掘削断面については、次のような考え方で、地質性状に合わせた開口率を設定している。

- ・開口部を汎用機械類が通過できること。
- ・中央部の掘削がクリティカル作業にならないこと。
- ・地山が固い場合は開口率を大きめに、逆は小さめにすること。

その結果、φ 6 m断面の場合、シャフローダ(KL-7)が通過できるφ 2 mとした。φ 1 1 m断面の場合は、KL-41に合わせてφ 4.5 mとしている。

掘削は、核残しの役目を果たしながら突き出してきた岩塊を二軸方式の岩破砕機によって200 mm以下に破砕する(図-6)。その時、大型ブレーカは掘削を補助する役目をする。

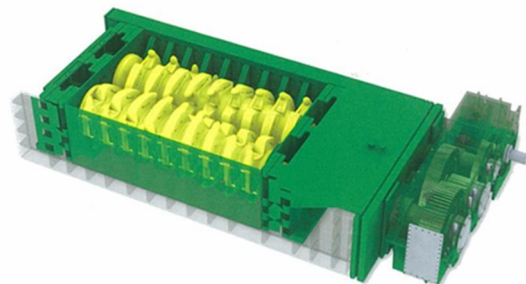


図-6 二軸式岩破砕機(モータ除く)

### (4) ズリ出しベルトコンベヤ

坑外までのベルトコンベヤの配置は、図-7に示すとおりであり、自動制御運転される。

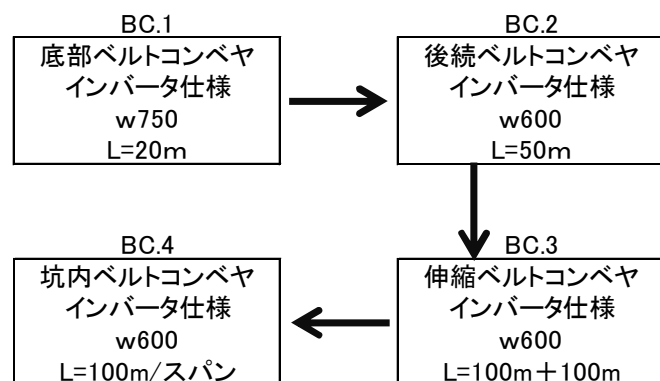


図-7 ベルトコンベヤのフロー

## 2-3-3 一次支保工(鋼リング支保工方式)

### (1) 鋼リング支保工方式

鋼リング支保工方式は、繊維補強吹付けコンクリートと鋼製支保工で構成される。繊維補強吹付けコンクリートは、28日強度で $36\text{ N/mm}^2$ (3時間強度で $2\text{ N/mm}^2$ )とし、吹付け厚の薄肉化を図り、施工時間を極力短くする。ビニロン繊維の混入は、抜け落ちやひび割れ抵抗性およびじん性の向上の補強効果とともに、金網設置の省略も考えたものである。図-8に標準断面を示す。

標準地山に対する支保工パターンは、BとC Iパターンは、鋼製支保工を使用せず、繊維補強吹付けコンクリートだけとしている(表-4)。過大な内空変位が生じる場合は、間隔を狭くするか、高規格材の鋼製支保工にするか、あるいはロックボルトを打設する。

表-4 鋼リング支保工方式標準パターン(軟岩用)

標準支保パターン区分	1掘進長(m)	1次繊維吹付けコンクリート 上下半部360°			鋼製支保工 上下半部360°		2次繊維吹付けコンクリート 上下半部360°		
		吹付け厚(mm)	強度 $\sigma_{28日}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	繊維吹付け コンクリート ( $\text{m}^3$ )	H鋼形状	建込ピッチ (m)	吹付け厚 (mm)	強度 $\sigma_{28日}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	繊維吹付け コンクリート ( $\text{m}^3$ )
B	2.00	50	36	5.0	-	-	-	-	-
C I	1.50	100	36	5.6	-	-	-	-	-
C II	1.20	50	36	3.0	H125	1.20	125	36	3.7
D I	1.00	50	36	2.5	H125	1.00	125	36	3.1
D II	0.75	50	36	1.9	H125	0.75	125	36	2.3

