

山岳トンネルにおける
ドーナツ型TBMの掘削特性に関する実験的研究

株 木 康 吉

目 次

第1章 序 論	
1.1 研究の目的	-----1
1.2 既往の研究	-----3
1.2.1 掘削技術	-----4
1.2.2 ズリ出し運搬技術	-----8
1.2.3 支保工・覆工技術	-----11
1.3 山岳トンネル工法のまとめ	-----17
1.4 本論文の構成	-----19
【第1章参考文献】	-----20
第2章 TBMの現状と課題	-----21
2.1 TBMの歴史と施工実績	-----21
2.1.1 TBMの歴史	-----21
2.1.2 TBMの施工実績	-----23
2.1.3 TBM工法の特徴	-----25
2.2 TBMの基本構造と種類	-----26
2.2.1 TBMの基本構造	-----26
2.2.2 TBMの種類	-----27
2.2.3 TBMの岩盤破碎のメカニズム	-----30
2.2.4 カッタの種類	-----32
2.2.5 カッタの作用負荷	-----34
2.2.6 TBMの純掘進速度、カッタ寿命	-----35
2.3 TBMの機能および掘削実験における既往研究	-----37
2.3.1 掘削実験機の研究	-----37
2.3.2 貫入量の研究	-----40
2.3.3 ゲージカッタの研究	-----41
2.3.4 センターカッタの研究	-----42
2.3.5 比エネルギーの研究	-----45
2.3.6 カッタ摩耗量の研究	-----47

2.3.7 TBMの施工管理の研究	-----52
2.4 TBMのトラブル対策事例	-----56
2.5 TBMの課題	-----59
2.6 第2章のまとめ	-----59
【第2章参考文献】	-----60
第3章 ドーナツ型の技術概要	-----62
3.1 ドーナツ型の技術概要	-----62
3.1.1 ドーナツ型の掘削	-----65
3.1.2 ドーナツ型の掘削フロー	-----66
3.2 ドーナツ型の低強度地山への対応策	-----68
3.2.1 地山調査	-----69
3.2.2 補助工法	-----70
3.3 第3章のまとめ	-----77
【第3章参考文献】	-----78
第4章 ドーナツ型の掘削特性	-----79
4.1 実験装置の製作	-----79
4.1.1 実験装置	-----80
4.1.2 カッターヘッドとカッターの配置	-----81
4.1.3 高強度モルタル供試体	-----84
4.2 掘削実験	-----85
4.2.1 測定条件	-----85
4.2.2 押付力、トルクの実験値の変換	-----86
4.2.3 データの測定方法	-----86
4.3 掘削実験の結果と考察	-----88
4.3.1 実験装置の評価	-----88
4.3.2 センターカッターの切削抵抗の評価	-----92
4.3.3 掘削特性の評価	-----94
4.4 第4章のまとめ	-----100
【第4章参考文献】	-----100
第5章 ドーナツ型工法の実用性	-----102

5.1	モデルトンネルの施工計画概要	-----102
5.2	ドーナツ型の設計	-----103
5.2.1	山岳ライナ形状の決定	-----103
5.2.2	ドーナツ型の掘進機外径の決定	-----104
5.2.3	ドーナツ型の開口径の決定	-----105
5.3	ドーナツ型の機械設計	-----105
5.4	ドーナツ型TBM工法の施工計画	-----108
5.4.1	掘削工	-----108
5.4.2	山岳ライナ支保工	-----113
5.4.3	山岳ライナの現地製作工	-----116
5.4.4	機材運搬工	-----118
5.5	仮設備配置計画	-----119
5.6	全体工程計画	-----120
5.6.1	掘削・支保工のサイクルタイム	-----120
5.6.2	労務編成人員	-----122
5.6.3	モデルトンネルの全体工事工程計画	-----123
5.7	概算工事金額	-----124
5.8	5章のまとめ	-----131
	【第5章参考文献】	-----131
第6章	結 論	-----132
6.1	結論	-----132
6.2	将来への展望	-----132
謝 辞		-----134
添付資料		-----135
	<ドーナツ型に係る特許一覧>	-----135

Experimental Study on Excavation Characteristics of Donut-type TBM for Mountain Tunnels

Kokichi Kabuki

Full-face type tunnel boring machines (hereinafter, "TBM(s)") was first experimented at the end of the 19th century but needed much time until final commercialization in the 1960s. In Japan, TBMs have been used for constructing some typical tunnels including the Seikan Tunnel but most of the tunnels constructed with TBMs are those with small diameters. Since the 2000s, TBMs have been re-evaluated and used for constructing some large-scale tunnels. However, TBMs still have not been widely adopted.

Generally, TBMs enable tunnels to be constructed at high drilling rates, thereby contributing to reducing construction periods and costs. Requiring no direct face operation, TBMs can also enhance safe tunnel construction. Therefore, TBMs have been widely used in countries outside Japan that have stretches of homogeneous geology and become the main trend in the excavation method.

TBMs have not been popular in Japan mainly due to the geological complexity. In some occasions, weak ground interrupts tunneling and prevents TBMs from leveraging their high drilling rates. In other occasions, hard bedrock causes cutting bits to undergo severe abrasion. Then, the need to frequently replace cutting bits interrupts drilling work, thereby causing TBMs to be disadvantageous in terms of reducing average drilling rates and increasing construction costs.

To popularize TBMs in Japan, the authors developed donut-type TBMs with a central opening on a drilling face (hereinafter, "donut-type") for tailoring TBMs to all types of ground. But with no precedence, the excavation characteristics of TBMs with donut-shaped drilling face must be evaluated.

Therefore, such evaluation was made with a mechanism researched and developed so as to be suitable for commercializing donut-type TBMs. Also, the superiority of the excavation characteristics was clarified with test equipment to demonstrate the capability of excavating all areas with which cutter heads come into contact. In addition, the comparative study with the NATM method clarified the practicability of donut-type TBMs.

第 1 章 序 論

1.1 研究の目的

トンネルは、太古の時代から洞窟などの形として用いられ、構造形式としては最も古いものであり、人類の歴史とともに歩んできた構造物である。トンネルを造る技術は、時代とともに進歩してきているが、岩石を破碎し、崩れてこないように支保して、大量のズリを搬出することは困難なことであり、そのため近代に至るまでは建設するのに可能な地山を選び、トンネルは建設されてきた。現代では技術の進歩によって、ほとんどの地山条件に対してトンネルの建設は可能になり、技術的な目標はトンネルが建設できるかどうかではなく、いかに安全に、安く、早く、品質の優れたものを建設するかという点に移っている¹⁾。

本研究の対象である TBM (Tunnel Boring Machine) の最初は、シールド機としてイギリスの Brunel により 1818 年に考案された (海外ではシールド機も TBM と呼び、土砂用か岩盤用で分けている)。岩盤用の TBM は、19 世紀末から試用されているが、実用化されたのは 1960 年代に入ってからである。我が国においては、青函トンネル、恵那山トンネル等で導入されたものの、施工件数は 2019 年まで 175 件と少なく、さらに大部分が小口径断面を対象としたものである (表 1.1.1)^{2),3)}。2000 年代頃からは、新東名高速道路の導坑トンネル、東海北陸自動車道の飛騨トンネルの本坑、避難坑で採用され、水路トンネルでは豊川用水のトンネルなどで TBM の再評価が進められているが、広く採用される状況ではない。

表 1.1.1 TBM 国内施工実績³⁾

TBM 国内施工実績集計 (1964~2019年)		
TBM: 径別	施工箇所数	適用
2.0~4.9m	135	φ 7m 以上 発電導水路3箇所 高速道路4箇所
5.0~6.9m	33	
7.0m~	7	
計	175	

TBMは、掘進速度が早く工期の短縮とコストの縮減が可能となり、切羽で直接作業する必要がなくなり安全性も向上する。同一地質が続く諸外国では、スイスのアルプス鉄道 of Gotthard トンネル、マレーシアのパハンセランゴール導水トンネルなどで広く用いられ、TBMが掘削方式の主要な流れになっている^{4),5)}。

我が国でTBMの普及が進まない理由は、地質の複雑さにある。低強度地山が断続的に出現することが多く、たびたび掘進困難となり、高速施工の利点を活かすことができないことが普及を妨げている。もう一つの課題として、特殊機械が多く機械の購入費や運搬、組立、解体費が高く、また、カッタ寿命に伴う施工費の増大など、現在、山岳トンネルの施工法の主流であるNATM工法(New Austrian Tunneling Method) に比べてTBM工法の工事費が高いことが挙げられる。

我が国のTBMの課題を解決し普及に資するために、硬軟地質の全岩盤を対象としたカッタヘッドの中心部に開口を設けたドーナツ型TBM(以下、ドーナツ型と呼ぶ)を著者らが考案した(図 1.1.1)^{6), 7), 8)}。ドーナツ型は、現状では国内外とも施工実績がなく、実用に供するためには中心部を開口することで中心部を掘削しないことなどの掘削特性を評価する必要がある。

本研究ではドーナツ型の実用化に向けて、機構などの研究開発を行うとともに、中心部を開口にする掘削特性などによる施工性を評価する。また、カッタヘッドが接するすべての範囲を掘削する実験装置を新たに製作し、この装置を用いた掘削実験により、掘削特性の優位性などを明らかにする。さらに、経済性ではNATM工法と比較し実用性を明らかにする。

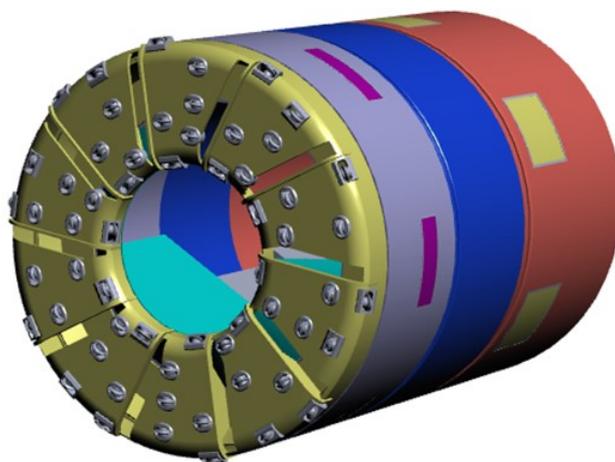


図 1.1.1 ドーナツ型
(シールド型)

1.2 既往の研究

山岳トンネル工法の適用範囲は、掘削後の掘削面に支保工ができるまで切羽が自立していることが条件になる。一方、都市トンネル工法では、対象地盤が主に土砂などのように掘削後の地山が自立しないことを前提として設計・施工されている。

山岳トンネル工法は、岩盤を破碎して、運び出すという作業の繰り返しが基本的な流れである。この間に地山が不安定であれば掘削した空間を保持し、作業の安全を確保するため支保工が施工される。また、空間を恒久的に保持するため切羽の後方で覆工が施工される。さらに、低強度地山ではトンネル断面を一度に掘削できない場合、切羽を分割することや、あらかじめ地山を補強することが必要となる。その補助工法には、施工手順に関する工夫や工法が考案され、また、各種の先受け工や地山改良などが適用されている。

このように山岳トンネル工法の要素技術は、岩盤を破碎・掘削する技術、ズリを運搬する技術、空間を保持する技術、施工順序など工法に関する技術、切羽の安定性を確保するための技術などによって構成されている（図 1.2.1）¹⁾。

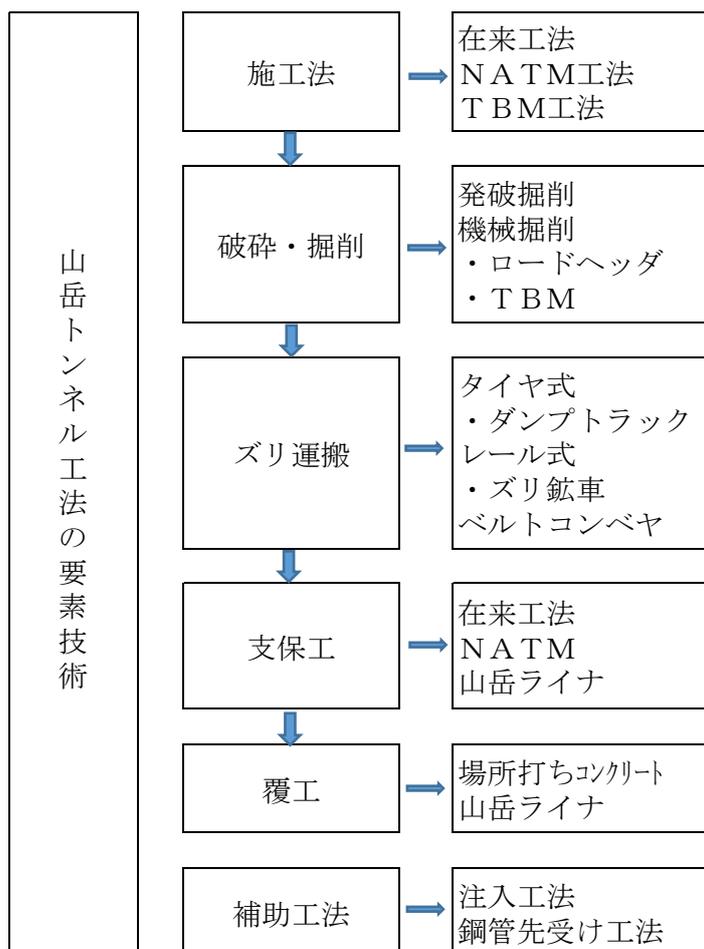


図 1.2.1 山岳トンネル工法の要素技術

1.2.1 掘削技術

硬い岩石を砕くことは、20世紀に至るまでは大変な仕事であった。19世紀後半から20世紀の初頭にかけて、アルプス越えする多くのトンネルが建設されたが、爆薬を装填するためのせん孔をいかに能率よく行うかが重要な技術課題であり、空気圧を使用する削岩機が開発され定着していった。1970年代に油圧式の削岩機が普及し、大型の削岩機を載せた台車⁹⁾を使用するのが一般的となった。

一方、我が国でTBMが用いられるようになったのは、1960年代からであったが前述したように地山条件に適合しなかったため普及するに至らなかった。しかし、TBMはトンネル施工の最もわかりやすい掘削工法であり、今後の掘削技術の柱の一つであると考えることができる。

山岳トンネル掘削方式は、発破掘削方式と機械掘削方式に大別される（図1.2.2）。機械掘削方式では、自由断面掘削機（ロードヘッダ）¹⁰⁾とTBM掘削機²⁾による方式が主に採用されている。

■ 山岳トンネル掘削方式の分類

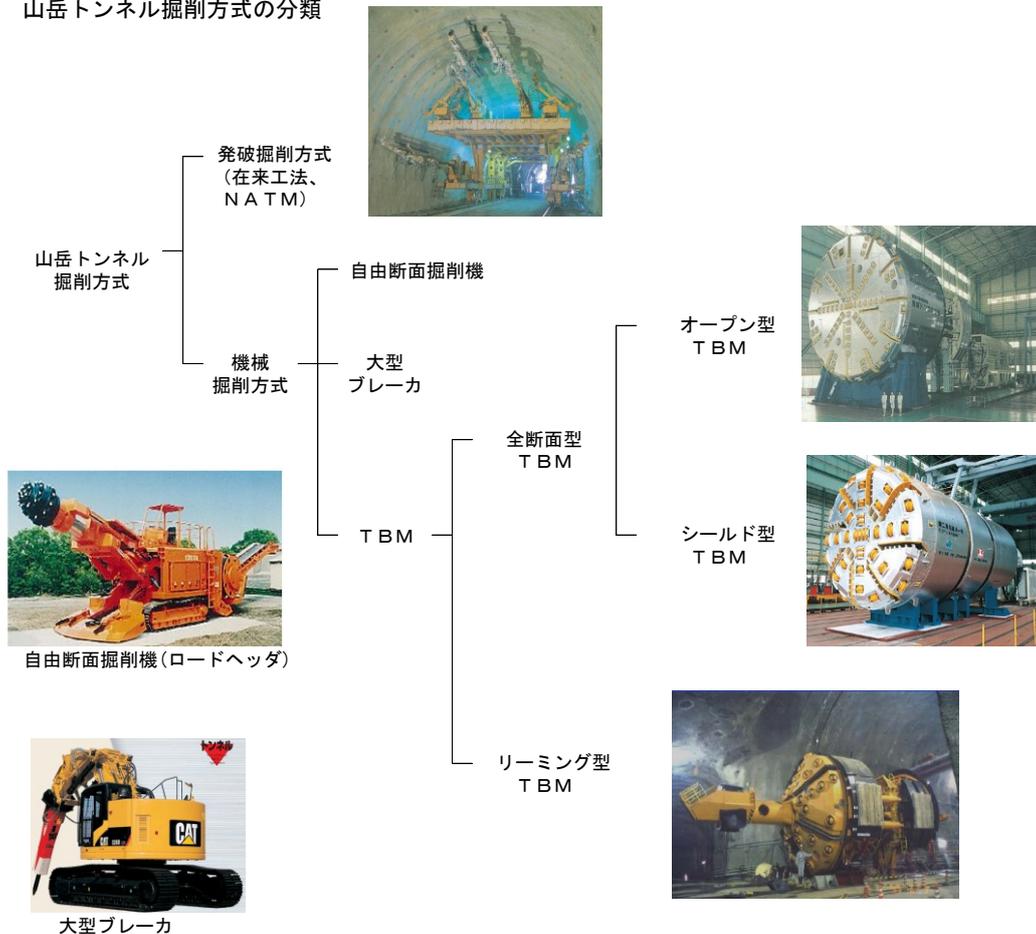


図 1.2.2 山岳トンネル掘削方式の分類^{2), 9), 10)}

(1) 発破掘削方式

1900年代に入ると岩石の破碎には、爆薬が多く使われるようになった。それに伴い、爆薬を装填するためのせん孔に空気圧を使用する削岩機が開発され（図1.2.3）、1970年代には油圧式の削岩機が普及し、削岩能率が著しく向上した（図1.2.4）。

トンネル掘削作業に使用されている掘削機械は、発破孔のせん孔、支保工の建て込み、またはロックボルト打込みおよびコンクリート吹付けなどの一連の作業を、それぞれの単機能の組合せにより施工されてきた。近年、特に大断面トンネルでは、機能を集約した多機能集約型のICT化されたトンネルワークステーションとした自動化作業が盛んに行われている（図1.2.5）⁹⁾。



図 1.2.3 空気圧式削岩機⁹⁾



図 1.2.4 油圧式削岩機(ジャンボ)⁹⁾



2ブームトンネルワークステーション

(吹付け機1台)
(チャージングケーブ2台)
(コンプレッサ1台)
(クレーン1台)

図 1.2.5 トンネルワークステーション⁹⁾

トンネルに使用されている爆薬は、後ガスの少ないダイナマイトの他に、含水爆薬、硝安油剤爆薬などがある。以前はダイナマイトを多用していたが、安全性の観点からのニーズや、火薬製造技術の向上などにより、現在では、含水爆薬（スラリー爆薬：図 1.2.6）を使用するようになった。また、爆薬を起爆させるための雷管（工業雷管、電気雷管：図 1.2.7）があり、最近では段発数を多く取るために電子雷管も使われている。

図 1.2.8 は、掘削断面積 63 m^2 （二車線道路幅程度）における全断面発破のせん孔・装薬パターンである。段発発破の順番は、瞬発 1 段は中心部の心抜きを V カットに破碎し、自由面を造り荷重を小さくして内側に向けて 2、3 段と外側に順に発破、最後に荷重の重たい最下部の払いが行われる。なお、地山を切り離す最外側の発破は、地山を痛めなく平滑に仕上げるため、孔間隔を狭く、薬量を少なくしたスムーズブラスティング（SB）により発破が行われる。



図 1.2.6 含水爆薬（スラリー爆薬）¹¹⁾



図 1.2.7 雷管¹¹⁾

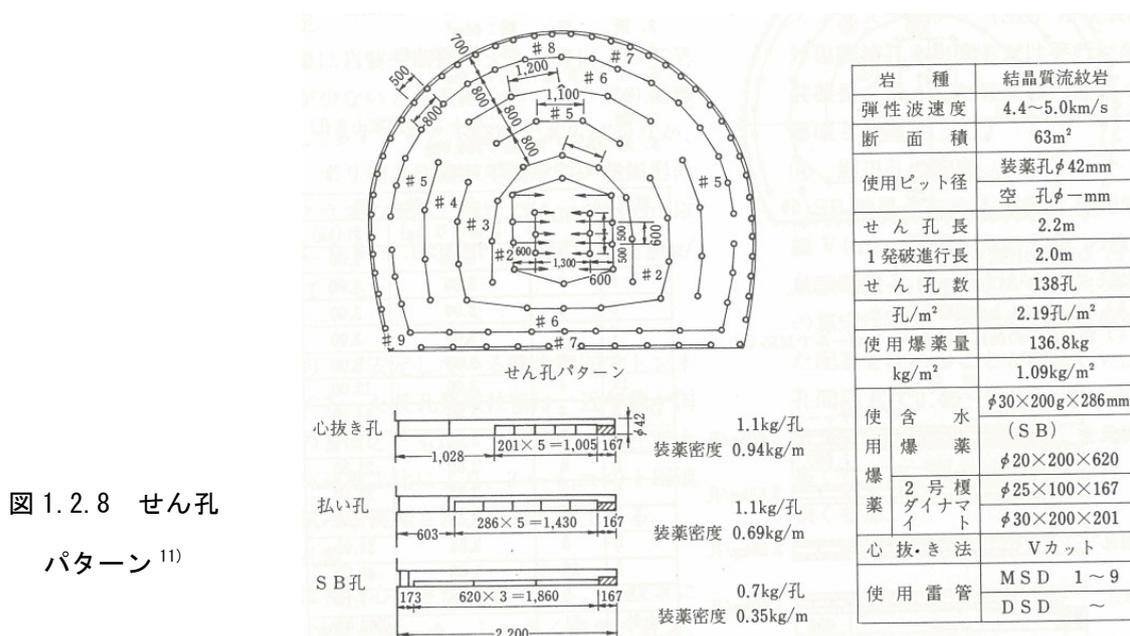


図 1.2.8 せん孔パターン¹¹⁾

(2) 機械掘削方式

1) TBM工法

我が国では、1960年代からTBM（図1.2.9）が青函トンネルなどで導入されるようになった。その後、TBMは地山条件に適合しなかったため普及に至らず、掘進機外径φ5m程度以下の小断面トンネルでの活用に留まっている。一方、欧米では大断面トンネルにおいてもTBMを使用する事例が増加していることから、今後の掘削技術の主力になることが期待されている。



図 1.2.9 TBM（シールド型）²⁾

以下に、TBMの特徴を発破工法と比較する。

<TBM工法の長所>

- ①掘削作業が連続的に行えるので施工速度が速く、工期の短縮が図れる。特に、安定した地山を長距離施工する場合にはこの特徴が顕著となる。
- ②発破のような大きな衝撃を与えずに地山を掘削できるため、岩盤の緩みがほとんど発生せず、崩落、肌落ちの危険が少ないため支保工が軽減できる。また、余堀が少なく覆工費も経済的となる。
- ③掘削壁面が平滑であるので、無圧水路トンネルでは覆工を必要としない。
- ④振動、騒音が少ないので、周辺の住民や構造物への影響が少ない。
- ⑤発破工法に比較して熟練作業員への依存度は低く、切羽での直接作業が少ないため、施工の安全性が高い。また、シールドや保護ルーフの装備、カッタヘッド内でのカッタ交換可能な構造、密閉式運転室および高性能集塵機などの採用により、安全性と作業環境の改善が図られている。

<TBM工法の短書>

- ①機械の購入費や運搬、組立、解体費が高く、また、機械の設計、製作のリードタイムが長く、施工延長の短いトンネルには適用しにくい。また、カッタ消費量が多くトンネル延長1kmあたり7千万円から1億円程度の費用が掛かるため、発破工法から比べると全体コストが割高になる。

②施工途中での掘削径の変更は、オープン型では約±10%程度まで改造可能だが、シールド型はほぼ不可能である。

③発破工法に比較して適用地質に制約がある（ライナの利用や、支保材料の改善により適用性が大幅に改善されつつある）。

2) 自由断面掘削機

ロードヘッダ (Road Header) は別名自由断面掘削機と言われ、機体先端上部に設置してある切削チップが配列されたドラムを回転させて、土や鉱物を掘削する機械である。1970 年ごろから発破作業が適しない現場で使用されるようになり、適用できる岩盤強度は 50MPa 程度以下で多用されている (図 1.2.10) ¹⁰⁾。

1.2.2 ブリ出し運搬技術

発破掘削した後のブリ出しは、主要なクリティカル工程であるため掘進速度に影響を与える。ブリ出し運搬方式の選択に当たっては、トンネル断面の大きさ、トンネル延長、地質状態(路盤の維持の難易、湧水の大小)、採用可能な換気方式、掘進速度、ブリ捨て場までの距離に適合した方式を検討する必要がある。また、能率化のためには、運搬単位の大型化、操作の簡略化、作業の平均化、および連続化を図ることである。

ブリ出しは、ブリ積み、ブリ運搬およびブリ捨ての作業に分かれるが、基本となる作業はブリ運搬であり、運搬方式はタイヤ式とレール式が一般に採用されている。中・大断面トンネルでは、タイヤ方式、小断面トンネルではレール方式が

全長	約18m
全高	4.8m
全幅(クローラ幅)	3.4m(3.2m)
設備重量	約120 ton
最大切削高さ	8.8m
最大切削幅	8.8m
下盤掘削深さ	0.45m
切削動力	350/350kW-4/6P



図 1.2.10 SLB-350S 型ロードヘッダ ¹⁰⁾

表 1.2.1 坑内運搬方式の比較

項目	タイヤ方式	レール方式	ベルトコンベヤ方式
路盤 走行路	<ul style="list-style-type: none"> ・路盤の排水、補強工の施工および泥濘化防止対策工として仮舗装、インバートの早期閉合等が必要 ・湧水が多い軟岩、未固結地山では一般に不向き 	<ul style="list-style-type: none"> ・路盤を傷めない硬軟いづれの地質でも可能 ・ポイント付近での路盤整備に留意 	<ul style="list-style-type: none"> ・路盤を傷めない ・硬軟いづれの地質でも可能 ・湧水が多い未固結地山では一般に不向き
勾配の 制限	<ul style="list-style-type: none"> ・制限が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・制限が生じる 	<ul style="list-style-type: none"> ・水平、傾斜、垂直も可能
断面の 制限	<ul style="list-style-type: none"> ・小断面には適さない 	<ul style="list-style-type: none"> ・タイヤ方式に比較して小断面でも可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的小断面でも可能
換気	<ul style="list-style-type: none"> ・大型の設備が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・タイヤ方式よりも小型でよい 	<ul style="list-style-type: none"> ・タイヤ方式よりも小型でよい

一般的である。最近では、TBMとの組み合わせに連続ベルトコンベヤ方式も多く採用されるようになってきた。表 1.2.1 に坑内運搬方式の比較を示す。

ズリ積み機械は、発破で破碎された岩を運搬機械に積み込むため、運搬方式により機械の組み合わせが違ってくる。また、岩ズリの形状は節理などで大塊が多く出ることから、小断面トンネルでは機械を並列に置くスペースが取れないことから、人力での小割も行われている。図 1.2.11 は、タイヤ方式との組み合わせに採用されるサイドダンプ式トラクタショベルと坑内小回り用重ダンプトラックである。



出典：日本キャタピラー合同会社カタログ¹²⁾

サイドダンプ式トラクタショベル

坑内小回り用重ダンプトラック

図 1.2.11 タイヤ方式による組み合わせ機械

レール方式の積込機械は、近年までエアーを動力としたロッカーショベル（図 1.2.12）で行われていたが、熟練の運転技術が必要で坑夫の高齢化とともに、図 1.2.13 に示すシャフローダが主流になっている。積込機械のレール上の移動は、下部に車輪が内蔵されており、車輪が下りてバッテリーロコなどで牽引される。

掘削ズリの運搬は、シャフローダなどからズリ鉱車に積み込まれバッテリーロコによるレール上の移動になり、排出は鉱車を転倒装置によって行われる（図 1.2.14）。

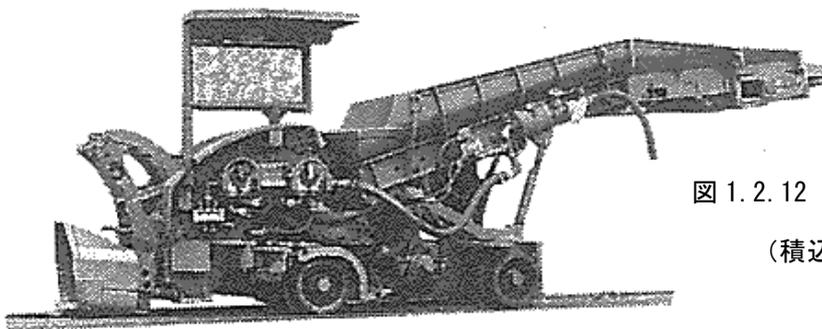


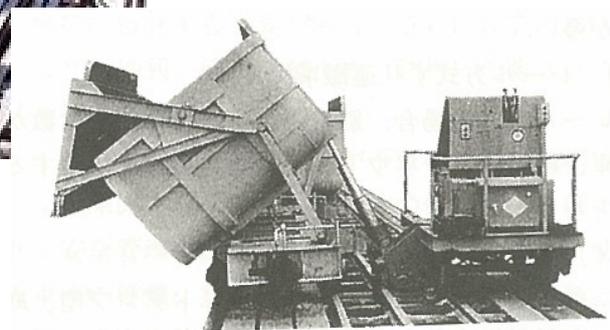
図 1.2.12 ロッカーショベル¹⁰⁾
(積込コンベヤ付き)



図 1.2.13 シャフローダ⁹⁾



バッテリーロコと鉱車



鉱車と転倒装置

図 1.2.14 バッテリーロコ、鉱車と転倒設備²⁾

1.2.3 支保工・覆工技術

掘削した後の地山を支える支保工方式では、発破で掘削した場合には在来方式¹⁾と現在では標準工法になっているNATM方式²⁾がある。TBM掘削した場合には、掘削面が平滑に揃うことなどから図1.2.15に示すような多種多様な覆工方式が採用可能になる。

トンネル掘削に伴う地山緩み荷重は、一般に時間の経過とともに進行し増加する。在来工法では、早期覆工することが望ましいが支保工と覆工が分離方式をとらざるを得ないため、覆工までの間で地山の緩みが助長する。それに対してNATM工法では、掘削直後に施工される吹付コンクリートとロックボルトの支保工で地山と一体化して荷重を支える。そのため覆工は、地山荷重を負担させない考え方が取られている。

支保技術を計画する際には、使用する材料と設計の考え方の両面から検討する必要があり、近年のトンネル技術は基本的に支保工の変革とともに、段階的に発展してきた経緯がある。

■ 山岳トンネル支保工方式の分類

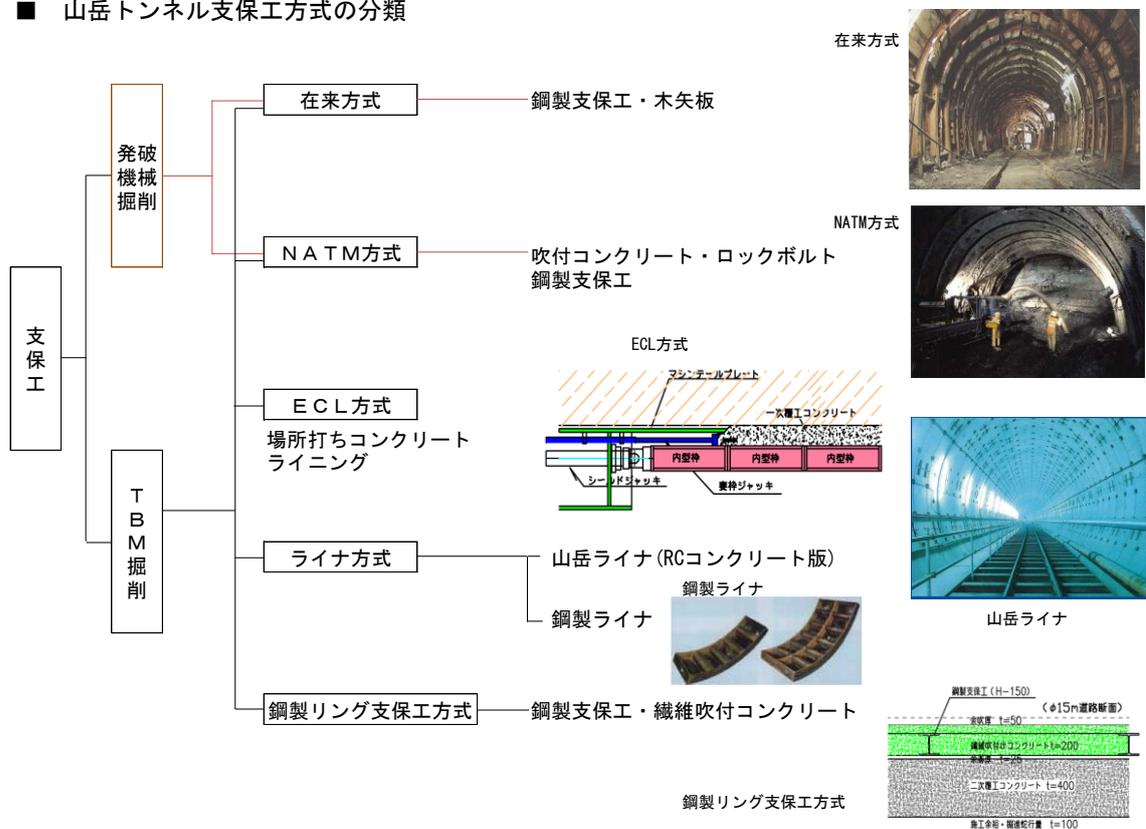


図1.2.15 山岳トンネル支保工方式の分類^{1), 2)}

(1) 在来工法

掘削外径φ3m程度以下の小断面トンネルでは、作業空間が狭いため現在でも鋼アーチ支保工と松矢板による支保工方式は行われている。木製支保工から鋼アーチ支保工に標準化されたことにより、作業空間を大きくとることができるようになり、先進導坑を用いない上部半断面工法が一般化するようになった。それにより、本格的な機械化が可能となり、安全性の向上に大きく貢献することになった(図1.2.16)。しかし、熟練技能が要求され、熟練坑夫が少ない現状がある。



図 1.2.16 在来工法・鋼アーチ・木矢板支保工¹⁾

(2) NATM工法

トンネルの支保工としてのNATM工法はオーストリアで開発され、吹付けコンクリートとロックボルトを用いて、地山自体の保持力を利用した支保工工法として、積極的に日本においても採用されるようになった。我が国では、上越新幹線中山トンネル(1976年)で初めて本格的に用いられ、東北新幹線工事等での経験を積み、1980年代には一般工法として広く普及し、トンネル工法の標準工法となった(図1.2.17)。

NATM工法では、掘削直後に吹付けコンクリートを施工することで地山との密着した構造体を形成し、周辺地山の緩みを最小限に抑えることができる。さら



図 1.2.17 NATM工法¹⁾

に、ロックボルトを地山内部に打ち込み、周辺地山との一体化した支保工構造にすることが可能となる。

NATMにおける支保工の施工順序は、比較的地山が良好な硬岩・中硬岩地山の場合、①吹付けコンクリート、②ロックボルトの順に、また、亀裂の発達した中硬岩地山や軟岩・土砂地山の場合は、①一次吹付けコンクリート、②鋼製支保工+溶接金網、③二次吹付けコンクリート、④ロックボルトの順で施工する。

図 1.2.18 に NATM による支保工の模式図、表 1.2.2 に道路トンネルにおける地山等級別の NATM の標準支保パターン¹⁾の例を示す。

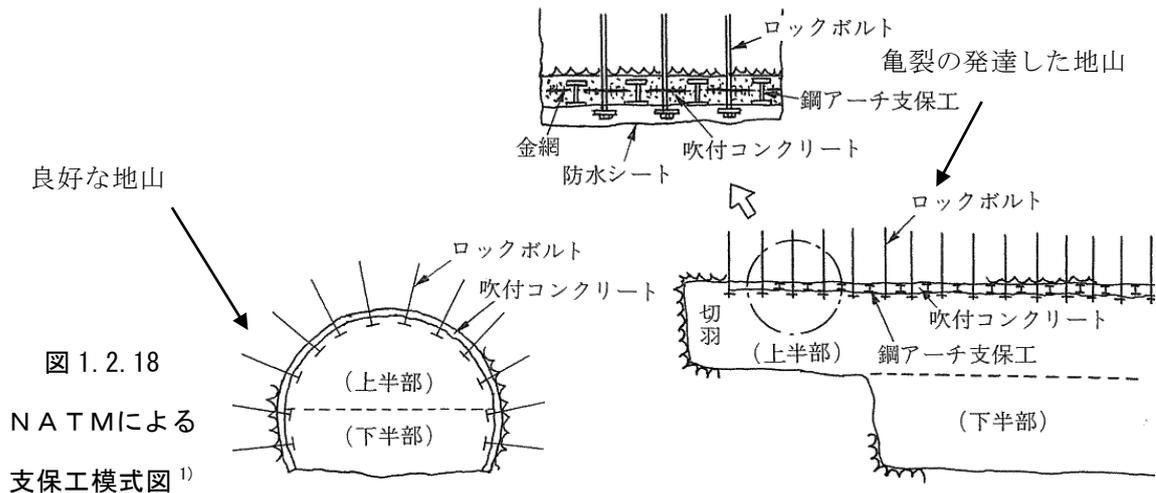


表 1.2.2 道路トンネルにおける地山等級別の NATM の標準支保パターンの例

地山等級	掘削工法	標準一掘進長 (上半) (m)	ロックボルト			鋼アーチ支保工			吹付け厚 (cm)	覆工厚 (cm)		変形余裕量 (cm)		
			長さ (m)	施工間隔		上半部	下半部	標準建込間隔 (m)		アーチ・側壁部	インバート部	上半部	下半部	インバート
				周方向 (m)	延長方向 (m)									
B	補助ベンチ付き全断面工法 (上半工法)	2.0	3.0	1.5	2.0	なし	なし	—	5	30	0	0	0	0
C _I	補助ベンチ付き全断面工法、上半工法	1.5	3.0	1.5	1.5	なし	なし	—	10	30	0	0	0	0
C _{II}	補助ベンチ付き全断面工法	1.2	3.0	1.5	1.2	H-125 (U-21)	原則としてなし	1.2	10	30	0	0	0	0
	なし													
D _I	(補助ベンチ付き全断面工法) 上半工法	1.0	4.0	1.2	1.0	H-125 (U-21)	H-125 (U-21)	1.0	15	30	45	0	0	0
D _{II}	(補助ベンチ付き全断面工法) 上半工法	1.0 (以下)	4.0	1.2	1.0 以下	H-150 (U-29)	H-150 (U-29)	1.0以下	20	30	50	10	10	0
	10											0	0	

注：・地山等級 A、E については、地山条件を考慮して、別途、支保パターンを設計するものとする。

・()書きについては、地山条件を考慮して、選定する場合がある。

・覆工厚、変形余裕量については、別途、設計する場合がある。

道路トンネルでは、原則として、坑口部および地山等級 D の区間にインバートを設けるものとしている。ただし、地山等級が C_I、C_{II} であっても泥岩、凝灰岩等で長期の安定性に問題があると考えられる場合はインバートを設けることができるとしている。また、地山等級 D_I であっても岩の長期的支持力が十分であり、側圧による押し出し等もないと考えられる場合はインバートを省略できるとしている。

出典：土木学会、道路トンネル標準示方書

(3) 覆工 (場所打ちコンクリート)

覆工は、長大トンネルのように掘削と並行して行う場合と、小断面や比較的距離の短いトンネルでは掘削完了後に行う場合がある。工程について前者の場合は、覆工の工程が掘削の進行に左右され、後者の場合は、覆工の工程がトンネルの全体工程に影響を及ぼす。

覆工の打設時期は、トンネル掘削機の地山の変位が収束したことを計測により確認してから、施工するのが原則である。収束前に施工することは、覆工コンクリートに構造的クラックの発生や漏水の原因となり、後々に多大な補修が必要となる。図 1.2.19 に車両通過式の移動用の全断面スチールフォームを示す。



図 1.2.19 全断面用スチールフォーム¹³⁾

(3) TBM工法における覆工

TBM工法の覆工は、発破掘削と違い掘削面が平滑に仕上がることで、発破による飛石もないことなどから計画された形状が確保されることで在来工法、NATM工法の覆工方式とともに、山岳ライナ（鉄筋コンクリートPC版）やECL工法（現場打ちライニング工法）、鋼リング支保工方式など、多種多様な方式の選択が可能である。

1) 山岳ライナ方式

山岳ライナは、シールド工法で使用されているセグメント（土木学会、2016年制定トンネル標準示方書シールド編）と同様であるが、山岳トンネル工法では切羽が自立する岩盤ではそれほどの強度を必要としない支保パターンもあることか

ら、山岳用に製作したコンクリートプレキャスト版を山岳ライナと呼んでいる。

設計では、NATM支保設計の考え方にに基づきフレーム解析による山岳ライナに発生する断面力を算出し、鉄筋コンクリート部材としての山岳ライナ厚を算定している¹⁴⁾。実績では山岳トンネルで全線に渡って使用されたことがなく、補助工法として部分的に使用された例がある。今後は、TBM工法には欠かせなく標準覆工になるべきであり、研究課題になっている。

山岳ライナに具備すべき基本的な条件として、以下のようなものを求められている。

- ・急速施工を可能とするため、建て込みが容易である。
- ・低強度地山でジャッキ推進の反力に対応できる。
- ・従来のセグメントに比べてコストダウンができる。

使い方として、支保工として施工される場合と支保兼覆工用の山岳ライナ(シングルライニング:ワンパス)とがある。山岳トンネルに採用されるのは支保工として多く、経済性の観点からは覆工を兼用したワンパス方式が求められている。

山岳ライナの経済性を向上させる基本的な方策として、以下のようなことが考えられる。

- ・山岳ライナに合致した荷重および山岳ライナの材質等の設計条件の見直すことにより、経済的な断面を追求し、山岳ライナ製作費の低減を図る¹¹⁾。
- ・山岳ライナ幅を大きくすることにより、継手部材の低減、山岳ライナ製作工期の短縮による製作費の低減および施工速度の向上等を可能とし、工事費の低減を図る。
- ・山岳ライナを等分割、あるいは分割数を減少させることにより、山岳ライナ製作費および工事費低減を図る。
- ・岩盤が自立することを踏まえた山岳ライナの形状および継手型式を改良することにより、継手金物を減少、あるいは省略し、山岳ライナ製作費および工事費の低減を図る。

また、品質的には実現場で発生している次のようなトラブル項目に対して、特にワンパスとして使用する場合には、設計基準に対応した設計面からの対応が必要である。

- ・継手からの漏水

- ・エキスパンション不能
- ・山岳ライナにクラック発生で推力不足
- ・山岳ライナの座屈

2) 鋼リング支保工方式

施工順序は、全周 360° にH鋼支保工をリング状に配置し、その間を繊維コンクリートで吹付けすることで地山荷重に対応する（図 1.2.20）。この方式の特徴は、TBMの掘削は地山のゆるみを小さくできることから、H型鋼支保工で荷重を支え、吹付けコンクリートに繊維を混入することで靱性強度を高めることで、ロックボルトを標準から外すことにより掘進速度を速くできる優位性がある。

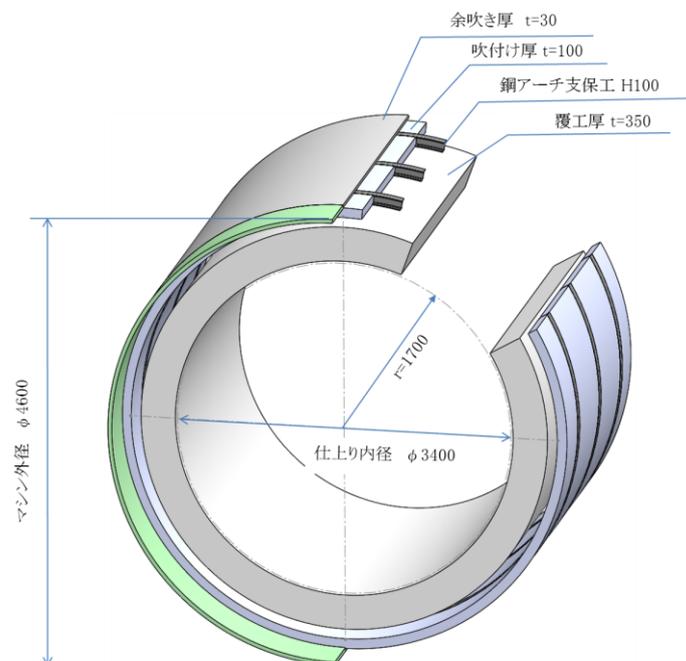


図 1.2.20 鋼リング支保工標準断面図

1.3 山岳トンネル工法のまとめ

山岳トンネル工法のまとめとして、表 1.3.1 に標準工法である NATM 工法と機械掘削方式の TBM 工法の特徴を一覧表に示す。

表 1.3.1 NATM工法とTBM工法の特徴

項 目	NATM工法	TBM工法	
工法概要	<ul style="list-style-type: none"> 我が国では、現時点で最もよく用いられている工法である。 標準的には、発破掘削方式、ズリ出しを行い、鋼製支保工、コンクリート吹き付け、ロックボルトによって、地山を安定させ、覆工を巻き立てる。 ドリルジャンボ、吹き付けロボットなどの専用機械がある⁹⁾。 地山が悪いエリアでは、薬注等の補助工法を用いる。 	<ul style="list-style-type: none"> 日本では、大口径トンネルの実績は限られるが、先進導坑含め、径の小さいトンネルには多くの実績がある。 専用機械による掘進。(マシン構造により、オープン型、ルーフ型、シールド型に分かれる)²⁾ 標準的には、推進反力はグリッパ(周辺地山)を支えとする。 グリッパの効かない軟弱層では、後端で支保工を巻立て、推進反力を受け持たせる。 地山が悪いエリアでは、切羽前面への補助工法がマシンによって制約される。 支保工は、オープン型とルーフ型では一般的に吹き付けとロックボルト、シールド型ではセグメント。  	
推進・掘削方法	<ul style="list-style-type: none"> 地質状況に合わせて、掘削方法は発破掘削もしくは機械掘削による手法が選択可能、掘削工法についても、全断面工法・上半掘削工法、ショートベンチ工法のどの手法もとりうる。 	<ul style="list-style-type: none"> 通常の岩盤部では、グリッパで坑壁に反力を取り、スラストジャッキで推進するが、軟弱地山では、セグメントで反力を取ってシールドジャッキで推進する。 	
適用地山	<ul style="list-style-type: none"> すべての地山に適用が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 軟岩～中硬岩及び破砕帯、軟弱地層との互層まで適用可能とされるが、変状の激しい地山でマシンが拘束されると、後方から拡幅掘削を行い、脱出する必要がある。 	
脆弱地盤対応性	<ul style="list-style-type: none"> 掘削は、切羽の自立を基本とするために、掘削工法の変更(全断面→補助ベンチ付全断面、上半先進ショートベンチ、ロングベンチ、CD工法)等の加背割りの変更で対応する。また、補助工法を用いて地山の改良を行うこともできる。対応性は高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ディスクカッタ、面版開口寸法、チャンパー内に閉塞解除用の機能を持たせる。面版開口を可変にする、チャンパー内を洗うジェットノズルを配置するなど。 	
切羽確認	<ul style="list-style-type: none"> 目視等により切羽確認可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽確認不可能。切羽状況は機内に取り込んだ掘削土から判断する。 	
切羽での掘削土搬出機械、方法	<ul style="list-style-type: none"> サイドダンプショベル、シャフロダ等の積込機械で重ダンプトラックに積込み搬出する。必要に応じて、ベルトコンベアを併用する場合もある。 	<ul style="list-style-type: none"> スクリューコンベア、流体輸送により機内に取り込み、坑内の連続ベルトコンベアにより坑口まで運搬。 	
支保方法	<ul style="list-style-type: none"> 吹付ライニング、鋼製支保工、ロックボルトを支保の主要部材とする。 	<ul style="list-style-type: none"> オープン型、ルーフ型は無背割、吹付ライニング、鋼製支保工、ロックボルトが可能。グリッパの後方で施工。 シールド型は機内でライナー(セグメント)組立。 	
補助工法の必要性及び作業性	<ul style="list-style-type: none"> 切羽全面が開放されているため、補助工法が多く必要になる場合が多い。 補助工法の選択自由度は高い。 補助工法だけでは崩壊する場合は、切羽を小分割して切羽を広げる方法を取ることで、掘進速度は1日当たり数メートル程度になる。 	<ul style="list-style-type: none"> 発破を使わないので地山が緩む影響は少なく、補助工法を必要とする区間は限られる。 一方で、補助工法が必要な場合であっても、機内からの工法に限定されることになる。 	
掘進速度	良好地山	<ul style="list-style-type: none"> 掘削に問題はない。(月進100m程度) 	<ul style="list-style-type: none"> カッタヘッドの適用性が地山と合致すれば、大きな掘進速度が得られる。(地山が悪くなければ、概ね月進300m程度。国内のTBM最大掘削月進として800m程度の実績がある。)
	不良地山	<ul style="list-style-type: none"> 補助工法を多用することで進捗は大幅に低下する。(月進50m程度)。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業性、操作性が劣るために掘進能率は落ちるが、切羽、側壁とも山留は有効でコンスタントな掘進速度が得られる。 全断面のため前方の確認が遅れることで、マシンが地山に拘束されて進行不能のリスクがある。
安全性	<ul style="list-style-type: none"> 切羽崩落、火葉の取扱い、頻繁な車両の通行・入替え等の危険な要因を内包している。 	<ul style="list-style-type: none"> 地山強度が低い場合はシールド型TBMを採用し、TBM機体内で支保を組立ることにより、危険回避。 	
坑内環境	<ul style="list-style-type: none"> 発破の後ガス、ずり積時・吹付コンクリート施工時の粉じん、車両の排気ガス等の坑内環境を悪化させる要因がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 粉じんに対する坑内環境は、NATM工法に比して圧倒的に良好。 TBM機械の熱により坑内温度上昇がある。換気量を確保して温度を下げる。 	
採算が合う施工延長	<ul style="list-style-type: none"> トンネル延長の長短に係らず、掘削・覆工機械設備、仮設備等の初期費用とトンネル掘削・覆工の直接工事費の合算となるが、一般には、TBMに比べ最も安価と考えられる。 不良地山の場合、切羽の分割や補助工法の多用で工事は数倍の工事費になる。 	<ul style="list-style-type: none"> 一般に良質な地質において、NATMに比して20Km程度で同等とされている。 	
利点	<ul style="list-style-type: none"> 地山に対して、柔軟な対応が可能(補助工法、断面変更等)。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘進速度がNATMに比して大幅に改善。 発破を用いず、機械化が進んでいるため安全性が高い。 	
問題点	<ul style="list-style-type: none"> 作業性から、TBMの順調な掘進速度には及ばない。 補助工法を多用するとTBMと変わらない工事費になる場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> マシンが高価で、機械の設計、製作に時間を要する。このため施工延長の短いトンネルには適用しにくい。 施工途中での掘削径の変更ができない。 前方が目視できないため、地質が悪くなると、マシンが地山に拘束され、脱出に相当の時間を要するリスクがある。 	