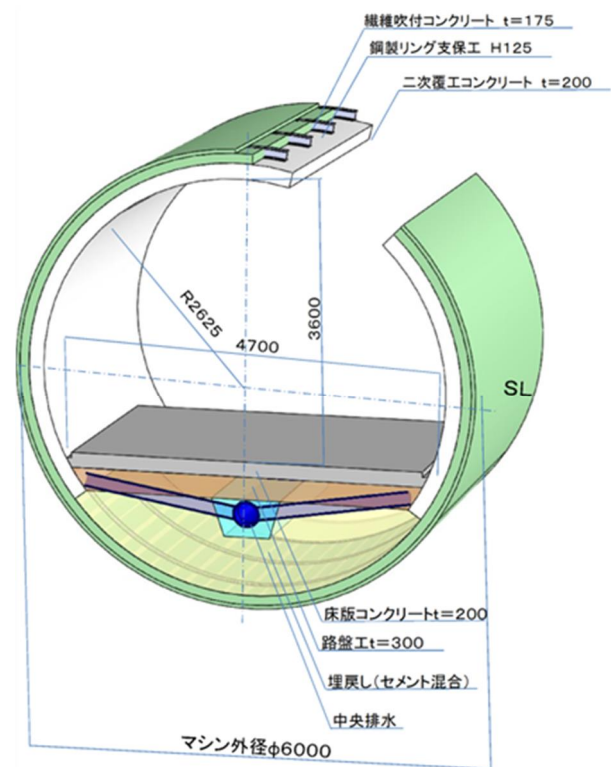


図-8 鋼リング支保工方式標準断面図(軟岩用)

### (2) 一次支保工の安定性評価

表-5に示すとおり、一次支保工に作用する応力を2次元FEM解析にて確認した。解析は土被り100m、側圧係数1.0の条件で、掘削解放率を素掘時40%、支保設置後60%とした。結果として、鋼製支保工は短期許容応力を超過するものの、吹付けコンクリ

ート応力は許容応力に対して十分余裕のある状態であり、トンネル支保構造としては安定している。なお、H125支保工は施工時の変位観測により、支保工間隔を狭めるか、HH123高規格材に変えるなどを判断することも可能である。また、TBMで施工した他事例と支保内圧を比較すると、高強度コンクリートを使用していることもあり、十分な支保内圧を有しており、高耐力な支保パターンである。

表-5 鋼リング支保工に作用する応力結果

DTBM鋼リング支保工の解析結果					
開放率	支保パターン	掘削 頂部沈下量 (mm)	吹付け コンクリート $\sigma <$ $-13.5\text{N/mm}^2$	H125支保工 $\sigma <$ $\pm 210\text{N/mm}^2$	支保内圧 ( $\text{N/mm}^2$ )
40% / 60%	B	2.1	-2.27	--	0.595
	C I	4.9	-5.12	--	1.18
	C II	7.6	-6.63	-221.3	2.243
	D I	12.7	-8.92	-297.5	2.284
	D II	30.3	-10.8	-360.8	2.365

### (3) 資材運搬設備

月進速度が大きいため必要とする資材も多く、生コン運搬をとっても大量になる。タイヤ式かレール式かは、生コン車の台数や離合場所などの問題から、設備は無人運転などでもできることも考慮してレール方式とした(図-10)。