1.4 本論文の構成

本論文は、新しく考案したドーナツ型の研究開発と、その実用性について実験的研究した成果を取りまとめたものである。本論文の構成は、次のような全6章、28節で論じている。

第1章 序論

本章では本研究の目的とその背景を述べるとともに、我が国の山岳トンネル施工法の歴史について、および山岳トンネル工法の掘削方式と支保工・覆工について概説した。掘削方式では、発破掘削方式と機械掘削方式について技術概要を詳述した。支保工・覆工方式では、在来工法、NATM工法およびTBM工法に適用されている施工方式について概説した。

第2章 TBMの現状と課題

本章ではTBM工法の現状について、我が国に導入されてからの施工実績、およびTBMの基本構造等についてそれぞれ記述した。また、TBMの岩盤破碎のメカニズムについて、溝掘りにより隣接剥離破碎される機構を概説し、ディスクカッタの種類と構造について詳述した。さらに、本研究に関係する既往の掘削実験について、掘削実験機、貫入量、ゲージカッタ、センターカッタ、掘削体積比エネルギーおよびカッタ摩耗量などに分けて概説し、最後にTBMの現状の課題としてまとめ、本研究の方向性を明らかにした。

第3章 ドーナツ型の施工性

本章では、研究開発したドーナツ型の中心部の開口径やカッタの配置をはじめとする機器構成、および掘削工、支保工などの施工性について詳述した。また、TBMの課題である低強度地山への対応策について、ドーナツ型による具体的な地山調査手法と補助工法を詳述した。

第4章 ドーナツ型の掘削特性

本章では、ドーナツ型の掘削特性を評価するため、カッタヘッドが接するすべての範囲を掘削する新たな掘削実験装置を製作した。その実験により、センターカッタが無くなること、カッタ数が少なくなること、および掘進速度が早くなりカッタが岩盤に接触している時間が短くなることから、カッタ寿命が延伸することを明らかにした。

第5章 ドーナツ型の実用性

本章では、ドーナツ型の山岳トンネルへの実用性について、モデルトンネルを想定した施工計画による施工シミュレーションにより評価した。その結果、全体工事費は、ドーナツ型の施工性や山岳ライナによる大幅な工期縮減などから、NATM工法と同程度の経済性になることを明らかにした。

第6章 結論

本章では、各章で得られたドーナツ型の実用性に関する研究成果を取りまとめて本論文の結論とした。

【第1章参考文献】

- 1) 今田 徹：山岳トンネル設計の考え方、土木工学社、2010、1-2
- 2) TBMハンドブック：日本トンネル技術協会、2000、3-12
- 3) トンネル年報：日本トンネル技術協会、2000年～2019年
- 4) 日本トンネル技術協会：Alp Transit Gotthard、ドバイ世界トンネル会議および現場技術調査報告資、2018、2-5
- 5) 河田孝志：パハンセランゴール導水トンネル、Ace 建設業界、2012、36-37
- 6) 武田光雄、株木雅浩：トンネル掘削装置、及びトンネル掘削方法、特許公報、特許第5138821号、2012
- 7) 株木康吉、武田光雄、小山幸則：ドーナツ型TBMの掘削に関する研究、土木学会第70回年次学術講演会、2015、Ⅲ-43、225-226
- 8) 株木康吉、武田光雄、小山幸則：ドーナツ型TBMの掘削に関する研究、土木学会第71回年次学術講演会、2016、Ⅵ-482、963-964
- 9) 古河ロックドリル株式会社：<http://www.Furukawarockdrill.co.jp/>
- 10) 株式会社三井三池製作所：<https://www.mitsumiike.co.jp/>
- 11) カヤク・ジャパン株式会社：<http://www.kayaku-japan.co.jp/about/about.html>
- 12) 日本キャタピラー合同会社：ダンプトラックカタログ
- 13) ㈱岐阜工業：全断面型スチールフォームカタログ、2019
- 14) トンネル設計技術資料：株式会社ロード・エンジニアリング

第2章 TBMの現状と課題

2.1 TBMの歴史と施工実績

2.1.1 TBMの歴史

トンネルは、太古の時代から造られてきた最も古い構造物と言われている。工事として行われたのは、B.C. 4000年にバビロンの古代都市にユーフラテス川の両岸を結ぶ河床トンネルが始まりとされている。このトンネルは、河床に溝を掘り、レンガでトンネルを構築し、土で埋め戻されたもので幅4m、高さ5m、延長1,500mに及ぶ開削トンネルであった。

シールド機の歴史は、イギリス産業革命後期の技術者 Brunel により、1818年トンネル用シールド工法として発明され、イギリスのテムズ川のトンネル工事（1826～1841年）で初めて使用された。そのシールド機は、高さ6.78m、幅11.43m、長さ2.74mの大型の矩形型手掘り式であった。現在のシールド工法の基礎になったのは、1896年にイギリスの J.Price によってメカニカルシールド機の特許が出願されてからである。

日本のシールド機の歴史は、1910年に初めて折渡トンネル（旧国鉄）に導入され、その後、1926年に丹那トンネルにも採用されたが中断されている。1932年には関門トンネルで直径7mのシールド機が採用され、無事完了した。戦争による中断から、1964年に初めて日本製メカニカルシールド機が開発された。1997年には、**図 2.1.1** に示す世界最大掘削径の $\phi 14\text{m}$ 級超大断面泥水式シールド機による東京湾横断道路トンネルが施工されるまでになった。



図 2.1.1 東京湾横断道路用 $\phi 14\text{m}$ 級シールド機¹⁾

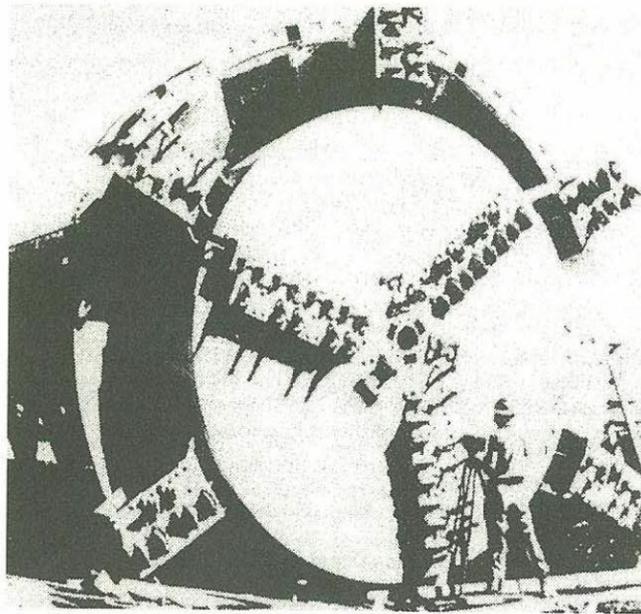


図 2.1.2 近代的TBM第1号機¹⁾

一方、硬岩用のTBMの歴史は、1846年に世界で初めてHenry Joseph（イタリア）によってロック・トンネル・マシンが考案された。しかし、実用化には至らず100年後の1952年にJ. S. Robbinsにより、掘削径 ϕ 8.0m、全長27.4mの大口徑TBMが考案された。その機構は、外周カッタと内周カッタが逆に廻る近代的TBMの第1号である（図2.1.2）。

日本の導入は、1964年に新居浜発電所導水路トンネル（276m）で小松製作所製のTBMが最初であった。その後、昭和40年代に約30件の施工が行われたが、長距離を本格的に掘削したのは香川用水阿讃導水路（水資源開発公団）や篠ノ井線第3白坂トンネル（旧国鉄）のわずか2現場に過ぎない。その他の工事は短距離の試験施工か、本格的に採用されても恵那山の避難坑工事や青函トンネルの先進導坑（ ϕ 3.6m硬軟岩両用の切削式）のように機械的故障や膨張性地山によるTBMの拘束などの理由により、途中で掘進を断念せざるを得なかった例が多かった。このような経験から、日本の地山にTBMが適さないという理由で1973年の青函トンネル以降採用が減少し、空白期間が続いた。2000年には、高速道路に世界最大級TBM（ ϕ 12.84m）による飛騨トンネルの施工が行われたが、低強度地山を克服できず中断を余儀なくされた（図2.1.3）。現在では、水路トンネルを中心として1年に1箇所程度の施工が行われているにすぎない¹⁾。



図 2.1.3 飛驒トンネルTBM (φ12.84m) ¹⁾

2.1.2 TBMの施工実績

我が国のTBMの掘進実績は、平均月進200~250m/月であるのに対して、欧州で約440m/月、米国で約650m/月となっている。また、最大月進では1993年に米国テキサス州で1,647m (φ4.6m)、1992年には中国において1,401m (φ5.5m)、および英仏海峡では1991年 (φ7.6m) にイギリス本坑トンネルで1,719mを記録している。最大日進では、米国ラスベガスで150mの実績があり、日本では1973年に東北新幹線第2有壁トンネルの導坑掘削 (φ4.5m) において、月進670m、日進62.2mが記録されたのが最高である。図2.1.4は、海外におけるTBMの直径と最大月進、最大日進の関係を示したものである ¹⁾。

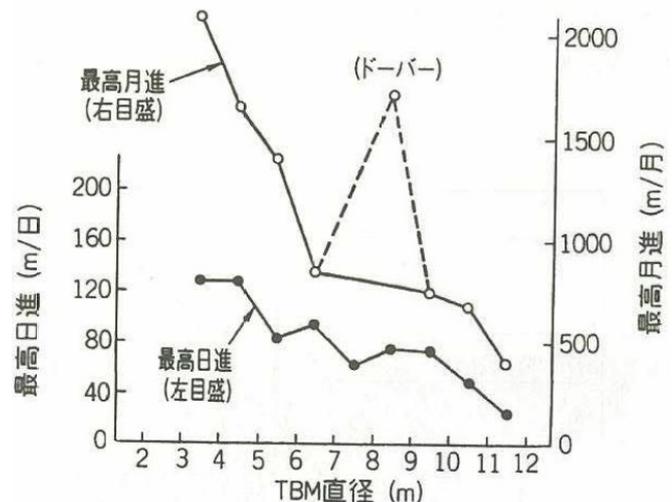


図 2.1.4 TBMの直径と
最高月進・最高日進 (ロビンス社) ¹⁾

また、TBMの稼働率（全作業時間に対する純掘削時間の割合）では海外で35～50%に対して、日本では20～30%程度である。実績には、初期掘進期間や低強度地山対応のための休止期間も含まれるが、日本と海外では大きな開きがある。

その理由として、海外では均一な安定した地質を長距離掘削することが多く、日本では地質が複雑で破碎帯での補助工法による長期休止が多いことが挙げられる。また、施工延長が短いことや作業体制が1日2シフトであるが、海外では3シフトの違いも影響している。表2.1.1に国内外の施工実績比較、表2.1.2にTBMの径別の掘進世界記録をそれぞれ示す¹⁾。

さらに、海外では高速施工のために連続ベルトコンベヤなど稼働率を上げる方策が行われているが、日本では低強度地山への対応のための技術開発がメインテーマになっている。取組み方の違いもあるが、最近は国土交通省においてICTの導入などによる生産性向上を官民一体となって進めている。

表 2.1.1 国内外の施工実績比較¹⁾

項目	国内実績 (主に1986年以降)	海外実績 (1990年以降)
施工延長	・平均2,500m	・平均6,000m
TBM径	・小中口径主体 ・近年大口径化の傾向	・中大口径主体 ・中口径が54%、大口径29%
用途	・水路、上下水道が主流 ・道路トンネル(本坑や避難坑、先進導坑)への適用増加	・水路、鉄道、道路への適用が多い
TBMタイプ	・シールド型TBMが75%	・オープン型TBMが60% ・特に米国はオープン主体
平均運行	・平均月進222m (L ₂ ≥2,000m 32例)	・平均月進516m (欧米 49例)
採用シフト	・2シフト制 10時間/1シフト	・2シフト制 40% ・3シフト制 46% ・2+/メンテナンスシフト14%
月当たり作業日	・平均作業日 24.4日 ・90%以上が23日以上作業	・平均作業日 24.8日 ・48%は22日作業 25%は30日作業
無普請以外の支保構造	・小口径はライナが多い	・小口径に吹付け・RB採用 ・小口径にRB多用 ・大口径はライナが多い
ズリ搬出方式	・流体輸送36%(特に小口径TBMの53%) ・近年、中口径で連続ベルコン採用例増加 ・小口径の16%でシャトルカーを採用	・本体排土は86%平ベルコン ・後方排土は67%が鉸車、20%が連続ベルコン、3%がタイヤ方式を採用

表 2.1.2 TBMの径別の掘進世界記録 (Robbins 資料)

TBM径別掘進世界記録

		最大日進	最大週進	最大月進	平均月進
φ 3.01～4.0m	記録	172.4m	703m	2066m	1189m/mo
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	カトゥーンバトンネル	カトゥーンバトンネル	オソトンネル	カトゥーンバトンネル
	国	オーストラリア	オーストラリア	アメリカ	オーストラリア
φ 4.01～5.0m	記録	128.0m	477.0m	1822m	1352m/mo
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	SSC No.4 テキサス	SSC No.4 テキサス	黄河トンネル4、5	黄河トンネル4、5
	国	アメリカ	アメリカ	中国	中国
φ 5.01～6.0m	記録	99.1m	562m	2163m	1095m
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	シカゴ小キヤルメット川	シカゴ小キヤルメット川	シカゴ小キヤルメット川	Yindaruqin
	国	アメリカ	アメリカ	アメリカ	中国
φ 6.01～7.0m	記録	124.7m	515.1m	1754m	1187m/mo
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	インディアナポリスDRT	インディアナポリスDRT	インディアナポリスDRT	ダラスメトロ
	国	アメリカ	アメリカ	アメリカ	アメリカ
φ 7.01～8.0m	記録	115.7m	428m	1482m	770m
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	カラウユカール 水力発電	カラウユカール 水力発電	TARP シカゴ	TARP シカゴ
	国	アイスランド	アイスランド	アメリカ	アメリカ
φ 8.01～9.0m	記録	75.5m	428m	1719m	873m/mo
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	Robbins
	プロジェクト	英仏海峡トンネル	英仏海峡トンネル	英仏海峡トンネル	英仏海峡トンネル
	国	イギリス	イギリス	イギリス	イギリス
φ 9.01～10.0m	記録	105.6m	435m	1600m	715m/mo
	メーカー	Herrenknecht	Herrenknecht	Herrenknecht	Herrenknecht
	プロジェクト	ラ・カブレラ	ラ・カブレラ	ラ・カブレラ	TARP シカゴ
	国	スペイン	スペイン	スペイン	アメリカ
φ 10.01～11.0m	記録	48.8m	235m	841.8m	-
	メーカー	Robbins	Robbins	Robbins	-
	プロジェクト	TARP シカゴ	西秦嶺トンネル	西秦嶺トンネル	-
	国	アメリカ	中国	中国	-
φ 11.01～13.0m	記録	49.7m	248.8m	787.8m	-
	メーカー	Herrenknecht	Herrenknecht	Herrenknecht	-
	プロジェクト	レガシーウェイ	レガシーウェイ	レガシーウェイ	-
	国	オーストラリア	オーストラリア	オーストラリア	-
φ 13.0m以上	記録	-	153m	468m	-
	メーカー	-	Robbins	Robbins	-
	プロジェクト	-	ナイアガラ	ナイアガラ	-
	国	-	カナダ	カナダ	-

2.1.3 TBM工法の特徴

1) TBM工法の長所

- ①掘削作業が連続的に行えるので施工速度が速く、工期の短縮が図れる。特に、安定した地山を長距離施工する場合にはこの特徴が顕著となる。
- ②発破のような大きな衝撃を与えずに地山を掘削できるため、岩盤の緩みがほとんど発生せず、崩落、肌落ちの危険が少ないため支保工が軽減できる。また、余堀が少なく覆工費も経済的となる。
- ③振動、騒音が少ないので、周辺の住民や構造物への影響が少ない。

④発破工法に比較して熟練作業員への依存度は低く、切羽での直接作業が少ないため、施工の安全性が高い。また、シールドや保護ルーフの装備、カッタヘッド内でのカッタ交換可能な構造、密閉式運転室、高性能集塵機などの採用により、安全性と作業環境の改善が図られている。

2) TBM工法の短所

- ①機械の購入費や運搬、組立、解体費が高く、また、機械の設計、製作のリードタイムが長い。そのため、施工延長の短いトンネルには適用しにくい。
- ②カッタの摩耗や破損などで寿命が短いことや、その交換のために掘削がストップするなど工期遅延にもなり費用も大きいものになる。
- ③施工途中での掘削径の変更ができない。また、オープン型は約±10%程度まで改造可能だが、シールド型はほぼ不可能である。
- ④発破工法に比較して適用地質に制約がある。

2.2 TBMの基本構造と種類

2.2.1 TBMの基本構造

TBMの基本構造は、掘進機とそれに牽引される動力源、制御装置などの後続設備から構成される（図 2.2.1）。

主な基本構成要素と各構成機器の機能については、表 2.2.1 に示すとおりである。

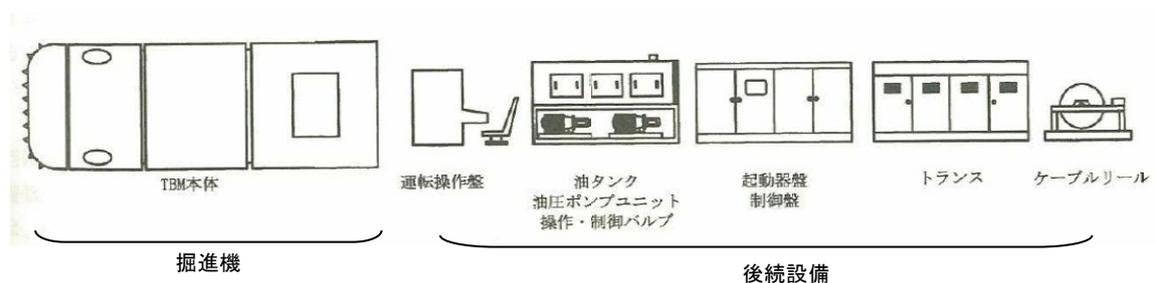


図 2.2.1 TBMの構成機器の配置概念図

表 2.2.1 TBMの構成要素と機能

構成要素	構成機器	機 能
掘削部	カッタ	岩を圧砕する刃物
	カッタヘッド	カッタ, スクレーパを取り付ける
駆動部	カッタヘッド支持ベアリング	カッタヘッドを支える
	カッタヘッド駆動装置	カッタヘッドを回転させる
推進部	スラストジャッキ	推進力を発生させる
	メインビーム胴体部	反力支持に対し, 伸縮させる
掘削反力支持部	グリッパ	坑壁に押し付け掘削反力を確保する
ズリ搬出部	スクレーパ	ズリをすくい込む
	ベルトコンベヤ	ズリを搬送する
動力源部	油圧ユニット 電気機器	動力を発生させ, 制御する

2.2.2 TBMの種類

TBMの種類としては、図 2.2.2 に示すようにTBMと言えば全断面型TBMを指すことになるが、他に数事例であるが発電所の水圧管路等の斜坑用に開発されたリーミング型TBMがあり、中心部を小口径で先行して掘削し、その後方から本坑を掘削する方式を取っている。

TBMの種類には、オープン型TBMとシールド型TBMがあり、昭和40年代に海外から最初に導入されたのがオープン型TBMである。しかし、我が国の複雑な地質条件、特に軟弱部に合わず、一時使われなくなった。その後、改良が行われ「ルーフサポート」の大型化や「ハーフシールド」付きにするなどの改良オープン型TBMで行われるようになった（図 2.2.3）¹⁾。

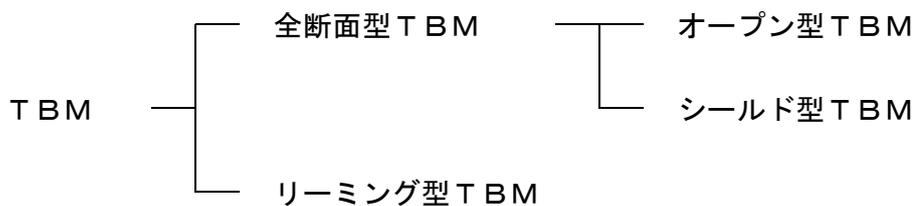
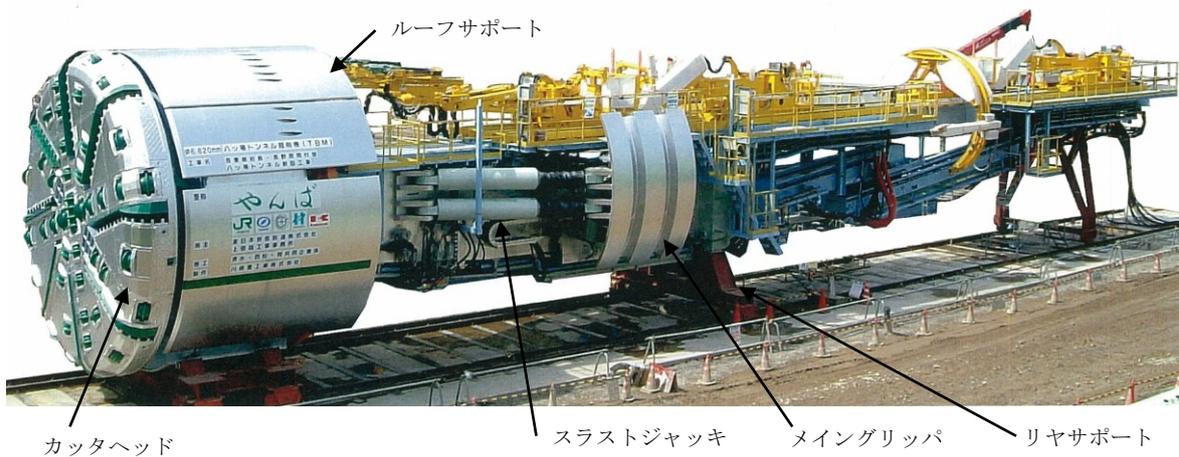
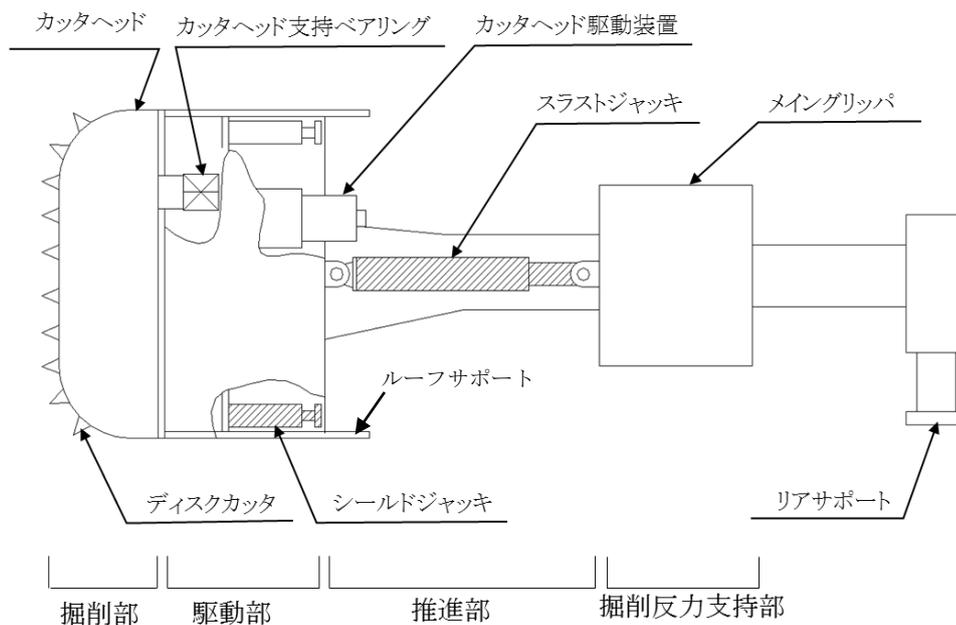


図 2.2.2
TBMの種類



出典:清水建設(株)提供

図 2.2.3 改良オープン型TBM¹⁾

シールド型TBMは、昭和60年代には我が国で改良された本体構造を完全にシールドで覆った日本独自の「シールド型TBM」が開発された。このタイプは、伸縮が可能な複動構造とするとともに、主推進ジャッキ（スラストジャッキ）の他に補助推進ジャッキ（シールドジャッキ）を装備している（図2.2.4）。この機能により、TBM適用地質の拡大が図られた。一方、欧米では押して回すだけのシンプル性を重んじ、また、地質の均一性もあり、オープン型TBMの単動構造が多く採用されている。表2.2.2にTBM型式別構造比較表を示す。

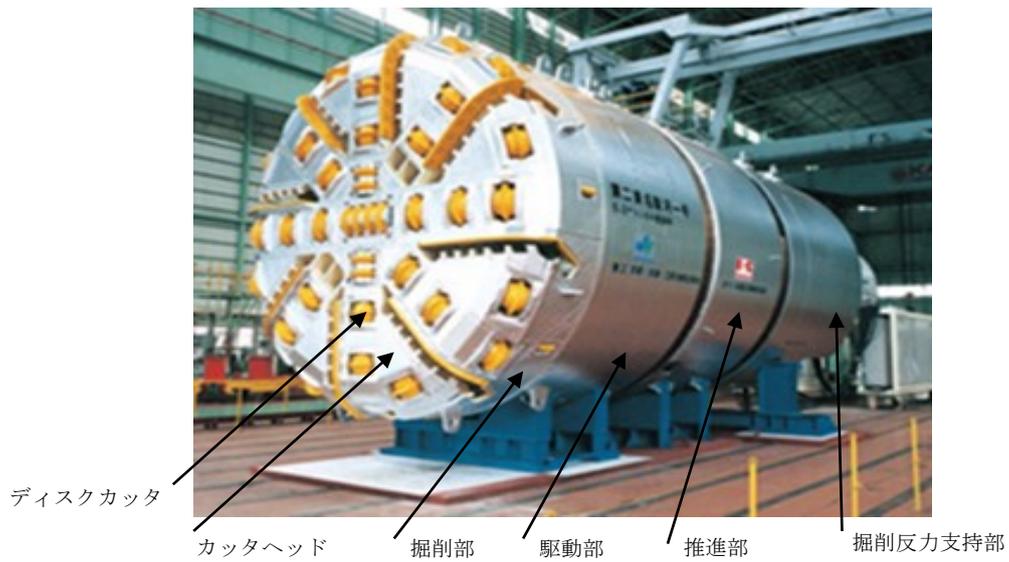
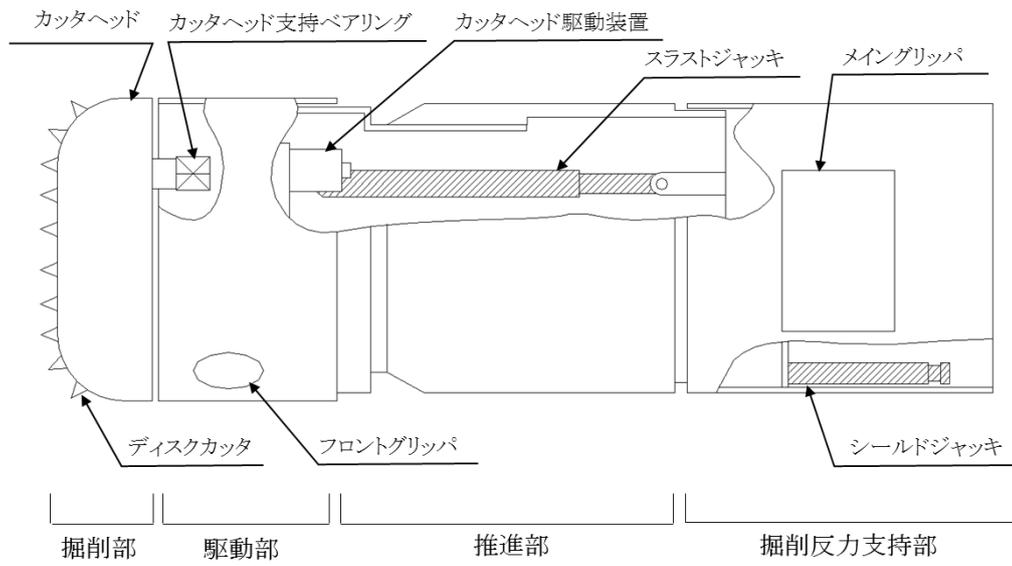


図 2.2.4 シールド型 TBM¹⁾

表 2.2.2 TBM型式別構造比較表¹⁾

TBM型式 項目	オープン型TBM		シールド型TBM
	オープン型TBM	改良オープン型TBM	
本体(外殻)	存在しない 駆動部の保護カバーに存在する。(ルーフサポート)	ライナが組立られる長さで存在する	機長全長に渡り存在するTBM本体構造物であり、複数の胴体から構成されている
カッタヘッド	フラット型 ドーム型	ドーム型	ドーム型
カッタ取付け	外取付け方式 内取付け方式	内取付け方式	内取付け方式
推進方式	スラストジャッキ + メイングリッパ	スラストジャッキ + メイングリッパ シールドジャッキ	スラストジャッキ + メイングリッパ シールドジャッキ
グリッパ形式	開放型(シングルグリッパ or ダブルグリッパ)		シールド内蔵型
方向制御	メインビーム制御		(スラストジャッキ、方向制御ジャッキ、フロントジャッキ)による制御
急曲線施工	真直ぐなメインビーム構造のためTBM本体が屈曲せずやや困難		胴体接合部の中折れ構造によりTBM本体が屈曲するため可能
本体排土方式	ベルトコンベヤ		ベルトコンベヤ スクリーコンベヤ ジェットポンプ
支保作業位置	ライナ以外の支保がルーフサポート部で可能 (メイングリッパ前方)	ライナを含めた支保がテールシェル部で可能 (メイングリッパ前方)	ライナを含めた支保がテールシェル部で可能 (メイングリッパ後方)
掘削径の変更	カッタヘッド、グリッパ等の改造により可能	カッタヘッド、グリッパ等に加え、シェル部の改造が必要でやや困難	シェル構造なので基本的には不可

2.2.3 TBMの岩盤破碎のメカニズム

ディスクカッタ（以下、カッタと呼ぶ）はTBMに装着された岩を圧砕する刃物の総称で、その岩盤破碎のメカニズムは、**図 2.2.5**に示すように各カッタが同心円状に回転しながら推進力（押付力）と旋回力（トルク）を受けて溝が掘られることにより、溝がある深さに達すると、カッタ間に亀裂が進展し隣接剥離破碎が生じることである（以下、溝掘りと呼ぶ）。福井ら²⁾は、「カッタ間隔の隣接剥離破碎は、カッタの間隔と貫入量に関係するが、カッタの1回の回転で常に生じるのではなく、貫入量がある深さに達した時点で生じる」と述べている。

これに対してカッタヘッドの中心部にあるセンターカッタは、谷本ら³⁾によるとカッタの内外周軌跡差により溝の幅が広がるような掘削形状（以下、幅掘りと

呼ぶ) になり、削り取られるような掘削となる。図 2.2.6 は、実機の同心円状に掘削された状況を示すもので、カッタ間の溝掘りによる隣接剥離破碎が行われているのが分かる。

掘削ブリの性状は、地山の亀裂状態や岩種によって異なるが、岩盤が硬くなるほど剥離岩片が薄くなる。一方、地山に亀裂の多い場合は、角ブロック状の岩片が多くなる。この場合の岩片の大きさは、地山の亀裂の状況によって異なり、10cm から数 10cm の大きさになることもある。風化の進んだ地山では、細粒分が増加し剥離岩片は減少する。

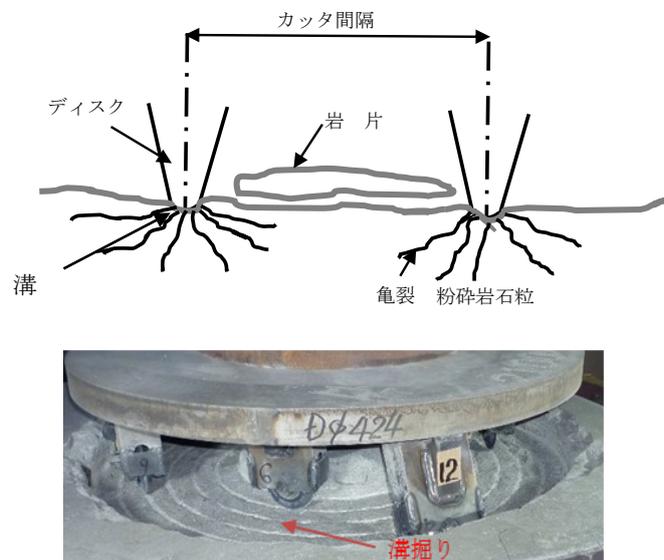


図 2.2.5 カッタの溝掘り・隣接剥離破碎

図 2.2.6
実機によるカッタ間の
隣接剥離破碎状況⁴⁾



2.2.4 カッタの種類

カッタの種類は、**図2.2.7**に示すように取り付ける位置により中心部から、センターカッタ、フェースカッタおよび外周部の外ゲージカッタから構成されている。

フェースカッタは、切羽面に垂直に配置され最も個数の多いカッタで、この配置間隔が岩盤を破碎する設計の基準となる。これに対して、外ゲージカッタは最外周側に配置され、掘進時にカッタヘッドが岩盤に当たらないように傾斜し突き出して配置される。センターカッタは、**図2.2.8**に示すように狭い中心部に配置されることから数個を連結した構造となる

また、実機ではすべてのカッタでカッタヘッドが岩盤に接触しないように 50mm 程度突き出した形で配置される。そのため、カッタが 15mm 程度摩耗するとカッタリングだけを交換し、ベアリングなど全体の交換は、取り付け位置でも異なるが、カッタリング 3~4 回に対して 1 回の割合を目安に行われている。カッタの内部構造を**図 2.2.9**に示す。

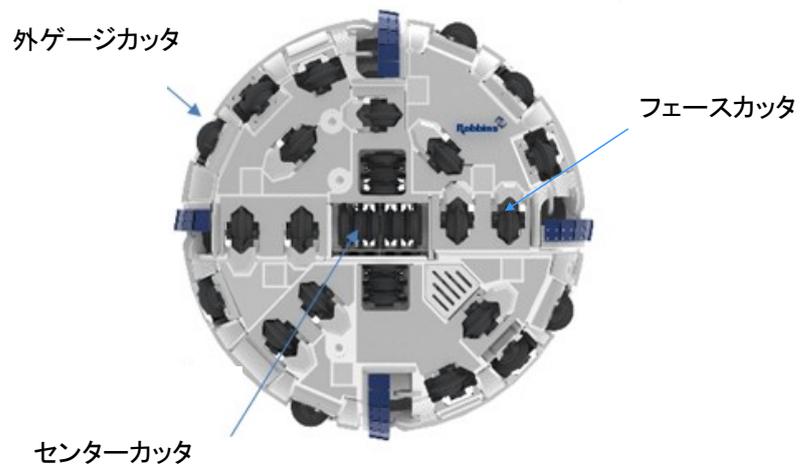


図 2.2.7 カッタの種類

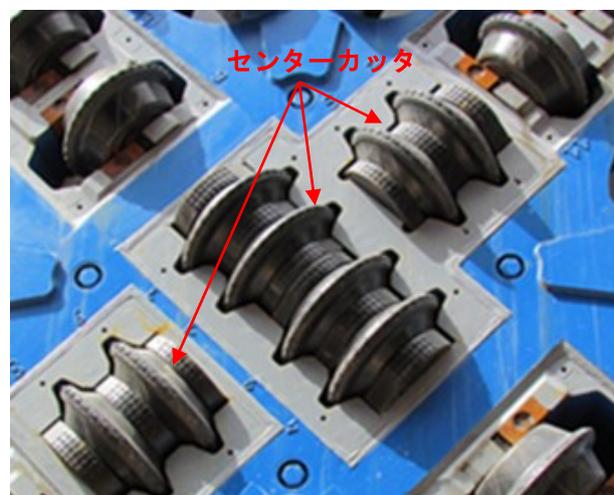


図 2.2.8 センターカッタ
の連結配置

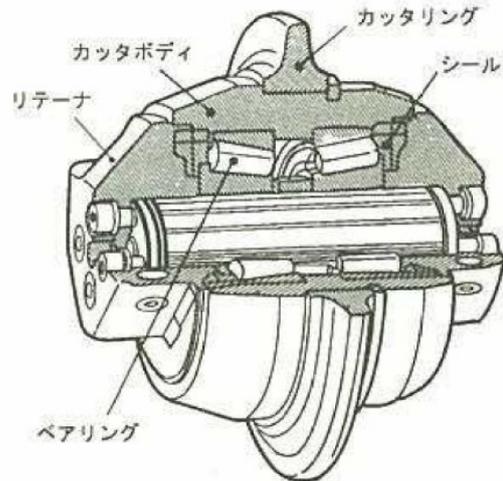
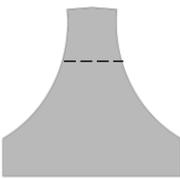
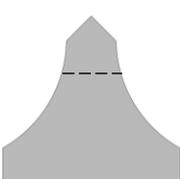
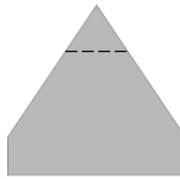


図 2.2.9 カッタの内部構造¹⁾

カッタの刃先形状は、一般的に多く採用されている平型カッタ、先端を鋭角にしたくさび型である(表 2.2.3)。カッタリングの材質には、SNCM(ニッケル、クロム、モリブデン鋼)のほか、耐摩耗用特殊カッタ(工具鋼系)などが使用されている。なお、カッタリング表面の硬度は、SNCMでHRC54~58、工具鋼系で56~62 となっている。

表 2.2.3 カッタリング形状の比較¹⁾

カッタ種類	形状	特徴
平型カッタ		カッタ新品時から摩耗交換時まで一定した刃先幅(貫入幅)を保つことができる。多くの岩種で使用される。
くさび型カッタA		亀裂の少ない硬岩や玉石混在岩などで使用されることがある。初期の切込性は良いが摩耗が早い。
くさび型カッタB		石灰岩や泥岩など摩耗の非常に少ない堆積岩が続く場合などに使用されることがある。

2.2.5 カッタの作用負荷

カッタへの作用負荷は、フェースカッタでは垂直荷重だけの負荷になるが、カッタヘッドの外周に近づくにつれて転動距離が長くなるため、摩耗量が増大する。センターカッタは、他のカッタより転動距離では短くなるが、中心付近で回転するため、カッタの刃に大きなねじりモーメントが作用することが指摘されている^{5), 6)}。最外周部に取り付けられる外ゲージカッタは、龔ら^{7), 8)}によると他のカッタと作用外力の方向が異なること、二次破碎を受ける部位であること、および取付け半径が大きいことなど転動距離が長いことなど摩耗量が増大することが指摘されている。

カッタピッチの設定は、TBMの性能と施工コストの上で重要となり、狭すぎるとカッタ装着数が増加し、イニシャルコストとカッタ消費量が増加し施工コストの増大や稼働率の低下を招くことになる。また、逆に広過ぎると、隣接剥離破碎が起きにくくなり掘削効率の極端な低下や過大荷重によるカッタベアリングの破損に繋がる。図2.2.10にカッタ間隔と岩盤の破碎形態を示す。

カッタヘッド回転速度は、TBMの掘進性能を決定する重要なファクタの一つで、カッタヘッド回転速度は最外周カッタの許容回転速度、カッタヘッド駆動部シールの許容周速、カッタヘッドバケットのズリ取り込み排出能力、カッタヘッドの振動などを考慮して設定する。このうち、カッタの許容周速は内部ベアリング寿命や発熱の影響などを考慮して決められる。カッタサイズごとの標準仕様は、表2.2.4に示すようにカッタ内部のベアリングやシールの耐久度などから許容荷重、許容周速などが設定されている¹⁾。

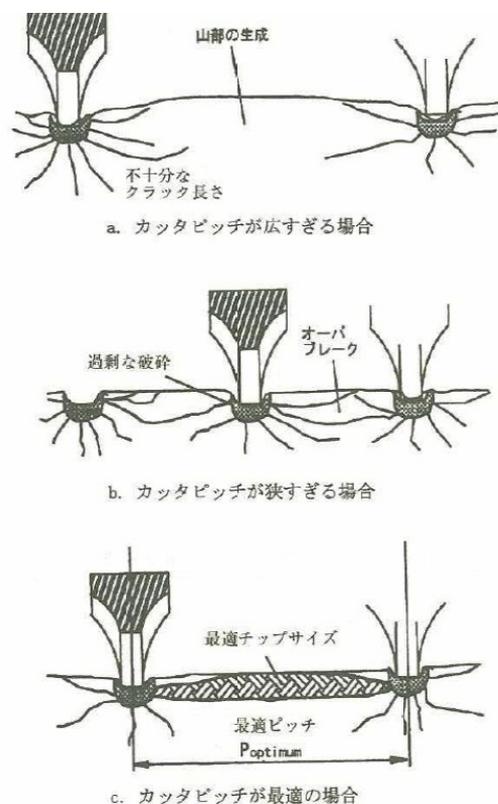


図 2.2.10 カッタ間隔と岩盤の破碎形態¹⁾

表 2.2.4 カッタサイズ毎の標準仕様¹⁾

カッタサイズ (カッタリング外径)	12インチ (305mm)	15.5インチ (394mm)	17インチ (432mm)	19インチ (483mm)
カッタ荷重 (kN)	125	176	216	314
許容周速 (m/min)	75	130	150	180
カッタピッチ (mm) (フェースカッタ)	65~75	75~85	80~90	90~100

2.2.6 TBMの純掘進速度、カッタ寿命

1) 純掘進速度

純掘進速度は、カッタ貫入量を用いて式 (2.1) で表わされる。

$$V_h = P_e \times N \times (60/100) \text{-----} (2.1)$$

V_h : 純掘進速度 (m/h)

P_e : カッタ貫入量 (cm/回)

N : カッタヘッド回転数 (回/min)

この式により純掘進速度は、カッタ貫入量とカッタヘッド回転速度に比例することと、カッタ仕様はTBMの掘進速度に直接影響する重要な要素であることが分かる。施工実績をまとめた例として、**図 2.2.12** に圧縮強度と純掘進速度の関係、**図 2.2.13** に岩盤等級別の純掘削速度をそれぞれ示す¹⁾。

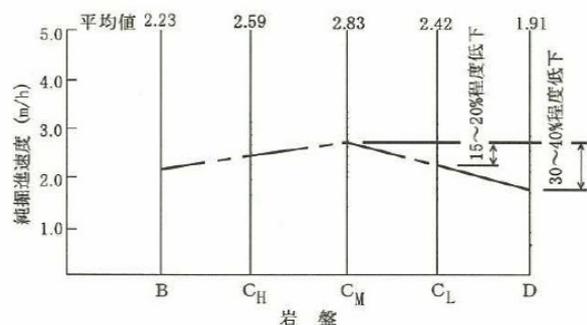
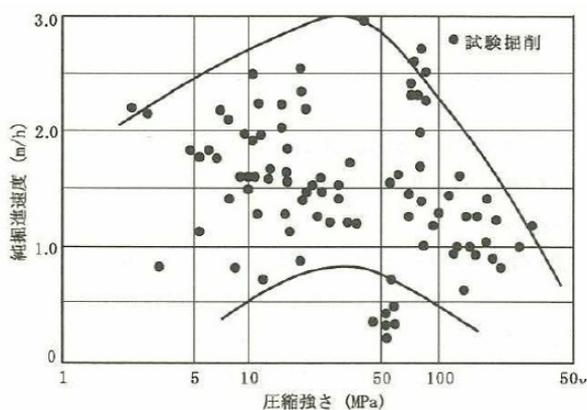


図 2.2.12 純掘進速度実績と圧縮強度の関係

図 2.2.13 純掘進速度実績と岩盤等級の関係

2) カッタ寿命

TBMは、摩耗や破損により消耗したカッタ（カッタリング、カッタボディ）を適宜交換しながら掘進する機構であり、カッタ寿命（カッタを交換するまでの寿命）がTBM施工費の中で大きなウェイトを占める。それは、カッタ寿命が短いとカッタ交換回数が増え、稼働率の低下に繋がり、掘進速度にも影響を及ぼすことになる。