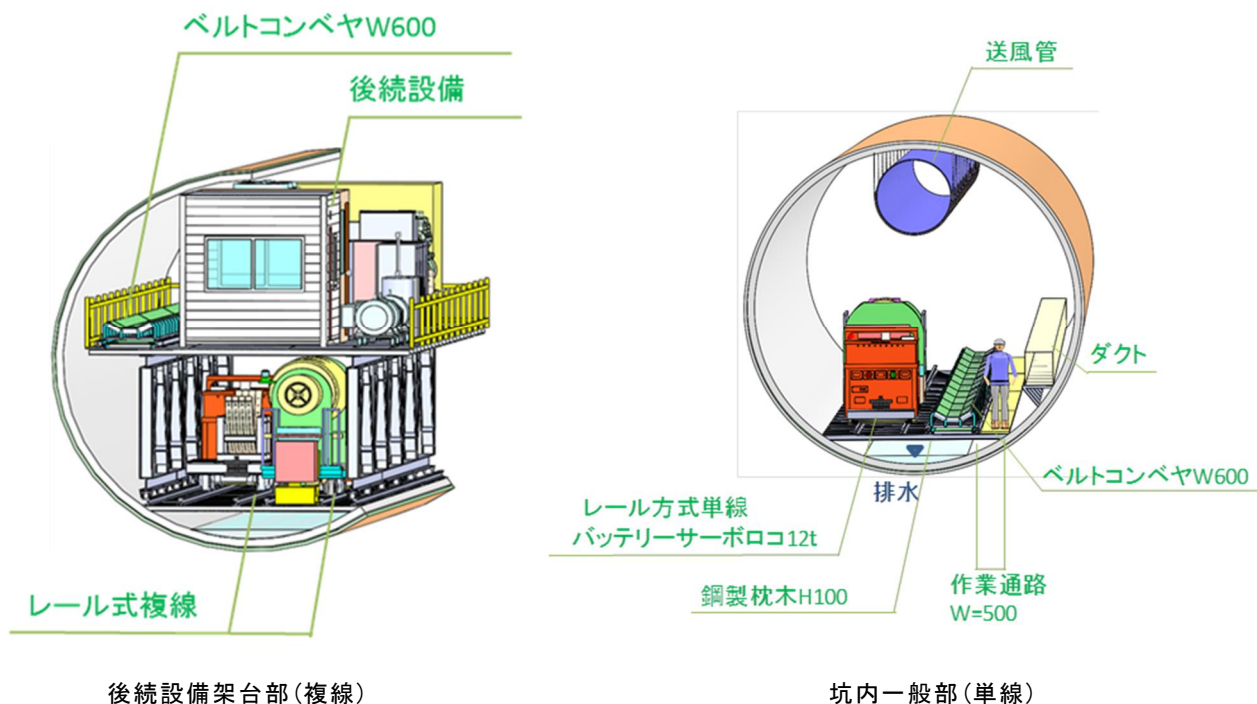


図-10 レール方式図

## 3. 検討結果

施工システムの検討結果を受けて、標準地山でトンネル延長5000mを想定した $\phi 6$ m DTBM工法の①月進速度、②掘削工期、③編制人員数、④コストについて確認をした。

### 3-1 月進速度

DTBM工法の掘削・支保工サイクルタイムは、表-6に示すとおりになる。B、C Iタイプは、DTBMの掘削の作業時間がクリティカルになり、C II、D I、D IIは、一次支保工の作業で繊維補強吹付けコンクリートまでの作業時間がクリティカルになる。

なお、稼働時間は損失時間を割り出し、日当たりを12時間、月当たり稼働日数を22日で算出した。結果は表-6に示すとおり、標準地山のB、C Iタイプでは528m/月で500mを超えるが、C II、D I、D IIでは目標に達してないものとなった。

表-6 掘削・支保工施工サイクルタイム

標準支保パターン	掘削支払断面積 (m <sup>2</sup> /m)	1サイクル掘進長 (m)	DTBM掘削時間 (分)	1次繊維吹付けコンクリート (分/厚さcm)	H125鋼製支保工 (分)	2次繊維吹付けコンクリート (分/厚さcm)	1サイクルクリティカル作業時間 (分)	日当たり標準掘進長 (12h/日) (m/日)	月当たり標準掘進長 (22日/月) (m/月)
B	φ6.000m 29.2m <sup>2</sup> /m	2.00	60	25分/5cm	--	--	60	24.0	528
C I		1.50	45	28分/10cm	--	--	45	24.0	528
C II		1.20	36	15分/5cm	20	18分/12.5cm	53	16.3	359
D I		1.00	30	13分/5cm	20	15分/12.5cm	48	15.0	330
D II		0.75	22	9分/5cm	20	11分/12.5cm	40	13.5	297

### 3-2 掘削工期

表-7にトンネル延長5000mの標準地山を想定した場合の概略工程表を示す。DTBMでは15月、NATMでは52月となる。DTBMでも月進330m程度となり、目標の500m程度に達することができていない。欧州では、1日を3交替制にしている。今後、さらに機械化を進めることで、例えば3日間72時間の連続作業と1日の整備というサイクルを目指すなど、作業体制まで変えて行く研究も必要となる。

表-7 標準地山5000m概略工程表

工法	地山等級	D III	D II	D I	C II	C I	C II	D I	D II	D III	計
		100	250	500	1,150	1,000	1,150	500	250	100	
DTBM	区間長 (m)	初期掘進長100m	250	500	1,150	1,000	1,150	500	250	終期掘進長100m	5,000m
	日当たり掘進量 (m/日)	5.0	13.5	15.0	16.3	24.0	16.3	15.0	13.5	5.0	
	月当たり掘進量 (m/月)	110	297	330	359	528	359	330	297	110	
NATM	掘削月数 (月)	1.0	0.8	1.5	3.2	1.9	3.2	1.5	0.8	1.0	15月
	月当たり掘進量 (m/月)	50	66	88	106	132	106	88	66	50	
	掘削月数 (月)	2.0	3.8	5.7	10.8	7.6	10.8	5.7	3.8	2.0	52月

### 3-3 編制人員

月進500m編成での掘削・支保工の作業人員は、図-11に示すとおりNATM編成より多く片番14人の両番で28人編成になる。標準地山での同条件において、工事期間中の作業員をNATM工法と比較すると、50%程度の低減になる。さらにDTBM工法は、坑夫などのトンネル熟練工の低減ができる。