カッタ消費量の求め方は、等級別純掘進速度の推定方法から1回転当たりのカッタ貫入量を求め、純掘進速度（m/h）、カッタリングの摩耗限界転送距離（カッタ寿命）（km）よりカッタ消費量（m³/個）を求める。カッタ貫入量、カッタ寿命の推定方法は、国内外の研究機関、メーカーで異なっており統一されたものではなく、その一例を表2.2.5に示す¹⁾。

カッタの交換は、一つのカッタが機能しなくなると周辺カッタに負担がかかるため、カッタリングなどの摩耗量を定期的に測定し管理する必要がある。交換する摩耗量の目安として、概ね10～15mmの摩耗で交換するのが一般的である。15～17インチのカッタで使用するカッタリングの交換基準摩耗量の参考値を表2.2.6に示す。

表 2.2.5 カッタ消費量の設定例

等級	カッタ寿命 (km)	貫入量 (mm/rev)	純掘進速度 (m/h)	カッタ消費量 (m ³ /個)
B	400	4	2.2	120
C	400	6	3.2	180
D	700	10	5.4	500

表 2.2.6 カッタリング交換基準の摩耗量

配置位置	基準値 (mm)	許容値 (mm)
センターカッタ	15	±3
フェースカッタ	15	±3
ゲージカッタ	10	-3

2.3 TBMの機能および掘削実験における既往研究

TBMにおける岩石掘削に関する研究は、最近ではTBMの施工が減少していることもあり少なくなっている。多くは、官民によって1970年頃から2000年頃に多くの成果が発表されている。本研究と関係する機能や掘削実験における既往研究について、掘削実験機、貫入量、ゲージカッタ、センターカッタ、比エネルギーおよびカッタ摩耗量など分けて概説する。

2.3.1 掘削実験機の研究

(1) 高岡ら「ロータリーカッタによる岩石破碎に関する研究」⁹⁾

この研究の実験装置は、実現場とは逆にディスクカッタが移動せず岩石の方が移動する。ディスクカッタへの押付力は、圧縮空気により供試岩石面上に押し付けられる。台上に固定された供試岩石は、減速電動機により送りネジを回転することで所定の速度で移動する。この動作で、岩石表面にディスクカッタによる破砕溝が作成される。図2.3.1に実験装置、ディスクカッタの略図を示す。

実験目的は、ディスクカッタによる岩石破碎の基礎実験として、単一のディスクカッタにより岩石面上に直線状の破砕部を作成する実験を行い、岩石の破碎抵抗、カッタとの摩擦力および岩石破砕部の形状等を計測するために実験された。

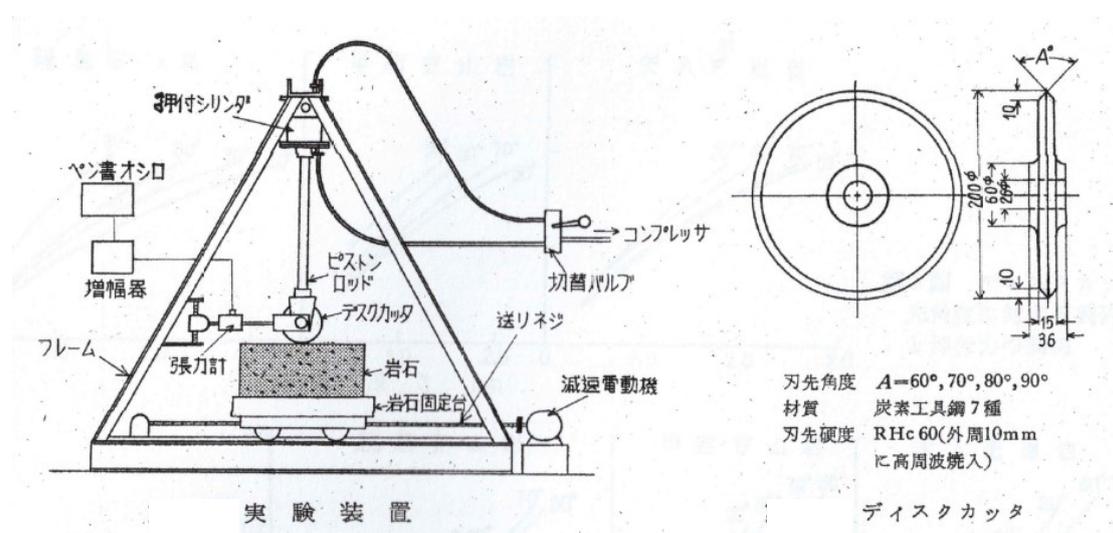
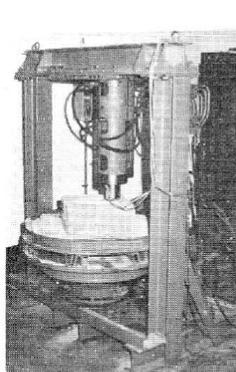


図 2.3.1 実験装置、ディスクカッタの略図

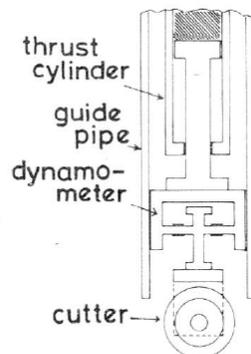
(2) 西松ら「ローラカッタによる岩石掘削に関する研究」¹⁰⁾

岩石掘削実験は、従来からディスクカッタ（ローラカッタ）を直線的に移動させる装置が用いられていた。この装置は、**図 2.3.2** にその主要部分を示すようにカッタを固定して、試料岩石を回転させる形式のものを用いた。使用したディスクカッタは、**図 2.3.3** にその形状・寸法を示すとおりである。

目的は、実際のトンネル掘進機の場合と同様にリング状の掘削溝を掘削する（回転掘削）場合について、単一のディスクカッタを用いて、その掘削抵抗や比エネルギーに推力や回転半径がどのような影響を及ぼすかを明らかにするために実験が行われた。



第1図 実験装置の主要部分



第2図 ダイナモメータの配置

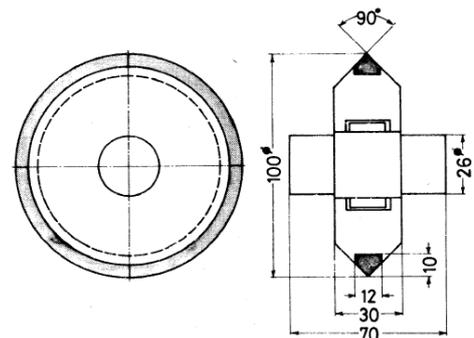


図 2.3.3 ディスクカッタφ100mm 形状

a) ただし24個の刃先ピッチのうち1個のみは9.2mmにして、くり返し圧入の場合、刃先の圧入位置が変化するようにしてある。

図 2.3.2 実験装置と模式図

(3) 西岳 茂「岩盤中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究」⁵⁾

この掘削装置は、**図 2.3.4** に示すようにディスクカッタを回転させ、モルタル供試体を固定する方式を取っている。実験の目的は、実際のセンターカッタでは2個、3個と連結して使用されているので、それらの特質も比較分析し、岩盤との力の相互作用を明確にするために行われた。

図 2.3.5 に実験状況を示す。

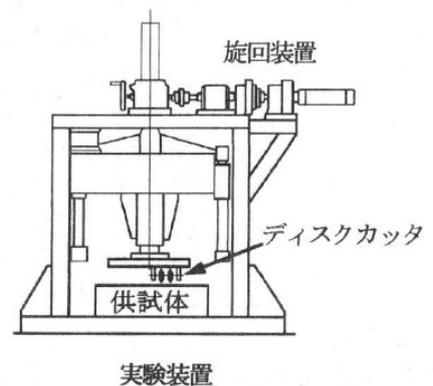


図 2.3.4 実験装置

2.3.2 貫入量の研究

(1) 西松ら「ローラカッタによる岩石掘削に関する研究」¹⁰⁾

リング状の掘削溝を掘削する（回転掘削）実験によって、同一の掘削溝を何回も繰り返して掘削する場合の貫入量 Δd と掘削抵抗 P_x の変化を測定した。図2.3.7に示すとおり、1回転ごとの貫入量の増分は回転数の増加とともに増加し続けることが分かる。これに対して、掘削抵抗は2回目以後急激に減少し、4回目以後はほぼ一定値を取ることが分かる。このことにより、掘進機の設計に際しては、カッタ間隔を適当に選んで、毎回あるいは2~3回の圧入によって、隣り合った掘削溝が連結して、新しい自由面が形成されるようにすることが重要であることを実験で明らかにした。

(2) 福井ら「TBMの仕様と掘削抵抗の関連について」²⁾

カッタ間隔と貫入量の関係について、カッタ間隔を大きく取りすぎると何度か同じ場所を通過した後、やっと隣接溝と連結するので、能率が悪く掘進速度が減少してしまう。逆に、カッタ間隔が小さい場合には、隣接溝との連結は、一度カッタが通過すると直ちに生じるが、隣接溝との間隔が短いので能率が悪い。そのため、カッタ間隔には適当な範囲が存在すると指摘されている。また、一度のカ

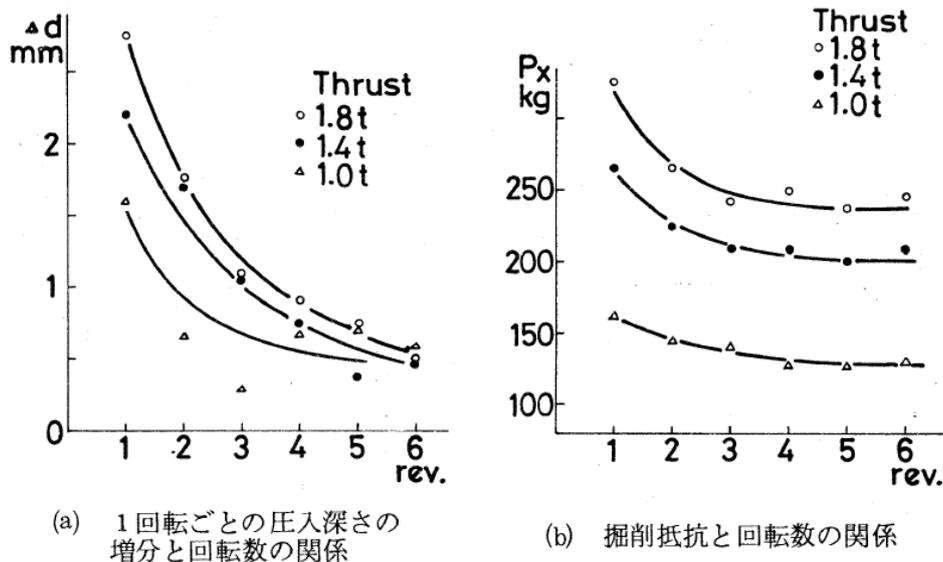


図 2.3.7 繰り返し掘削の効果（回転半径 8cm）

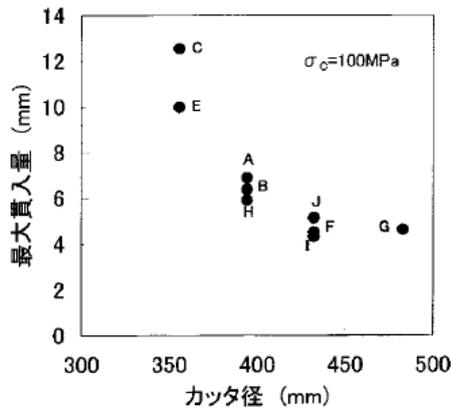


図 2.3.8 カッタ径による最大貫入量の変化。岩盤強度を 100MPa とした場合

図 2.3.8 カッタ径と貫入量の関係

ッタ（カッタヘッド 1 回転）の通過では隣接溝との連結が生じることはまれである。そのことは、カッタ数を減らしてカッタ間隔を大きくした方が、TBM の推力を小さくできることになる。また、岩盤強度 100MPa の切羽に各カッタ許容最大荷重で貫入したとき、カッタ径の小さい方が大きい貫入量になることが分かる（図 2.3.8）。

2.3.3 ゲージカッタの研究

(1) 龔ら「TBMゲージカッタに作用する切削抵抗の抑制方法について」^{7), 8)}

カッタヘッド周縁部に取り付けられるゲージカッタは、掘進面に立てた垂直面に対し、刃先円周を含む面が角度 α だけ傾斜して圧入される（図 2.3.9）。

ゲージカッタや外周部の傾斜カッタは、推力、回転力、横方向力がセンターカッタやフェースカッタに比べて大きくなり、さらに推力軸まわりに力のモーメント作用を受けることになる。

ゲージカッタの寿命は、ディスクの摩耗、破損か、あるいは軸受の破損のいずれかによる。

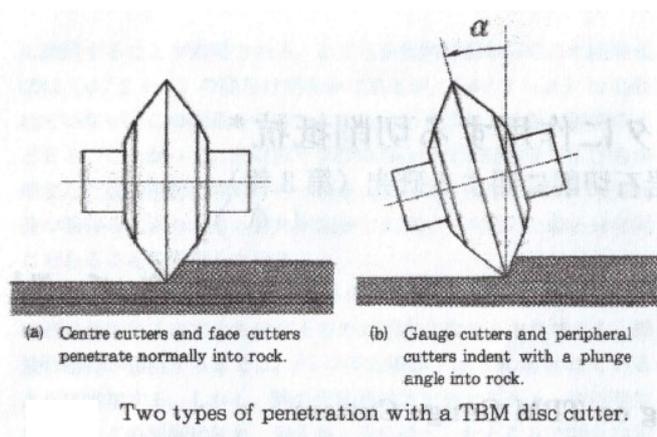


図 2.3.9 フェースカッタ (a)、ゲージカッタ (b)

構造上からは、中央部のスラスト軸受が破損する可能性が高い。寿命を延伸するためには、軸受のボールベアリングの負担を軽減することが有効であることを実験で明らかにした。

(2) Francisco J, M. 「Hard Rock Tunnel Boring Performance Predictions and Cutter Life Assessments」¹²⁾

実現場のデータから、センターカッタとゲージカッタおよびフェースカッタの寿命を調査した。図 2.3.10 は、横軸に相対カッタ位置、縦軸に相対カッタ寿命を表わしている。その結果から、作用負荷の大きいセンターカッタとゲージカッタは、フェースカッタよりも寿命が短いことを現場実績から明らかにした。

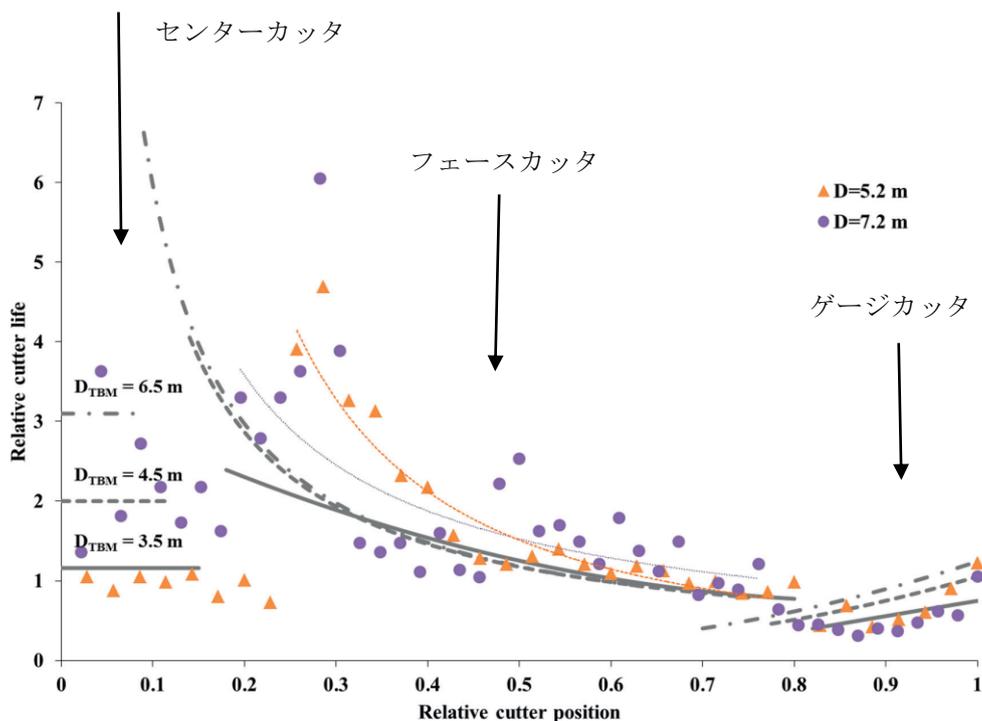


図 2.3.10 実現場の TBM 別のカッタ交換曲線(カッタの寿命実績)

2.3.4 センターカッタの研究

(1) 谷本ら「TBM 施工におけるディスクカッタの摩耗と岩石の物性に関する研究」³⁾

実現場のカッタの摩耗量の調査から、センターカッタにおいて一部が破損して、偏摩耗が生じたために平均摩耗量の 4 倍以上になり、交換基準値に達せずに交換

が強いられていた。その理由として、図 2.3.11 にカッタの回転半径と軌跡幅の関係を示すように、回転半径が小さいカッタほど軌跡幅が大きくなり、貫入量が大きいほど顕著になることを明らかにした。実現場の TBM 施工においては、回転半径が小さいほど軌跡幅が大きくなり、中心部ほどカッタに大きな半径方向の負荷がかかると考えられ、硬質な地山を掘進する際にはカッタの欠けが多く生じると推察される。

なお、軌跡幅とはカッタの軌道による内外周の軌跡差による削り幅を言う。

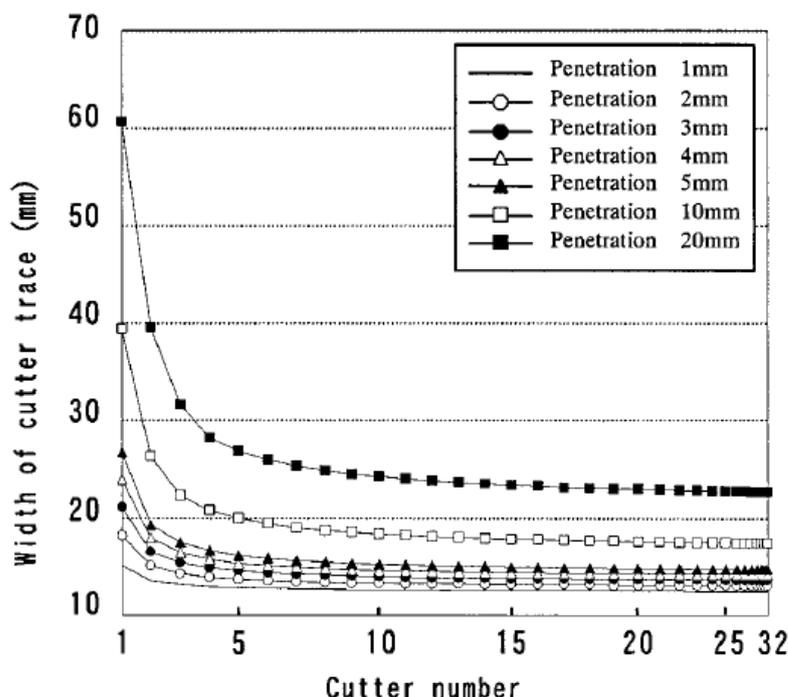


図 2.3.11 カッタの回転半径と軌跡幅の関係

(2) 西岳 茂「岩盤中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究」⁵⁾

ディスクカッタは、取り付け半径により、寿命が大幅に異なることが知られている。特に TBM 中心部に装備されるディスクカッタは、異なった荷重が作用し、寿命低下の要因となっている。研究では、ディスクカッタの取り付け位置による作用荷重の解明と、ディスクカッタの構造の最適化を目的として実験が行われた。実験では、疑似岩盤により実験条件の統一性を計り、ディスクカッタへの作用力

を説明した。また、独立回転ディスクカッタは、3枚刃一体回転構造に対して、掘削効率面での優位性がある

ことを説明した。

各切り込み（貫入量）条件値に対応する、各種計測値の結果を以下に示す。

＜切り込みとトルクの関係（図2.3.12）＞

- ・岩盤の圧縮強度が高い方がトルクも大きい

- ・回転半径にトルクは依存しない

＜切り込みとねじりモーメントの関係（図2.3.13）＞

- ・岩盤の圧縮強度が高い方がねじりモーメントが大きい

- ・回転半径が小さい方がねじりモーメントが大きい

＜切り込みと押付力の関係（図2.3.14）＞

- ・岩盤の圧縮強度が高い方が押付力が大きい

- ・切り込みが大きくなっても押付力は一定以上増大しない。

- ・回転半径に押付力は依存しない

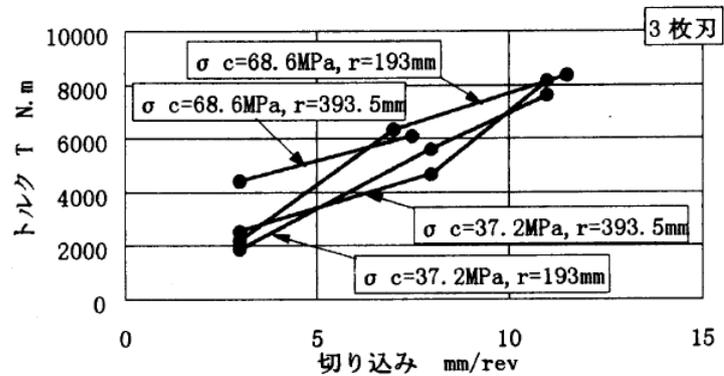


図 2.3.12 3枚刃における切り込みとトルクの関係

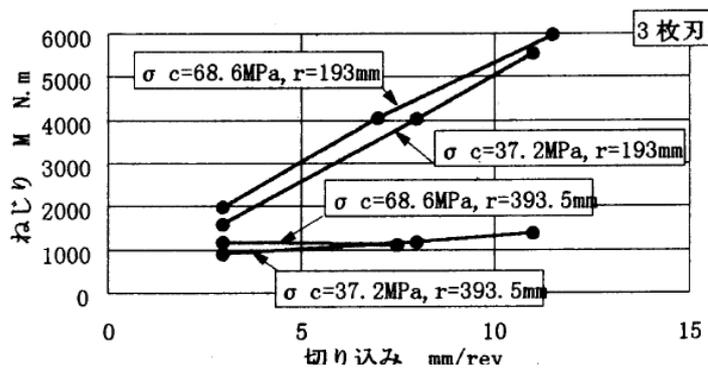


図 2.3.13 3枚刃における切り込みとねじりモーメントの関係

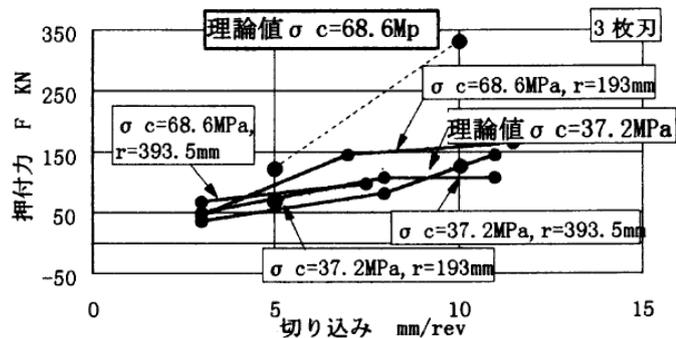


図 2.3.14 3枚刃における切り込みと押付力の関係

(4) 西松ら「ローラカッタによる岩石掘削に関する研究」¹⁰⁾

実現場のトンネル掘進機の場合と同様に、リング状の掘削溝を掘削する(回転掘削)場合について、単一のローラカッタ(ディスクカッタ)を用いて、その掘削抵抗や比エネルギーに推力や回転半径がどのような影響をおよぼすかを明らかにするために実験を行った。

図 2.3.14 は、掘削溝断面積に及ぼす回転半径の影響を示したものである。これから、回転半径の増加とともに、掘削溝断面積が減少することが分かる。軌跡幅は、回転半径が大きくなると狭くなることを明らかにした。

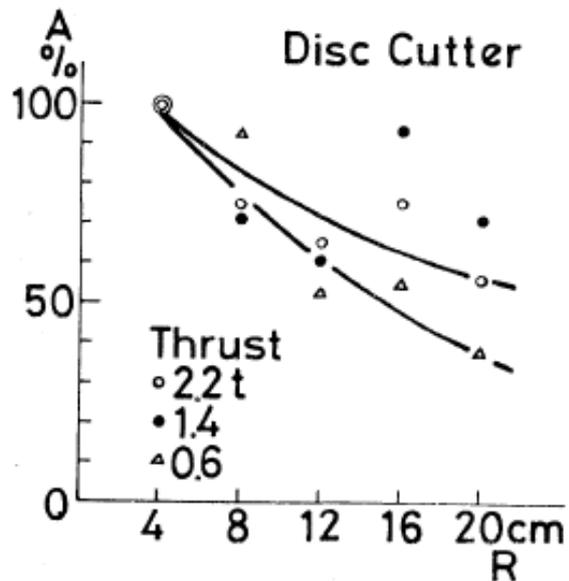


図 2.3.14 掘削溝断面積に及ぼす回転半径の影響

2.3.5 比エネルギーの研究

(1) 城間ら「TBM機械データを用いた支保パターン選定に関する一考察」¹³⁾

計5つのTBMトンネル(清水第三・富士川・栗東・城端・袴腰)のデータを用いて、機械データすなわち比エネルギーと支保パターンの相関性を調べ、比エネルギーを用いた支保パターン選定方法の技術的可能性と標準化のための課題を検討した。

比エネルギーとは式(2.2)に示すように、掘削に要する総エネルギーを掘削体積で除したもので定義される。総エネルギーは、カッターフェイスを岩盤に押しえつけるスラスト系エネルギーとカッターフェイスを回転させる回転系エネルギーを加算したものである。

$$\begin{aligned} \text{掘削体積比エネルギー (Et)} &= \text{総エネルギー (スラスト系+回転系)} / \text{掘削体積} \\ &= (F \cdot V \cdot S + T \cdot N \cdot S) / (A \cdot V \cdot S) \quad \text{----- (2.2)} \end{aligned}$$

(F:スラスト推進力、V:掘進速度、S:掘削時間、T:トルク、N:回転速度、A:掘削断面積)

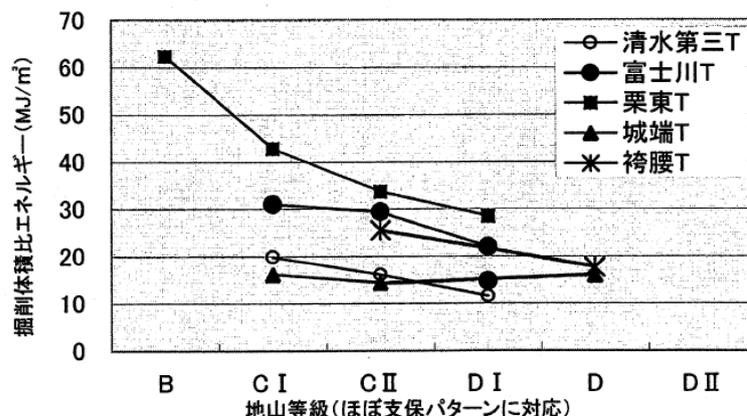


図 2.3.15 地山分類と比エネルギー

図 2.3.15 は、5 現場の地山分類と比エネルギーの関係を現わしたもので、トンネルを横断的に見ると、地山等級が同等でも比エネルギーおよび支保パターンが各トンネルでかなり異なっている。たとえば、同じ C I 分類でも、比エネルギーは 16～43MJ/m³までの範囲を示している。この結果より、現時点では比エネルギーによる標準地山分類、標準支保パターンを決めるのは困難なことが分かる。

(2) 水上ら「掘削エネルギー解析システムを用いた TBM 掘削」¹⁴⁾

TBM では切羽面が目視できないことなどから、低強度地山に遭遇すると判断が遅れるなどで長期間の掘進停止による最大の利点である高速施工ができなくなる問題が生じている。そのため、掘削後速やかに支保することで地山を安定させるために、早期に、より適切な支保パターンの選定手法を確立することを目的に、比エネルギーと地山評価との相関性について検討した。

比エネルギーの値は、以下の式より算出する。

$$E = \{(F - F_0) \times L + 2\pi \times (T - T_0) \times N\} / V$$

E: 掘削体積比エネルギー (MJ/m³)

F: スラスト推力 (N)

F₀: スラスト推力の初期値 (N)

T: カッタトルク (N・m)

T₀: カッタトルクの初期値 (N・m)

N: カッタヘッドの回転数

N: 1 分当たりの回転数 (rpm)

表 2.3.1 比エネルギーと支保パターンの関係

掘削エネルギー(MJ/m ²)	支保パターン	判別率 (%)
$E \geq 49.37$	B	78.8
$49.37 > E \geq 38.59$	C I	70.6
$38.59 > E \geq 29.51$	C II	60.2
$29.51 > E$	D I	

V:掘削体積(m³)

L:1 ストローク当たりの掘進長(m)

表 2.3.1 は、比エネルギーと支保パターンの関係を示し、地山評価の判別率は度数が 100%に近いほど信頼度が高くなり、度数が 50%以下となった場合には信頼性が無いことになる。今後は、判別の一つの指標とするには、他のデータとの組み合わせることにより十分有効と考えられる。また、どの程度の判別率であれば正確な判定ができるか、十分な検討が必要であると思われる。

2.3.6 カッタ摩耗量の研究

(1) 小泉ら「TBM施工におけるディスクカッタの摩耗と二次破碎」¹⁵⁾

ディスクカッタの過剰摩耗は、新規カッタの購入および交換を必要とするため、施工全体の工費および工程に重大な影響を及ぼすことから、掘削対象となる地山の岩石物性を室内で試験し、地質調査段階において、TBM施工におけるディスクカッタの摩耗量を適切に予測することを目的とした研究が数多くなされてきた。

我が国では、三沢ら¹⁶⁾により岩石の石英含有率、土木学会岩盤力学委員会により岩石の引張強度、石英含有率、岩盤に内在する亀裂、岩種の差異がディスクカッタの摩耗に影響を及ぼすことを示した。

海外では、主だったものとして、Cerchar 摩耗能指数(CAI)、摩耗能指数(F value)、トータルハードネス (Total Hardness)、カッターライフ指数 (CLI)、修正摩耗能指数 (Modified F value) が挙げられる。各指標の概要を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 ディスクカッタの消費量の予測のために提案された指標

発案者・発案機関, 発案年	指標名	指標の定義式	定義式により表される指標の物理的意味
フランス国立石炭研究所 ⁶⁾ (Cerchar), 1964	Cerchar摩耗能指数 (CAI)	$CAI = D \times 10$ D: 摩耗試験により平坦となった鋼製ピン先端部の直径 (mm)	岩石の摩耗能
Schimazek&Knatz ⁷⁾ , 1970	摩耗能指数 (F)	$F = 1/100 \times EQC \times dQ_z \times S_1$ EQC: 等価石英含有率 (%) dQ_z : 石英粒子の平均粒径 (mm) S_1 : 圧裂引張強度 (MPa)	引掻き硬度の高い鉱物の含有率とその粒子径および岩石の引張強度の積
Tarkoy, P.J. ⁸⁾ , 1975	トータルハードネス (H_T)	$H_T = H_R \times (H_A)^{0.5}$ H_R : シュミットハンマー反撥硬度 H_A : Taber摩耗硬度 (1/g)	岩石の反撥硬度と摩耗硬度の0.5乗の積
ノルウェー技術研究所 ⁹⁾ (Norwegian Institute of technology), 1980~1983	カッターライフ指数 (CLI)	$CLI = 13.84 \times (SJ / AVS)^{0.3847}$ SJ: SieverのJ値 (mm) AVS: アブラシオン値 (mg)	岩石の押込硬度と岩石粉の摩耗能の比に基づく関数
Ewendt, G. ¹⁰⁾ , 1989	修正摩耗能指数 (F_{mod})	$F_{mod} = 1/100 \times EQC \times (dQ_z (\varphi \geq 1mm))^{0.5} \times I_{550}$ EQC: 等価石英含有率 (%) $dQ_z (\varphi \geq 1mm)$: 1mm以上の石英平均粒子径 (mm) I_{550} : 点載荷強度指数 (MPa)	引掻き硬度の高い鉱物の含有率とその粒子径の0.5乗および岩石の引張強度の積

本研究は、TBM施工におけるディスクカッタの総摩耗量を、一次破碎摩耗と切羽とカッタヘッドの間にたまった掘削ズリの再破碎を意味する二次破碎摩耗との総和として考え、一次破碎摩耗量および二次破碎摩耗率（二次破碎に起因する摩耗量が総摩耗量に占める割合）なる指標を新たに提案した。

表 2.3.3 に示すように、4つの施工事例で提案した2つ指標を適用した結果、二次破碎がディスクカッタの摩耗に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。

表 2.3.3 分析対象とした13区間の岩種、主な実施支保区分、二次破碎摩耗率

	T.D.(m)	区間長(m)	岩種	主な実施支保区分	二次破碎摩耗率※(%)	
					区間平均値	範囲
A-1	0 ~ 780	780	頁岩・砂岩	CI-T	27.8 (16.3)	10~60 (10~20)
A-2	780 ~ 1740	960	硬質砂岩	CI-T	14.4	10~20
A-3	1740 ~ 2536	796	頁岩・砂岩	CI-T	14.5	10~20
B-1	0 ~ 1450	1450	花崗岩	DI-T	37.8	25~55
B-2	1450 ~ 2050	600	花崗岩	CII-T	42.1	35~55
B-3	2050 ~ 3080	1030	花崗岩	B-T~CI-T	41.4	20~60
B-4	3080 ~ 3457	377	花崗岩	DI-T	57.1	50~80
C-1	0 ~ 960	960	溶結凝灰岩	CI-T~CII-T	27.5	20~35
C-2	960 ~ 1880	920	花崗斑岩	CII-T	35.7	25~55
C-3	1880 ~ 2786	906	花崗斑岩	DI-T	34.1	20~45
D-1	0 ~ 1220	1220	花崗岩	CI-T	25.3	20~30
D-2	1220 ~ 1925	705	花崗岩	CII-T~DI-T	22.0	20~30
D-3	1925 ~ 3559	1634	砂岩・泥岩	B-T~DI-T	11.7	35以下

※A-1区間の()内数字は、TBM掘進後の290mを除いたときの値である。

(2) 西澤ら「ディスクカッタの摩耗特性と寿命向上法」⁶⁾

TBMに用いられるディスクカッタの寿命向上を目的として、実機における摩耗特性の解明、摩耗モデルの構築ならびに寿命向上策の提案を行った。実機のディスクカッタ摩耗調査より、カッタヘッド上の軌道半径によってディスクカッタの寿命は大きく異なり、内周部のカッタは極端に寿命が短くなることが明らかとなった。またカッタは必ずしも左右対称には摩耗せず、その摩耗形態は軌道半径によって異なることも判明した。

図2.3.16は、その実機でのカッタ軌道半径と単位摩耗量当たりの転送距離の関係を求めた結果を示したものである。A、B両現場とも、カッタヘッド中ほどより内側（最大掘削半径の約60%以下）のカッタについては、滑りに基づく計算値と実測データとはよく一致しており、カッタの摩耗がカッタと岩石との間の相対的な滑りを主要因として生じているという考えを支持している。

一方外周側のカッタでは、計算値は外周へいくほど大きくなっているのに対して、実際の寿命は逆に減少しており、計算値と実測値とが逆の傾向を示している。その要因として、外周部へいくほどカッタ摩耗の主要因が滑りからズリの二次破砕に移行しているものと考えられる。

また、内周部のディスクカッタの摩耗は、すべりに起因している可能性が高いため、図2.3.17に示すように、カッタヘッド上でのディスクカッタ中心軸取付位

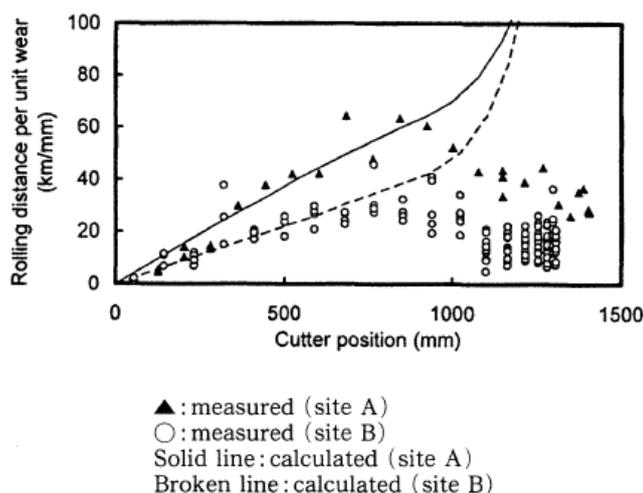


図 2.3.16 軌道半径と単位摩耗量当たりの転送距離の測定値と計算値の比較

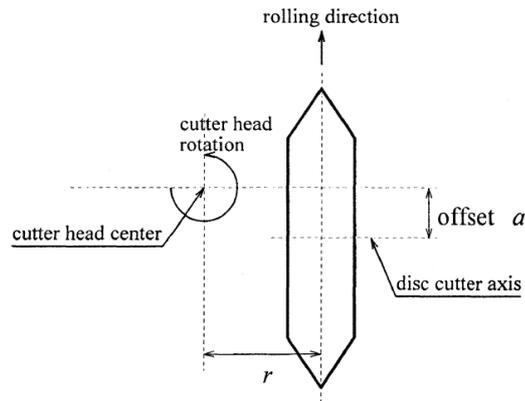


図 2.3.17 カッタのオフセット位置

置を、そのカッタ刃先を含む平面内で進行方向後方に平行にずらす(オフセットする)寿命向上策を試算した。A、B現場において、オフセットした場合の単位摩耗量当たりの転走距離、すなわち寿命は、オフセットしない場合より大きくなっており、オフセットが寿命向上に有効であることを明らかにした。

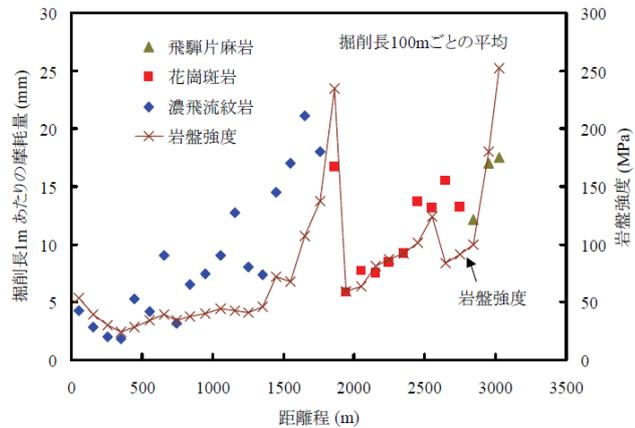
(3) 福井ら「飛騨トンネル本坑におけるTBMのディスクカッタの摩耗に関する研究」¹⁷⁾

ディスクカッタの摩耗は、カッタ外縁が掘削に伴い徐々に摩耗していく通常摩耗の他に、部分的に摩耗して使用不能となる偏摩耗、割れや欠けによる破損およびハブの損傷などがある。

研究では、TBMのカッタヘッド回転数などの運転操作状況や岩盤強度と、カッタ摩耗量との関係について検討し、同一岩種における摩耗量は、岩盤強度やカッタヘッド回転数(掘削長1m当たり)にほぼ比例することを示した。さらに、岩石の摩耗能を測定するために旋削試験を実施し、岩盤強度やカッタヘッド回転数に、旋削試験におけるチップ摩耗長を乗じることでカッタ摩耗量を推定できることを示した。

飛騨トンネル本坑の実績データから、岩盤強度およびカッタ摩耗量と距離程の関係について図2.3.17に示す。図では、最初3mmから5mm程度であった摩耗量が徐々に増加し、距離程1,800m付近では20mmであった。濃飛流紋岩から花崗岩になると、2,000m付近で摩耗量は急激に低下し、2,000mを過ぎると再度、摩耗量の増加がみられた。2,800m付近では摩耗量は15mmであり、飛騨片麻岩に入ってもほぼ同様であった。また、岩盤強度とカッタ摩耗量を比較すると、1,200mから

図 2.3.17 岩盤強度およびカッタ摩耗量の距離程による変化



1,800m（濃飛流紋岩）および2,000mから2,700m（花崗斑岩）で岩盤強度が大きくなると、カッタ摩耗量も増加している傾向がみられた。

図 2.3.18 には、掘削長 100m ごとの平均カッタ摩耗量と岩盤強度の関係を示した。岩盤強度の増加に従い、カッタ摩耗量が増加している傾向がみられた。また、花崗岩と飛驒片麻岩はほぼ同じような傾向がみられるが、濃飛流紋岩では岩盤強度の割にカッタ摩耗量が多いことがわかる。

図 2.3.19 は、岩盤強度の代わりに掘削長 1m 当たりのカッタヘッド回転数を示した。岩盤強度と同様にカッタヘッド回転数の増加に伴い、カッタ摩耗量も増加している傾向がみられた。式 (2.3) から分かるように岩盤強度 σ_c とカッタヘッド回転数 R は比例に近い関係があるためである。

$$\sigma_c = \alpha FR \quad (2.3)$$

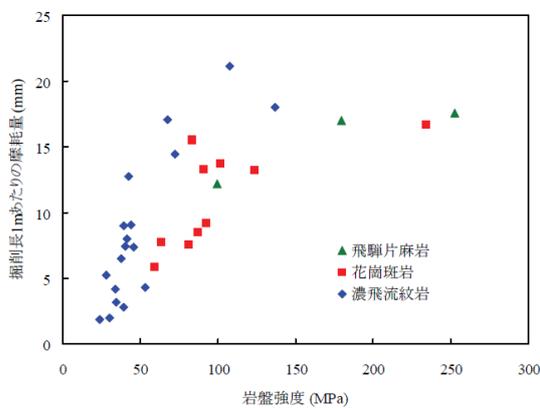


図 2.3.18 岩盤強度およびカッタ摩耗量の関係

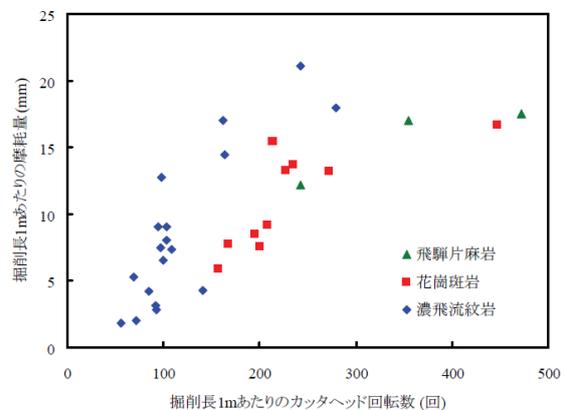


図 2.3.19 カッタヘッド回転数とカッタ摩耗量の関係

表 2.3.4 は、3 資料の力学試験および旋削試験結果を示す。濃飛流紋岩では、試料番号 1<3<2 の順にチップ摩耗長が大きくなった。薄片による観察では、試料番号 4 に比べ 5 のチップ摩耗長が大きかった。石英は 17.9%と 20.5%の違いであるが、斜長石が多く見られることも関係している可能性が考えられる。飛騨片麻岩では試料番号 8 の黒色に比べて、試料番号 6 の白色および 7 の灰色の方がチップ摩耗長は大きくなった。チップ摩耗長の平均値は、濃飛流紋岩は 0.73mm、花崗岩は 0.46mm、飛騨片麻岩では 0.59mm となった。

表 2.3.4 力学試験および旋削試験結果

岩石名	試料番号	比重	一軸圧縮強度(MPa)	ヤング率(GPa)	ポアソン比	圧裂引張強度(MPa)	ショア硬度	チップ摩耗長(mm)
濃飛流紋岩	1	2.62	357	69.8	0.24	20.3	108	0.56
	2	2.70	479	79.4	0.24	19.7	103	0.91
	3	2.66	181	83.6	0.20	19.0	95	0.72
	平均	2.66	339	77.6	0.23	19.7	102	0.73
花崗斑岩	4	2.66	308	70.9	0.24	17.6	98	0.40
	5	2.64	262	70.2	0.26	24.2	103	0.51
	平均	2.65	285	70.6	0.25	20.9	101	0.46
飛騨片麻岩	6	2.67	238	70.8	0.21	21.7	96	0.66
	7	2.66	241	68.0	0.23	21.5	97	0.64
	8	2.77	169	63.8	0.20	22.5	90	0.46
	平均	2.70	216	67.5	0.21	21.9	94	0.59

2.3.7 TBMの施工管理の研究

(1) 秦野ら「TBM工法によるトンネル掘削の施工実績と岩盤分類指標との関係掘削実績とRMRを用いた数量化I類の適用の試み」¹⁸⁾

岩盤性状を現す岩盤分類の指標とTBM掘削の関係を明らかにするため、トンネル掘削時に記録されたデータからRMR (Rock Mass Rating) の分類パラメーターの評点 (Rating) を算出し、それらを用いて運転・施工実績との関係について分析を行った。TBM工法の運転・施工実績には、スラスト推力、ヘッドトルク、掘進速度の三種で代表されると考えられる量的データが得られることから、RMR による分類パラメーター毎の質的データとの関係を数量化I類の手法により分析した。

分析では、TBM掘削での量的データであるスラスト推力 (kN)、ヘッドトルク (kN・m)、日進 (m/day) をそれぞれ目的変数として、質的データであるRMRの各分類パラメーター区分および支保区分を説明変数とした。

なお、支保区分は地山の安定性を示す指標としての位置づけで説明変数の一つとした。説明変数のアイテムは、RMRの分類パラメーターである①岩石強度、②割れ目間隔、③割れ目状態、④地下水、⑤方向性、⑥RMR評点合計による岩盤区分および⑦支保タイプの7つとした。ただし、RMRの分類パラメーターのRQD (ボーリング1m区間毎の10cm以上のコア長の総和) については、割れ目間隔と強い相関があるため、説明変数のアイテムとしては、割れ目間隔を代表とした。これらアイテムとそのカテゴリー分けを表2.3.5に示した。

その結果を、図2.3.20にTBM掘削実績および岩盤分類を示すとおり、付加体の地山にTBM工法を導入する場合、割れ目間隔、割れ目状態、割れ目の方向性は、運転・施工に強く影響する重要な指標であることが判明した。

表 2.3.5 アイテムとカテゴリーの区分表

アイテム	カテゴリー
岩石強度 (MPa)	[1]100-250, [2]50-100, [3]25-50
割れ目間隔 (m)	[1]0.2<, [2]0.06-0.2, [3]<0.06
割れ目状態	[1]やや粗い(概ね新鮮), [2]やや粗い(風化), [3]スリッケンサイド, [4]軟質挟在物
地下水	[1]湿気, [2]濡れ, [3]適水, [4]連続湧水
割れ目の方向性	[1]有利-非常に有利, [2]普通, [3]不利, [4]非常に不利好ましくない
RMR 評点の合計による岩盤区分	[1]非常に良好, [2]良好, [3]普通, [4]悪い, [5]非常に悪い
支保	[1]無支保, [2]ファイコン吹付, [3]リング支保 (1.0m), [4]リング支保 (0.5m)

注) RMR 分類パラメーターの RQD は、割れ目間隔に含めアイテムとして独立させていない。また、RMR の分類パラメーターに項目としてあるものの本分析で該当項目がないものはカテゴリーを設定しなかった。