< 5000m に対する作業員数 >

DTBM: 14 人/方 × 2 方 × 22 日 × 15 月 = 9,240 人

NATM: 8 人/方 × 2 方 × 22 日 × 52 月 = 18,300 人

全般	世話役		
	トンネル世話役		2人
	計		2人/方
DTBM 掘削	中央運転・制御室		
	DTBM 運転管理		1人
	データ制御管理		1人
	大型ブレーカ運転		1人
	機械運転保守		1人
計		3人/方	
一次 支保工	一次支保工		
	H支保工	エレクタ	2人/方
	繊維吹付	吹付設備 1セット	
	切羽雑作業		2人/方
坑外 作業	坑外積込・雑作業		2人/方
	吹付けプラント		2人/方
	整備鍛冶工		1人
昼夜 14 × 2方 = 28			28人/日

図-11 編成配置人数

### 3-4 コスト

DTBM 施工の場合、マシン価格を含めた機械費はコストに大きな割合を占めている。コスト削減を図るには、機械の転用回数・掘進距離を延ばし、1 現場当たりの機械費負担を低くする必要がある。積算上は、3 現場転用で NATM 工事費と同等程度になる。

これを実現するためには、我国では存在していないがリース業を専門とするマシン保有会社を設立する必要がある。転用回数および掘進距離を延ばす取り組みは欠かせない条件になる。また、今後の市場が縮小する中、国内での実績を積み、将来的には海外を含めた展開もコスト面から検討しなければならない。

## 4. 不良地山対策

標準地山での DTBM 工法は、高速性・経済性で目標を十分に達成しうることが分かったが、課題は不良地山に遭遇したとき、高速性も経済性も殺がれてしまうことにある。地山強度比で 0.3 以下程度の E タイプ地山を想定し、肌落ち崩落や湧水などを想定した対策を三つに分けて検討した。

- ① 前方切羽側のトラブル対策
- ② マシン後方側のトラブル対策
- ③ 膨張性地山のトラブル対策

### 4-1 前方切羽側のトラブル対策

#### 4-1-1 トラブル発生現象

発生するトラブルとして、以下のものを想定した。

- ① 破碎質の地山に遭遇し、岩塊がカッタヘッドの回転に合わせて動くため掘進不能になる。
- ② 取込みズリ量が多くなり掘進不能になる。
- ④ 脆弱層で切羽が自立せず崩落、進行とともに崩落が拡大、掘進不能となる。

⑤ 湧水に伴い土砂が機内に流入し、土砂の撤去作業が必要となる。

#### 4-1-2 対応策

(1) 共通対策として、事前に予知し堅硬な岩盤から事前に適切な処置を図ることが必要である。

- ・ 開口部から切羽を直接目視で観察する。
- ・ 100～150m前方の探査ボーリングによりコア採取と湧水量の把握を行い、切羽前方の地質と地下水状況を確認する。
- ・ コアボーリング孔を利用した水抜きを行い、水量によっては水抜き孔を追加する。

(2) ①や②の現象では、開口部から重機によりマシン内部に礫などを取り込む。

(3) 切羽が泥流化する場合、開口部からの注入による地盤改良を行う。

(4) 脆弱帯が長い区間予想される場合、開口部から前方に出てNATM施工に切り替え、その区間を掘進する(図-12)。

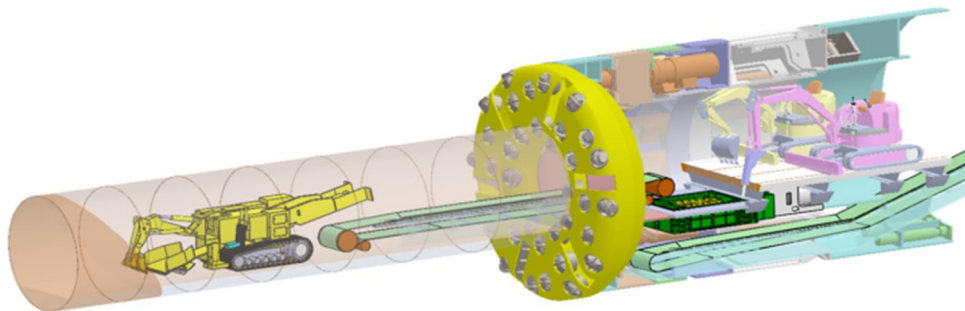


図-12 導坑による地山改良

## 4-2 マシン後方側のトラブル対策

### 4-2-1 トラブル発生現象

発生するトラブルとして、以下のものを想定した。

- ① 地山坑壁が強度不足で、メイングリッパ反力が取れない。同様に、フロントグリッパ反力が不足し、後胴が引き込めない。
- ② マシンが地山に締め付けられ、掘進不能になる。
- ③ 支保工箇所崩落・肌落ちがある。また、湧水、肌落ちがあるため繊維吹付けコンクリートが施工できない。