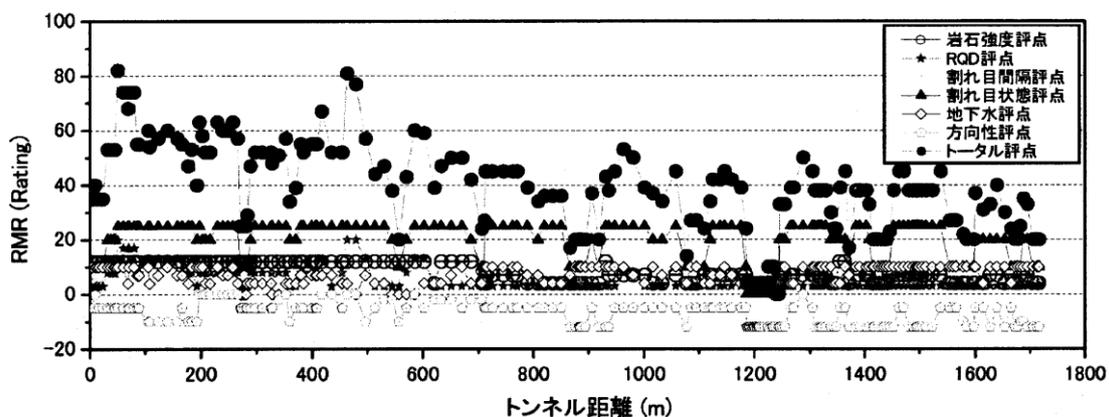


図 2.3.20 TBM掘削実績および岩盤分類 (電発式、電研式、RMR) の掘進方向における変化

(2) 谷本ら「TBM掘削指数（TEI）に基づくTBM施工管理基準の提案」¹⁹⁾

TBMの総仕事量を、地山掘削に費やされた一次破碎仕事量とそれ以外の二次破碎仕事量に区別することに基づいて、その掘削効率や施工管理の基準となる新たな指標として、TBM掘削指数（TBM Excavation Index、略してTEI）を提案した。TEIは、実際のTBM機械データに現れるトルクと推力の比を G_p とし、理論式より導かれるそれらの比 G_T で除して求める。

$$TEI = G_p / G_T$$

TBMの総仕事量がすべて一次破碎に費やされている場合、TEIは1に近い値となり、逆に1から遠ざかるほど、切羽の崩落や周辺地山の変形により、二次破碎仕事量が多いことを示す。

このTEIを2つの施工事例に適用し、掘削効率や地山性状の評価を行った。

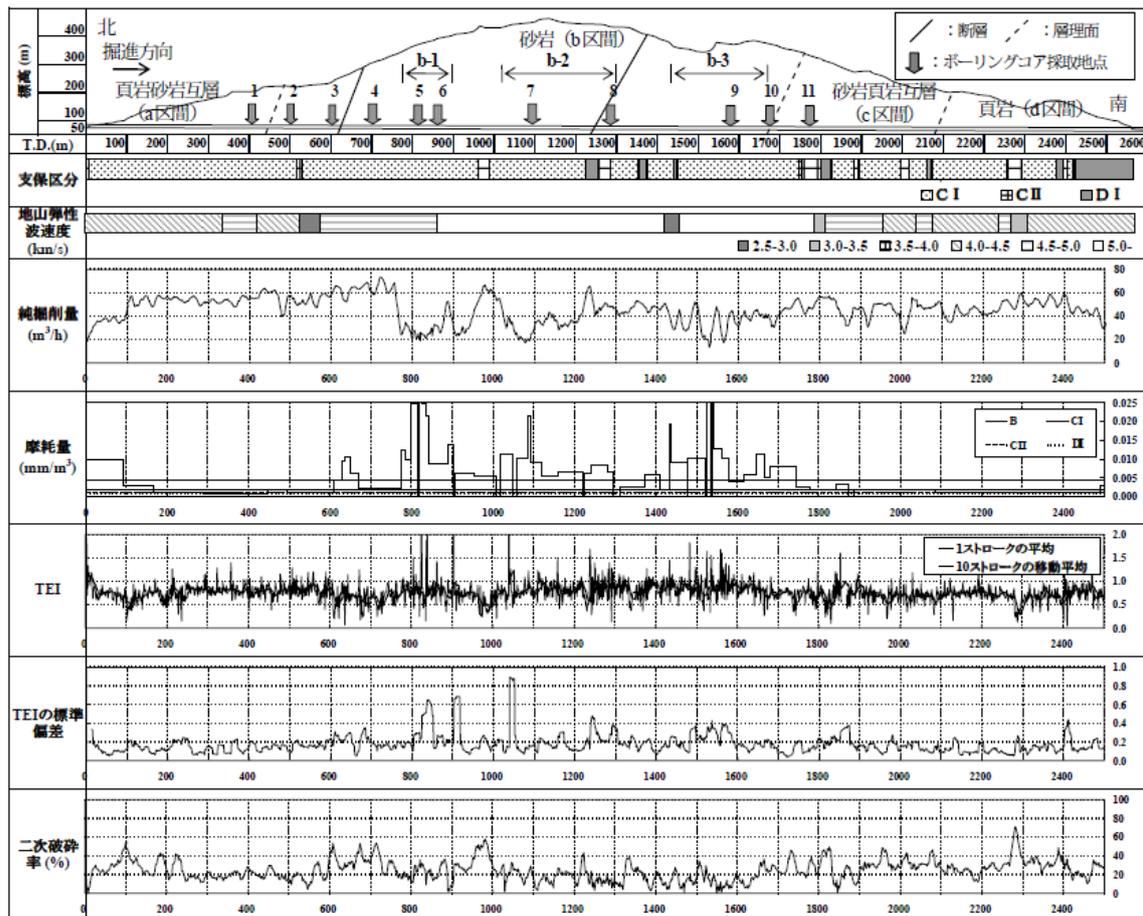


図 2.3.21 A トンネルにおける実施支保工、地山弾性波速度、純掘削量、摩耗量、TEI、TEIの標準偏差、二次破碎率の推移

その結果、ディスクカッタの過剰摩耗が生じた事例や切羽の崩落が生じTBMの掘進が停止した事例において、TEIの標準偏差に着目することにより、地山状況を把握することができ、その基準となる変動は0.2未満であれば過剰な摩耗の発生が無いことを明らかにした。

(3) 福井ら「TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定」²⁰⁾

福井らは、TBMの推力やトルクなどの掘削特性から切羽の岩盤強度を予測する方法について提案している。施工中のTBMの推力、トルク、掘進速度などの機械データと岩盤分類の関係についてはいくつかの報告がある。これらに示された結果では、定性的な傾向は一致しており、岩盤分類の評価が高いほど掘進速度は減少し、一方推力は上昇している。これは、岩盤強度が大きいほどTBMの掘削抵抗が大きくなることを現わしている。このように、TBMの掘削抵抗は岩盤強度と関連するものと考えられている。

岩盤強度は、TBMの推力とトルク、シュミットロックハンマ打撃値からそれぞれ推定している。

1) 推力と岩盤強度の関係

$$\sigma_c = 2.5 \times 10^{-2} F_N / V \quad \sigma_c : \text{岩盤強度} \quad F_N : \text{推力} \quad V : \text{掘進速度}$$

2) トルクと岩盤強度の関係

$$\sigma_c = 6.0 \times 10^{-3} T_R / V^{1.5} \quad \sigma_c : \text{岩盤強度} \quad T_R : \text{トルク} \quad V : \text{掘進速度}$$

3) シュミットロックハンマ打撃値と岩盤強度の関係

シュミットロックハンマ打撃値Sと岩盤強度 σ_c (MPa) との関係は必ずしも確立されておらず、岩種や施工現場ごとに若干異なるが、ここでは次式を仮定して岩盤強度を求める。

$$\text{Log} (\sigma_c) = 1.65 \times 10^{-2} S + 1.13$$

$$\sigma_c : \text{岩盤強度} \quad S : \text{シュミットロックハンマ打撃値}$$

シュミットロックハンマ打撃値から換算した岩盤強度を、黒丸で図2.3.23に示しており、岩盤強度は、825～875mの間で最大値(110MPa)、925mおよび950m付近で最小値(25MPa)となる。なお900～925mでは岩盤が軟弱であったため、シュミットロックハンマ打撃値は求められていない。図から分かるように掘削抵抗から推定した岩盤強度とシュミットロックハンマから求めた岩盤強度は比較的良好一致している。

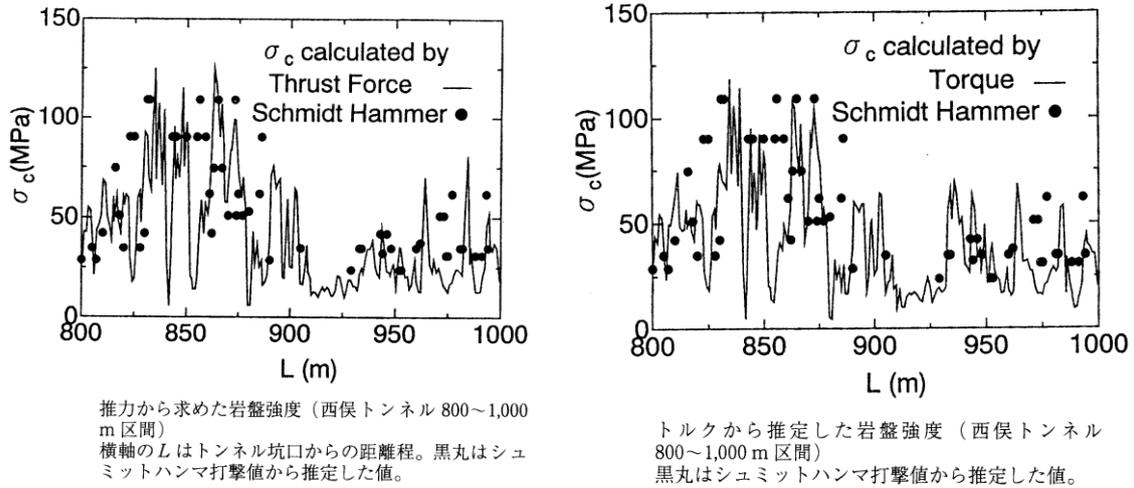


図 2.3.23 推力・トルクから求めた岩盤強度

2.4 TBMのトラブル対策事例

実現場でのトラブル対策事例について、表 2.4.1 は、地山現象に対してその地質要因を整理し、そのことで起きるTBMに生じるトラブル現象とそのトラブル対策事例について示す。表 2.4.2 は、地質的要因を詳細に分けて、具体的なトラブル対策事例を示す。表 2.4.3 は、TBMの部位のトラブル要因を具体的に対策事例で示す。

表 2.4.1 地山現象によるトラブル対策事例¹⁾

地山現象	地質要因	トラブル現象	トラブル対策工
肌落ち 崩落	・断層・破砕帯 ・土砂化、砂礫粘土 ・多亀裂地山	・掘削作業不可 ・カッタヘッド回転不能 ・グリッパ反力不足	・薬液注入 ・フォアホーリング ・グリッパ反力壁の補強 ・推進反力体の構築 ・シールドジャッキ推進 ・拡幅掘削 ・迂回路(調査、水抜き、地山改良、迎堀)
地山の押出し	・粘土化 ・膨張性地山	・カッタヘッド回転不能 ・機体締付け ・グリッパ反力不足 ・排土不能	・グリッパ反力壁の補強 ・推進反力体の構築 ・シールドジャッキ推進 ・滑材注入 ・拡幅掘削 ・オーバーカット ・迂回路(調査、水抜き、地山改良、迎堀)
湧水	・高透水性・ 高地下水位地山	・掘削作業不可 ・排土不能 ・電気系統故障	・薬液注入 ・湧水処理 ・水抜きホーリング ・迂回路(調査、水抜き、地山改良、迎堀)
軟弱地盤層	・断層・破砕帯 ・粘土化 ・膨張性地山	・機体沈下 ・グリッパ反力不足 ・カッタヘッド回転不能	・薬液注入 ・置換えコンクリート ・グリッパ反力壁の補強 ・推進反力体の構築 ・シールドジャッキ推進 ・カッタフェイススリット制限

表 2.4.2 地質的要因によるトラブル対策事例¹⁾

番号	TBM形式	地質・湧水状況	発生箇所	トラブル原因	トラブル発生現象	対応策	処理日数
1	シールド φ2.35m	花崗岩/中硬岩、軟岩 中硬岩より軟岩に変化した箇所	後胴部	多亀裂	地山坑壁が強度不足で、グリッパ反力が取れなくなり、推進不能に陥る。	セグメントを組み、ロックボルトにより地山に固定し、反力を確保した。	--
2	オープン φ2.7m	堆積岩/砂岩・粘板岩 粘板岩、破砕帯、湧水伴う	後胴部	崩落 湧水	グリッパシューの接地面の坑壁が崩壊し、グリッパによる反力がとれない。	崩落部に吹付けを行い、コンクリート反力壁を打設した。	6日
3	シールド φ2.35m	花崗岩/中硬岩、軟岩 破砕質の地山	切羽	多亀裂	破砕質の地山に遭遇し、岩塊がカットヘッドの回転に合わせて動くため掘進不能に陥る。	注入により破砕質地山を改良した。	13日/16日/13日
4	オープン φ2.7m	堆積岩/砂岩・粘板岩 崩落性の不良地山	切羽/前胴部/後胴部/マシン頂部/マシン側方	多亀裂	大きな空洞と、その中にあった大小の礫(大きいものは直径が数メートル)のため、カットヘッドが締めつけられ、カットヘッドの前面に礫がはさまり、掘削不能に陥る。	・マシン本体直上を注入により改良し、吹付け、ロックボルトで切羽を安定させた。 ・バルクヘッドを構築し、セメントミルクの注入、充填を行った。 ・後続台車を切り離して引出し、ボーリングを行って注入を行った。	3ヶ月
5	シールド φ3.5m	緑灰色砂質凝灰岩 /半固結状態/湧水なし	切羽/後胴部/マシン頂部	砂礫 粘土 崩落	・ズリ取り込み量非常に多くなり、後胴部が締めつけられ、前後進不能になった。	・カット上部の崩落個所に発泡ウレタンを充填した。 ・後胴部が締めつけられたことから、中胴から後胴にかけてTBMの頂部、側方部を掘削し、フリクションカットを実施した。	15日
6	シールド φ3.5m	流紋岩質凝灰岩で軟弱、水を含むと粘土化/湧水は溜っばい程度/ズリ付着によるカット開口部の閉塞、ディスクカットの偏摩耗	前胴部/後胴部/マシン頂部/マシン側方/マシン下部	砂礫 粘土 膨圧	・軟岩中に硬岩の転石があるため破砕されず、カットが回転停止する。 ・掘削完了後フロントグリッパ反力が不足し、後胴が引き込めなくなった。	・滑材注入と反力受けを組み立て、シールドジャッキによる後胴盛替えを試みたが、反力受けが軽微なため動かなかった。 ・反力受けの補強したが、前後胴部も動かなく、切抜け掘削となった。	8日
7	オープン φ5.0m	黒雲母花崗岩/10条の断層 /3t/min程度の湧水 マサ化した風化花崗岩部	切羽	崩落	・切羽が自立せず崩落、進行とともに崩落が拡大、掘進不能となった。	・空洞部にエアモルタル、前方に薬液注入する。	52日
8	シールド φ3.8m	灰色の泥岩、砂岩/凝灰岩層への変り目で、300~400%/min集中湧水	切羽/マシン頂部	崩落 湧水	・前方天端部から崩落を伴い出水(800%/min) ・崩落土砂を取込むと、次々に崩落し、空洞を広がった。 ・取込み量が多く、約40m ³ の土砂を取込んだが、数cmの前進しかできなくなった。 ・湧水に伴い土砂がTBM機内に流入し、土砂の撤去作業が必要となった。	・テール部後方から水抜きボーリング実施。 ・滑材によるマシン保護。 ・崩落空洞部にエアミルク注入。	15日
9	シールド φ5.0m	20~80MPa程度の砂岩、泥岩および互層/湧水は全体では非常に少ない。 破砕が進んだ泥岩、切羽面は自立しているが、TBMが通過するまでに天端部が崩落する。	前胴部/後胴部/マシン頂部/マシン側方/マシン下部	崩落	・オーバーカットした部分に、崩落した土砂が堆積し、カーブ線形がとれない。 ・崩落した岩塊の処理が困難になる。 ・フロントグリッパを延ばすことが、地山の崩壊を招き、後胴の引き寄せが不可能となる。	・空洞部に吹付けコンクリート、ファイバモルタル。 ・反力受けにスラブコンクリートを実施。	5日
10	オープン φ7.1m	黒色片岩と緑色片岩 岩級Dの黒色片岩が分布、小断層によるクサビ型ブロックがトンネルを横断。 掘削により湧水状態が変化し、すべり面の粘着力を低下させた。	前胴部/後胴部/マシン頂部	小断層の すべり	・切羽より後方10m区間において高さ10m程度の崩落が発生。 ・TBM本体が完全に崩落ズリで埋没。	・空洞部に発泡ミルク、LW注入。 ・フォアバイリング実施。	31日
11	シールド φ8.3m	堆積岩 新第三紀泥岩、200~300%/minの湧水	切羽/ 前胴部	粘土化/ 土砂化/ 多亀裂/ 崩落/ 湧水	・取込みズリ量が多くなりTBMの前進が不可能になった。 ・切羽は、3~4m程度洗掘されており、若干の湧水がみられ、局所的に脆弱層を確認した。 ・切羽前方天端でも所々に空洞が確認されたため、TBM内から上半120°にフォアボーリングによるウレタン注入を実施し再度掘進を試みた。 ・前面の堆積土の抵抗と周辺地山の摩擦抵抗により前進できず、さらにカットの回転により天端からの崩落が多くなる状況でマシンを停止した。	・TBM直上の地表部から約65mの深さから、TBM直上および切羽前方の上部にLW、CBを注入した。 ・TBM内側から追加のウレタン注入を行い、切羽前方上部とTBM前胴部上部の地山を強化した。	22日

表 2.4.3 機械的要因によるトラブル対策事例¹⁾

番号	トラブル発生箇所	トラブル現象	トラブル原因	トラブル対策	処理日数
1	カッタ	カッタ偏摩耗	センタカッタ部に破砕されたズリが堆積し、カッタリングが回転しなくなった	カッタ外側に放水するノズルを追加設置し、掘進時に常時センタカッタ部に堆積するズリを洗い流した	10日
2		カッタ偏摩耗	粘性土がディスクカッタベアリング部に侵入し破損、カッタリングが回転しなくなった	特に対策せず (カッタ交換)	不明
3		カッタ損傷・割れ	-----	カッタ・ボディの交換	不明
4	カッタヘッド	面板扉部にクラック破損	強度不足	補強溶接の実施	3日
5		カッタヘッド停止	スタレーバが脱落し、カッタヘッドのメインベアリングシール部に噛みこんだ	ベアリング部、シール部の修理	15日
6	カッタヘッド 駆動部	減速機破損	強度不足	3台のうち1台が破損したため残りの2台で掘進し、代替現場到着後交換	7日
7		ベアリング破損	クラッチ側シールの耐熱不足	NO.1カッタモータを取り外し、分解修理後に再組立	13日
8		メインベアリング故障	メインベアリング内周土砂シール部から土砂侵入	マシンを後退させ、作業スペース確保の上、オイルシール交線、ベアリングギア修理	20日
9	カッタヘッド 駆動部	電動機破損	湧水によりカッタ駆動モータ絶縁不良が発生し、NO.1およびNO.3モータ焼損	リード線グラウンド部強化、モータ本体にエアブリーザ設置	26日
10		減速機破損	軸受ケース破損	メインギア交換カッタ駆動用減速機改造(ケーシング)強度増、モータ取付板と減速機取付板を一体化、回り止めキー追加)	不明
11	排土装置	液体輸送での閉塞および管路破損	許容範囲外の大きさ岩塊の取り込み	排泥管、スラリポンプインペラ、クラッシャの歯など修理・部品交換	不明
12	スラストジャッキ	後胴引き寄せ時に、スラストジャッキ固定部破損	機内のテレスコピット部下部にベルコンからこぼれたズリが溜り、スラストジャッキの動きを拘束した	スラストジャッキを工場へ運搬し修理後、再取付	8日
13	グリッパ部	グリッパシュー破損	崩壊岩がシューと坑壁の間で挟まり、シュー部に異常荷重が作用した	グリッパ両側の坑壁を人力で拡幅して作業スペースを確保し、修理	19日
14	その他	スキンプレート変形	テレスコピックシールドと地山の間に崩落した岩片が噛み込み、前進につれてスキンプレートが変形した	変形断面を溶断し、噛み込んだ岩を小割にして撤去。別途用意したスキンプレートを溶接し補修	不明

2.5 TBMの課題

TBMは、NATMより早くから導入されてきたが欧米に比べて普及が進まない理由として、日本は地質が複雑で断続的に低強度地山が出現することが多く、掘進がたびたび困難になることもあり、TBM本来の高速施工の利点を活かし切れないことが要因の一つとされている。一方、通常岩盤においても堅岩になるほどカッタの摩耗や破損によりカッタ寿命が短くなる。そのため、交換にかかる材料費から工事が止まる経費などを含めて、工期の遅延や施工費に多大な影響を及ぼしている。このような現状から、TBMには以下のような課題が挙げられる。

① 低強度地山に対する課題

TBMは、切羽の状況を直接観察することが難しく、地山等級などの判断が遅れる。また、切羽で直接補助工法などの対応策ができない。このため、低強度地山に遭遇すると切羽崩壊、機体の締め付けなどのトラブルが発生し掘進の停止や、その復旧対策に長時間を要することになる。

② カッタ寿命に対する課題

カッタ寿命は、最も個数の多いフェースカッタと最外周に配置されるゲージカッタは摩耗の影響が大きく、中心部に配置されるセンターカッタはねじれなどの破損による影響が大きい。そのことにより、カッタ交換回数の増加に伴う施工の遅延、およびカッタ交換などの施工費の増加が挙げられる。

2.6 第2章のまとめ

現状のTBMについて、歴史と施工実績、基本構造および岩盤破碎のメカニズム、さらに、本研究テーマに関係するカッタの機能に関する既往研究から、以下のようなことをまとめとした。

① 硬岩用TBMは、施工実績からも早くに導入されたが、小口径断面トンネルを対象に施工され数も少ない。その理由の最もなるものは、我が国の地質の複雑性に伴う低強度地山を克服できないことにある。

② TBMの岩盤破碎のメカニズムは、カッタによる溝掘りで亀裂を伸展させ隣接剥離破碎を起こさせる合理的な掘削方法と言える。この役目を担うカッタは、火

薬による岩盤破碎の代わりにカッタで溝を掘ることから負担荷重も大きいものがあり、特にゲージカッタとセンターカッタへの負担が増大することになる。

③ 既往のカッタの研究では、カッタの岩破碎に関して掘削実験機の製作、貫入量、センターカッタおよび摩耗量などについて、カッタの設計などの基準となる実験が行われてきた。これらの実験からも、フェースカッタより負担荷重の大きいゲージカッタとセンターカッタの変形や摩耗により寿命の短命が明らかにされた。

④ TBMが普及するには、低強度地山を克服するとともに、工期の延伸やコスト増に繋がるカッタ寿命の延伸を図る必要がある。そのための課題として、低強度地山に遭遇しても掘進を止めない対応策が欠かせなく、また、施工費の縮減に繋がるカッタ寿命の延伸策が求められている。

⑤ 我が国の実現場でのトラブル対策事例について、地山現象、地質的要因および機械的要因ごとに一覧表でまとめた。

【第2章参考文献】

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会：TBMハンドブック、2000
- 2) 福井勝則、大久保誠介、穏やかな謙一：TBMの仕様と掘削抵抗の関連について、資源と素材、Vol. 118、2002、392-398
- 3) 谷本親伯、山仲俊一郎、津坂仁和、中根達人、平野 實、神崎浩、阿部 俊、岩田修一：TBM施工におけるディスクカッタの摩耗と岩石の物性に関する研究、2006、材料 Vol. 55、29-36
- 4) 清水建設株式会社：パハンセラランゴール導水トンネル資料
- 5) 西岳 茂：岩盤掘削中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究、土木学会論文集、1996、No. 554/Ⅲ-37、211-220
- 6) 西沢 泉、三谷典夫：ディスクカッタの摩耗特性と寿命向上法、資源と素材、1996、Vol. 112、505-510
- 7) 龔 放鳴、佐藤一彦、内海千尋：TBMゲージカッタに作用する切削抵抗ディスクカッタによる岩石切削に関する研究(第3報)、資源と素材、1994、Vol. 110、277-282
- 8) 龔 放鳴、佐藤一彦、内海千尋：TBMゲージカッタに作用する切削抵抗の抑制方法についてディスクカッタによる岩石切削に関する研究(第4報)、資源と素材、1994、Vol. 110、851-856

- 9) 高岡三郎、速水博秀、三沢茂夫:ロータリーカッタによる岩石破砕に関する研究(第1報)ディスクカッタによる岩石の破砕について、日本鉱業会誌、1968、84巻960号、427-433
- 10) 西松裕一、奥野 昇、平沢幸久:ローラカッタによる岩石掘削に関する研究、日本鉱業会誌、1975、91巻1052号、653-658
- 11) 室 達郎、土屋 清、上松正史、河原荘一郎:TBMセンターカッタの定常掘削特性に及ぼすビット斜角の影響、土木学会論文集、2000、NO.652、III-51、47-60
- 12) Francisco Javier Macias: Hard Rock Tunnel Boring Performance Predictions and Cutter Life Assessments、Norwegian University of Science and Technology、2016、138-150
- 13) 城間博道、赤木 渉、高崎英邦、山口泰男、関 伸也:TBM機械データを用いた支保パターン選定に関する一考察、トンネル工学論文集、2001、第11巻、15-22
- 14) 水上秀夫、古川哲男、今森純朗、廣川幸喜:掘削エネルギー解析システムを用いたTBM掘削、トンネル工学研究論文報告集、2000、第10巻、197-202
- 15) 小泉 悠、津坂仁和、谷本親伯、宮島保幸:TBM施工におけるディスクカッタの摩耗と二次破砕、土木学会論文集C、2009、Vol.65 No.4、951-962
- 16) 三沢清扶、桜井 孝、高橋昭教:RTMに関するか岩石・岩ばん調査法、鉄道技術研究資料、Vol129、pp17-21、1972
- 17) 福井勝則、大久保誠介、森山 守、青木智幸、小塚 孝、松原 誠:飛騨トンネル本坑におけるTBMのディスクカッタの摩耗に関する研究、土木学会、第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、2007、129-134
- 18) 秦野輝儀、天野 格、持田裕之、津田延裕:TBM工法によるトンネル掘削の施工実績と岩盤分類指標との関係、掘削実績とRMRを用いた数量化I類の適用の試み、日本応用地質学会、研究発表講演会論文集、2006、251-254
- 19) 谷本親伯、津坂仁和、山仲俊一郎、中根達人、平野 實、亀山克裕:TBM掘削指数(TEI)に基づくTBM施工管理基準の提案、土木学会、第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、2007、11-16
- 20) 福井勝則、大久保誠介、本間直樹:TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定、資源と素材、1996、Vol.112、303-308

第3章 ドーナツ型の技術概要

ドーナツ型の研究開発は、(一財)先端建設技術センターの「ドーナツTBM施工検討会」と筆者らの共同研究により行われ、中心部の開口径やカッタの配置をはじめ、掘削工、支保工等の施工方法から、機器構成に至るまでの検討を進めてきた。また、平成27、28年度には国土交通省建設技術研究開発助成を受けて、掘削実験により中心部を開口にする優位性について検証を行った²⁾。

本章では、ドーナツ型の技術概要と低強度地山への対応策などの施工性について評価する。

3.1 ドーナツ型の技術概要

ドーナツ型の大きな特長は、全断面ではなくドーナツ状に外殻だけをTBMで掘削し、残りの中心部分を横型二軸式岩破碎機（以下、破碎機と呼ぶ）で機械掘削する二分割方式にある。その特長の一つは、中心部を開放して地山を直接見えるようにし、また開口部からカッタヘッドの前に出ることを可能にしたことにある。それにより、TBMの課題である低強度地山などへのリスク要因に対して、従来から培われてきた山岳トンネル技術をそのまま使えるという優位性がある。もう一つは、中心部をカッタで掘らないドーナツ型は、TBMより掘削速度が早く、カッタ負担が少なくなるなどカッタ寿命の延伸が考えられる。

ドーナツ型は、TBMと構造的に変わりがなく、カッタヘッドの中心部を開口しているところに大きな違いがあり、掘削順序では、リーミング型は小口径で中心部を先行して掘削し、その後方から本坑を掘削する方式であるが、ドーナツ型は逆に中心部を残して本坑の外殻側が先行する掘削方式になる。

図3.1.1と図3.1.2に示す掘進機外径5.75mの機械図は、内空幅5mとした場合のドーナツ型（シールド型）で機械設計したものである。カッタヘッド内径は、1.2mとして内ゲージカッタを配置している。スラストの反力は、メイングリッパで地山に取っている。中心部岩盤は、破碎機で破碎され、底部ベルトコンベヤから坑外に搬出される。覆工方式は、支保工、覆工を合わせたワンパス方式の山岳ライナを採用している³⁾。

表 3.1.1 は、カッターヘッド形状とそれに取り付けるカッター仕様、およびカッターモータ、スラストジャッキ、メイングリッパなどの機械仕様を示している。

ドーナツ型の掘進機外径 $\phi 5.75\text{m}$ の決定では、山岳ライナ（鉄筋プレキャストコンクリート：セグメント）形状を決める必要があり、フレーム解析により掘削外径の 4% 程度の厚さ 250mm を確認する。コンクリート強度では、「トンネル標準示方書（シールド編）」の基準から $42\text{N}/\text{mm}^2$ で主鉄筋 D16 の 250mm ピッチのシングル配筋とする。この山岳ライナの決定から、支保工と覆工と合わせたシングルシェル（ワンパス）方式の標準断面図を、図 3.1.3 に示す。

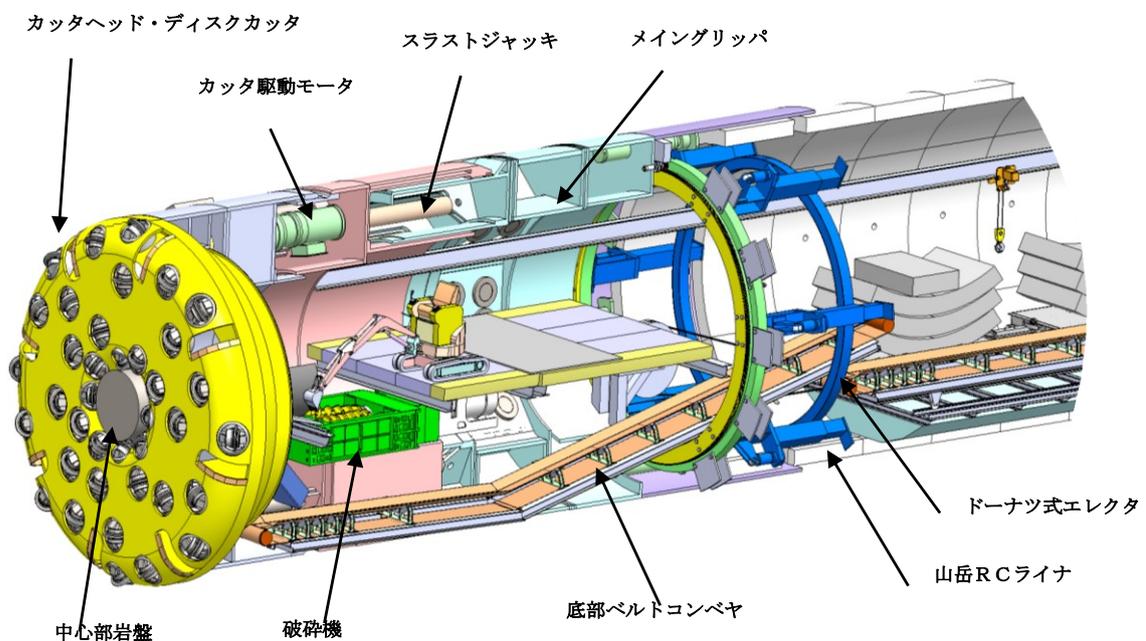


図 3.1.1 ドーナツ型（シールド型）掘進機外径 $\phi 5.75\text{m}$ の機械図

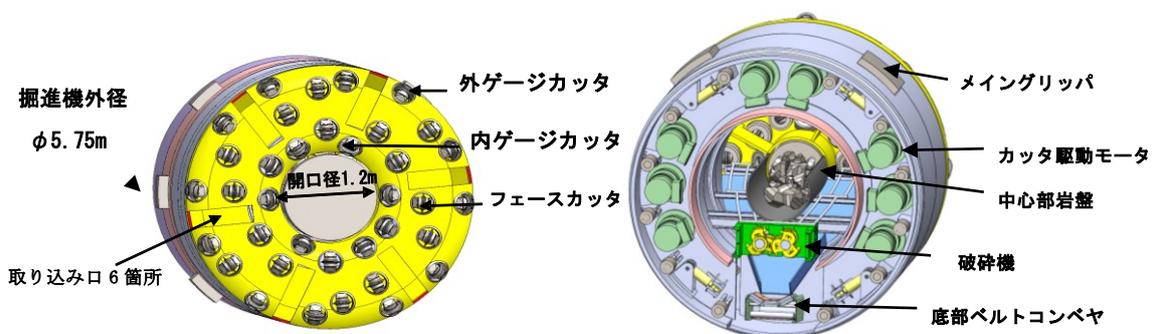


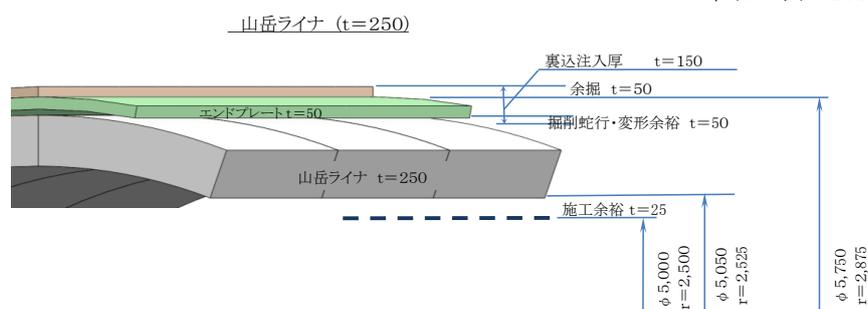
図 3.1.2 掘進機外径 $\phi 5.75\text{m}$ のカッターヘッド、機械内部の断面図

表 3.1.1 ドーナツ型の機械仕様

部 位	仕 様	
ドーナツ型TBM	カッタヘッド外径	φ 5.750m
	カッタヘッド内径	φ 1.200m
	掘削外径	φ 5.850m
	掘削内径	φ 1.100m
テールシール	形式	ワイヤブラシ
	段数	2段
ディスクカッタ	カッタ径	17インチ(φ 432mm), 15.5インチ(φ 394mm)
	取付構造	バックローディング, 90度回転式抜き式
	装備ピッチ	65~80mm
	インナーカッタ	17":25個, 15.5":5個
	ゲージカッタ	外ゲージカッタ:5個, 内ゲージカッタ:3個
カッタ仕様	カッタトルク	定トルク : 35.1 kN・m
	カッタ回転速度	1.0~7m i n ⁻¹
	カッタモータ	200kW×8台
スラストジャッキ	総推力	22,200kN
	シリンダ本数	1,500kN×1,650st×12本
	伸長速度	50mm/min
方向修正ジャッキ	総推力	14,400 kN
	シリンダ本数	1,200 kN×200st×12本
ローリング修正ジャッキ	総推力	1,874 kN
	シリンダ本数	600kN×100st×4本
ライナ補助ジャッキ	総推力	10,500 kN
	シリンダ本数	1,500kN×300st×7本
メイングリッパ	総推力	36,000 kN
	装備数	(1,500 kN×150st×4本)×6台
フロントグリッパ	総推力	8,000 kN
	装備数	2,000 kN×150st×4本

ドーナツ型TBMの断面決定要件

① 所要内空	所要半径2.5m+施工余裕0.025m	2.525m
② 山岳ライナの厚さ		0.250m
③ 掘削蛇行量、変形余裕量		0.050m
④ エンドプレート厚さ		0.050m
⑤ 掘削余裕		0.050m
	掘削半径 計	2.925m
	マシン半径 計	2.875m



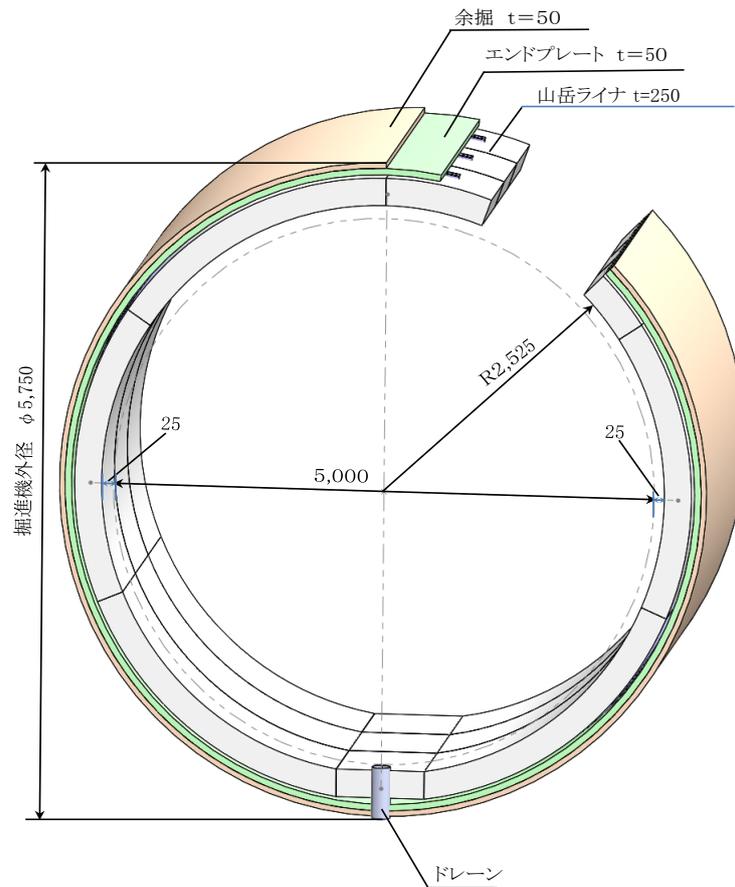


図 3.1.3 ドーナツ型の標準断面図

3.1.1 ドーナツ型の掘削

ドーナツ型の掘削は、掘進機による外殻部と破碎機による中心部岩盤破碎に分けて行われる。掘進機の Cutterヘッドに取り付けられる Cutter は、中心部を開口にしていることから、TBM に有るセンター Cutter が無く、その代わりに中心部を残して掘削するために内ゲージ Cutter が配置される。フェース Cutter と外ゲージ Cutter については、TBM と同様である。図 3.1.4 は、Cutter の配置寸法を示したもので基準となるフェース Cutter は 80mm 間隔、外ゲージ Cutter と内ゲージ Cutter は 45~60mm 程度の間隔に細かく傾斜して配置している⁴⁾。

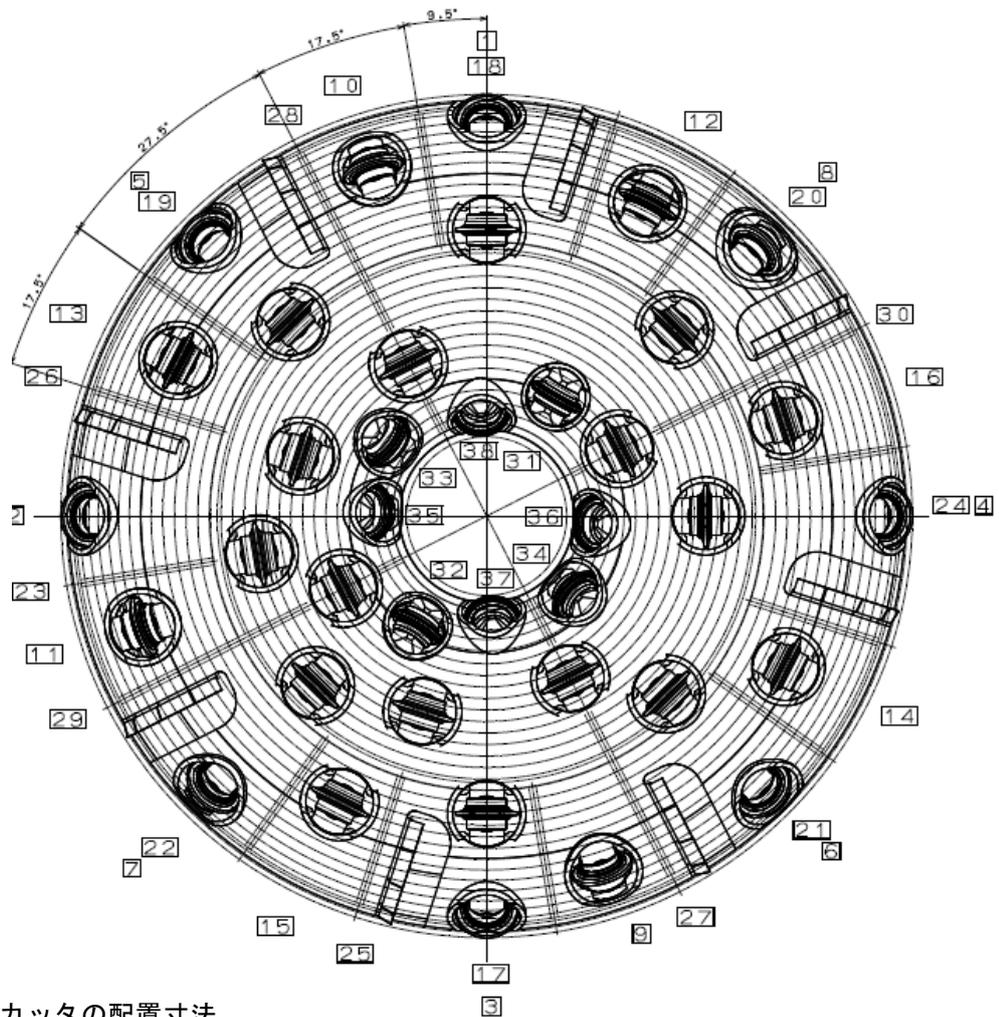
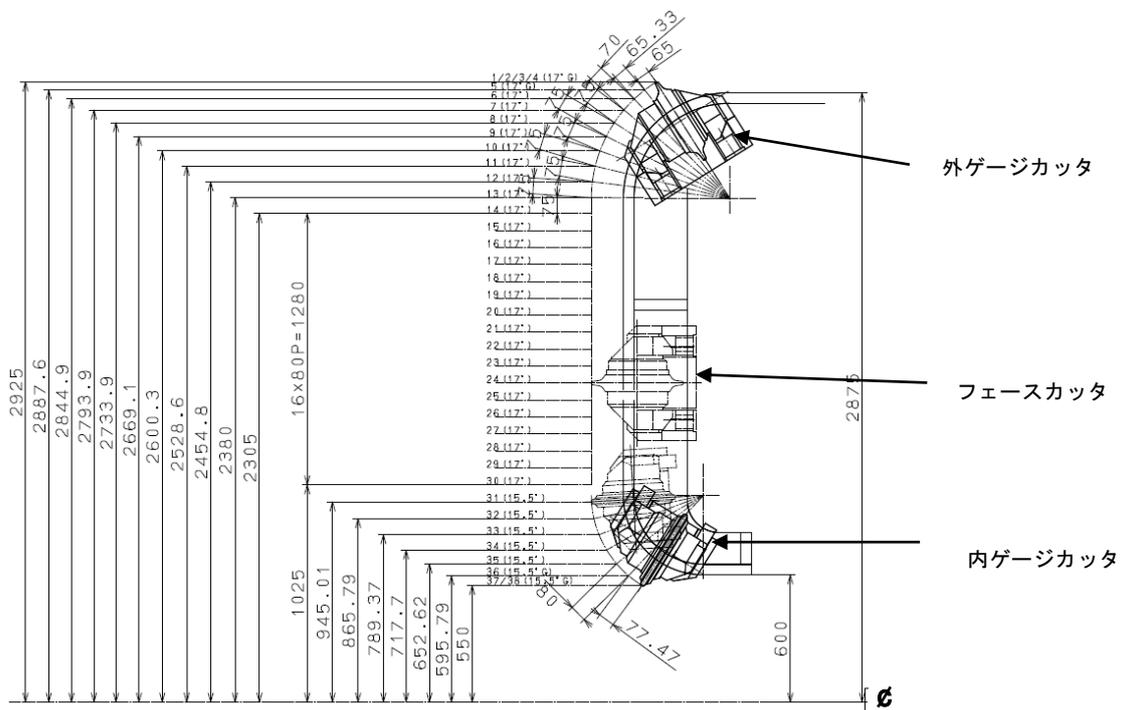


図 3.1.4 カッタの配置寸法

3.1.2 ドーナツ型の掘削フロー

掘進機による掘削のフローは、**図 3.1.5** の掘削概念図に示すように掘削された切削ズリは、カッターヘッド開口部（180 度）より、振動式グリズリから底部ベルトコンベヤに直接搬出される。

中心部の開口部から出てくる岩盤は、破碎機の開口幅以内（**図 3.1.6**）とされ、かつ内ゲージカッターの押付力で節理等により大半は大きく破碎されるものと想定されている。出てきた岩盤は、掘進機の掘進に合わせて破碎機の中に押し出され 200mm 程度以下に細粉され底部ベルトコンベヤに搬出される。また、破碎歯の形状はスクリュウ状になっていることで粘質系土砂でも閉塞せず排出可能で、硬軟地質に対応できる特長を有している。ミニバックホウは、振動式グリズリなどの閉塞に対する掘削補助として配置してある^{5),6)}。

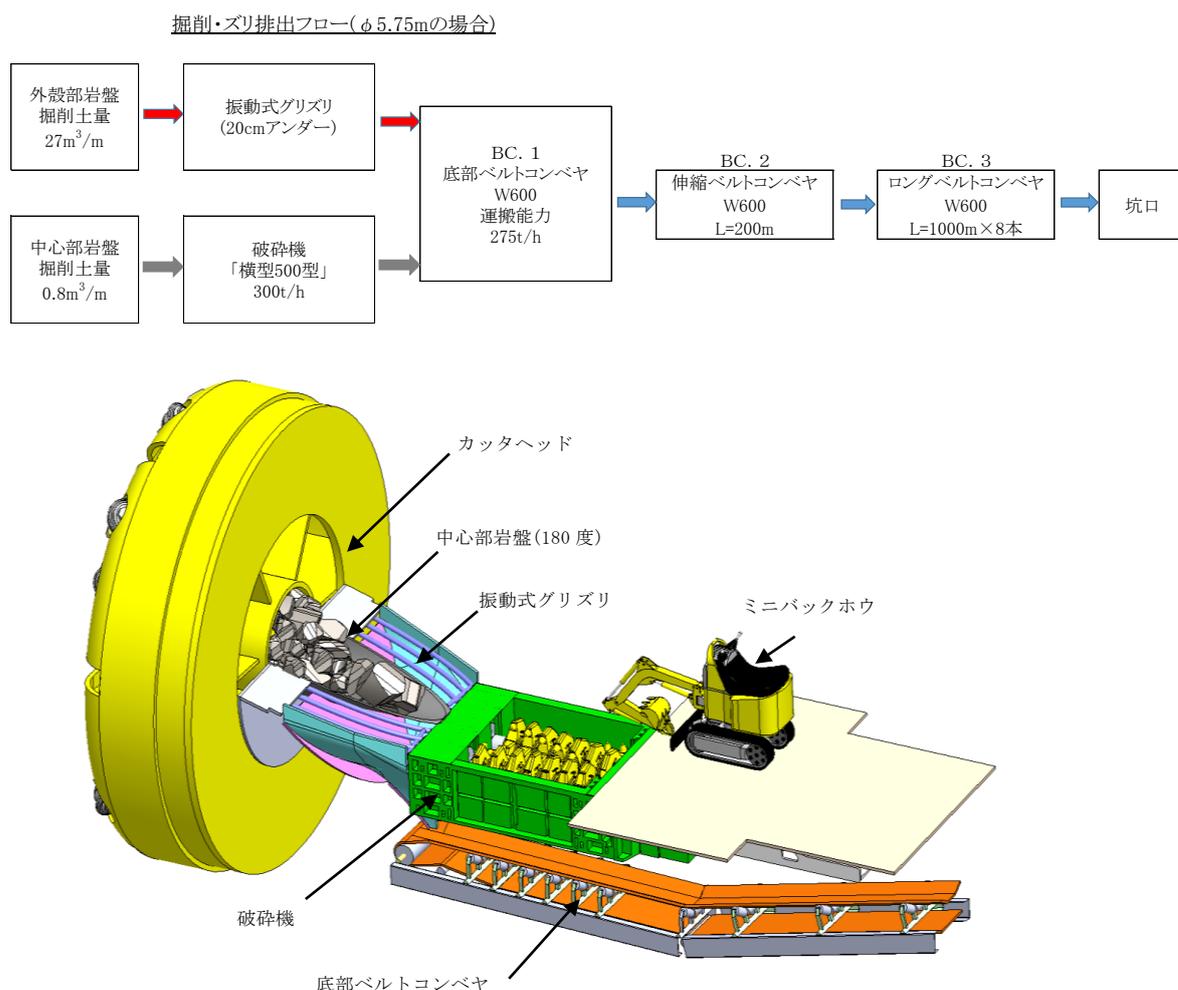
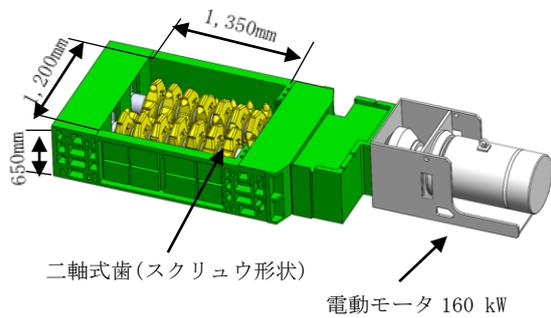