### 4-2-2 対応策

(1) 砂金伸治らの研究<sup>1)</sup>によるとTBM掘削において支保に作用する荷重は、概ね1D(6m)程度以下であり、C級以上であれば0.5D以下であるとされている。グリッパ反力不足や締め付けられた場合、必要な補助ジャッキの推進力を持つことで補助工法の低減を図る(表-8)。

(2) 支保工時に崩落・肌落ちがある場合、地山状態に合わせて支保工間隔をマシンの引き戻し量により調整する(図-13)。

(3) 湧水などで繊維補強吹付けコンクリートが施工できない場合、コンクリート板をH支保工の間に差し込み、裏込め注入する(図-14)。

表-8 必要な補助ジャッキ推進

必要な補助ジャッキ総推進力の目安	
地山荷重 (m)	必要な推進力 (kN)
30	84,860
25	72,020
20	59,180
15	46,330
10	33,490
6	23,210
1	10,370

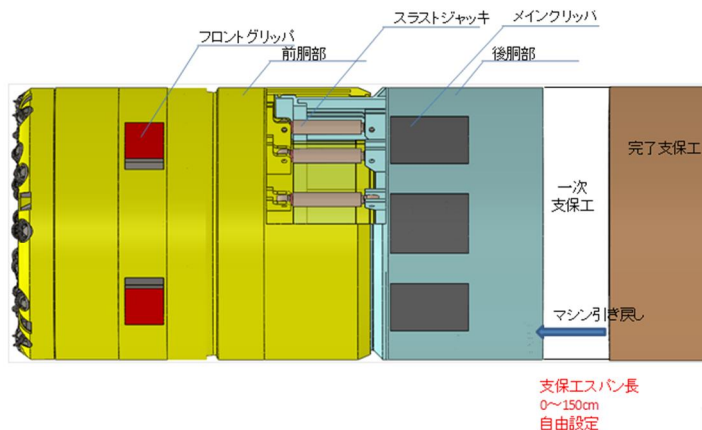
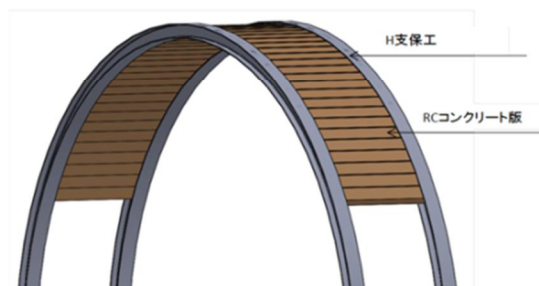


図-13 スパン長の自由設定

図-14 コンクリート板の差し込み



### 4-3 膨張性地山のトラブル対策

膨張性地山は、低強度地山と違い地山の体積が膨張する特異的な現象である。地盤が置かれた環境により、直ぐに膨張性が出ることもあり、1、2年後に変化する地盤もある。

対策には、地山開放応力に対して支保内圧を大きくする方法をとる。

- ・繊維補強吹付けコンクリートを厚くする
- ・H形鋼製支保工として高規格材(440N/mm<sup>2</sup>)を使用する、あるいは支保工間隔を狭くするなどを行う。

## 5. まとめ

以上の検討の結果、以下の結論を得られた。

- ① 標準地山では、DTBMと鋼リング支保工方式の組み合わせで平均月進500mを確保できるシステム構築が可能であることが分かった。
- ② 核を残してリングカット状に分割掘削する方式によれば、不良地山では切羽が泥流化しない限り、できるだけ補助工法によらない対策が可能である。
- ③ 経済性については3現場、15kmを基本にした損料体系で転用し、そのためにマシン保有会社の設立を図り、さらに欧米並みの25km程度に転用距離を延ばしコスト縮減を進めることが必要である。

今後は、現場での実証を目指すとともに、施工管理や地質解析などに3次元、4次元の手法を用いて、施工前に問題点の対策が決められるようなシミュレーション化の研究を進めたい。最後に、多くのトンネル関係者に多大なご指導、ご支援を賜わっていることに深く謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 砂金伸治, 真下英人, 木谷 努, 城間博通: TBMにより施工されるトンネル支保工の作用荷重に関する考察, 土木学会論文集, Vol. 65, No. 4, pp. 1018-1023, 2009. 12