図 3.1.5 ドーナツ型の掘削フロー、掘削概念図



二軸式 岩破碎機 型式	破碎能力 (m ³ /hr)	破碎機 開口横幅 (m)	ドーナツ径の範囲 横幅1/2(最小)～ 横幅(最大) (m)
500型	350	1.20	≒0.60～1.20
625型	420	1.50	≒0.75～1.50
850型	600	2.00	≒1.00～2.00
1000型	700	2.50	≒1.30～2.50
1300型	900	3.00	≒1.50～3.00
1500型	1000	3.50	≒1.80～3.50



図 3.1.6 破碎機の開口幅・破碎仕組み

3.2 ドーナツ型の低強度地山への対応策

TBMの最大の課題になっている低強度地山区間の施工は、ドーナツ型においても簡単ではなく、このような地山に遭遇したときも掘進を止めない施工法が必要とされている。低強度地山は、脆弱な破碎帯および粘土化した変質帯で構成され、掘削で応力が解放されると大きな変位が発生し、TBM胴体が締め付けられたりして掘進が不能に陥る。また、支保構造においてもこの応力を受けることから、地山条件を把握し地山安定を図る必要がある。

低強度地山区間の施工判定は、図 3.2.1 に示すように最初に地山条件になる岩石の持つ弾性係数などの力

低強度地山区間の施工判定フロー

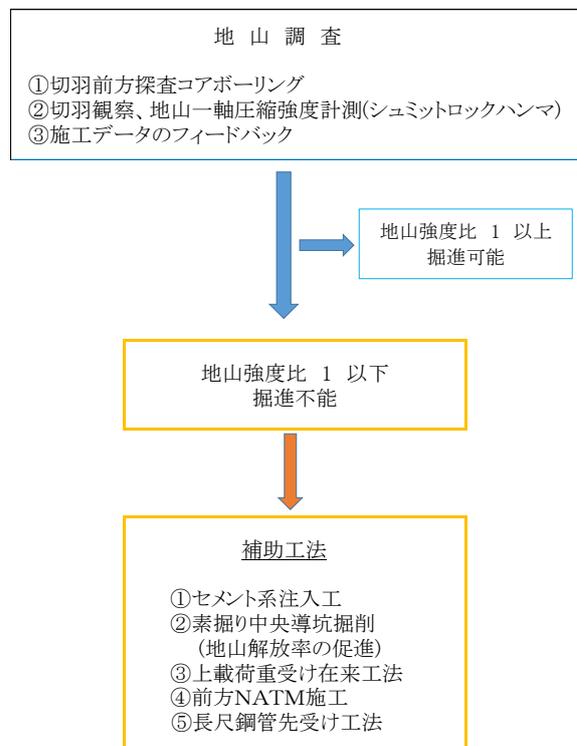


図 3.2.1 低強度地山区間の施工判定フロー

学性質を把握することから始まり、トンネル内からより正確な地山調査により低強度地山区間の位置を特定する。低強度地山を判定する指標は、標準設計で用いられている地山強度比を主要項目とした。

次に、その区間の掘進時の拘束を防止するための補助工法が必要で、掘削することで解放される応力を支える方法として、セメント系地盤改良などがあるが確実性から長尺鋼管先受け工法が最適であり、それにはドーナツ型の内側からの施工方法などに工夫が必要になる。

3.2.1 地山調査

事前の地山調査では、切羽状態を直接に目視観察し岩盤情報を得るとともに、中心部岩盤そのものが大きいコア採取になることから、シュミットロックハンマなどの簡易反発硬度試験から岩盤強度を推定し、地山強度比を算出する。また、地山状態では切羽前方 100m 程度の探査ボーリングにより、補助工法の必要性の有無、あるいは工法選択などの判断材料にする。以下に、調査内容を示す。

- ・ コアを採取し、コア観察、地質の分布や節理などの不連続面の分布
- ・ コア岩石圧縮強度とドーナツ型の中心部岩盤のシュミットロックハンマによる圧縮強度との整合性、および TBM のトルク電流値などの施工データのフィードバックとの整合性の確認
- ・ ボーリング孔を利用した湧水量、湧水圧の測定

地山強度比の算定は、中心部岩盤をシュミットロックハンマによって岩盤強度を測定し、その地点の土被り高さ分の重量から、式 (3.1) により求める。

$$\text{地山強度比} = q_u / \gamma h \quad \text{----- (3.1)}$$

q_u : 地山の一軸圧縮強度 (kN/m²)

γ : 地山の単位体積重量 (kN/m³)

h : 土被り高さ (m)

地山強度比の考え方は、等方地圧における素掘り円形トンネル周辺では、地山が弾性体の場合、トンネル壁面では地山の一軸圧縮応力 $2P$ (P は初期応力) の状態になっている。そのため、地山の一軸圧縮強度 (q_u) が作用荷重 $2P$ よりも大き

表 3.2.1 地山強度比による地山等級の関係

	地山等級	地山強度比	地山単位体積重量
高強度 ↓ 低強度	C I 級	4 以上	22 kN/m ³
	C II 級	4 以上	
	D I 級	4~2	
	D II 級	2~1	
	E I 級	1 以上	20 kN/m ³
	E II 級	1 以下	

参照：国土交通省・地山分類表

い場合 ($q_u > 2P$) に安定となる。これが地山強度比 ($q_u / \gamma h > 2$) の考え方になっている⁷⁾。表 3.2.1 は、地山等級と地山強度比との関係を示したもので、この分類基準で岩盤判定が行われている。

地山強度比と塑性領域の関係から、地山強度比が 2~1 程度では塑性領域はあまり大きく生じない。また、地山強度比が 0.8 程度より小さくなると、塑性領域が大きく生じるようになり、内部摩擦角が 20° 以下の場合には特に顕著である。これに対し、内部摩擦角が 30° 程度になると地山強度比が小さくなくても塑性領域の発生は比較的限られる。

このような設計の地山強度比の考え方から、地山強度比 1 以上であれば、TBM による掘進が可能と判定し、地山強度比 1 以下の場合には、補助工法の検討が必要といえる。

3.2.2 補助工法

TBM 工法の最大の課題は、低強度地山に遭遇した際に高速性も経済性も殺がれてしまうことにある。ドーナツ型は、その改善を図るためにカッターヘッドの中心部に開口を設けることで、TBM ではできない低強度地山に対する施工リスク対策を容易にした。以下に、具体的な補助工法について示す。

(1) セメント系地盤改良

開口部から切羽前方地山をボーリング機で削孔し、地山に適したセメント系地盤改良材を注入する。最近の注入材は、良好な改良ができないため極超微粒子セメントが使用されるようになった。また、ボーリング孔を利用して湧水圧や水抜

きもでき、必要な追加孔の設置もできる（表 3.2.2、図 3.2.2）。

表 3.2.2 セメント系地盤改良

発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破砕帯・切羽崩壊・泥流化
具体的な現象	<ul style="list-style-type: none"> ・破砕質の地山に遭遇し、岩塊がカッターヘッドの回転に合わせて動くため掘進不能となる。 ・カッターヘッドの回転に伴い、岩塊がスリットにかかり回転不能となる。 ・切羽が崩壊・泥流化して押し出されてくる。
補助工法の目的	・トンネル上部の荷重支持、地山の強度改良 空洞部の充填。
具体的な対策	<ul style="list-style-type: none"> ・切羽前方地山をボーリング機により削孔し、地山に適したセメント系地盤改良材を注入する。 ・注入材は、普通セメントを中心に改良具合で超微粒子、極超微粒子セメントを使用する。湧水量・周辺環境への影響を考慮して、ゲルタイムで調整する。 ・改良範囲:1.5~2D ・湧水圧が大きい場合は、水抜きボーリングで湧水圧を低下させる。
施工日数	地盤改良区間20m当たり施工日数 : 4日、 5m/日 削孔長:25m、注入区間:20m、カバーロック長:5m 施工本数:23本

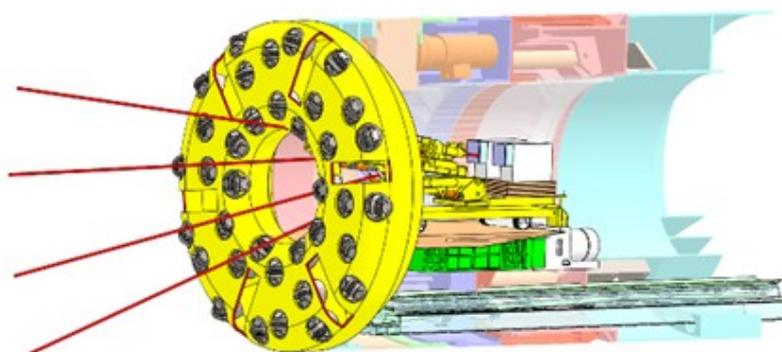


図 3.2.2 セメント系地盤改良

(2) 素掘り中央導坑掘削(地山解放率の促進)

開口部から掘進機前方を先掘りすることで地山解放を促進させ、掘進機に掛かる荷重を低減させる。施工方法は、掘進機前方2～3m程度をφ2m程度の空間をつくるため、バックホウ等により素掘り掘削する(表3.2.3、図3.2.3)。

表 3. 2. 3 素掘り中央導坑掘削(地山解放率の促進)

発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破碎帯
具体的な現象	・掘進機に掛かる地山荷重により、掘進機が拘束され掘進ができない恐れがある。
補助工法の目的	・掘進機前方を先掘りすることで地山解放を促進させ、掘進機に掛かる荷重を低減させる。
具体的な対策	・掘進機前方2～3m程度をφ2m程度の空間をつくるため、バックホウ等により素掘り掘削する。
施工日数	前方2～3m当たり施工日数 : 1日 1日当たり施工量 : 2.0m/日(2方)

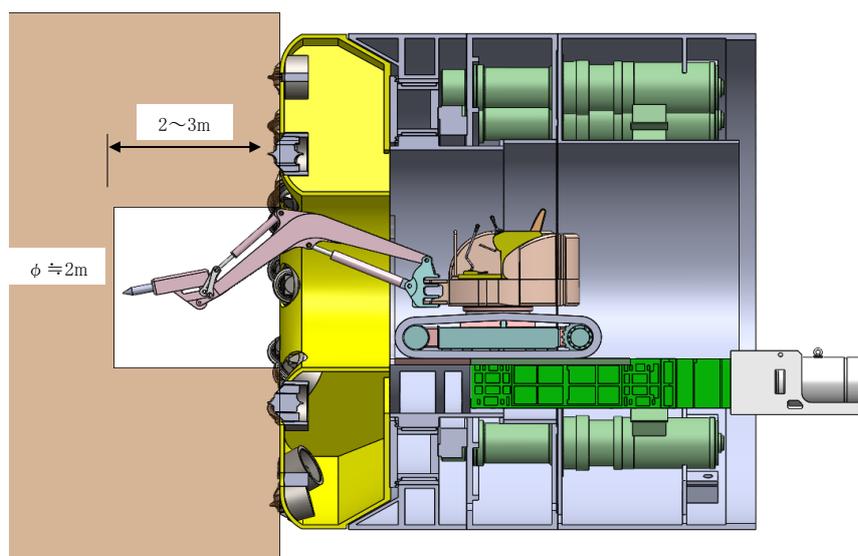


図 3. 2. 3 素掘り中央導坑掘削(地山解放率の促進)

(3) 上載荷重受け在来工法

ドーナツ型が拘束されたとき、開口部から前方に出て掘進機上部の負荷を除去し、トンネル上部荷重を在来工法で支持し、掘進機通過を補助する（図 3.2.4、表 3.2.4）。

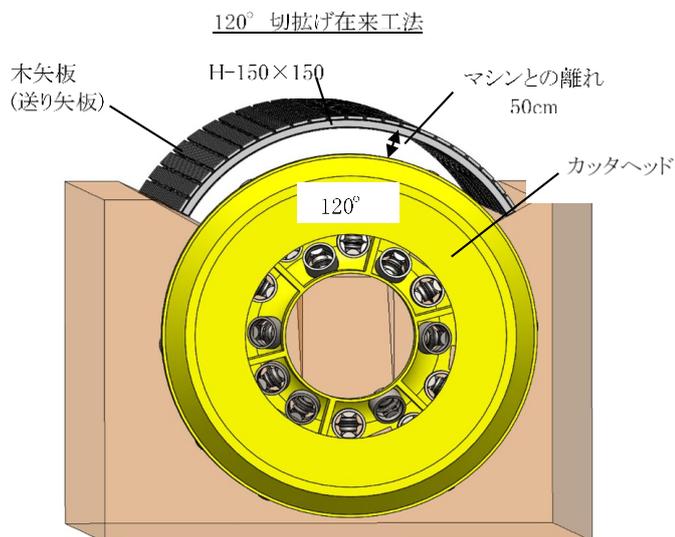


図 3.2.4 上載荷重受け
在来工法

表 3.2.4 上載荷重受け在来工法

発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破碎帯・切羽崩壊
具体的な現象	・掘進機に掛かる地山荷重により、掘進機が拘束され掘進ができない恐れがある。
補助工法の目的	・トンネル上部荷重を在来工法で支持し、掘進機通過を補助する。
具体的な対策	①荷重受けをするための小断面作業坑を10m程度天端付近まで在来工法で施工する。 ②掘進機前方を0.75mスパン毎に鋼製支保工と木矢板による在来工法で上部120度を掘削・支保工をする。 ③上載荷重受けが完了後、掘進機を掘進し、山岳ライナで覆工する。 ④在来工法と山岳ライナの間、裏込め注入する。
施工日数	①小断面トンネル在来工法 9m当たり施工日数:6日 ②120°切拵げ在来工法 10.5m当たり施工日数 : 7日 1日当たり施工量 : 1.5m/日(2方)

(4) ドーナツ型を利用した前方N A T M施工

脆弱帯が長い区間では、開口部から前方に出てN A T M工法に切替える（図 3.2.5、表 3.2.5）。

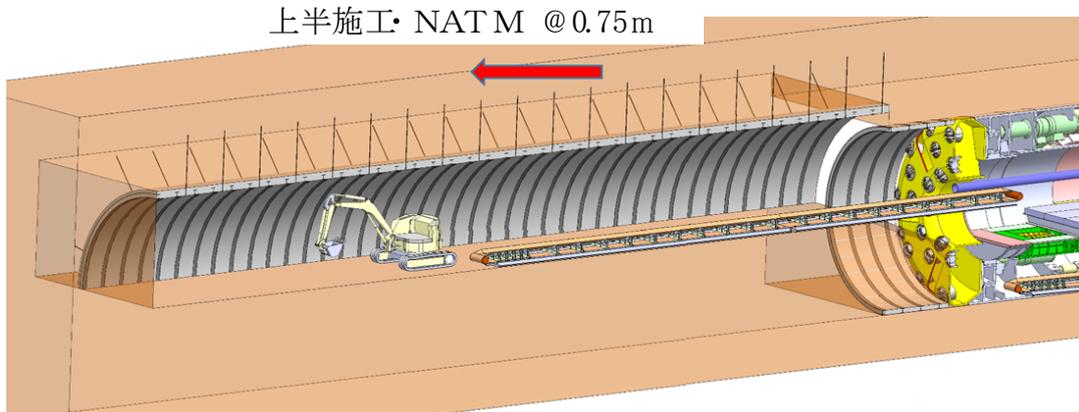


図 3.2.5 ドーナツ型を利用したN A T M施工

表 3.2.5 ドーナツ型を利用したN A T M施工

発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破碎帯・切羽崩壊
具体的な現象	・山岳ライナでは支持できない荷重負担が想定される。
補助工法の目的	・低強度地山区間において、山岳ライナ方式では地山支持ができない場合、掘進機前方に出てN A T M工法に切り替えて施工し、山岳ライナと一体化して支持するため。
具体的な対策	①前方30m程度をセメント系等による地山注入改良する。 ②掘進機を後方に2,3mバックさせ、その部分を鋼リング支保式で支持し、進入路・ヤード等を確保する。 ③注入区間30m程度を上半施工する。 ④戻りながら下半施工する。 ⑤掘進機を前進させるため、鋼材架台を設置し、山岳ライナ据付後にN A T Mとの隙間に裏込め注入をし一体化する。
施工日数	①セメント系注入改良：6日（5m/日） ②掘進機前方2,3m施工：4日（0.75×4スパン） ③N A T M上半施工：10日（30m/3m/日） ④N A T M下半施工：10日（30m/3m/日） ⑤掘進機前進・一体化：架台設置2日、前進・ライナ・注入2日 合計：34日 ≒1m/日

(5) 長尺鋼管先受け工法

長尺鋼管先受け工法は、ドーナツ型の天井部の崩落を防止するため行うもので、標準的には外径φ114.3mm、肉厚さt=6mmの鋼管をトンネル頂部から120度の範囲に、掘進に先行して打ち込み岩盤を補強するものである。1ロット当たりの打ち込み長さを12.5mとして、低強度地山区間の必要長さに応じて延長も可能なボーリング機械を使用する。表3.2.6に長尺鋼管先受け工法の施工仕様、表3.2.7にパーカッション式ボーリング機械仕様をそれぞれ示す。

この補助工法は、NATM工法では地山荷重を確実に支えられることから多く採用されている。TBM工法においては、鋼管が掘進機に当たることから不可能になっている。そのため、ドーナツ型では施工場所をマシンのテール側から既設の山岳ライナを上部120°、長さ6m程度を撤去し、作業は支保工ヤードから行うことで可能にした(図3.2.6、図3.2.7)。

既設山岳ライナの撤去工は、人力施工により1スパン(1.5m)ごとにH-100鋼製支保工に鋼製掛矢板による在来工法で施工する(図3.2.8)。図3.2.9に長尺鋼管先受け工法の施工サイクルタイムを示す。

表3.2.6 長尺鋼管先受け工法の

施工仕様

1ロット数量	14本@500
鋼管径	φ114.3mm
打設長	12.5m
材料	シリカレジン
施工機械	パーカッション式 ボーリング機

表3.2.7 パーカッション式

ボーリング機械仕様

掘さく口径	mm	101~157
掘さく深度	m	100
回転数	rpm	38
トルク	N-m	600
打撃数	bpm	2200
打撃エネルギー	J	500
スラスト	kN	60
ストローク長	mm	1700
原動機(ディーゼルエンジン)	kW/rpm	45/2500
機体寸法(運搬時)(L×W×H)	mm	4150×1400×1800
質量	kg	2500

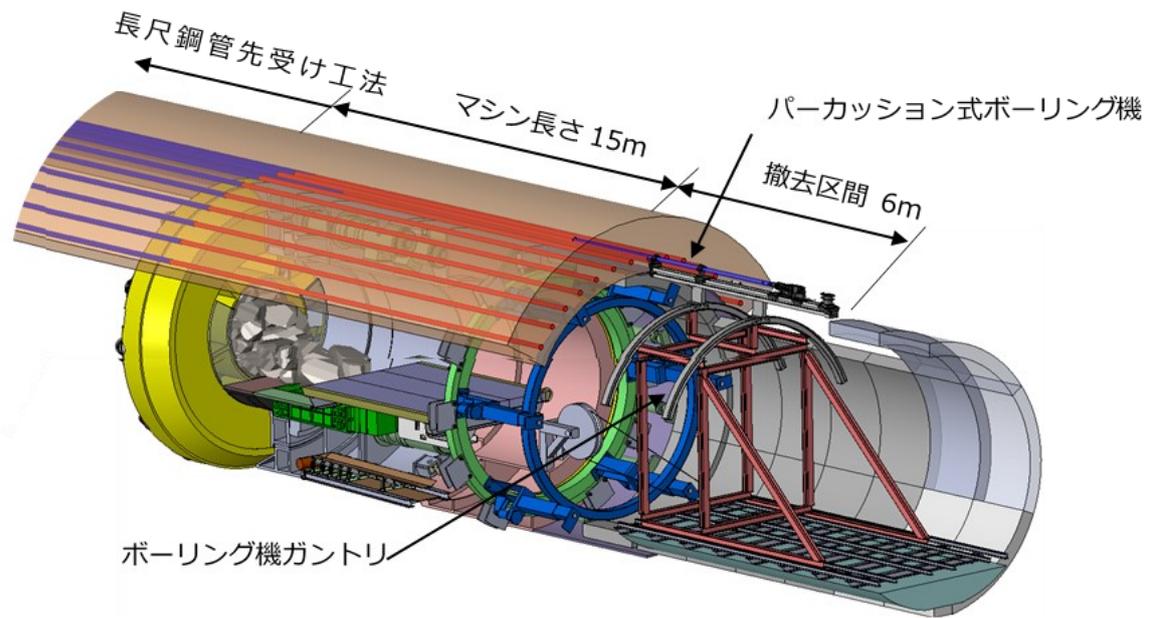


図 3.2.6 長尺鋼管先受け工法の施工位置

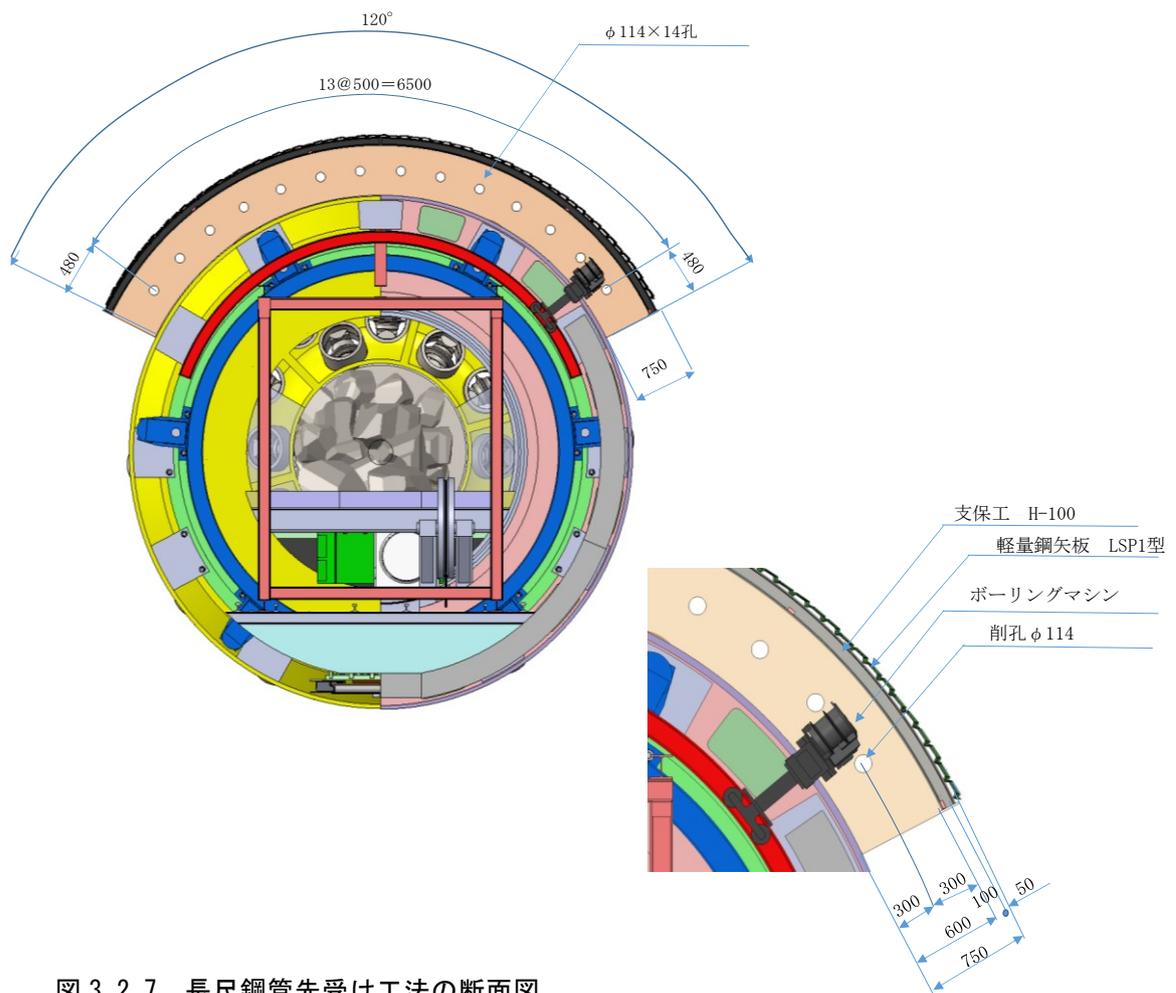


図 3.2.7 長尺鋼管先受け工法の断面図

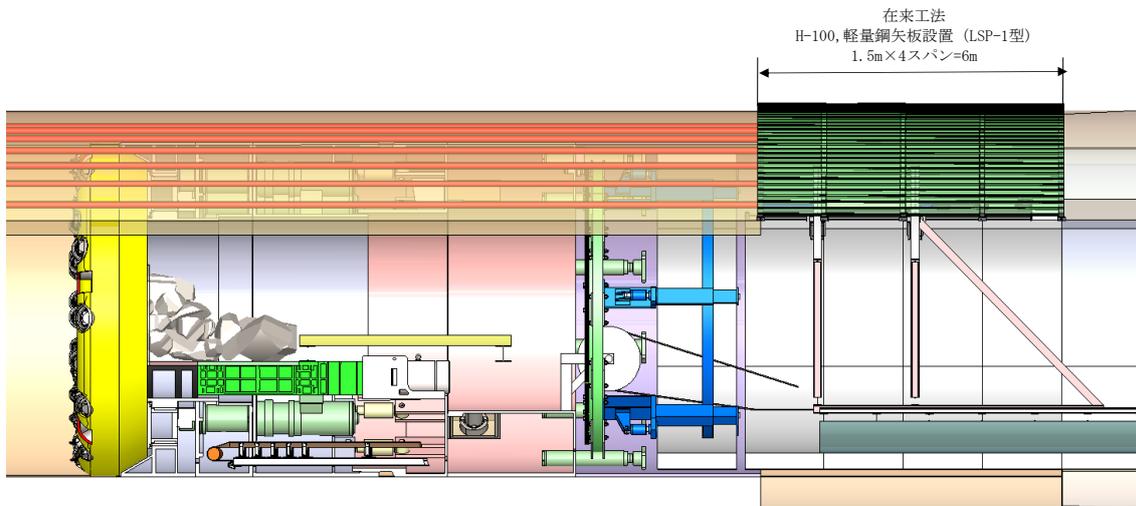


図 3.2.8 撤去工・在来工法

低強度地山区間長尺鋼管先受け工法サイクルタイム

12.5m 当たり	:	撤去工 1日 + 長尺鋼管先受け工法施工日数 1.4日 + 掘削・支保工施工日数 0.7日
	=	3.1日
1日 当たり	:	12.5m ÷ 3.1日 = 4.0m/日
1月 当たり	:	4.0m/日 × 17日/月 = 68m/月

図 3.2.9 長尺鋼管先受け工法の施工サイクルタイム

3.3 第3章のまとめ

研究開発したドーナツ型は、中心部に開口を設けることで切羽を二分割して掘削する機構であることと、その特長を活かした低強度地山に対する対応の容易さにある。主な施工性は、以下に示すとおりである。

① ドーナツ型の特長

ドーナツ型の最大の特長は、中心部を開口して地山を直接見えるようにし、またカッタヘッドの前に出ることを可能にしたことにある。そのことを可能にするため、全断面ではなくドーナツ状に外殻だけをTBMで掘削し、残りの中心部分を破砕機で機械掘削する機構としたことにある。

② 低強度地山の対応策

中心部を開口したことにより、その開口部を利用して低強度地山の対応策を容易にしたことがある。また、中心部岩盤そのものが大きいコア採取になることか

ら、シュミットロックハンマなどの簡易反発硬度試験から岩盤強度を推定し、地山強度比を算出することでリアルタイムに補助工法の必要性の判断材料にする効果がある。

③ 補助工法

TBMの機内からの補助工法は、切羽が見えないことや狭いスペースから作業になり、工期の遅延など施工費の増大に繋がっている。ドーナツ型では、カッターヘッドの中心部が開口していることで、従来からNATM工法で培われてきた補助工法の大部分が開口部から施工できる優位性がある。

特に、長尺鋼管先受け工法は、従来のTBMでは施工できなかったが、一部の既設ライナを撤去して掘進機のテール側から施工することで可能にした。

【第3章参考文献】

- 1) 武田光雄、株木雅浩：トンネル掘削装置、及びトンネル掘削方法、特許公報、特許第 5138821 号、2012
- 2) (一財)先端建設技術センター：ドーナツ型 TBM を活用した新たな山岳トンネル工法の開発、ドーナツ TBM 施工検討会、2017.3
- 3) 日本トンネル技術協会：TBM ハンドブック、2000
- 4) 武田光雄、株木雅浩：トンネル掘削装置、及び、トンネル掘削方法、特許公報、特許第 6467754 号、2019
- 5) 株木康吉、武田光雄、株木雅浩：トンネル掘削装置、及びトンネル掘削方法、特許公報、特許第 6153173 号、2017
- 6) 武田光雄、株木雅浩：トンネル掘削装置、特許公報、特許第 5242862 号、2013
- 7) 今田 徹：山岳トンネル設計の考え方、土木工学社、2010

第4章 ドーナツ型の掘削特性

ドーナツ型は、中心部を掘削しないことによりセンターカッタを無くすことができることや、掘削面積の減少によりカッタ配置数を少なくできるなど従来のTBMとは異なる掘削特性がある。この掘削特性を評価するため、カッタヘッドが接するすべての範囲を掘削する実験装置を新たに製作した。この装置を用いた高強度モルタル供試体による掘削実験により、TBMの岩盤破碎のメカニズムを再現できることや、中心部を開口にすることによる掘削特性、およびTBMの課題であるカッタ寿命に対する優位性を明らかにする^{1),2)}。

4.1 実験装置の製作

従来のTBMに関する掘削実験は、西松ら³⁾によるカッタの貫入量、室ら⁴⁾によるビット斜角の影響など岩盤破碎のメカニズムの解明に多くの成果が挙げられている。しかしながら、ドーナツ型とTBMを比較する場合、カッタ1個ごとではなく全体を掘削して比較する必要があるため、新たな実験装置を製作することとした。

この装置は、トンネル形状をTBM外径6m程度、岩盤強度で100MPa程度の通常地山を想定し、実験条件を決めるために予備実験を繰り返した⁵⁾。特に、実験では回転しない固定式カッタを繰り返し用いるため、**図4.1.1**に示すように摩耗量が大きく測定値に影響した。掘削実験は、TBMとドーナツ型を同一条件で比較しなければ正確なデータが得られないことから、ローラ式カッタなど新たに実験装置を製作した^{6),7)}。

すり減り



図4.1.1 回転しない
固定式カッタの摩耗量

4.1.1 実験装置

新たな実験装置の設定条件として、以下のことが要求される。

- ・既存の鉛直押付式ビット掘削機⁸⁾を改良する
- ・詳細なデータがとれる駆動装置にする
- ・摩耗・破損が起きないディスクカッタにする
- ・モルタル供試体は高強度にする

要求条件を受けて、新たな実験装置の仕様は、以下のとおり決定した。

- ・カッタヘッド外径 ϕ 1,000mm:実験装置に収まる最大寸法とした。
- ・カッタ径 ϕ 100mm:ローラ式カッタとして設計・製造可能な最小寸法とした。
- ・カッタ間隔48mm:カッタは、カッタヘッドの同心円上にそれぞれ1個ずつ配置される。カッタ間隔とは、この同心円の間隔のことで、実機TBMと同様に隣接剥離破砕が生じるように48mmとした。

また、動力については、押付力には油圧式ジャッキを使用し、旋回モータは電流値を計測できる電動インバータ方式とした。モルタル供試体を掘削するカッタを取り付けたカッタヘッドは、2台の油圧ジャッキにより押圧力が付与され、トルクは電動モータによりピニオンギヤとメインギヤを介して伝達される構造とした。

表4.1.1に油圧押付装置の仕様、表4.1.2に電動旋回装置の仕様、図4.1.2、図4.1.3に実験装置および駆動部の構造の模式図をそれぞれ示す。

以下、型式別の実験名称をTBM ϕ 1,000mmはF1000、ドーナツ型の開口径 ϕ 232mm(開口面積率5%)、 ϕ 328mm(開口面積率11%)、 ϕ 424mm(開口面積率18%)をそれぞれD200、D300、D400と呼ぶこととする。

表 4.1.1 油圧押付装置の仕様

押付装置	
油圧モータ仕様	
押付速度	12.9cm/min
油圧ジャッキ	42.2ton \times 200st \times 2
油圧ポンプ	5.2L/min \times 210kg/cm ²
電源	2.2kw \times 4P \times 200V \times 50Hz \times 1

表 4.1.2 電動旋回装置の仕様

旋回装置	
電動モータ仕様	
旋回トルク	60.0kN \cdot m
旋回速度	0.5 \sim 2.0m/min
メインギヤ径	2,160mm
ピニオンギヤ径	300mm
モータ容量	15kw \times 4P インバータ
電源	200V \times 50Hz 3 ϕ

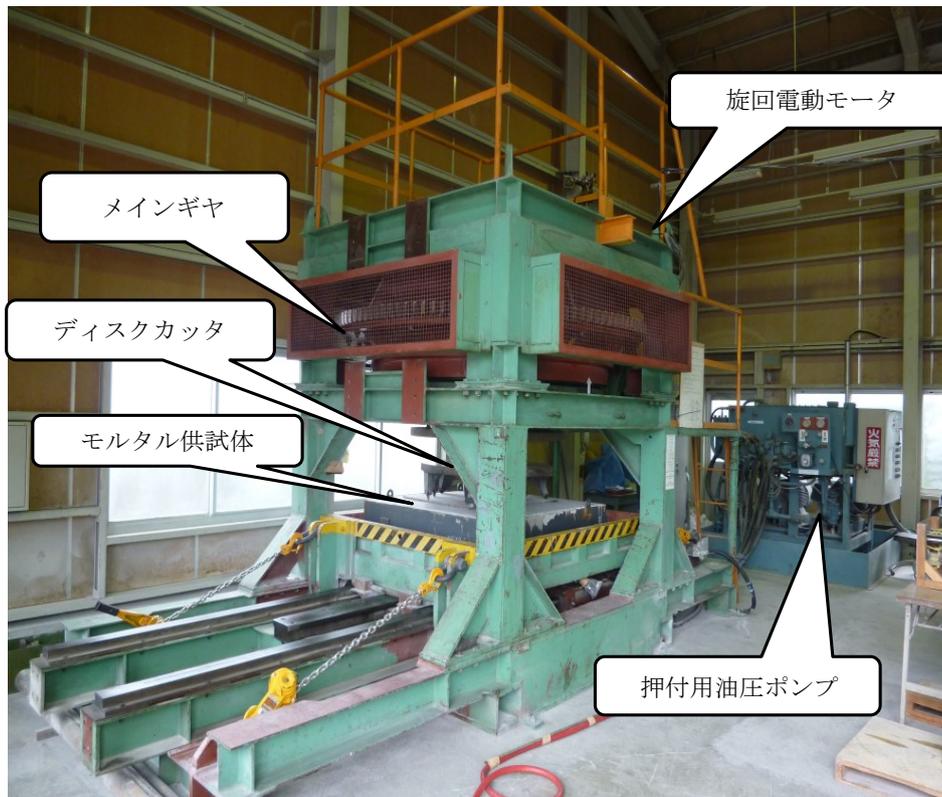
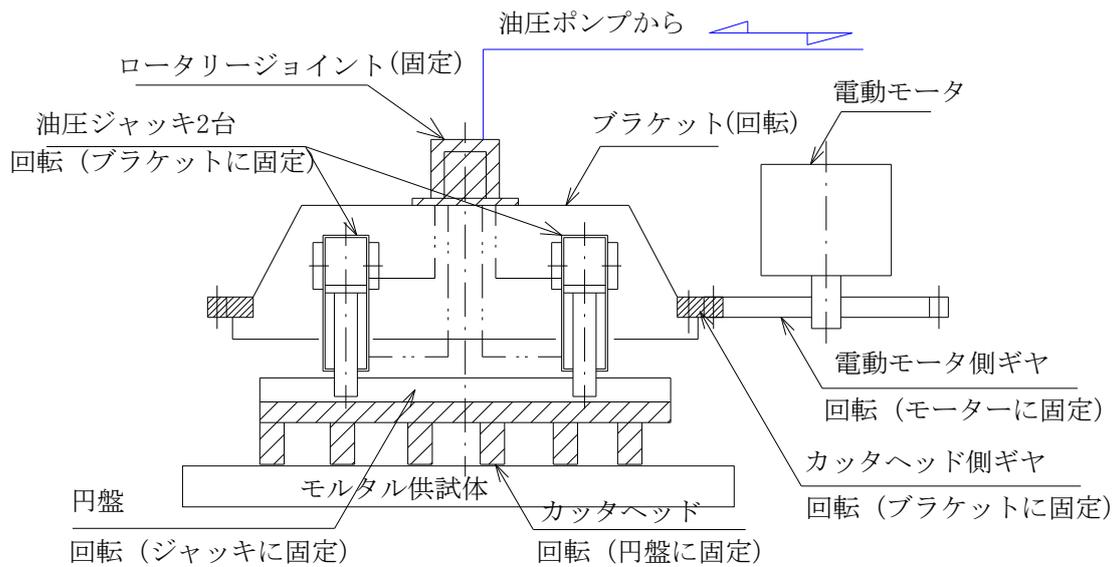


図 4.1.2 実験装置（鉛直押し式）



※電動モーターについてのギヤを介して、ロータリージョイント以外は回転する。
 ※ロータリージョイントは、固定して回転している油圧ジャッキ2台に油圧を送る。

図 4.1.3 実験装置の構造

4.1.2 カッタヘッドとカッタの配置

掘削実験用に製作した実験装置のカッタヘッドは、油圧ジャッキの押付力が実験結果に影響を及ぼすようなひずみの発生を防止するため、鋼板の形状をφ1,000mm、厚さを50mmとした。

カッタヘッド上のカッタの配置は、図4.1.4に示すとおりF1000の配置を基準に決めている。図中の番号は、中心から順に①～③は連結したセンターカッタ、④～⑩はフェースカッタ、そして⑪～⑬は同一円周上に配置した外ゲージカッタを表している。カッタは、外ゲージカッタを除き図4.1.4に示す各同心円に1個ずつ配置され、カッタヘッドが一回転するごとにすべてのカッタが同心円上の軌跡に沿って岩盤を掘削することになる。この同心円の間隔が前述したカッタ間隔で、本実験装置では48mmとした。

また、ドーナツ型では図4.1.5に示すように、D400の場合にはカッタ番号⑤の位置に内ゲージカッタを配置することになる。同様にD200とD300では、カッタ番号③と④（図4.1.4参照）の位置に内ゲージカッタが配置される。

カッタの仕様は、今回の実験の頻度でも摩耗の影響がでないように実機TBMと同一の材質(SKD11)で製作した。各型式のカッタヘッドには、F1000では図4.1.6のとおり連結したセンターカッタ3個、外ゲージカッタは同一最外周に3個およびフェースカッタ7個を48mm間隔で配置した。

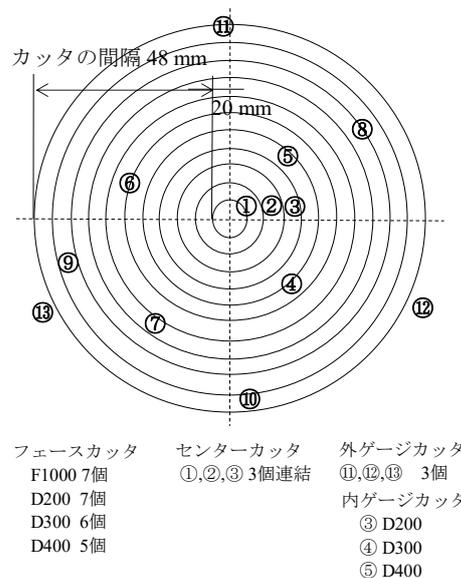
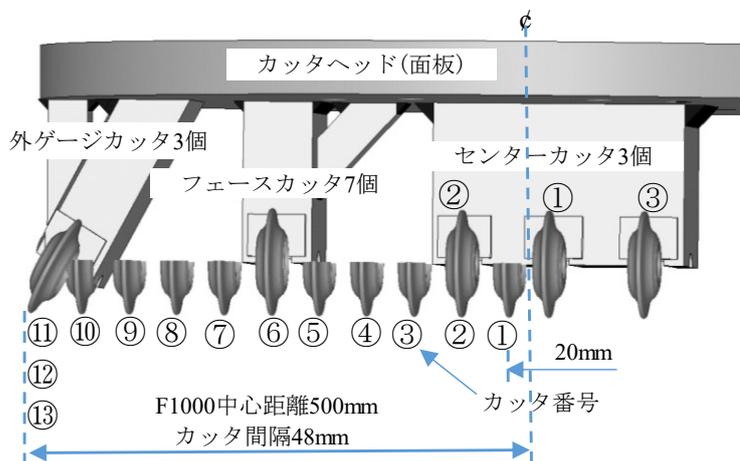


図4.1.4 F1000のカッタの配置図

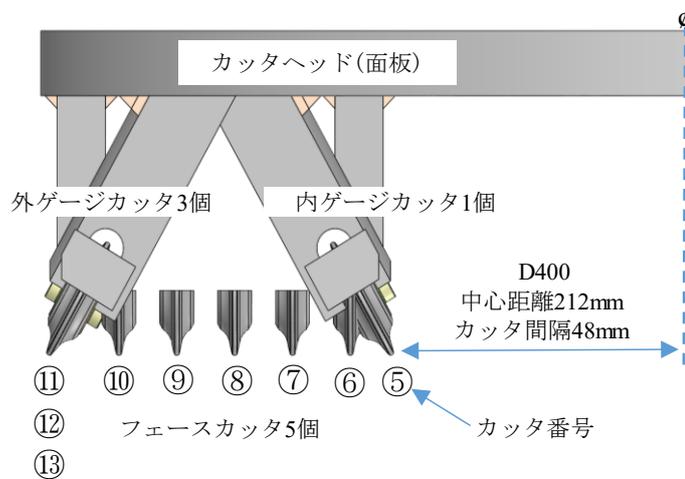


図 4.1.5 D400 のカッタの配置図

一方、D200 では図 4.1.7 のとおり、最内周に 1 個の内ゲージカッタ、最外周に外ゲージカッタ 3 個およびフェースカッタ 7 個を 48mm 間隔で配置した。また、D300 と D400 も同様に内ゲージカッタをそれぞれずらして配置した。また、図 4.1.8 には F1000 の 3 個連結したセンターカッタ、図 4.1.9 にはフェースカッタと外ゲージカッタが掘削している状況をそれぞれ示す。

なお、ドーナツ型の D200 は、センターカッタの有無による掘削特性を比較するため、センターカッタ 3 個の掘削面積と同一になるように開口部の面積を設定した。また、掘削ズリの排出方法は鉛直下向きの掘削となるため、エアーコンプレッサ 2 台を配置し、風圧により排除する方式を採用した。

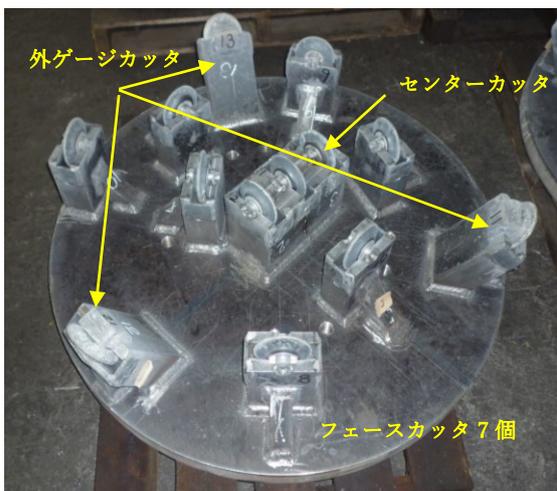


図 4.1.6 F1000 におけるカッタの配置状況

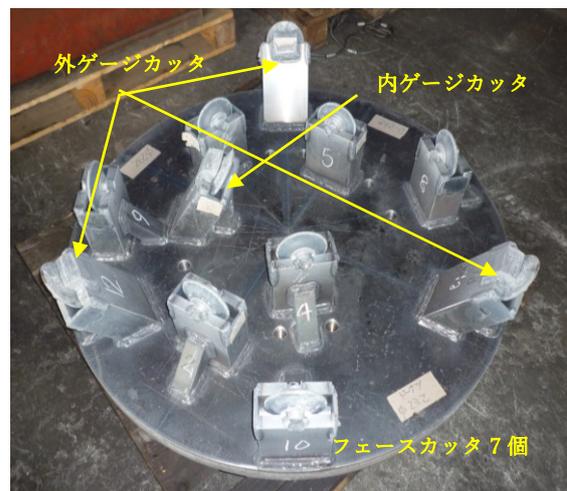


図 4.1.7 D200 におけるカッタの配置状況



図 4.1.8 センターカッタの作動状況



図 4.1.9 フェースカッタおよび
外ゲージカッタの作動状況

4.1.3 高強度モルタル供試体

掘削対象の硬質岩盤モデルとなる供試体には、高強度モルタルを使用した。供試体寸法は、掘削径 $\phi 1,000\text{mm}$ 、掘削深さ 200mm を確保するため、縦 $1,320\text{mm} \times$ 横 $1,320\text{mm} \times$ 高さ 300mm とし、割れ防止のため鋼製 ($t=9\text{mm}$) の箱枠で補強した。補強枠は、実際に TBM が掘削中に受ける地山の拘束の役割を果たすもので、掘削実験中にひび割れが発生した場合でも地山である試験体を拘束する役目も担っている。

供試体のモルタルの配合は、表 4.1.3 に示すとおりで目標強度 (28 日) を 70N/mm^2 程度とした。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用し、水セメント比を小さくすることで高強度化を図った。なお、使用したモルタルは JIS 認定の生コン工場で製造し、各試験はそれぞれの JIS 規定に準じて実施した。

結果、供試体強度 (95 日) は、圧縮強度で 94.8N/mm^2 、引張強度 (割裂引張強度) で 4.77N/mm^2 程度となった。実験では、強度のバラツキを少なくするため、28 日圧縮強度から算定したゴーラル曲線から圧縮強度の伸びがほぼ止まる材齢 91 日以上気中で養生を行った供試体を用いることとした。表 4.1.4 に材齢ごとの圧縮強度と引張強度の試験結果を示す。

表 4.1.3 高強度モルタルの配合

目標 28日強度 (N/mm^2)	水セメン ト比 (%)	水 (kg/m^3)	普通 セメント (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	混和剤* 高性能AE 減水剤 (kg/m^3)
70	29.9	285	952	1076	9.52

表 4.1.4 モルタル圧縮・引張強度試験の結果

材齢 (日)	7	28	70	84	95
圧縮強度 (N/mm ²)	64.5	82.2	94.5	94.1	94.8
引張強度 (N/mm ²) (割裂引張強度)	4.77 (材齢 99 日)				

4.2 掘削実験

4.2.1 測定条件

測定条件は、実験装置の仕様の制限などから押圧力として 115kN/m²、130kN/m²、145kN/m² および 160kN/m² の 4 ケースとして、同一条件で比較するため、油圧ジャッキの押付力 (kN) は掘削面積当たりに換算した。回転数は、1 分間当たり 3 回に固定した。実験は、型式ごとに押圧力の 4 ケースに対して、掘削深さは予備実験から十分な安定したデータが得られることから、それぞれ深さ 3cm を 1 回の実験とした。しかしながら、押圧力で 115kN/m²、130kN/m²、145kN/m²、および D300 ではデータが安定しなかったため、実験回数を増やして全体で 25 個の測定値で評価することにした。表 4.2.1 に、掘削実験の測定条件を示す。

表 4.2.1 掘削実験の測定条件

型 式	TBM		ドーナツ型		
径 別	外径 φ 1,000mm (F1000)		開口径 φ 232mm (D200)	開口径 φ 328mm (D300)	開口径 φ 424mm (D400)
掘削面積(開口面積率)	0.785m ²		0.743m ² (5%)	0.700m ² (11%)	0.644m ² (18%)
カッタ個数	13個 センターカッタ 3個 フェースカッタ 7個 外ゲージカッタ 3個		11個 内ゲージカッタ 1個 フェースカッタ 7個 外ゲージカッタ 3個	10個 内ゲージカッタ 1個 フェースカッタ 6個 外ゲージカッタ 3個	9個 内ゲージカッタ 1個 フェースカッタ 5個 外ゲージカッタ 3個
押圧力 (kN/m ²)	油圧ジャッキ押付力 (押圧力×掘削面積) (kN)				
ケース1 115	90		85	81	74
ケース2 130	102		97	91	84
ケース3 145	114		108	102	93
ケース4 160	126		119	112	103

4.2.2 押付力、トルクの実験値の変換

油圧ジャッキの押付力は、ロードセルで校正した。図 4.2.1 に、押付力のロードセルによるキャリブレーションの結果を示す。

押付力は、式 (4.1) に示すように油圧ジャッキの出力と掘削装置の自重の和にキャリブレーションの結果を補正した。トルクは、式 (4.2) に示すように電動モータの電流値に減速機のトルク係数とギヤ比と機械効率を乗じ 1,000 で除して kN・m 単位に変換して求めた。

$$\begin{aligned} \text{押付力 (kN)} = & (2 \text{ 本の油圧ジャッキ押付力 (kN)} \\ & + \text{掘削装置の自重 (kN)}) \times 0.91 \end{aligned} \quad (4.1)$$

0.91 : キャリブレーション補正值

$$\text{トルク (kN}\cdot\text{m)} = (\text{電流値 (A)} \times 1,120) / 1,000 \quad (4.2)$$

1,120 : 181 (減速機のトルク係数)

$\times 116/15$ (ギヤ比) $\times 0.8$ (機械効率)

4.2.3 データの測定方法

各測定値は、5 秒毎に自動記録し、始動時と停止時の不安定な出力を除き、それ以外の掘削深さ 3cm 区間のすべての測定値を平均した値とした。掘削深さ管理は、押付用油圧ジャッキのストロークを自動計測することで行った。

図 4.2.2 は、押圧力 145kN/m² 時の型式別の押付力の測定結果を示したものであ

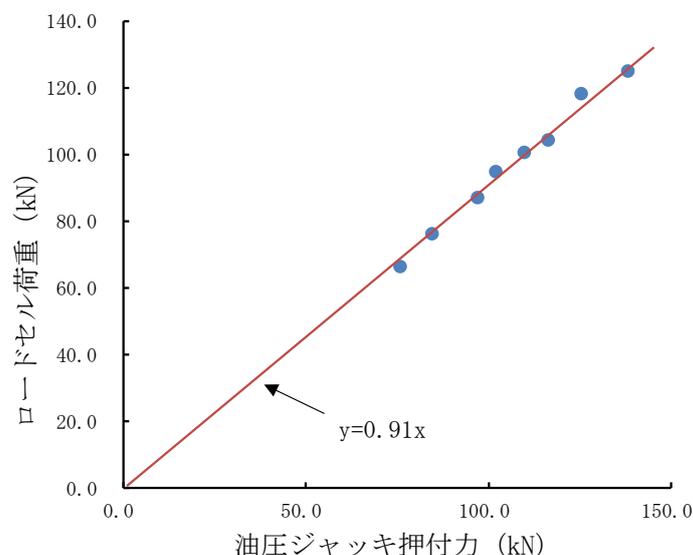


図 4.2.1 押付力のキャリブレーション結果

る。掘削実験中は、常に押付力を一定に保つため、人力によって油圧の微調整を行っている。掘削の進行につれて、押付力が急激に低下する現象が生じており、この低下量の大きさと押付力の変動は開口径が大きくなるほど大きくなる傾向にあった。この瞬間的な押付力の低下現象は、溝掘りによる隣接剥離破砕が生じた瞬間に発生している。

図 4.2.3 は、掘削実験中のトルクを記録したものである。トルクは、電動モータをインバータ制御しているため、押圧力のように急激にトルクが低下する現象は現れていない。なお、トルクは $F1000 < D200 < D400 < D300$ の順に大きくなっている。

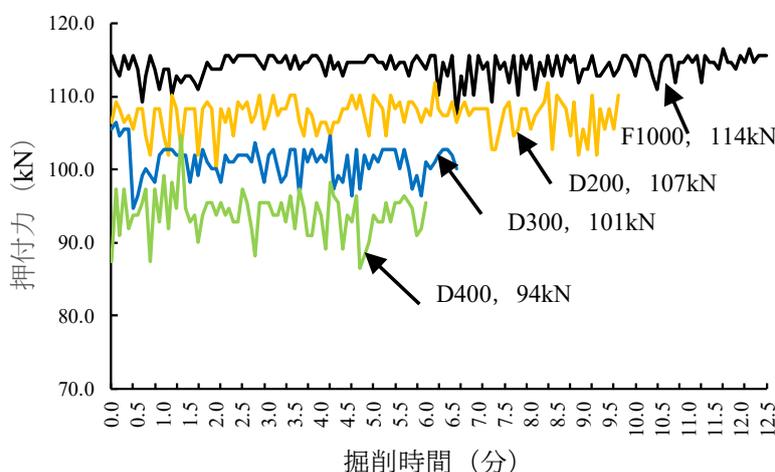


図 4.2.2 押付力と掘削時間の関係 (ケース 3: 145kN/m²)

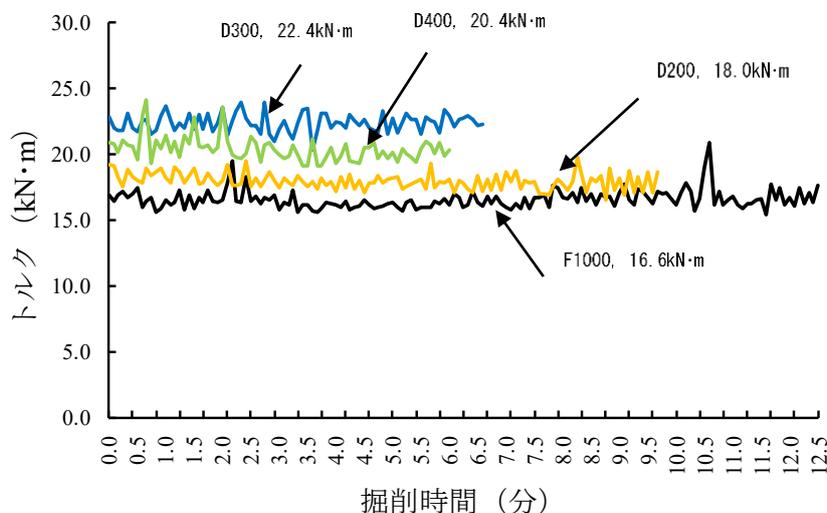


図 4.2.3 トルクと掘削時間の関係 (ケース 3: 145kN/m²)

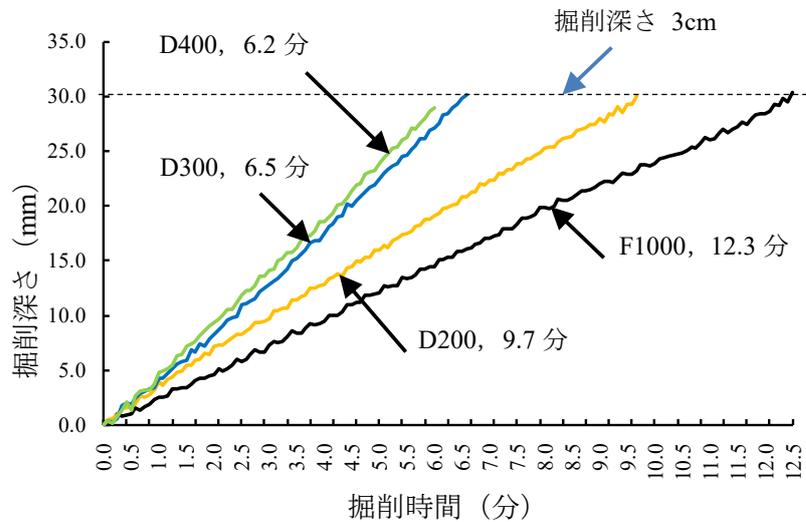


図 4.2.4 掘削深さと掘削時間の関係 (ケース 3: 145kN/m²)

図 4.2.4 は、掘削時間と掘削深さの関係を示したものであり、図中の数字は 3cm の掘削深さに到達するまでの時間を表している。いずれの条件とも、掘削時間と掘削深さは直線的な関係にあり、一定の速度で掘削が行われていたことが分かる。

4.3 掘削実験の結果と考察

表 4.3.1 は、4 ケースの押圧力でカッタヘッドを押付けた場合の掘削深さ 3cm に到達するまでの掘削時間、押付力およびトルクの測定結果を示したものである。掘削特性を評価するにあたり、最初に新たに製作した実験装置が岩盤破碎のメカニズムを再現していることを確認する。次に TBM のセンターカッタの切削抵抗について、TBM とドーナツ型の掘削形状と掘削時間から比較する。最後に掘削特性の評価として、4 ケースの押圧力に対して掘削時間、トルクおよび比エネルギーそれぞれについて実験条件ごとに比較することとする。

4.3.1 実験装置の評価

図 4.3.1 は、D400 の隣接剥離破碎によるバナナ形状のズリなどや、内ゲージカッタの押圧による中心部の崩れた部分の岩片を示したもので、実験では予想どおりの掘削が行われている。

図 4.3.2 は、F1000 において押圧力 4 ケースで各深さ 3cm を掘削した終了時の仕

上がり状態を示したもので、48mm 間隔の同心円状に隣接剥離破碎が現れている。

表 4.3.1 高強度モルタル掘削実験の掘削深さ 3cm 当たりの測定結果

型式	TBM (外径φ1,000mm)			ドーナツ型 (外径φ1,000mm)								
	外径φ1,000mm (F1000)			開口径φ232mm (D200)			開口径φ328mm (D300)			開口径φ424mm (D400)		
径 別	掘削時間 (min)	押付力 (kN)	トルク (kN・m)	掘削時間 (min)	押付力 (kN)	トルク (kN・m)	掘削時間 (min)	押付力 (kN)	トルク (kN・m)	掘削時間 (min)	押付力 (kN)	トルク (kN・m)
ケース1 115	19.2	90	15.8	16.7	86	16.2	18.2	81	16.6	12.4	74	17.4
	21.4	89	15.6	16.7	84	16.1	13.4	81	18.5	-	-	-
ケース2 130	14.6	102	16.5	13.0	96	16.8	12.0	92	17.4	9.8	84	18.0
	16.4	101	15.9	12.2	97	17.3	9.8	91	19.6	-	-	-
ケース3 145	11.5	113	17.2	10.7	108	17.3	9.4	101	19.2	6.2	94	20.4
	12.3	114	16.6	9.7	107	18.0	6.5	101	22.4	-	-	-
ケース4 160	9.7	126	17.4	8.9	118	18.7	5.7	114	23.5	5.8	103	21.5



図 4.3.1 カッタ間の隣接剥離破碎ズリ片の形状

図 4.3.3 に示す D200 においても、隣接剥離破砕が生じている。また、内ゲージカッタにより大部分は崩れているものの中心部を残した破砕パターンが生じている。図 4.3.4、図 4.3.5 も同様に、ドーナツ型では開口径が小さいほど中心部の残存岩盤が少なくなっており、内ゲージカッタの効果が現れていることが分かる。



図 4.3.2 F1000 仕上がり状況



図 4.3.3 D200 仕上がり状況



図 4.3.4 D300 仕上がり状況

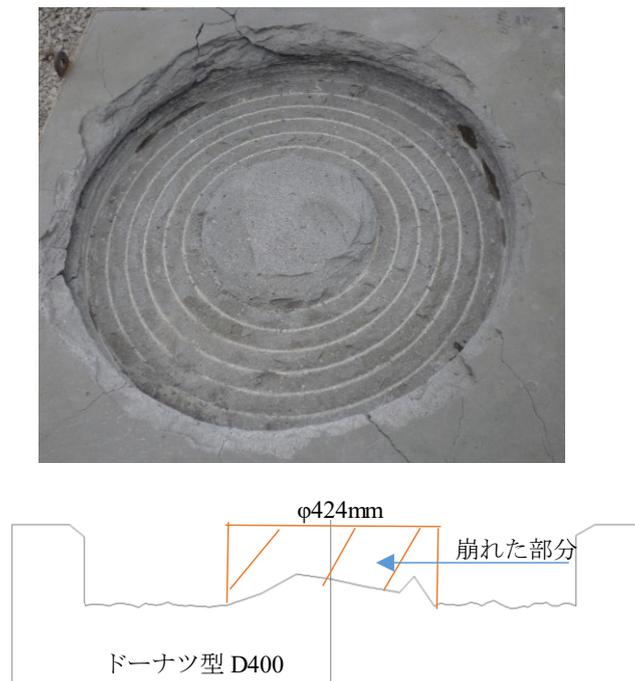


図 4.3.5 D400 仕上がり状況

以上より、掘削した仕上りの形状と、掘削ズリの状態から、カッタ間で隣接剥離破碎のメカニズムを確認できた。さらに、ドーナツ型では内ゲージカッタを配置したことで中心部を残して掘進していることから、本実験装置は、実機の岩盤破碎の状況を再現していることが確認された。

4.3.2 センターカッタの切削抵抗の評価

TBMの中心部に配置されるセンターカッタでは、回転半径が小さいためカッタが回転するに伴って、カッタの内周と外周の軌跡差に起因する幅掘りが行われる⁹⁾。

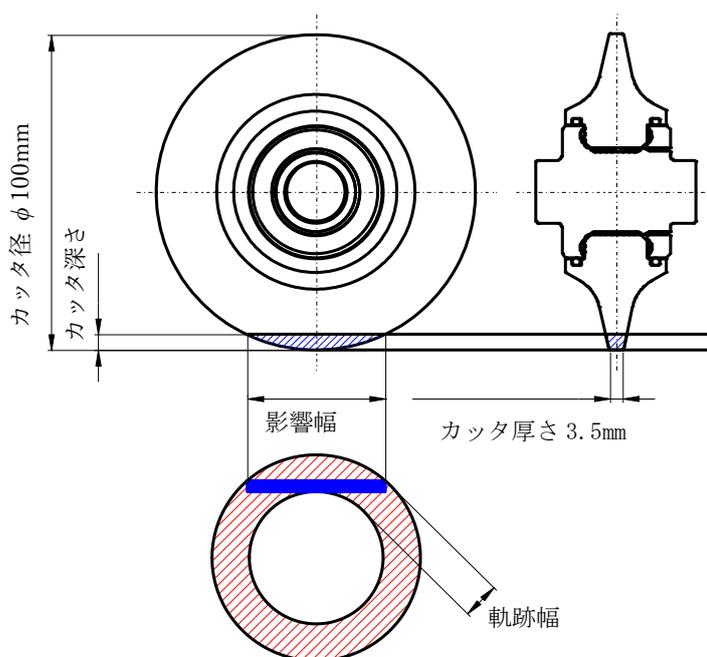


図 4.3.6 カッタの軌跡幅の模式図

図 4.3.6 は、カッタがある溝の深さに達したときに、軌跡差で溝が広く削られることの模式図を示したものである。

図 4.3.7 は、今回の実験で得られたTBMのセンターカッタ①、②および③の軌跡による幅掘りの状況を示したものである。明らかに、センターカッタの内周と外周の軌跡差で生じる幅掘りが行われていることが分かる。この実測軌跡幅は場所によってバラツキが生じているものの、最内側のセンターカッタ①で平均軌跡幅 9mm、②で 7mm および③で 4mm と回転半径が大きくなるに伴って狭くなっている(図 4.3.8)。

さらに、センターカッタの有無の影響について、センターカッタの掘削面積と同一の開口面積になるドーナツ型 D200 の掘削時間を比較すると、表 4.3.2 に示すように 15%程度短縮する結果が得られた。このことは、全体の掘削時間にセンターカッタの幅掘りによる切削抵抗が影響していることを示唆しているものと考えられる。

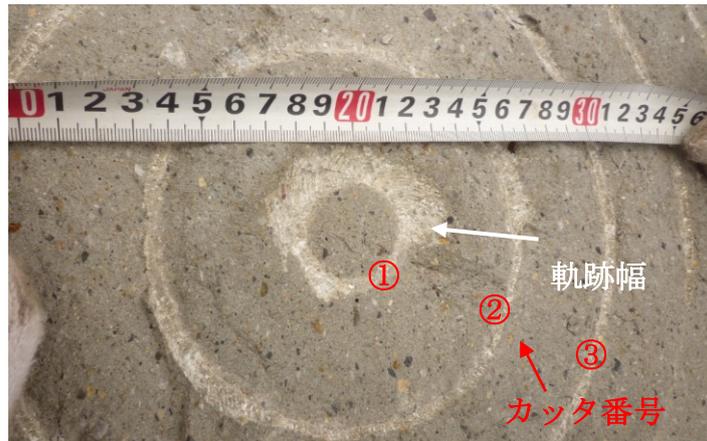


図 4.3.7 センターカッタの軌跡幅の状況

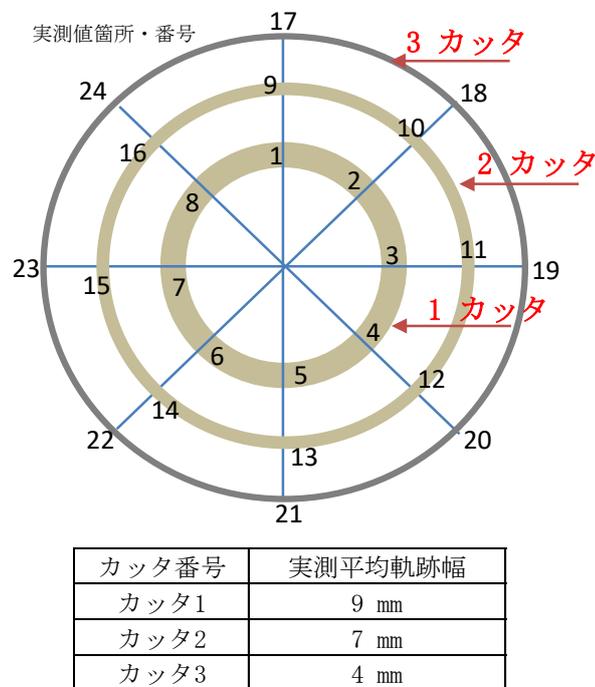


図 4.3.8 センターカッタの実測軌跡幅

表 4.3.2 センターカッタ有無の掘削時間差

型 式	掘削深さ3cmの掘削時間* (分)
F1000	14.2
D200	12.0
掘削時間差 (F1000との減少率)	2.2 (15 %)

* 押圧力135kN/m², モルタル強度95N/mm²

4.3.3 掘削特性の評価

掘削実験の結果から、4 ケースの押圧力に対して、掘削深さ 3cm に到達するまでの掘削時間、トルクおよび比エネルギーの項目に対して、TBMと比較することでドーナツ型の掘削特性を評価する。なお、図 4.3.9～図 4.3.11 の曲線は指数近似曲線であり、所要の押圧力に対する型式ごとの値を求めるために使用する。

(1) 掘削時間の評価

図 4.3.9 は、4 ケースの押圧力でカッタヘッドを押したときの掘削深さ 3cm に要する時間を開口径別に整理し比較したものである。掘削時間は、各型式とも押圧力が大きくなるほど短縮する。加えてドーナツ型では、開口径が大きいほど短縮する傾向にある。

表 4.3.3 は、測定レンジ内の 120kN/m²、135kN/m²、150kN/m² の 3 ケースを選定して、開口径別に TBM との掘削時間の減少率を比較したものである。中央の押圧力 135kN/m² で比較すると、TBM に対して D200 で 15%、D300 で 28%、D400 で 36%それぞれ掘削時間が短縮する。

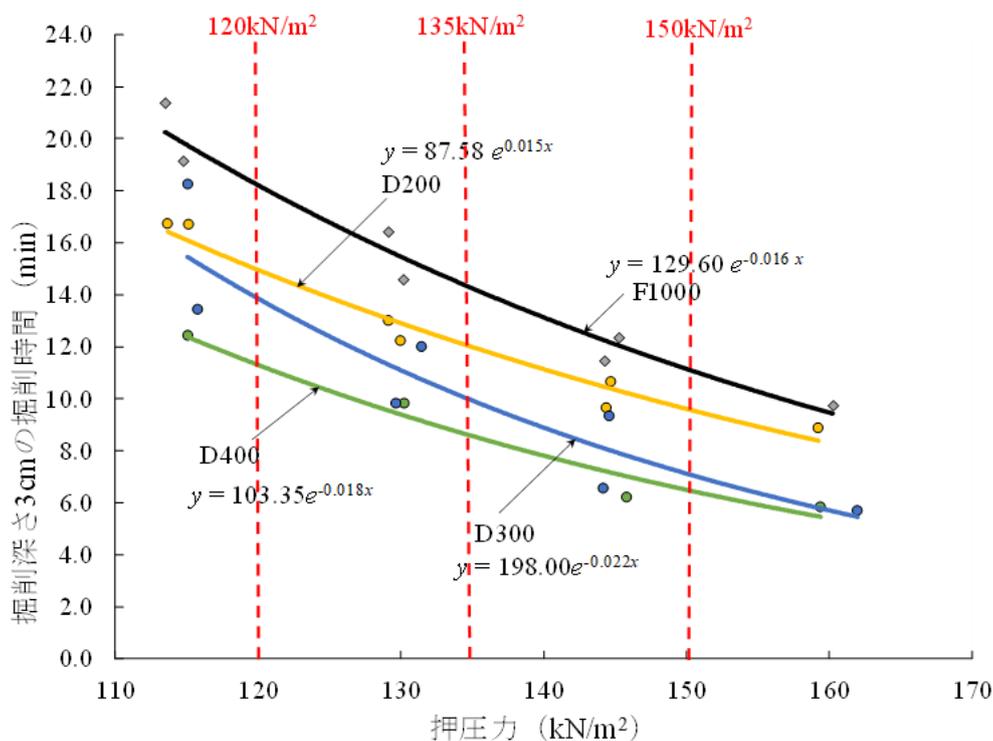


図 4.3.9 押圧力と掘削時間の関係

表 4.3.3 F1000 に対する開口径別の掘削時間の短縮率

型式 掘削時間	F1000 (分)	D200 (分)	D300 (分)	D400 (分)
120 kN/m ²	18.1	15.0	14.1	11.9
F1000に対する短縮率 (%)		17	22	33
135 kN/m ²	14.2	12.0	10.2	9.1
F1000に対する短縮率 (%)		15	28	36
150 kN/m ²	11.1	9.7	7.3	6.9
F1000に対する短縮率 (%)		13	34	38

この掘削時間の短縮の要因は、一つにはセンターカッタが無いことによる切削抵抗の低減があり、二つには掘削面積が減少することでカッタ個数が少なくなり、カッタ 1 個当たりの押付力が増加することが影響しているものと考えられる。表 4.3.4 にカッタ個数の減少率、表 4.3.5 にカッタ 1 個当たりの押付力の増加率をそれぞれ示す。

表 4.3.4 カッタ個数の減少率

型式	掘削面積 (m ²)	カッタ数 (個)	F1000に対する 減少率 (%)
F1000	0.785 (100%)	13	--
D200	0.743 (95%)	11	15
D300	0.700 (89%)	10	23
D400	0.644 (82%)	9	31

表 4.3.5 カッタ 1 個当たり押付力の増加率

型式	F1000	D200	D300	D400
カッタ数 (個)	13	11	10	9
カッタ1個当たり 押付力 (kN/個)	8.2	9.1	9.4	9.7
F1000に対する増加率 (%)		11	15	18

(2) トルクの評価

トルクの結果は、**図 4.3.10** に示すとおりとなった。トルクは、押圧力が大きいほど、ドーナツ型の開口径が大きくなるほど増大する傾向を示しているが、D300 と D400 でわずかながら逆転する現象が生じている。

この現象については、現時点では定かでないが、D300 の結果のバラツキが若干大きいこと、およびドーナツ型では、岩盤の種類や掘削の条件等の影響を受けるものの、掘削機の外周と開口径の間には適切な比率が存在する可能性がある。すなわち、開口径はいくらでも大きくすれば良いものではなく、トルクや比エネルギーなど掘削に最適、あるいは最小となる開口率が存在することを示唆しているものと考えられる。これについては、より詳細な実験を行って検証していく必要がある。

なお、**表 4.3.6** に示す押圧力の 3 ケースに関しては、開口径別に TBM と比較すると押圧力 135kN/m^2 では D200 で 4%、D300 で 17%、D400 で 14% 程度トルクが増大した。この結果は前述のごとく、カタ数が増え 1 個当たりの押付力が増大し、それに伴いトルクが増大するドーナツ型の掘削特性が現れているものである。

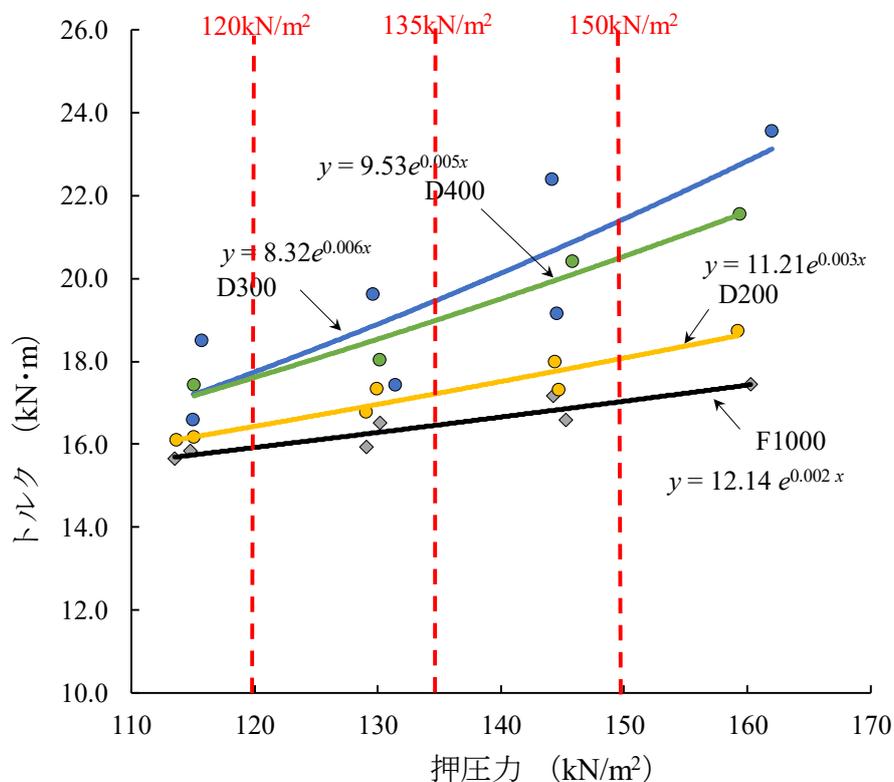


図 4.3.10 押圧力とトルクの関係

表 4.3.6 開口径別のトルクの増加率

型式 トルク	F1000 (kN・m)	D200 (kN・m)	D300 (kN・m)	D400 (kN・m)
120 kN/m ²	16.0	16.5	17.7	17.6
F1000に対する増加率 (%)		3	11	10
135 kN/m ²	16.6	17.3	19.5	19.0
F1000に対する増加率 (%)		4	17	14
150 kN/m ²	17.1	18.1	21.4	20.5
F1000に対する増加率 (%)		6	25	20

(3) 比エネルギーの評価

ドーナツ型の比エネルギーの算出は、掘進機の他に中心部岩盤を破碎する破碎機の比エネルギーを加えてTBMと比較する必要がある。掘進機の比エネルギーについては、4 ケースの押圧力で深さ 3cm を掘削するのに要した総エネルギーの関係から評価した。

算出には水上ら¹⁰⁾の式(4.3)を参照し、動力エネルギーの総和を深さ 3cm 当たり掘削体積で除して求めた。

$$E = \frac{F \times L + 2\pi \times T \times N}{V} \quad (4.3)$$

E : 掘削体積比エネルギー (kJ/m³)

F : 押付力 (kN)

L : 掘削深さ 3cm (0.03m)

T : トルク (kN・m)

N : カッタヘッド総回転数 (3cm 掘削当たり)

=1 分間当たりの回転数 (3rpm) × 3cm 掘削時間 (分)

V : 各掘削体積 3cm 当たり (m³)

比エネルギーは、式(4.3)のとおりトルクが大きく影響し、掘削時間が長くなることと総回転数が多くなり、転動距離が長くなることで増大する。

実験結果は図 4.3.11、表 4.3.7 に示すとおりとなった。なお、図 4.3.11 の縦軸の比エネルギーの単位は、kJ/m³ から MJ/m³ に変換して表記している。

各実験ケースとも押圧力が大きくなるに伴って、比エネルギーが小さくなっている。

これは、トルクの増大よりもその結果生じる掘削時間の減少の影響が大きくなったものと考えられる。

また、開口径でみると押圧力が小さな範囲で D300 と D200 が逆転している現象がみられるが、D300 のデータのバラツキが影響しているものと思われる。これについては、前述に示したように最適な開口径の存在も含めて今後の検証が必要である。

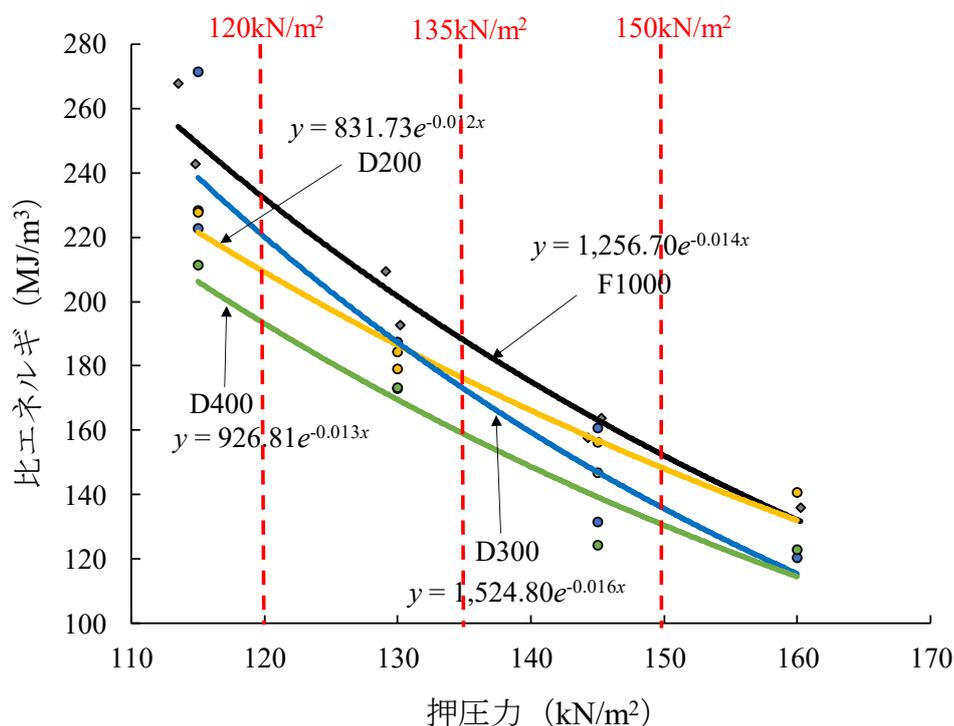


図 4.3.11 押圧力と比エネルギーの関係

表 4.3.7 開口径別の比エネルギーの減少率

型式 比エネルギー	F1000 (MJ/m ³)	D200 (MJ/m ³)	D300 (MJ/m ³)	D400 (MJ/m ³)
120kN/m ²	234	197	224	195
F1000に対する減少率 (%)		16	4	17
135kN/m ²	190	165	176	160
F1000に対する減少率 (%)		13	7	16
150kN/m ²	154	137	138	132
F1000に対する減少率 (%)		11	10	14

一方、中心部岩盤の破碎に必要な比エネルギーは、破碎機（出力 160 kW）の機械メーカー実績¹¹⁾から評価する。花崗岩を対象とした場合、破碎機の破碎消費電力は 0.3kWh/t になり比エネルギーに換算すると 3MJ/m³になる。また、別の機種ジョークラッシャ（出力 110kW）の場合、安山岩では破碎消費電力 0.4kWh/t、比エネルギーに換算すると 4MJ/m³になる。花崗岩と同程度の破碎エネルギーとした場合、モルタル 3cm の掘削量に相当する破碎エネルギーを計算すると、ドーナツ型の残掘削量が大きい開口径 D400 においても 0.013MJ/m³と比エネルギーはかなり小さくなる。

したがって、中心部岩盤の破碎に必要な比エネルギーは、掘進機の比エネルギーに比べると 1/100 程度のオーダーになり無視できる。実機においても、ドーナツ型の掘進機外径 φ6m 級の旋回モータ出力で 200kW が 8 台に対して、破碎機では 160kW が 1 台の配置になり、破碎するエネルギーは小さいものとなる。

しかし、中心部から排出される岩盤の形状寸法が、破碎機の大きさや破碎エネルギーに影響を与えることから、ここで検討した比エネルギーの大きさにも影響する。特に、全く破碎されることなく排出される場合には別途破碎設備が必要となり、比エネルギーの増加も考慮する必要がある。

(4) カッタ寿命の評価

TBMにとって掘削時間の短縮は、掘削効率の向上に繋がるとともに、カッタの岩盤に接触している時間が短くなることから、カッタの摩耗や破損の低減や寿命の延伸などにも影響する。

表 4.3.8 は、F1000 に対する D200 の掘削時間差を示したもので、カッタ全個数の減少率だけ同様に掘削時間差も 15%と減少している。掘削時間の短縮は、カッタが岩盤に接触している時間が減少することになり、カッタの摩耗や破損の減少に繋がることになる。その減少率については、センターカッタの切削抵抗を含めた掘削時間差が三型式なかで最も小

表 4.3.8 F1000 と D200 の掘削時間差 (135kN/m² の場合)

さい D200（開口面積率 5%）で比較すると、カッタ寿命は 15%程度延伸することができる。

比較項目	TBM (F1000)	ドーナツ型 (D200)	F1000に対する増減率(%)
カッタ全個数	13 個	11 個	-15
1個当たり押付力	8.2 kN	9.1 kN	11
3cm掘削時間 (センターカッタ有無の掘削時間差)	14.2 分	12.0 分	-15

4.4 第4章のまとめ

新たに掘削実験装置を製作して、その掘削実験の結果からドーナツ型の掘削特性を評価した。その結果、次のことが言える。

(1) 新たに製作した掘削実験装置は、溝掘りの隣接剥離破砕により掘進が行われていることや、ドーナツ型では内ゲージカッタを配置することで中心部を残して掘進できていることから、従来からのTBMの岩盤破砕のメカニズムを実証した。

(2) TBMのセンターカッタの幅掘りは、カッタの内外周の軌跡差により発生することを掘削実験で実証した。また、センターカッタが掘削する面積と同一になる開口面積のドーナツ型 D200 の掘削時間を比較し、幅掘りが 15%程度切削抵抗を大きくしていることを明らかにした。

(3) ドーナツ型の掘削特性の優位性は、センターカッタを無くすることができることと、掘削面積の減少によりカッタ配置数を少なくできることにある。その結果、カッタ 1 個当たりの押付力が大きくなり、それに伴いトルクも大きくなることから、掘削時間では各型式とも押圧力が大きくなるほど、ドーナツ型では開口径が大きいほど短縮する。また、掘削時間の短縮に伴い比エネルギーも減少することを明らかにした。

(4) TBMの課題であるカッタ寿命に対して、中心部を開口することで破損が多いセンターカッタが無くなることや、掘削面積が少ない分だけカッタ数が少なくなること、また、掘進速度が速くなることでカッタが岩盤に接触している時間が短くなり摩耗や破損が低減されることから、カッタ寿命が延伸することを明らかにした。

【第4章参考文献】

- 1) 株木康吉、渡部 正、武田光雄、小山幸則：ドーナツ型 TBM の掘削特性に関する実験的研究
農業農村工学会、2019-059 (2)
- 2) KABUKI Kokichi, TAKEDA Mitsuo, KOYAMA Yukinori: A Study of Excavation Characteristics of Donut Type TBM by Excavation Experiment with High-strength Mortar、ITA-AITES World Tunnel Congress 2020、

Malaysia, 2020

- 3) 西松祐一、奥野 昇、平沢幸久：ローラカッタによる岩石掘削に関する研究、日本鉱業会誌/91
1052、1975、653-658
- 4) 室 達朗、土屋 清、上松正史、河原荘一郎：TBMセンターカッタの定常掘削特性に及ぼすビット斜角の影響、土木学会論文集、No. 652、2000、47-60
- 5) (一財) 先端建設技術センター：ドーナツ型 TBM を活用した新たな山岳トンネル工法の開発、ドーナツ TBM 施工検討会、2017.3
- 6) 株木康吉、武田光雄、小山幸則：ドーナツ型 TBM の掘削に関する研究、土木学会第 70 回年次学術講演会、2015、III-43、225-226
- 7) 株木康吉、武田光雄、小山幸則：ドーナツ型 TBM の掘削に関する研究、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016、VI-482、963-964
- 8) 株式会社セキサク：ローラビット技術資料、2014
- 9) 谷本親伯、山仲俊一郎、津坂仁和、中根達人、平野 實、神崎浩、阿部 俊、岩田修一：TBM 施工におけるカッタの摩耗と岩石の物性に関する研究、材料 Vol. 55、2006、29-36
- 10) 水上秀夫、吉川哲男、今藤純明、廣川幸喜：掘削エネルギー解析システムを用いた TBM 掘削、トンネル工学研究論文、報告集第 10 巻、2000、197-202
- 11) MMD:MMD Power Consumption Report

第5章 ドーナツ型工法の実用性

我が国でTBMが普及しない課題として、低強度地山区間でマシンが拘束され掘進不能に陥ることと、NATM工法より全体工事費が高いことが共通認識になっている。これら課題に対して、ドーナツ型の実用化に向けての研究開発、および掘削実験による掘削特性の評価を行った。結果、カッタヘッドの中心部を開口することの施工性の向上、センターカッタが無くなるなどの優位性が立証された。

本章では、実用化に向けてドーナツ型工法として経済性が成り立つか、モデルトンネルを想定した施工計画を立案し、その全体工事費から実用性を評価するものとした。

5.1 モデルトンネルの施工計画概要

モデルトンネルの施工計画は、延長8.2km、内径5mおよび最大流量毎秒38tの水路トンネル工事を想定し、ドーナツ型を活用した施工方法、全体工事期間、および全体工事費を立案するものである(表5.1.1)。

トンネルサイトの地質は、付加体堆積岩、火山岩とした標準地山区間に当たるC級、D級、および3%程度の低強度地山区間に当たるE級を想定する(表5.1.2)。ドーナツ型の掘削後の支保工方式は、山岳トンネル用の鉄筋コンクリートセグメント(以下、山岳ライナと呼ぶ)による支保工、覆工を合わせたシングルシェル(ワンパス)方式で計画する。施工計画の立案フローは、図5.1.1に示すような手順で検討する。

表 5.1.1 水路トンネル施工概要

トンネル延長	L=8,200m
トンネル地質	付加体堆積岩, 火山岩
トンネル径	内径φ5m マシン外径φ5.750m
最大流量	毎秒38t
掘削工法	TBM工法・ドーナツ型TBM方式
施工方向	片押し施工
ズリ出し方式	ロングベルトコンベヤ方式
支保工方式	山岳ライナ方式(ワンパス), 現地製作
機材搬出入方式	ケーブル式インクライン方式

表 5.1.2 地山等級別の区間距離

地山等級		区間距離 (m)
標準地山区間	C 級	5,000
	D I 級	2,400
	D II 級	600
低強度地山区間	E 級	200
トンネル延長		8,200 m

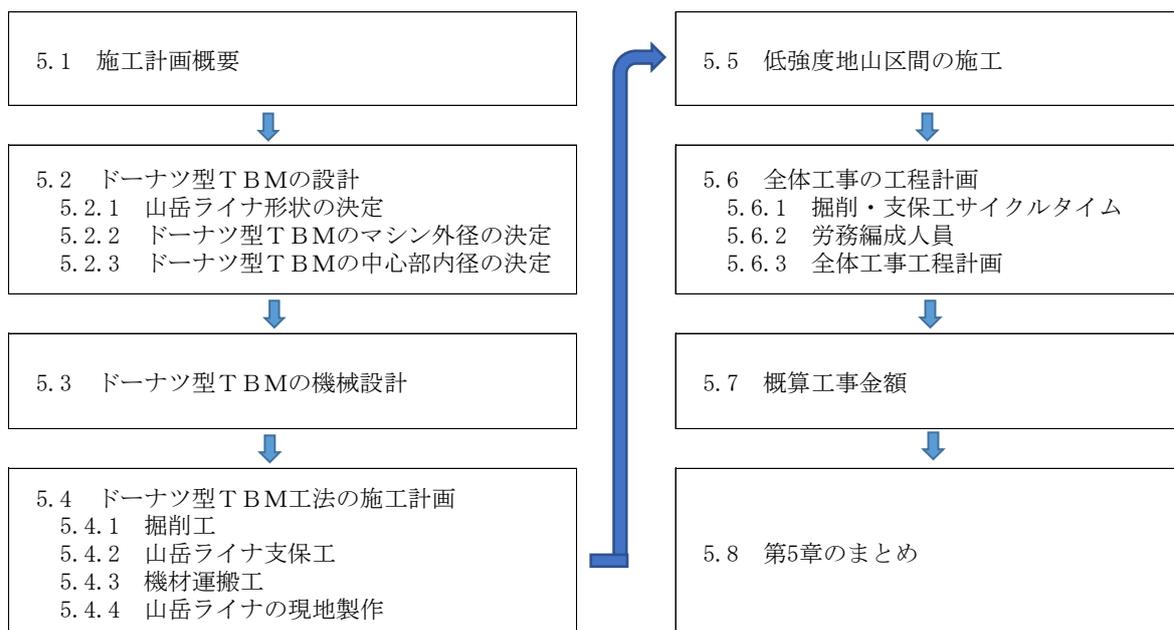


図 5.1.1 ドーナツ型の施工計画立案フロー

5.2 ドーナツ型の設計

5.2.1 山岳ライナ形状の決定

山岳ライナ形状は、掘削外径の4%程度の厚さ250mmとして、標準地山区間、低強度地山区間についてNATM支保設計の考え方にに基づき、多ヒンジ系リング構造によるフレーム解析でコンクリートセグメントに発生する断面力を算出し、鉄筋コンクリート部材としてのセグメント厚を確認する。山岳ライナの仕様は「トンネル標準示方書（シールド編）」の基準から、コンクリート強度 42N/mm^2 で厚さ250mm、主鉄筋D16の250mmピッチのシングル配筋とする¹⁾。これ以上の負荷が掛かる場合には、別途検討するものとする（表5.2.1）。

表 5.2.1 山岳ライナの設計仕様（マシン外径5.75m）

地山等級		ゆるみ範囲	山岳RCライナ厚	コンクリート強度	主鉄筋	継ぎ手
C級	C I	1D	250 mm	42 N/mm^2	シングル D16 @250 mm	軸力方向 縦断方向 ほぞ継ぎ手
	C II	5.7m				
D級	D I	2D				
	D II	11.4m				
E級	E	10D 57.0m				

5.2.2 ドーナツ型の掘進機外径の決定

断面決定に当たり、以下のような要件から掘進機外径 5.750m を決定する。

- ① 設計内空幅 5.0m を確保する。
- ② 覆工は、支保工と覆工と合わせたシングルシェル(ワンパス)方式とし、山岳ライナ厚さ 25cm とする。

図 5.2.1 にドーナツ型の標準断面を示す。

ドーナツ型TBMの断面決定要件

① 所要内空	所要半径2.5m+施工余裕0.025m	2.525m
② 山岳ライナの厚さ		0.250m
③ 掘削蛇行量、変形余裕量		0.050m
④ エンドプレート厚さ		0.050m
⑤ 掘削余掘		0.050m
	掘削半径 計	2.925m
	掘進機半径 計	2.875m

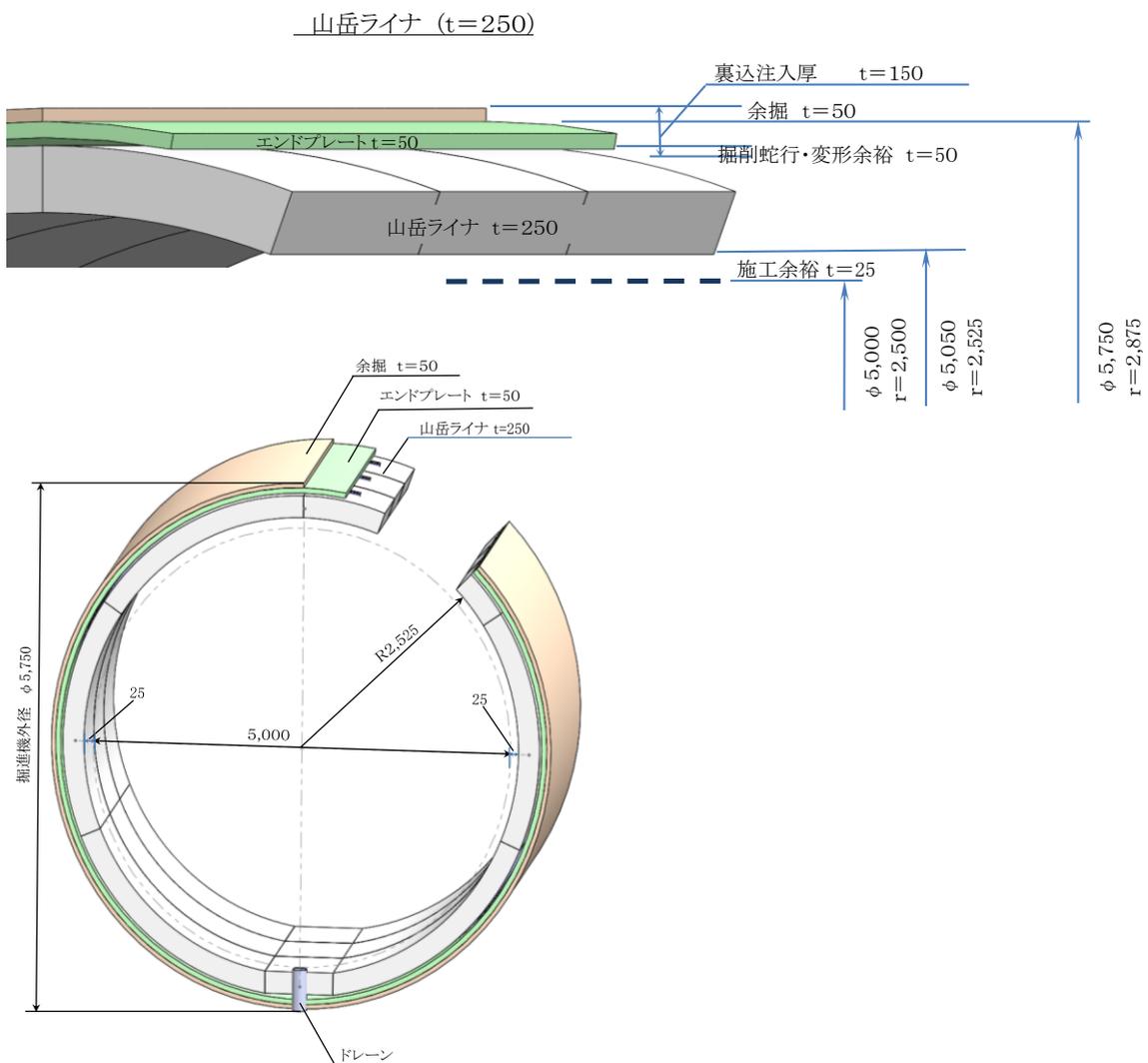
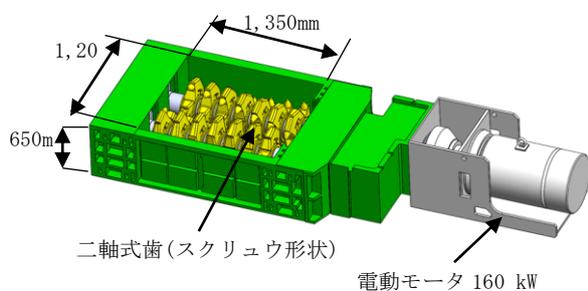


図 5.2.1 ドーナツ型の標準断面図

5.2.3 ドーナツ型の開口径の決定

中心部の開口径の決定は、以下のような条件から 1.2m とする。

- ・内ゲージカッタの切削抵抗を減少させるため、 $\phi 0.8\text{m}$ 程度以上を確保する。
- ・低強度地山を処理するためにはマシン前方に汎用機械類等が出られる空間を確保する。
- ・二軸式岩破碎機（以下、破碎機と呼ぶ）の開口横幅以内の形状を基本とし、**図 5.2.2** に示す 500 型を使用する。
- ・中心部岩盤の掘削がクリティカル作業にならないように設定する。



二軸式 岩破碎機 型式	破碎能力 (m^3/hr)	破碎機 開口横幅 (m)	ドーナツ径の範囲 横幅1/2(最小)~ 横幅(最大) (m)
500型	350	1.20	$\approx 0.60 \sim 1.20$
625型	420	1.50	$\approx 0.75 \sim 1.50$
850型	600	2.00	$\approx 1.00 \sim 2.00$
1000型	700	2.50	$\approx 1.30 \sim 2.50$
1300型	900	3.00	$\approx 1.50 \sim 3.00$
1500型	1000	3.50	$\approx 1.80 \sim 3.50$

図 5.2.2 破碎機の型式別開口横幅

5.3 ドーナツ型の機械設計

ドーナツ型の機械仕様は、マシン外径 $\phi 5.750\text{m}$ 、ディスクカッタ径 17 インチ ($\phi 432\text{mm}$)、シェルは複動式シールド型、メイングリッパで地山に反力を取る方式を採用する (**図 5.3.1**)²⁾。また、マシンの掘進に合わせて同時に移動する後続設備架台を配置する。後続設備架台には、上部に動力機械設備の電気、油圧、中央制御室や作業員休憩室・トイレ設備を配置する。下部には、ズリ運搬用ベルトコンベヤとレール式の機材搬入用の機材ストック場を確保する (**図 5.3.2**)。

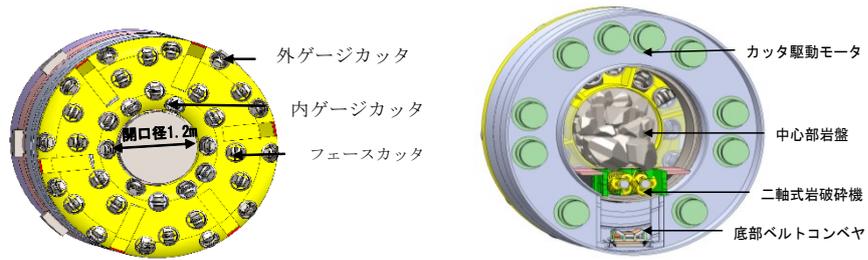
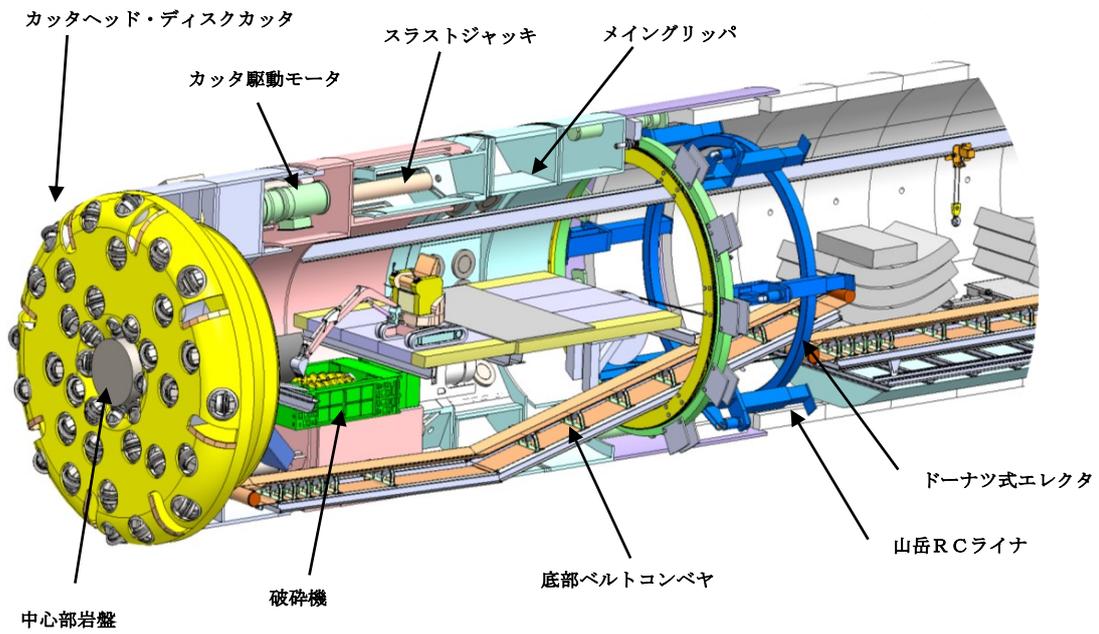
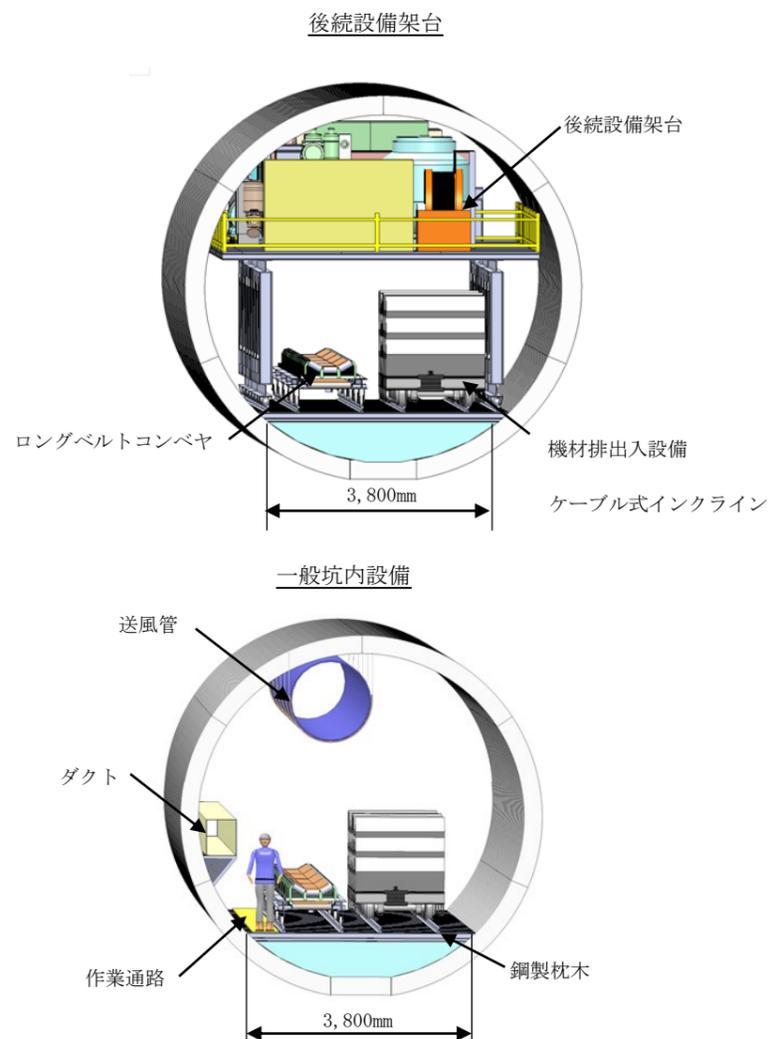
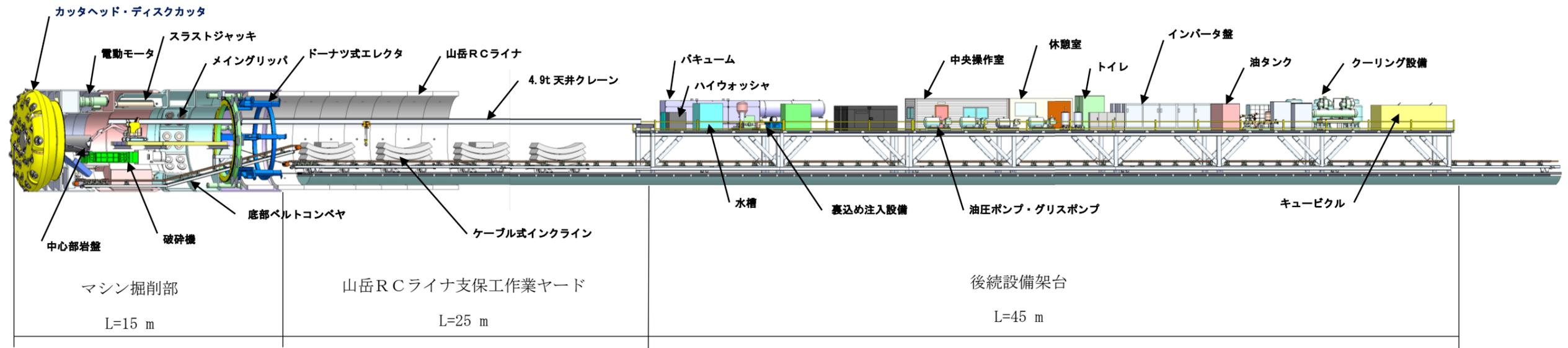


図 5.3.1 ドーナツ型（シールド型）掘進機外径φ5.75mの機械図



ドーナツ型TBM機械仕様

部 位	仕 様	
ドーナツ型TBM	カッタヘッド外径	φ 5.750m
	カッタヘッド内径	φ 1.200m
	掘削外径	φ 5.850m
	掘削内径	φ 1.100m
テールシール	形式	ワイヤブラシ
	段数	2段
ディスクカッタ	カッタ径	17インチ (φ 432) , 15.5インチ (φ 394)
	取付構造	バックローディング, 90度回転式抜き式
	装備ピッチ	65~80mm
	インナーカッタ	17":25個, 15.5":5個
	ゲージカッタ	外ゲージカッタ:5個, 内ゲージカッタ:3個
カッタ仕様	カッタトルク	定トルク : 35.1 kN・m
	カッタ回転速度	1.0~7m i n ⁻¹
	カッタモータ	200kW×8台
	スラストジャッキ	総推力 22,200 kN シリンダ本数 1,500 kN×1,650 s t ×12本 伸長速度 50mm/min
方向修正ジャッキ	総推力	14,400 kN
	シリンダ本数	1,200 kN×200 s t ×12本
ローリング修正ジャッキ	総推力	1,874 kN
	シリンダ本数	600 kN×100 s t ×4本
ライナ補助ジャッキ	総推力	10,500 kN
	シリンダ本数	1,500 kN×300 s t ×7本
メイングリッパ	総推力	36,000 kN
	装備数	(1,500 kN×150 s t ×4本)×6台
フロントグリッパ	総推力	8,000 kN
	装備数	2,000 kN×150 s t ×4本

機械設備一覧表

工 種	機 種	規 格	数量	単位	
坑内機械設備	ドーナツ型掘削工	外郭部掘削	ドーナツ型TBM	φ 5,750 L15.00m	1 基
		中心部岩盤	二軸式岩破碎機	横型500型	1 台
	掘削ズリ出し	底部ベルトコンベヤ	W600 275 t/h 50m	1 台	
		伸縮コンベヤ	W600 275 t/h 200m	1 台	
		ロングベルトコンベヤ	W600 275 t/h 1,000m	1 式	
	ドーナツ型後続設備	後続架台	W5400 45m	1 基	
		クーリングユニット	クーリングタワー3基	1 式	
		油圧ユニット	油圧タンク・ポンプ	1 式	
		制御盤	ドーナツ型用	1 台	
		インバータ盤	ドーナツ型用	4 台	
坑外機械設備	支保工	山岳RCライナ	エレクトラ設備	2.5t/枚	1 式
		裏込め注入設備	2液混合型TAC工法	1 式	
	機材運搬設備	ワイヤ式	ケーブルカ(牽引52t用)	1 台	
		運搬台車	機材用、人車用	10 台	
	排水設備	水中ポンプ	11kW・2.2kW・7.5kW	11 台	
	換気設備	送風機	RE60IW30 600m ³ /h	2 台	
	給水設備		15kW・7.5kW	1 台	
	濁水処理設備	機械脱水	60m ³	1 台	
	裏込め注入プラント設備	プラント サイロ		1 式	
	資材荷卸しクレーン	移動式	25t ラフタークレーン	1 台	
機械室	ケーブル式インクライン		1 式		
受電設備		1,000kW	1 式		

図 5.3.2 ドーナツ型 (シールド型) 掘進機外径φ5.75mの施工システム

5.4 ドーナツ型TBM工法の施工計画

施工計画は、図 5.4.1 に示すとおり掘削・支保工、山岳ライナの現地製作および低強度地山（不良地山）区間について立案する。

5.4.1 掘削工

ドーナツ型による機械掘削は、マシンによる外殻部掘削（φ5.75m）と破碎機による中心部掘削（φ1.2m）とに分けて掘削する。図 5.4.2 に示すように、外殻部はマシンにより掘削され切削ズリはカッターヘッド頂部開口（180°）よりグリ

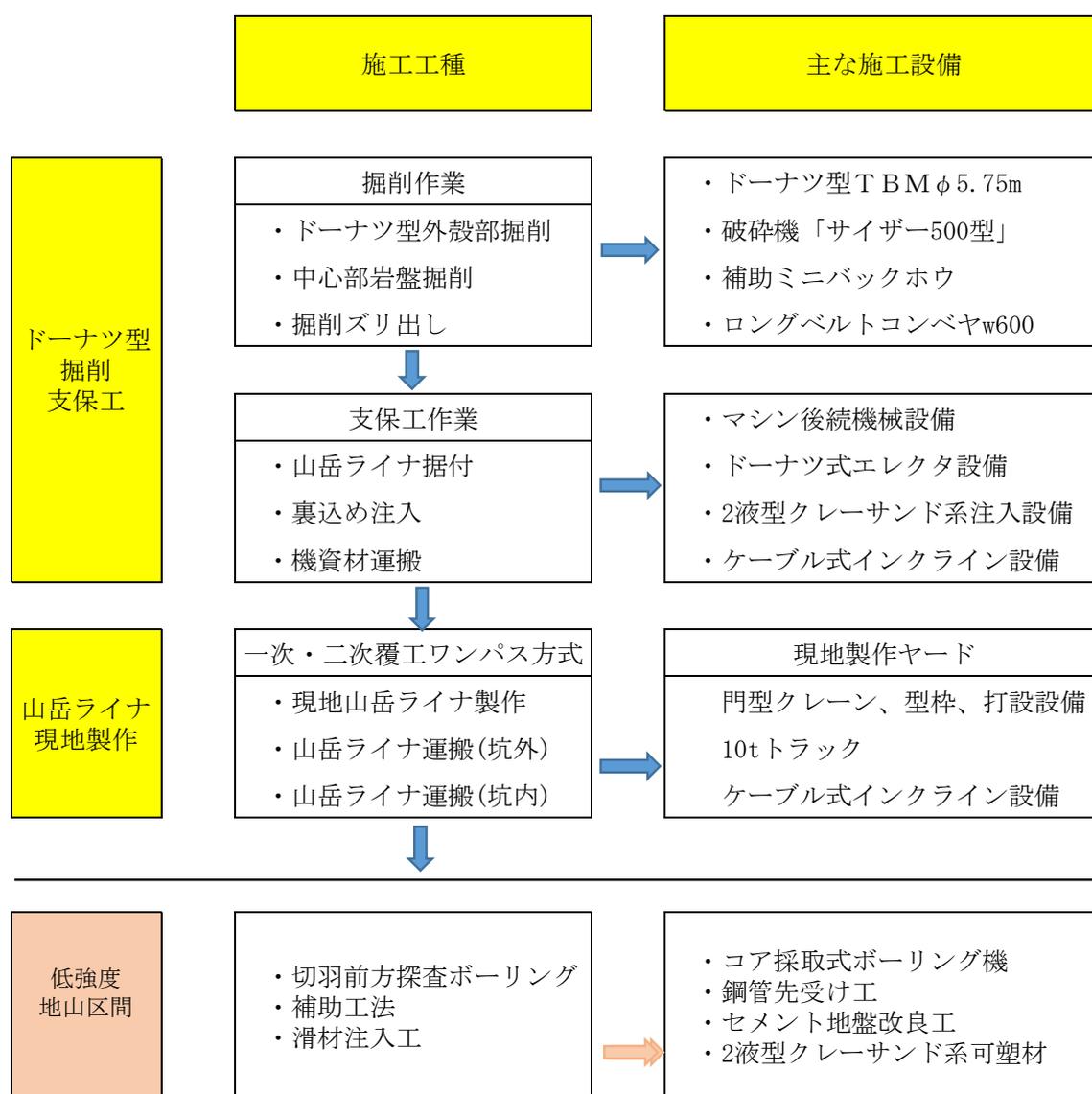


図 5.4.1 施工工種と主な施工設備

ズリを通して底部ベルトコンベヤに排出される³⁾。中心部の岩盤は掘削進行につれて押し出されて、破碎機で破碎され同じく底部ベルトコンベヤから搬出される。

破碎機 500 型は、掘進速度 (2.4m/h)、岩盤強度 270MPa 程度に対応した破碎運搬能力を有している。

破碎ズリは、底部のベルトコンベヤ (w600) から伸縮ベルトコンベヤ (w600)、坑内ロングベルトコンベヤ (w600) を経由して坑外に搬出する。ベルトコンベヤ能力は、掘進速度 2~5m/h として $28 \text{ m}^3 \times 5 \text{ m/h} = 140 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上を確保するためにベルトコンベヤ W600 運搬能力 $172 \text{ m}^3/\text{h}$ を配置する。

なお、掘削支保工の 1 サイクルは標準地山区間になる C 級、D 級岩盤では 1 掘進長 1.5m、低強度地山区間 E 級では 1 掘進長 1.0m を標準に施工する。

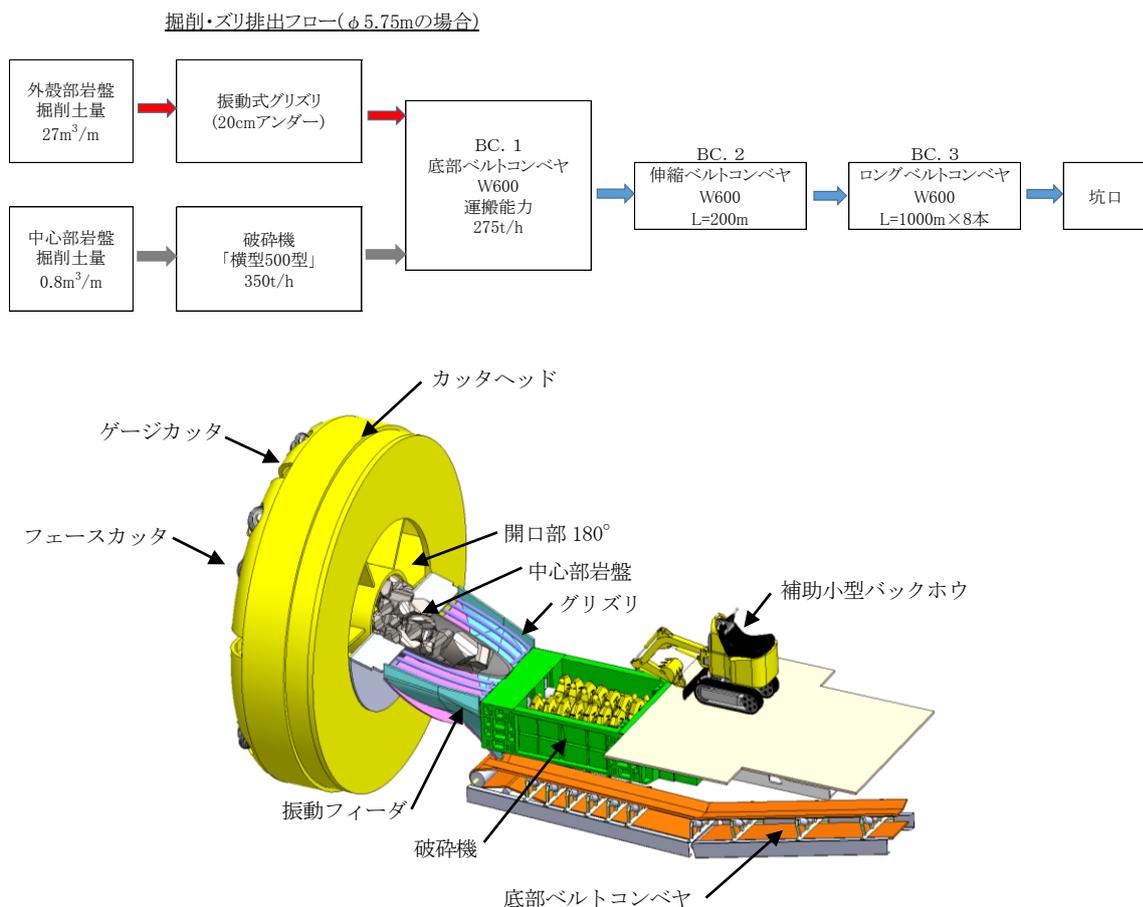


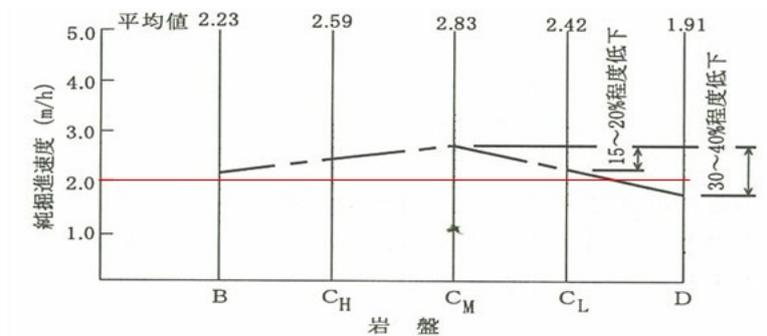
図 5.4.2 掘削フロー図

(1) ドーナツ型の純掘進速度

施工実績から標準地山を想定した場合、純掘削速度は1.9m~2.8m/h程度となる(図5.4.3)⁴⁾。

(2) 中心部岩盤掘削・二軸式岩破碎機

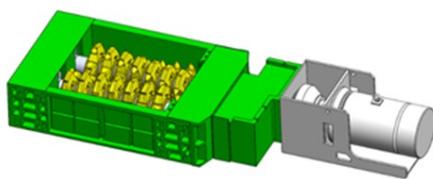
マシンの進行に合わせて押し出されてくる中心部岩盤は、直接に破碎機に取り込まれ破碎され底部からベルトコンベヤで排出される。破碎機「サイザー」機種を選定では、200MPa程度の堅固な岩盤を考慮し、500型(破碎能力300t/h)を設置する。破碎サイズは、1次破碎、2次破碎で200mm程度まで破碎する(図5.4.4)。



出典:TBMハンドブック、日本トンネル技術協会、2000

図5.4.3 実績純掘進速度と岩盤等級の関係

二軸式岩破碎機「サイザー500型」



部位	仕様
投入岩石硬度	275MPa程度以下
投入サイズ	1.2m以下
破碎サイズ	200mm
電動モータ	160kW
機械重量	12t



図5.4.4 破碎機「サイザー500型」⁵⁾

(3) 掘削ズリ出し

ズリ出しは、マシン底部ベルトコンベヤw600 (BC. 1) →伸縮ベルトコンベヤw600 (BC. 2) →坑内ロングベルトコンベヤw600 (BC. 3) をとおして、坑外仮置場まで搬出する(図 5. 4. 5)。

ロングベルトコンベヤの仕組みは、後続設備架台上のベルトコンベヤと架台下のベルトコンベヤの伸縮ラップ長を 100m 程度確保して、掘削進行に合わせてベルトコンベヤを継ぎ足しベルトのエンドレス作業を行い、1 スパン 1, 000m を 8 スパンセットする。

1) ロングベルトコンベヤ搬送量

表 5. 4. 1 にロングベルトコンベヤの仕様、表 5. 4. 2 に搬送量をそれぞれ示す。

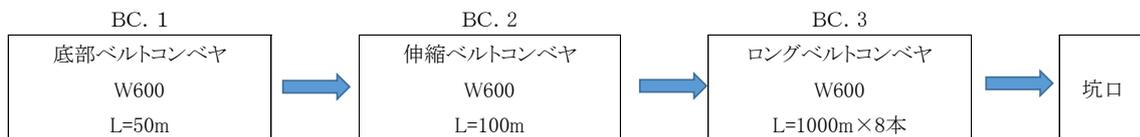


図 5. 4. 5 掘削ズリ出しフロー図

表 5. 4. 1 W600mm の
ロングベルトコンベヤ仕様

ベルトコンベヤ名称	仕様
運搬物	岩ズリ
見掛け比重(t/m ³)	1.6
能力 (t/h)	275
ベルト幅 (mm)	600
ベルト速度 (m/min)	80
水平機長 (m)	1,029
動力 (kW)	90

表 5. 4. 2 W600mm のロングベルトコンベヤ搬送量

定数K	ベルト幅	ベルト速度	搬送容量	搬送容量
トラフ30° 側角20°	B=(m)	V=(m/min)	Q=(m ³ /h)	Q=(t/h)
0.1493	0.60	80	172	275
0.1493	0.60	90	194	310
0.1493	0.60	100	215	344
0.1493	0.60	110	237	379
0.1493	0.60	120	258	413
0.1493	0.60	130	280	447
0.1493	0.60	140	301	482

* $Q=A \cdot V$ $A=K \cdot (0.9 \cdot 0.6 - 0.05)^2$

2) ロングベルトコンベヤの機械図

図 5.4.6 から図 5.4.8 にそれぞれの機械図を示す。

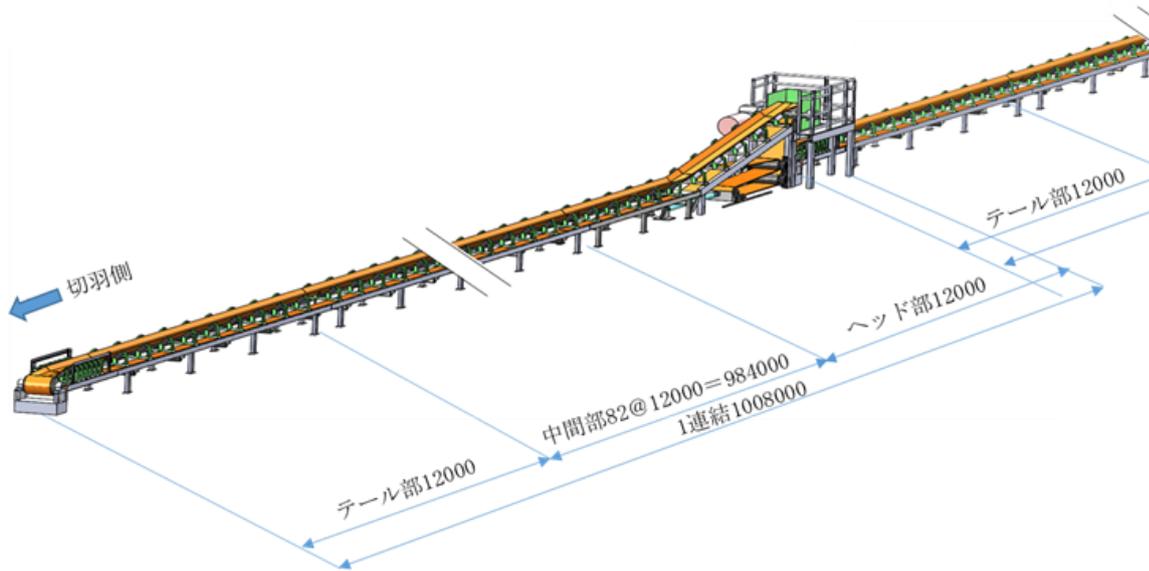


図 5.4.6 ロングベルトコンベヤ W600mm、1,008m/スパン

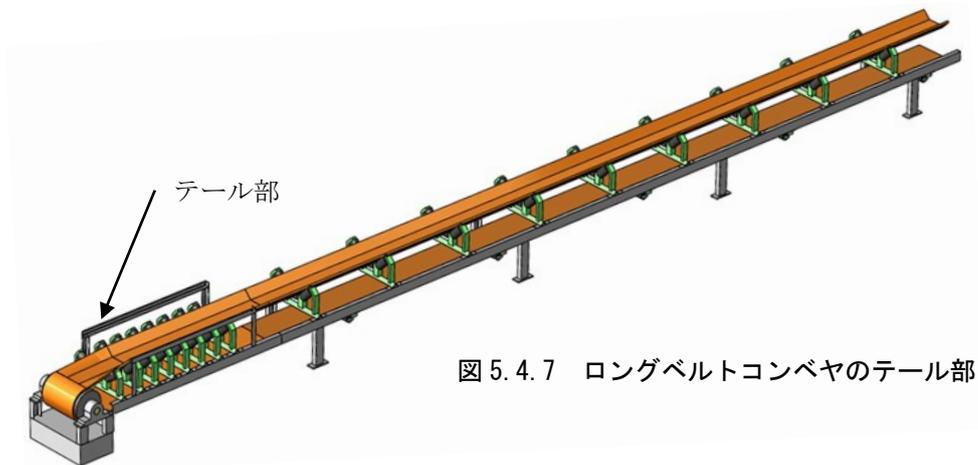


図 5.4.7 ロングベルトコンベヤのテール部

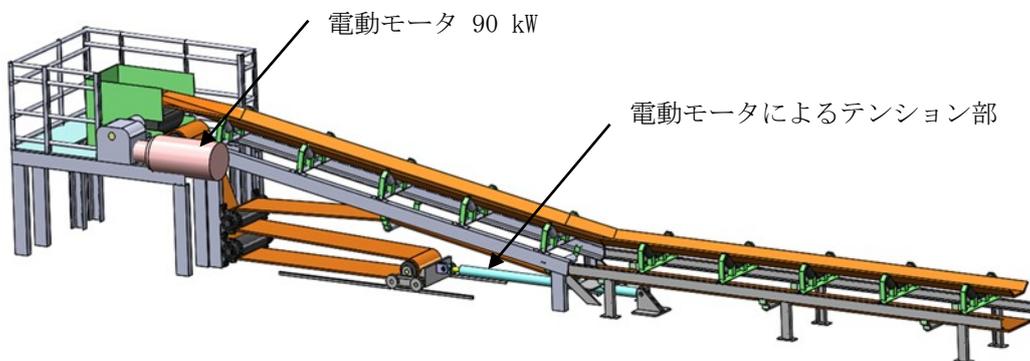


図 5.4.8 ロングベルトコンベヤのヘッドテンション部

5.4.2 山岳ライナ支保工

ドーナツ型は、支保工、覆工を兼ねた山岳ライナを基本とするワンパス方式で施工する。山岳ライナの製作は、坑外近郊で現場製作する。坑内機材の搬出入は、レール式によるケーブル式インクラインで自動搬送する。山岳ライナの据付けは、ドーナツ式エレクタ方式で施工する。

(1) 山岳ライナ形状

標準地山・低強度地山区間におけるライナ分割は、それぞれ6分割ブロックとキーブロックに分けて製作する（図 5.4.9、図 5.4.10）。山岳ライナの仕様は「トンネル標準示方書（シールド編）」の基準から、コンクリート強度 $42\text{N}/\text{mm}^2$ で厚さ 25cm 、主鉄筋 D16 の 250mm ピッチのシングル配筋とする。これ以上の負荷が掛かる場合には、別途検討する。表 5.4.3、表 5.4.4 に山岳ライナの6分割数量表を示す。

継ぎ手方法は、「ほぞ」による噛み合わせ式を採用し、止水には水膨張性ゴムを使用する（図 5.4.11）。

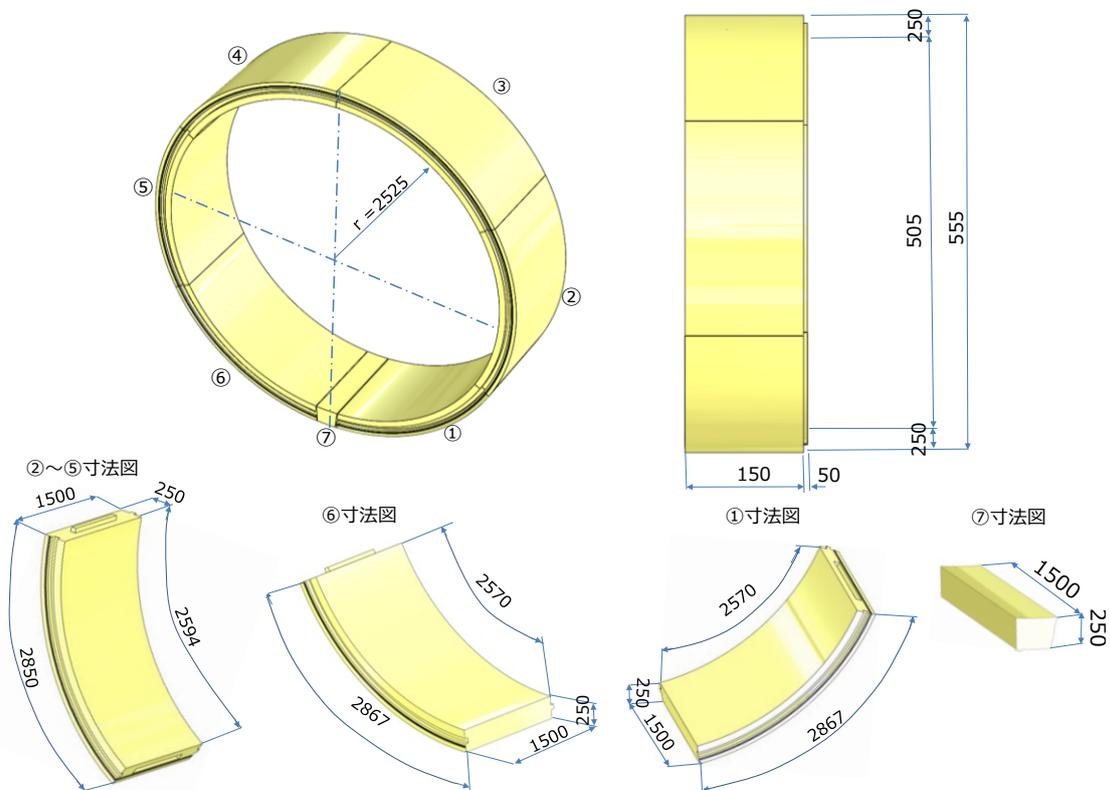


図 5.4.9 山岳ライナの製作図

②～⑤鉄筋構造図

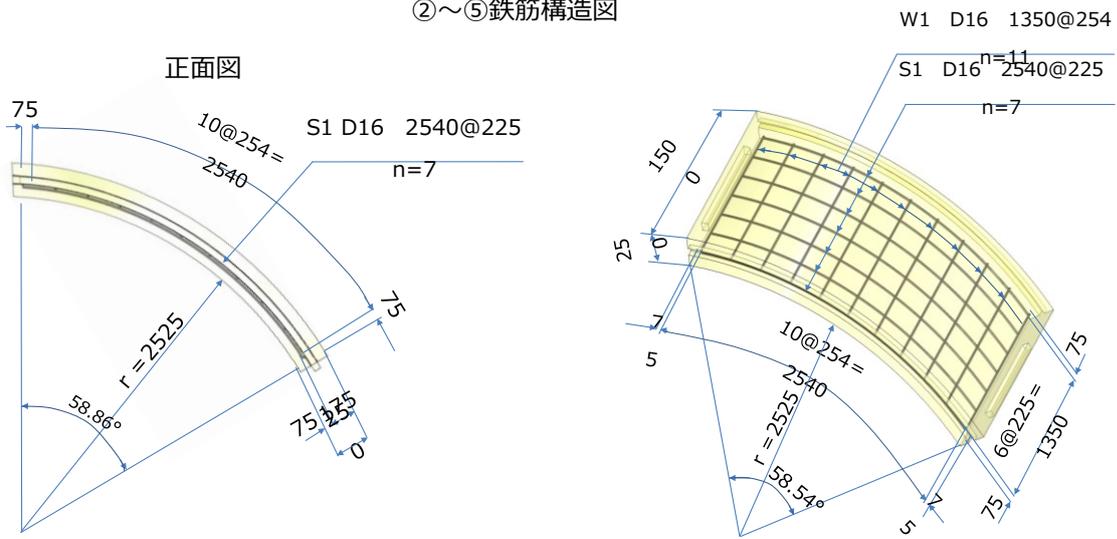


図 5.4.10 山岳ライナの配筋図(②～⑤)

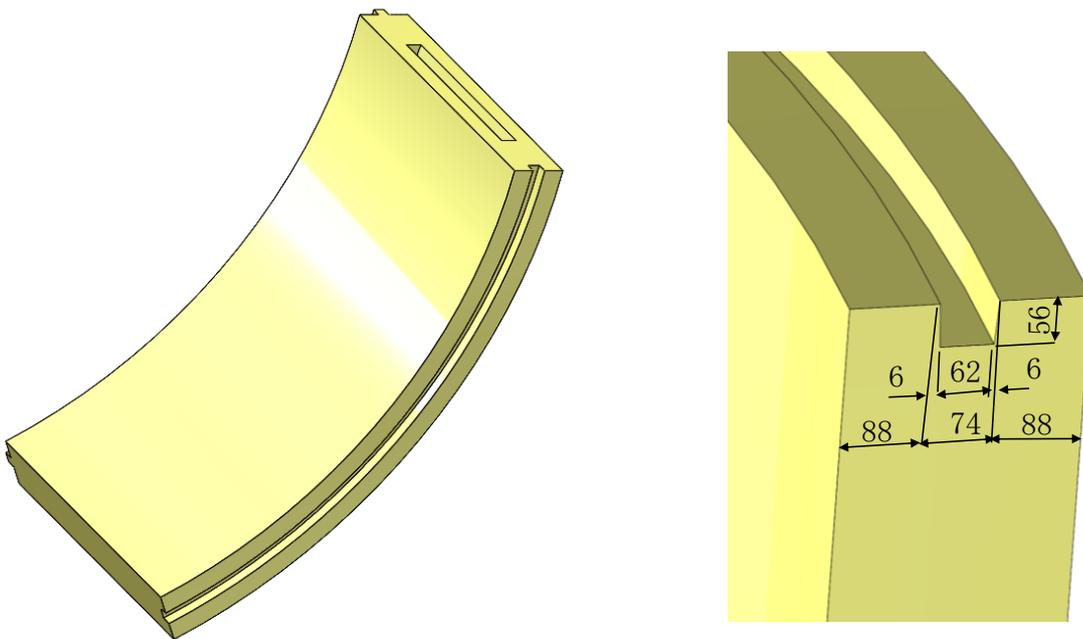


図 5.4.11 山岳ライナの「ほぞ」継ぎ手詳細図

表 5.4.3 山岳ライナの6分割数量表(1枚当たり)

項目	内周長 m	外周長 m	1リング枚数	1枚当たり			
				コンクリート m ³	鉄筋 kg	ライナ重量 t	シール (20mm×2mm) m
②～⑤	2.594	2.850	4	1.03	50.9	2.575	4.3
⑥	2.570	2.867	1	1.02	50.9	2.550	4.3
①	2.570	2.867	1	1.02	50.9	2.550	2.8
⑦	0.280	0.330	1	0.12	なし	—	なし

表 5.4.4 山岳ライナの6分割数量表(1リング当たり)

項目	内周長 m	外周長 m	1リング枚数	1リング当たり			
				ライナ重量 t	鉄筋 kg	コンクリート m ³	シール (20mm×2mm) m
②～⑤	2.594	2.850	4	10.300	204	4.12	17.2
⑥	2.570	2.867	1	2.550	51	1.02	4.3
①	2.570	2.867	1	2.550	51	1.02	2.8
⑦	0.280	0.330	1	0.300	なし	0.12	なし
			計	15.700	305	6.28	24.3

(2) 山岳ライナの据付工

山岳ライナの据付は、TBMのエレクタ設備ではマシン内部への通路空間が狭くなるため、据付機構を外周側に配置したドーナツ式エレクタを採用する（図 4.4.12）⁶⁾。中心部の空間が広くなるため、カッタヘッドへの機材の出入りが容易になり地山リスクに対して素早く対応ができるメリットがある。

ドーナツ式エレクタでの据付手順は、図 5.4.13 に示している番号順に、6 個あるエレクタがライナを 1 個ごと掴み順に回転して、最後にキープロックを上から差し込み完了する。また、この装置は形状保持の役目も担うことができる。

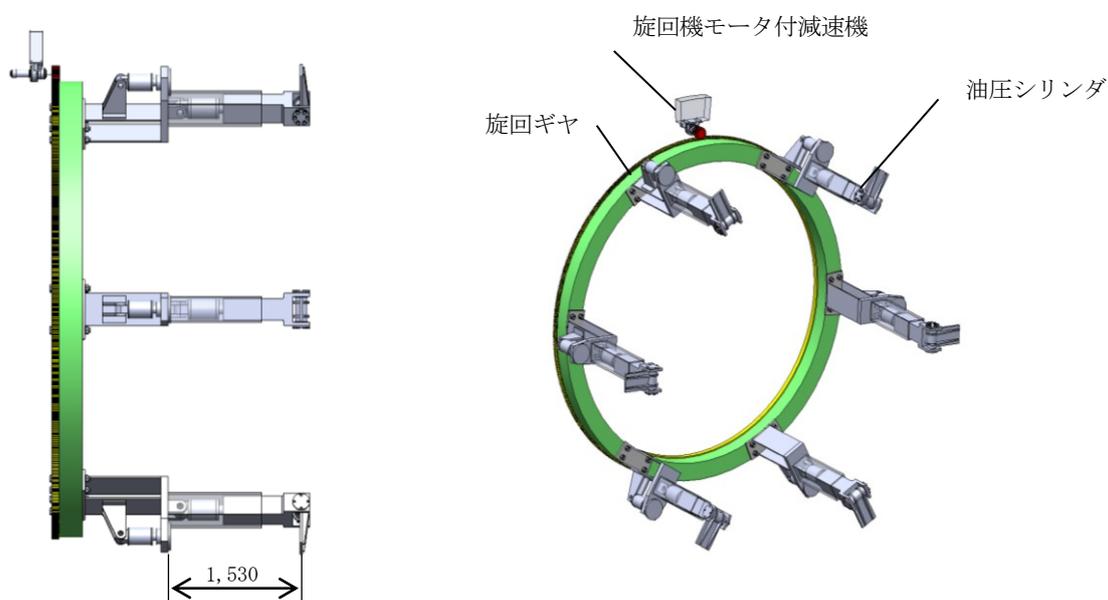


図 5.4.12 ドーナツ式エレクタの機械図

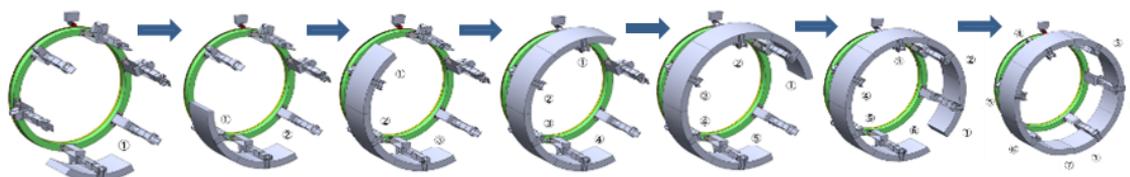


図 5.4.13 ドーナツ式エレクタによる山岳ライナの据付順序

5.2.3 山岳ライナの現地製作工

TBMにおける支保工は、NATMか鋼リング支保工で施工されている。最良は、支保工と覆工が一体にできるワンパス方式が取れることと、地山状態に左右されず掘進機内から支保工ができる山岳ライナ方式になる。採用されない理由は二次製品を使用することによるコスト高にあり、特に、工場から現場までの運搬費が割高になっている。改善策として、トンネル現場近郊で現地製造するための品質性、施工性および経済性等を立案した。

(1) 製作概要

製作ヤードは、現場近郊 10km 程度以内に 200m×100m 程度の広さを設ける。作業配置は、コンクリート打設、コンクリート養生(脱型まで 36 時間)、型枠解体・移動および型枠組立の 3 班に分け、それぞれ毎日分かれて作業する。用意する型枠は、鋼製型枠 20 リング×3 セット=60 リングを用意する(表 5.4.5)。1 日の製作数は、トンネル 30m 分(1.5m×20 セット)とし、搬出するまでの養生期間は 21 日以上を取り、その間は気中散水養生とする。また、それに必要な約 1 月分のストックヤードを確保する。

山岳ライナに用いるコンクリートの許容応力度は、トンネル標準示方書「シールド工法」を基準に準じる。表 5.4.6 に山岳ライナの品質仕様、表 5.4.7 にレデューミクストコンクリート配合表をそれぞれ示す。

表 5.4.5 山岳 RC ライナの製作概要

山岳ライナ製作概要(内径φ5.0m,8,200m分), 厚さ25cm,スパン長1.5m

名称	材料仕様	数量	備考
地山等級C級	RC, 42N/mm ² t=25cm, L=1, 5m	5,320 リング	8,000m/1.5m、6枚/リング
地山等級D級			
低強度地山E I	RC, 42N/mm ² t=25cm, L=1, 0m	200 リング	200m/1.0m、6枚/リング
低強度地山E II			
キーブロック	t=250,W=300	5,520枚	8,000m/1.5m,200m/1.0m
鋼製型枠 (メタルホーム)	コンクリート打設	20 リング	生コン車直取り
	コンクリート養生	20 リング	脱型養生36時間以上
	脱型・移動・組立	20 リング	3班体制
製作日数	20 リング/日	276日(14月)	5,520リング/20=276日

表 5.4.6 山岳ライナの品質仕様

地山等級		レディーミクスト コンクリート 呼び強度	鉄筋コンクリート造	山岳ライナ厚さ	適用 全長(8,200m)
C	C I	42 N/mm ²	D16mm @250mm シングル配筋	250 mm	60% (5,000m)
	C II				
D	D I	42 N/mm ²			
	D II				
E	E I	42 N/mm ²			
	E II	42 N/mm ²			

表 5.4.7 山岳ライナのレディーミクストコンクリート配合例

山岳ライナ現地製作配合表 (kg/m³) 42-15-20N

適合地山	呼び 強度 N/mm ²	セメ ント 種類	W/C (%)	S/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Ad (kg/m ³)
低強度 地山区間	42	N	45.0	47.0	373	168	807	966	2.61

(2) 型枠計画

型枠は、厚さ 15mm の鋼板で製作し、1 リング 6 枚のライナ板を 1 セットとして 20 セットで回転する。底型枠は固定し、端部と妻型枠だけにして天端型枠は設置しない。図 5.4.14 に、山岳ライナの型枠製作図を示す。

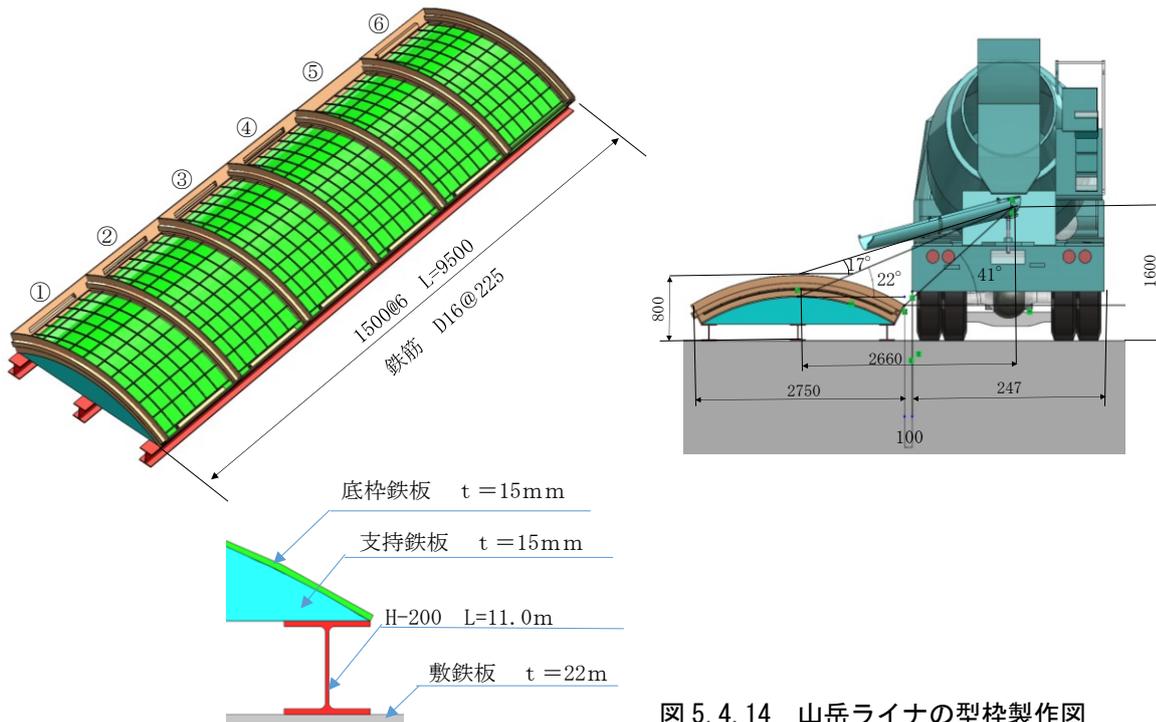


図 5.4.14 山岳ライナの型枠製作図

5.4.4 機材運搬工

山岳ライナ、機械類、材料および人員運搬などの坑内機材搬出入設備は、トンネル延長が長くなると切羽作業のサイクルタイムに資材などの供給が間に合わなくなる。そのため6m程度以下の小断面トンネルでは、バッテリーロコがトンネル内で交差できるように500～700m程度に仮設の拡幅部を設置している。また、サイクルタイムに間に合わせるために運転台数も2台、3台必要となり、自動運転も安全性などから煩雑になり施工費も高くなる。

ケーブル式インクラインは、1回当たりの牽引量を大きく取れることで、2、3サイクル分の資材を1回で運搬できることで拡幅部がいらず、ワイヤが台車の前後に繋がれていることから安全性などに利点があり、また、レール式にすることでさらに自動搬送が容易になる⁷⁾。図5.4.15にケーブル式インクラインの機械図、表5.4.7にその設備仕様を示す。

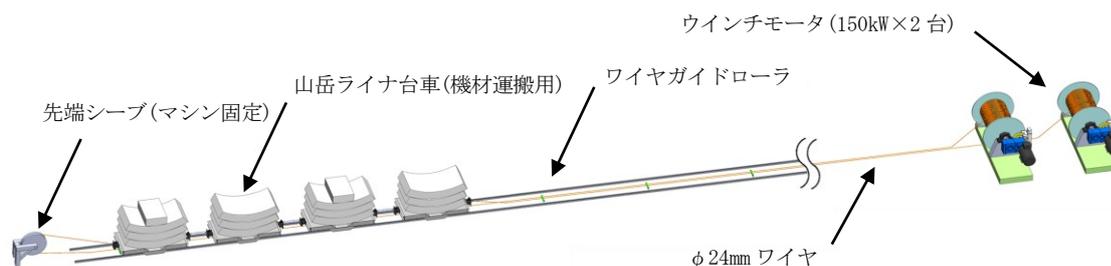


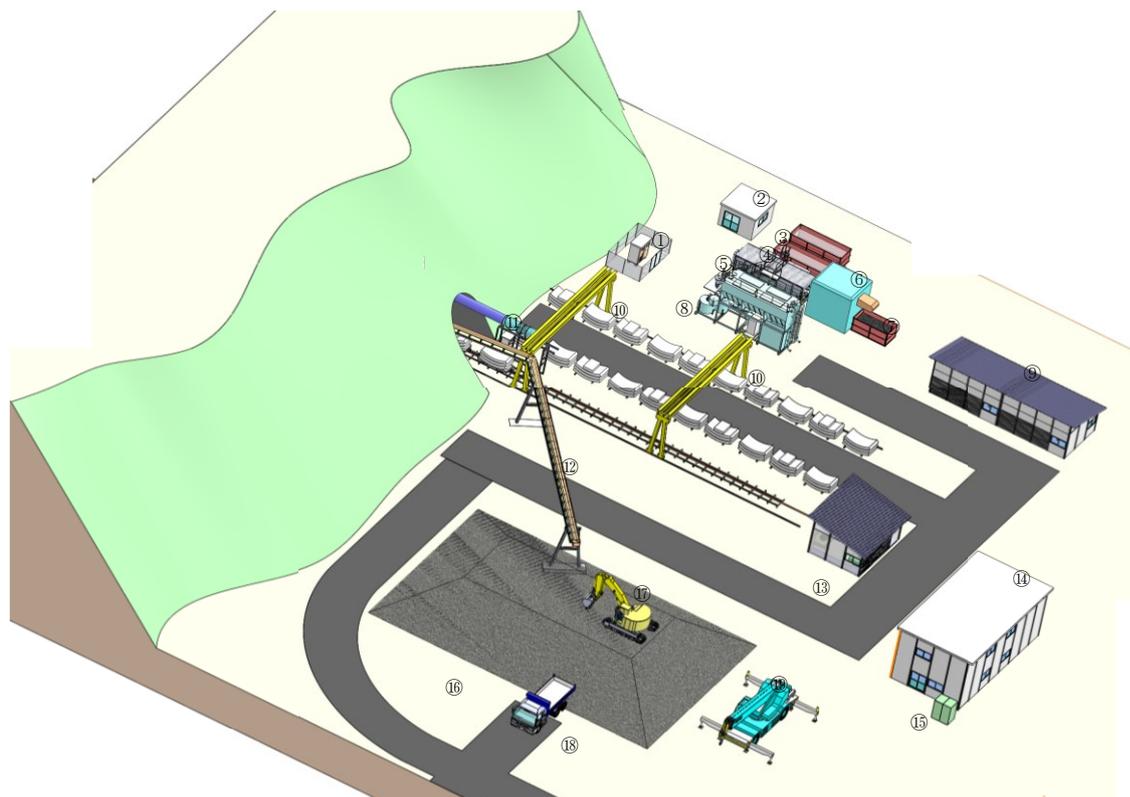
図 5.4.15 ケーブル式インクラインの機械図

表 5.4.7 ケーブル式インクラインの仕様

項目	仕様	摘要
トンネル延長	8,200m	
トンネル最大勾配	±3%	
レール間	762mm	
レール重量	22kg/m	
台車総重量 26t×2台	52t	総重量=26t×2台=52t
ライナ六分割+キープロック	22t	
台車 2台*2セット、人力車	6t*2	
ワイヤーロープ	6×Fi(29)B Φ24	引張力 $T=52 \times 0.05 + 52t \times \sin 1.72^\circ = 2.6 + 1.56 \approx 4.2\text{tf/m}$
ワイヤーロープ切断荷重	28.9tf/m	安全率 6より、ロープ切断荷重 $4.2 \times 6 = 25.2 < 28.9\text{tf/m}$
ドラム径	D=1,200mm	ワイヤロープ径24mm×50倍
ドラム幅	B=2,000mm	
モータ	150kW×2	移動速度 $V=10\text{km/h} \approx 170\text{m/min}$
先端シーブ径	D=1,200mm	ワイヤロープ径24mm×50倍

5.5 仮設備配置計画

坑外仮設備では受変電設備・給水設備・濁水処理設備・裏込め注入プラント・ズリ仮置場・資材置場・修理工場・倉庫・休憩所・詰所を設置する。また、ドーナツ型の組立・発進ヤードとして坑口に確保する(図 5.5.1)。



番号	名称	詳細
①	受電設備	200 kW
②	給水ポンプ室	2K×2K
③	給水用貯水槽	10m ³
④	濁水処理水槽	10m ³
⑤	濁水処理装置	60m ³ /h
⑥	フィルタープレス	11kW
⑦	ケーキ受け水槽	5m ³
⑧	裏込め材プラント	二液混合
⑨	修理工場・資材置き場	3K×8K
⑩	門型クレーン	4.8 t 吊 B15m
⑪	坑内換気設備	1000m ³ /min
⑫	坑外ずり運搬ベルトコンベア	B650
⑬	ワイヤー巻き取り部防護室	3K×4K
⑭	事務所・監督官詰所・休憩所	4K×8K×2階
⑮	トイレ	大・小
⑯	掘削土仮置き場	20m×30m (1,500m ³ /2日分)
⑰	バックホウ (掘削土搬出用)	0.7m ³ 級
⑱	ダンプトラック (掘削土搬出用)	10 t
⑲	ラフタークレーン	25 t

図 5.5.1 坑口仮設備配置図

5.6 全体工程計画

5.6.1 掘削・支保工のサイクルタイム

(1) 稼働時間の算出

表 5.6.1 の 1 日当たりの稼働時間と表 5.6.2 の 1 月当たりの稼働日数から、以下のように機械の実稼働時間を算出する。

1 日当たり作業時間

- ・ 1 日当たり機械稼働損失時間 5 時間/日 (表 5.6.1)
- ・ 1 月当たり機械稼働損失日数 13 日/月 (表 5.6.2)

ゆえに、1 日当たり機械稼働時間 15 時間/日

1 月当たり機械稼働日数 17 日/月

表 5.6.1 1 日当たり稼働時間

1日(2方)当たり機械稼働時間			
不稼働作業内容	単位	数値	時間(分)
日常点検	分/方	30	60
入出坑	5分/回	8	40
ミーティング	分/方	15	30
片付け	分/方	15	30
雑時間	式	1	20
作業ロス時間	分/方	60	120
機械不稼働時間 計			300
1日当たり機械稼働時間 20h-5h			15 時間/日

表 5.6.2 1 月当たり稼働日数

1月当たり機械稼働日数			
不稼働作業内容	単位	数値	日数(日)
作業全休日	式	1	4
測量	式	4h	0.5
ディスクカッタ装着数	38	15h	1
定期点検	式	15h	1
電気ケーブル盛替え他	式	15h	1
立会検査	h/月	4	1
見学者	h/月	2	
安全大会・安全教育	h/月	3	1
雑日	式	4h	0.5
作業ロス日数	式	15h	3
機械不稼働日数 計			13
1月当たり機械稼働日数 30日-13日			17 日/月

(2) 低強度地山区間のサイクルタイム

図 5.6.1 に、長尺鋼管先受け工法のサイクルタイムの算定内容を示す。

長尺鋼管先受け工法
撤去工

既設ライナの撤去(1.5m×4スパン=6m)→掘削支保工(4.2m³・鋼製支保工・鋼製掛矢板・1スパン1.5m)
1方当たり2スパン×2方 = 1日

低強度地山区間 掘削・支保工サイクルタイム
12.5m当たり

支保パターン	掘削面積 (m ² /m)	1サイクル 掘進長 (m)	ドーナツ型 掘削時間 (分)	山岳ライナ t=25cm (分)	1サイクル クリティカル 作業時間 (分)	日当たり 掘進長 (15h/日) (m/日)	12.5m当たり 作業日数 (日)
E	φ5.750 m 27m ² /m	1.00	30	20	50	18	0.7

低強度地山区間 長尺鋼管先受け工法サイクルタイム
12.5m当たり

崩落対策 区間	削孔径φ114 削孔長	シリカレジ ン 注入区間	施工本数 120° @500mm	日当たり 施工本数 1セット・2 方	施工日数
E	25m	12.5m	14本	10本	1.4日

低強度地山区間長尺鋼管先受け工法サイクルタイム

12.5m当たり : 撤去工 1日 + 長尺鋼管先受け工法施工日数 1.4日 + 掘削・支保工施工日数 0.7日
= 3.1日
1日当たり : 12.5m ÷ 3.1日 = 4.0m/日
1月当たり : 4.0m/日 × 17日/月 = 68m/月

図 5.6.1 長尺鋼管先受け工法のサイクルタイム

(3) 掘削・支保工のサイクルタイム

表 5.6.3 に、ドーナツ型による掘削・支保工のサイクルタイムを示す。

表 5.6.3 掘削・支保工のサイクルタイム

φ5.750m山岳ライナ方式(地山反力支持)の場合 掘削・支保工のサイクルタイム

地山等級	掘削面積 (m ² /m)	1サイクル 掘進長 (m)	純掘進速度 (m/h)	1サイクル 掘削時間 (分)	グリッパ・ 引込み 時間 (分)	山岳ライナ 据付 t=25cm (分)	1サイクル クリティカル 作業時間 (分)	日当たり 掘進長 (15h/日) (m/日)	月当たり 掘進長 (17日/月) (m/月)
B, C I, C II	φ5.750 m 27m ² /m	1.50	2.40	38	5	20	43	31.4	534
D I			2.00	45			50	27.0	459
D II			1.80	50			55	24.5	417
E		1.00	12.5m当たり:長尺鋼管先受け工法日進: 4.0m					4.0	68

地山等級の分類は、切羽が自立するB、CⅠ、CⅡとDⅠ、DⅡ、および低強度地山Eに分けた。掘進機の1サイクル掘進長は、1.5mとしE区間は1.0mとした。純掘進速度は、施工実績からB、CⅠ、CⅡ区間は2.40(m/h)、DⅠ区間は2.00(m/h)、DⅡに区間は1.80(m/h)とし、E区間については長尺鋼管先受け工法のサイクルタイムとの合算で算出した。

その結果、機械稼働時間を1日当たり15時間、1月当たり17日の場合の掘進長は、B、CⅠ、CⅡ区間で31.4(m/日)、534(m/月)、DⅠ区間で27.0(m/日)、459(m/月)、DⅡ区間で24.5(m/日)、417(m/月)、および低強度地山E区間で4.0(m/日)、68(m/月)になる。

5.6.2 労務編成人員

図5.6.2は、1方当たりの労務編成人員体制を示したもので、特殊作業員がNATMより少なくできる利点がある。表5.6.4に、NATMとの編成人員の比較を示す。

ドーナツ型TBM工法 1方当たり編成人数			
全般	世話役	1方当たり	職種
	トンネル世話役	1人	世話役
坑内作業	ドーナツ型の運転管理	2人	トンネル特殊工
	機械保守点検	2人	トンネル特殊工
	RCライナ据付作業	3人	トンネル作業員
坑外作業	ズリ出し・裏込め運転 機材搬出入作業	3人	トンネル作業員
	整備鍛冶工	1人	トンネル特殊工
	合計	1方当たり作業員数	12人

図 5.6.2 労務編成人員

表 5.6.4 NATMとの編成人員の比較

1方当たり編成人員数の比較

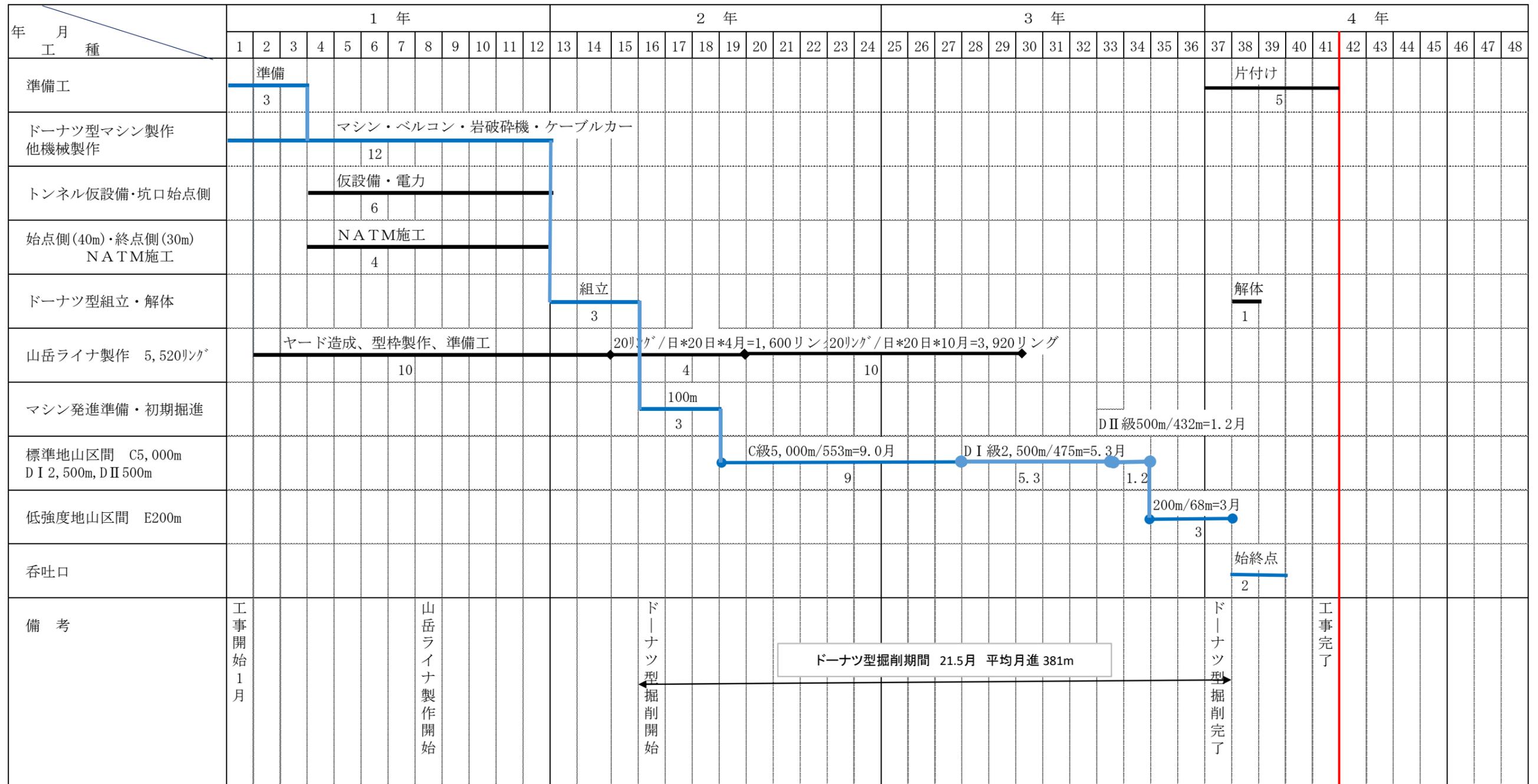
職種	NATM		ドーナツ型
	掘削工	覆工	掘削・山岳ライナ
トンネル世話役	1	1	1
トンネル特殊工	7	6	5
トンネル作業員	1	2	6
計	8(人)	9(人)	12(人)

5.6.3 モデルトンネルの全体工事工程計画

表 5.6.5 に、モデルトンネルの全体工事工程計画を示す。

表 5.6.5 全体工事工程計画

モデルトンネル(φ5.75m, L=8200m) 全体工事工程計画



全体工事工程計画では、ドーナツ型やベルトコンベヤなどの機械製作に約 12 月かかることから、この間に、仮設備工事、坑口処理、および山岳ライナ製作など、ドーナツ型が稼働する前に準備工事が行われる。

ドーナツ型のトンネル工事期間は、山岳ライナにより支保工と覆工が一体となって進めることから、掘削・支保工の完了は工事完了となり 21.5 月になる。平均月進では、381m になり、国内実績平均月進 222m よりは早くなるが、実現場に当てはめると計画の 500m には届いていない。

一方、NATM工法は、掘削・支保工では平均月進で 100m 程度となり、トンネル工事期間は 82 月を要することになり、掘削支保工の施工後に覆工作業があり、現場打設になる期間は、コンクリート養生期間もあり 1 スパン 12m を 2 日間で施工するため、覆工工期は約 62 月かかることになる。この場合、NATM工法ではトンネル延長 8.2km になると 2 工区以上に分けて施工するのが標準となる。

表 5.6.6 は、導水路トンネル延長 8.2km を施工した場合の作業員数をドーナツ型と NATM工法で比較したものである。ドーナツ型は掘削が早いことと、支保工と覆工を一体で施工することで全体工期では大きな優位性があり、総作業員数においても大幅な縮減ができる。なお、NATMは、掘削・支保工と覆工の 2 編成になり、ドーナツ型は掘削・支保工・覆工の 1 編成と坑外作業になる山岳ライナ製作に 1 編成になる。

表 5.6.6 導水路トンネル延長 8.2km に対する作業員数の比較

ドーナツ型 TBM工法	掘削・覆工 12人/方×2方×22日×28月 = 14,784人 山岳ライナ製作 16人×1方×276日 = 4,416人 計 = 19,200人	覆工(ワンパス方式) 掘削覆工2方編成 24人/日 ライナ製作1方編成 16人/日
NATM工法	掘削 8人/方×2方×22日×82月 = 28,864人 覆工 9人/方×1方×22日×62月 = 12,276人 計 = 41,140人	掘削支保工2方編成 16人/日 覆工1方編成 9人/日

5.7 概算工事金額

モデルトンネルに対して、立案された施工方法での概算工事費を積算する。以下に、工事金額内訳書を示す。

モデルトンネル(8,200m, φ5.75m)におけるドーナツ型TBM工法の概算工事費

<積算条件>

- ・掘削は、ドーナツ型TBMで8,200mを1工区で下流側から片押し施工する。
- ・覆工は、全区間8,200mを支保工、覆工を合わせたシングルシェル方式の山岳ライナで行う。
- ・ズリ出しは、坑口ストック場までとする。

工種	種別	単位	数量	単価	金額	摘要
直接工事費		式	1		7,294,900,000	内訳書-1
間接工事費	直工×40%	式	1		2,917,960,000	
工事価格		式	1		10,212,860,000	
				1m当たり工事費	1,245,471	
消費税	10%	式	1		1,021,286,000	
工事費計		式	1		11,234,146,000	

内訳書-1 直接工事費1式当たり

工種	種別	単位	数量	単価	金額	摘要
1. 機械費		式	1		3,089,000,000	内訳書-2
2. 労務費		人	21,120	50,000	1,056,000,000	40月×22日×24人
3. 山岳ライナ製作費		式	1		2,320,600,000	内訳書-3
4. 裏込注入費		m ³	18,300	12,000	219,600,000	
5. 補助工法	長尺鋼管先受け工法(AGF)	本	224	400,000	89,600,000	12.5m/1本
6. 呑口・吐口工		基	2	5,000,000	10,000,000	
7. トンネル仮設備工		式	1		510,100,000	内訳書-4
計					7,294,900,000	

内訳書-2 機械費 1式当たり						
工種	種別	単位	数量	単価	金額	摘要
マシン本体	φ5.75m	基	1		1,220,000,000	
ディスクカッタ	17"-25個, 15.5"-5個	個	560	200,000	112,000,000	(25*16)+(5*32)
ディスクカッタ台座	17インチ用 38台	台	140	1,000,000	140,000,000	4回に1台
マシン本体 組立解体		t	800	100,000	80,000,000	
マシン本体 運搬費		t	800		40,000,000	
岩破砕機サイザー	500型	基	1		100,000,000	
ベルトコンベヤ	W600	m	8,200	70,000	574,000,000	
ヘッドベルトコンベヤ	L=100m	基	8	5,000,000	40,000,000	
ベルトコンベヤ	組立解体	m	8,200	15,000	123,000,000	
門型クレーン	5tホイスト	基	2	1,000,000	2,000,000	
ラフタークレーン	25t	式	1		10,000,000	
170kgブレーカ		台	1		3,000,000	
0.1m ³ バックホウ		台	1		2,000,000	
ケーブル式インクライン	機材搬出入 150kW	台	2	40,000,000	80,000,000	
資材運搬台車	RCライナ	月	8	700,000	5,600,000	
人車	6人乗り	台	2	700,000	1,400,000	
22kgレール	8500m×2本 5m/本	m	17,000	2,500	42,500,000	
鋼製枕木	8200m/1.2m×L4m H-150	t	860	80,000	68,800,000	31.5kg/m
注入プラント		式	1		84,000,000	
パーカッションボーリング機		式	1		42,000,000	
消耗材・雑材	10%	式	1		318,700,000	
計					3,089,000,000	

内訳書-3 山岳ライナ製作費（ワンパス方式8,200m当たり）（1）						
工 種	規 格	単位	数量	単 価	金 額	備 考
材料						
生コン C, D級, t=25cm	42-15-20 L=8,000m	m ³	33,120	28,000	927,360,000	6.21 m ³ /m
生コン 低強度区間 t=25cm	42-15-20 L=200m	m ³	1,240	28,000	34,720,000	
鉄筋 D級	D16mm シングル ctc 250	t	1,631	150,000	244,650,000	306kg/リング
鉄筋 E級	D16mm シングル ctc 250	t	62	150,000	9,300,000	
固定金具	注入孔	箇所	34,200	1,000	34,200,000	鋼管材
吊フック	D13 0.4m	t	18	100,000	1,800,000	
シール材	止水材ボンドロープ20*5mm	m	180,000	120	21,600,000	5,676リング*30m/リング
剥離剤	ノックスC 18ℓ	缶	550	8,000	4,400,000	30m ² /ℓ 18ℓ/缶
小計					1,278,030,000	
労務費						
世話役	1日当り	人	16	50,000	800,000	型枠バラシ2・ライナ移動 4・清掃ケレン2・組立3→ 11人, 打設4人, 世話役1人 計 16人
型枠	1日当り	人				
普通作業員	1日当り	人				
作業期間労務費 小計	5,520リング÷20リング/日	日	276	800,000	220,800,000	
仮設費						
ヤード造成	200m×100m 2箇所	箇所	2	10,000,000	20,000,000	
基盤整備	砕石 t=200	m ²	40,000	650	26,000,000	
コンクリート		m ³	120	30,000	3,600,000	
借地代	20,000m ²	m ²	40,000	600	24,000,000	3年間
小計					73,600,000	
門型クレーン						
門型クレーン	4.9t 4基	ヶ月	120	300,000	36,000,000	
電気設備・電気代		式	1	5,000,000	5,000,000	
レール	30kgレール 400m×4基	m	1,600	4,800	7,680,000	

内訳書-3 山岳ライナ製作費（ワンパス方式8,200m当たり）（2）						
工 種	規 格	単 位	数 量	単 価	金 額	備 考
基礎コンクリート	1.0m×0.3m 1600m	m ³	480	25,000	12,000,000	
小計					60,680,000	
山岳ライナ型枠						
	鋼製スチールホーム型枠	リング	90	2,500,000	225,000,000	60リング×1.5
型枠架台	H鋼-200	m	600	5,000	3,000,000	
	敷き鉄板 t=22	t	200	36,000	7,200,000	
その他仮設材		式	1		10,000,000	
仮設材運搬	100km 1t当り	t	200	15,000	3,000,000	
小計					248,200,000	
運搬費						
セルフ車	20tセルフ 10km	ヶ月	20	1,000,000	20,000,000	
置場移動運転労務費	540日*2人	人	1,080	50,000	54,000,000	
80tクローラクレーン	1台, 置場	月	20	4,000,000	80,000,000	
小計					154,000,000	
その他設備						
打設箇所屋根	移動式、テント	m ²	3,000	20,000	60,000,000	
簡易濁水処理設備		式	1	5,000,000	5,000,000	
事務所・休憩室	ユニットプレハブ	式	1	5,000,000	5,000,000	
小計					70,000,000	
計					2,105,310,000	
雑材・経費		10% 式	1		210,531,000	
雑費		式	1		4,759,000	
合計					2,320,600,000	
				1m当り	283,000	

内訳書-4 トンネル仮設備工1式当たり					
工 種	規 格	単 位	数 量	単 価	金 額
坑口発進ヤード		式	1	30,000,000	30,000,000
電力設備		式	1	150,000,000	150,000,000
照明設備		式	1	27,000,000	27,000,000
給水設備		式	1	12,000,000	12,000,000
排水設備		式	1	12,000,000	12,000,000
換気設備		式	1	50,000,000	50,000,000
濁水処理設備	120m ³ /h	式	1	90,000,000	90,000,000
電気料金	3000kwh*0.6*9h*22日/月*30月	kWh	10,700,000	13	139,100,000
計					510,100,000

概算工事費は、同規模のトンネル工事実績からNATM工法では1m当たり70～120万円程度に対して、ドーナツ型は約125万円となり同程度である。図5.7.1に示す直接工事費の構成割合から、機械費と山岳ライナ製作費を合わせると約75%となり、工事費の大部分を占めることからこの工種の経済性が全体工事費に大きく影響する。

図5.7.2の機械費の内訳をみると、マシン本体やベルトコンベヤなどトンネル専用機械が多いため、リースできる機械が少なく新規製作になるため高い要因になっている。また、機械費は全体工事費の40%強を占めることから、工期縮減など生産性向上をさらに高める必要があり、また、機械の転用を考慮した損料扱いなどの検討の余地がある。

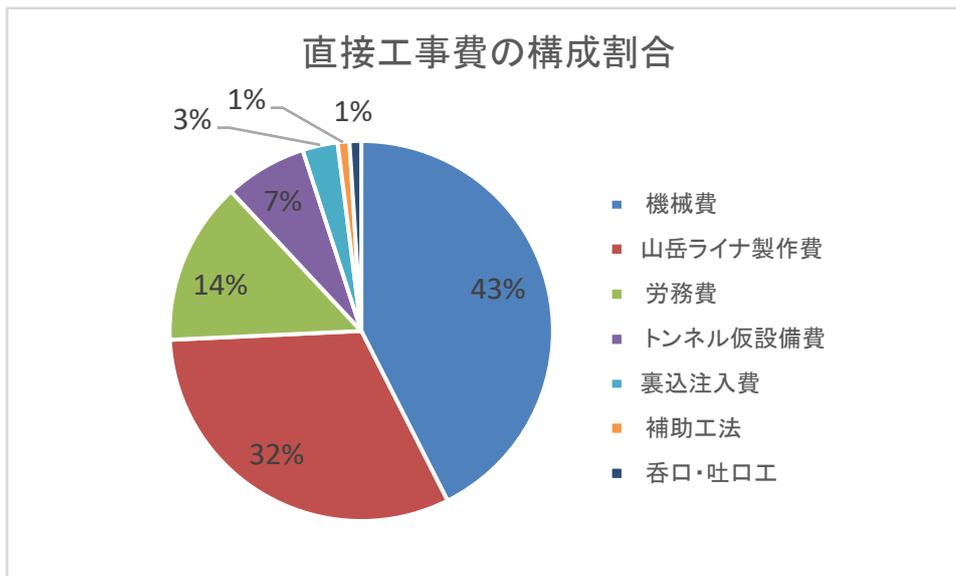


図5.7.1 直接工事費の構成割合

機械費の内訳

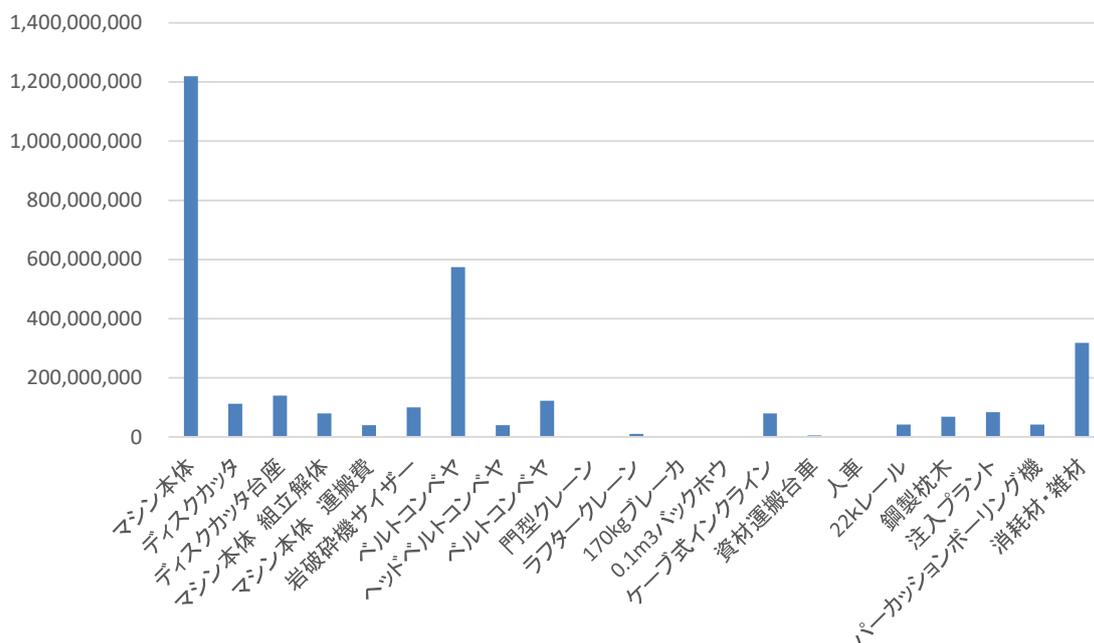


図 5.7.2 機械費の内訳

山岳ライナの製作費では、NATM工法と比較すると、地山等級C級の実績から吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工、および吹付けプラント等材料費約10万円と、場所打ちコンクリートの覆工費約20万円を含めると1m当たり30万円程度になり、対して山岳ライナはワンパス方式になることから1m当たり28万円と同程度になり、コスト縮減に大きく寄与している。

表 5.7.1 にNATM工法とドーナツ型工法の評価をまとめる。

表 5.7.1 導水トンネル延長 8.2km に対する NATM 工法との比較

評価項目		NATM工法	ドーナツ型工法
評価	施工性	全地質に対応ができる。発破作業のため熟練作業者のトンネル技術が必要。切羽と接する作業のため安全性に劣る。	低強度地山に対して、開口部から補助工法が容易に対応できる。機械施工になるためトンネル作業が容易である。
	工期	掘削支保工82月、覆工62月となり、144月を要する。2工区に分けて、72月を要する。	支保工がワンパス方式になることで、機械製作期間を足しても31月で完了する。
	経済性	全体工事費70～120万円/m。	全体工事費125万円/m、同程度。
総合評価		経済性に優れているが、他はドーナツ型に劣る。	工期は半分で完了する。経済性では均衡してきた。

5.8 第5章のまとめ

ドーナツ型の実用性に対して、施工シミュレーションにより各工種の施工方法を検証するとともに、その経済性について評価した。

(1) 山岳ライナの経済性

支保工と覆工を一体とした山岳ライナのワンパス方式は、事前に製作しておけるメリットと、掘削と同時に覆工まで完了することで大幅な工期縮減となる。また、現地製作することで山岳トンネルにおいても経済的にセグメント方式が可能になる。

(2) ケーブル式インクライン方式の経済性

トンネル工事のクリティカル設備になる機材搬出入設備は、ケーブル式インクラインにより1回の牽引量を大きく取ることで、入れ替えする拡幅部を必要としない。また、ワイヤが台車の前後に繋がれることで、安全性や自動運転に利点があることなどから、工期短縮や経済性に効果がある。

(3) 全体工事費の経済性

ドーナツ型工法は、坑内作業体制を掘削・支保工・覆工を一体化できることで、NATM工法と比較すると作業員総数で大幅な縮減と熟練作業員の配置を少なくできる効果がある。全体工事費においても、大幅な工期縮減や山岳ライナの採用などにより、NATM工法と同程度の経済性になる。

【第5章参考文献】

- 1) トンネル設計技術資料:株式会社ロード・エンジニアリング
- 2) 武田光雄、株木雅浩:トンネル掘削装置、及びトンネル掘削方法、特許公報、特許第 5138821号、2012
- 3) 武田光雄、株木雅浩:トンネル掘削装置、特許公報、特許第 5242862 号、2013
- 4) 日本トンネル技術協会:TBMハンドブック、2000
- 5) MMD(2019):MMD Power Consumption Report
- 6) 株木康吉、武田光雄:エレクター、トンネル掘削装置、及びシールドの構築方法、特許公報、特願 2017-006472、2017
- 7) 株木康吉、武田光雄:掘削システム、及び、トンネルの構築方法、特許公報、特願 2017-047449、2019

第6章 結論

6.1 結論

各章で得られた研究成果を取りまとめて、以下のことからドーナツ型の実用性を明らかにした。

(1) 施工性からの評価

ドーナツ型の最大の特長は、中心部を開口して地山を直接見えるようにし、またカッタヘッドの前に出ることを可能にしたことにある。その開口部から低強度地山に対して、従来からNATM工法で行われてきた補助工法の大部分が施工できる優位性がある。

(2) 掘削特性からの評価

ドーナツ型の掘削特性は、センターカッタを無くすことができることと、掘削面積の減少によりカッタ配置数を少なくできることから、カッタ1個当たりの押付力が大きくなり、それに伴いトルクも大きくなる。これにより同一の押圧力では掘進速度が増大し、かつ比エネルギーも減少する優位性がある。

また、その掘削特性はカッタ寿命に対しても大きな効果が発揮されるとともに、掘進速度が早くなることでカッタが岩盤に接触している時間が短くなり、カッタ摩耗や破損が低減されることからカッタ寿命が延伸することを明らかにした。

(3) 経済性からの評価

ドーナツ型工法は、坑内作業体制を掘削・支保工・覆工を一体化できることで、NATM工法と比較すると作業員総数で大幅な縮減と熟練作業員の配置を少なくできる効果がある。全体工事費においても、大幅な工期縮減や山岳ライナの採用などにより、NATM工法と同程度の経済性になることを明らかにした。

6.2 将来への展望

ドーナツ型TBMは、世界的に技術開発されていない新技術であり、中心部が開口していることでTBMよりも機械的に優位性があり、かつ、その最大の弱点

である低強度地山への対応も迅速・的確に実施できるという施工上の優位性も兼ね備えている。

今後は、実現場での稼働を目指す必要があり、特に、山岳トンネルの需要が多い道路トンネル、再生可能エネルギーとしての導水トンネル、農業用の用排水トンネルおよび穀物倉庫用トンネル、あるいは山岳地下を利用した防災都市空間などに対して実用化を図るべきである。

また、TBMが普及しない我が国において、NATM工法より工期が早いだけでなく、経済性においてもドーナツ型TBMを活用した新たな山岳トンネル工法の構築を進める必要がある。ドーナツ型TBMが実用化されれば、国内のみならず海外にも幅広く活用することができるなど、大きな変革をもたらすものと期待される。

謝 辞

本論文を取りまとめるに当たり、研究テーマに対する学術的論証手法ならびに考察方法について、多角的にご指導、ご教示を賜った日本大学教授 保坂成司 博士に対し、ここに謹んで感謝申し上げます。

また、本研究を進めるに当たり懇切なるご指導とご協力を賜りました日本大学教授 渡部 正 博士、日本大学教授 秋葉正一 博士、日本大学教授 西尾伸也 博士に対して深く感謝の意を表します。

さらに、本研究の当初から京都大学名誉教授 故足立紀尚 博士、京都大学院元教授 小山幸則 博士、京都大学名誉教授 朝倉俊弘 博士には懇切なるご指導を賜りまして、深く感謝の意を申し上げます。また、都立大学名誉教授 今田 徹 博士、(一財)先端建設技術センター 佐藤直良 理事長、「ドーナツTBM施工検討会」の委員方々に対し感謝の意を申し上げます。

TBM技術では、多大なご指導、ご教示を賜りました日立造船(株) 花岡泰治 技術統括、石油鑿井機製作(株) 廣瀬 毅 技術部長に対し感謝の意を申し上げます。また、構造設計では(株)ゴーテック 後藤 徹 社長、海外技術の導入では(株)ジェイシーイー藤井豊孝 社長には当初より、ご尽力を賜り感謝の意を申し上げます。

本研究遂行にあたっては、株木建設(株) 故株木雅浩 社長には研究の機会を与えて頂き、また、未来技術研究室室長 武田光雄 博士には技術面において多大なご指導を賜りまして心から感謝の意を申し上げます。

最後に、本論文取りまとめにあたっては、恵まれた研究環境を整備して頂きその好機を与えてくださいました日本大学に厚く御礼申し上げます。

添付資料

＜ドーナツ型TBMに関する特許取得一覧表＞

以下に、ドーナツTBMに関する特許出願について、日本および海外の出願状況を示す。

ドーナツTBM関係 国内・海外特許出願リスト

特許事務所:中村合同特許法律事務所、担当弁理士 山本航介、倉澤伊知郎
〒100-8355 東京都千代田区丸の内3-3-1新東京ビル6F TEL03-3211-8741

番号	発明の名称	出願人	発明者	出願国	特許年月日		特許概要
					出願日	特許年月日	
1	トンネル掘削装置、及びトンネル掘削方法	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	PCT 日本	出願日	2011.5.20	カッタヘッドの中心部に開口があるドーナツ型TBMの最初に提出した装置 *PCT:国際調査機関
					特願番号	2011-537083	
					特許日	2012.02.24	
					特許番号	特許第4934234号	
				PCT 中国	国際出願日	2011.05.20	
					国際出願番号	PCT/JP2011/061642	
					特許日	2015.01.21	
				PCT インドネシア	特許番号	ZL201180036271.7	
					国際出願日	2011.05.20	
					国際出願番号	PCT/JP2011/061642	
	PCT インド	特許日	2014.11.20				
		特許番号	IDP00037293B				
		国際出願日	2011.05.20				
	PCT ベトナム	国際出願番号	PCT/JP2011/061642				
特許日		2019.5.28					
特許番号		313267					
PCT 米国	国際出願日	2011.05.20					
	国際出願番号	PCT/JP2011/061642					
	特許日	2016.8.8					
2	トンネル掘削装置	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	特許番号	15822	カッタヘッドからズリ出し装置 内側にスクリュウ状の羽板を付ける カッタヘッドからのズリ出し方法 上部120° のか開口から自然排出装置
					国際出願日	2011.05.20	
					国際出願番号	PCT/JP2011/061642	
					特許日	2014.8.26	
					特許番号	8,814,472	
					出願日	2011.12.09	
				PCT ブラジル	特願番号	2011-270051	
					特許日	2012-032584	
					特許取得日	2012.11.22	
					特許番号	特許第5138821号	
PCT ドイツ	国際出願日	2012.08.10					
	国際出願番号	PCT/JP2012/070430					
	特許日						
	特許番号						

番号	発明の名称	出願人	発明者	出願国	特許年月日		特許概要
					出願日	特許番号	
3	トンネル掘削システム	株木建設・大林組・鹿島建設・熊谷組・清水建設・大成建設・日立造船・日本シビックコンサルタント	武田光雄 他18名	日本	出願日	2012.06.26	先端建設技術センター検討会 会で出願し、後続架台設備 だけを取得した
					特願番号	2012-142839	
					特許日	2016.07.15	
					特許番号	特許第5967812号	
4	支保工の構築方法及びトンネルの掘削方法	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2012.12.27	支保工の直巻きコンクリート 装置
					特願番号	2012-284342	
					特許日	2017.06.02	
					特許番号	特許第6150096号	
5	トンネル掘削システム	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2014.01.15	カッタヘッドから出てくる ズリを破砕機と直接にベル コンに導く装置
					特願番号	2014-004925	
					特許日		
					特許番号		
6	トンネル掘削システム	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2014.05.28	
					特願番号	2014-109704	
					特許日		
					特許番号		
6	トンネル掘削装置	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2014.09.09	カッタヘッドの摩耗 対策装置
					特願番号	2014-183165	
					特許日	2015.02.27	
				PCT 中国	特許番号	特許第5702500号	
					国際出願日	2015.06.17	
					国際特許番号	201510339060.0	
7	トンネル掘削装置、及び、トンネル掘削方法	株木建設株式会社	武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2015.02.24	中心部岩盤の破砕装置
					特願番号	2015-033740	
					特許日	2019.1.25	
					特許番号	特許第6467754号	
8	トンネル掘削方法、及び、トンネル掘削装置	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2015.10.19	ライナ組立用ルーフ鉄板装 置 テールの後側に屋根を 掛ける
					特願番号	2015-205411	
					特許日	2019.8.16	
					特許番号	特許第6571485号	
9	トンネル掘削装置、及び、トンネル掘削方法	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄 株木雅浩	日本	出願日	2015.12.08	岩破砕機を組み込んだ シールド機
					特願番号	2015-239193	
					特許日	2017.06.09	
				PCT 中国	特許番号	特許第6153173号	
					国際出願日	2017.04.20	
					国際特許番号	201710260842.4	
10	ディスクカッタ及び掘削装置	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄	日本	出願日	2016.07.28	ディスクカッタの摩耗防止 として、カッタ形状ギザギ ザにした装置
					特願番号	2016-148515	
					特許日	2020.3.11	
					特許番号	特許第6674859号	
11	エレクター、トンネル掘削装置、及び、シールド構築方法	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄	日本	出願日	2017.01.18	ドーナツ式エレクタ装置
					特願番号	2017-006472	
					特許日		
					特許番号		
12	掘削システム、及び、トンネルの構築方法	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄	日本	出願日	2017.03.13	ケーブル式インクライン 搬出入装置
					特願番号	2017-047449	
					特許日		
					特許番号		
13	コンクリートの搬送システム、及び、コンクリートの搬送方法	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄	日本	出願日	2017.04.12	ダム用コンクリート運搬装 置 連続ベルコンシステム
					特願番号	2017-078685	
					特許日		
					特許番号		
14	コンクリートの搬送システム、及び、コンクリートの搬送方法	株木建設株式会社	株木康吉 武田光雄	日本	出願日	2017.07.11	ダム用コンクリート運搬装 置 連続ベルコンシステム
					特願番号	2017-135257	
					特許日		
					特許番号		