

平成27年度 建設技術研究開発助成制度
政策課題解決型技術開発公募(一般タイプ)【新規課題】
テーマ3<建設生産システム>
「建設現場の省力化・効率化に資する技術開発」

研究開発課題名

「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」

交付申請者(研究代表者)

一般財団法人先端建設技術センター	八尋 裕
共同研究者代表	
株木建設株式会社	武田 光雄

提案の概要・目標

研究開発の概要

わが国におけるTBMの施工実績は、小口径のものに片寄っており、大口径には本格的な取り組みが行われていない。その大きな理由として、わが国の地質は変化が複雑であるため、たびたび掘進がストップして本来の高速施工の利点が生かされない点がある。

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

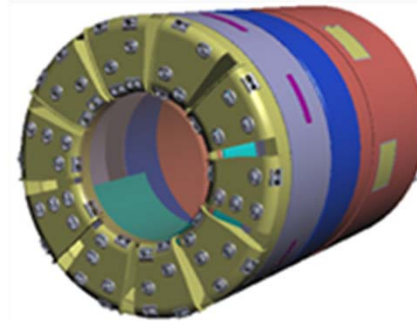
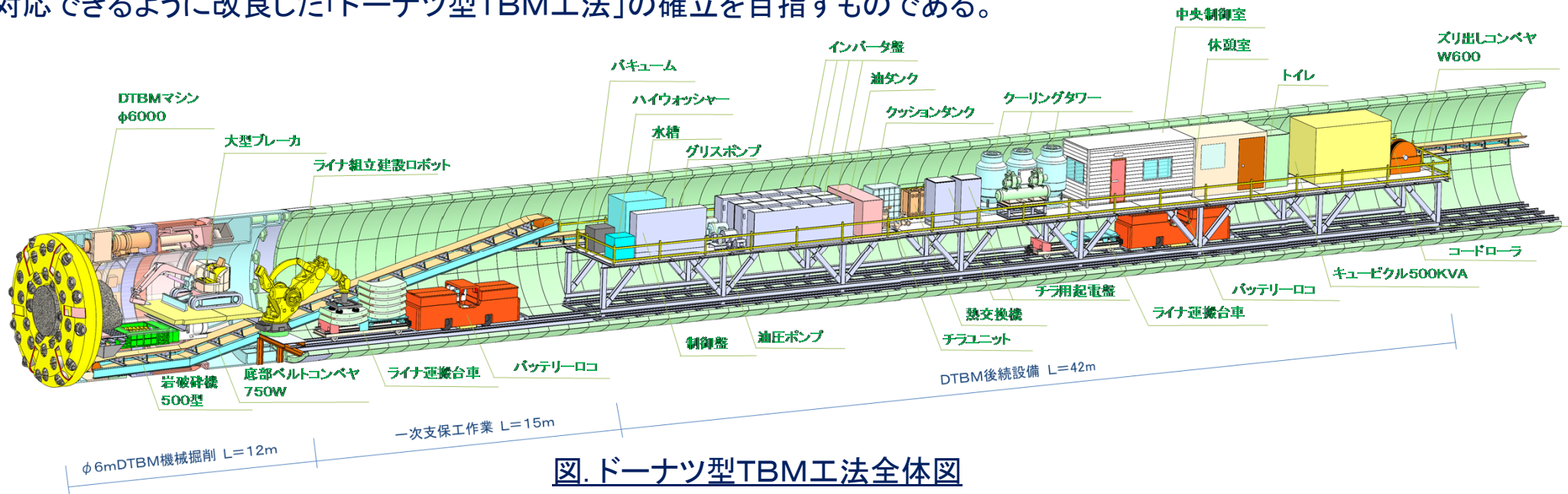


図. ドーナツ型TBM



図. 全断面型TBM

これを解決するため、本研究開発では、カッタヘッドの中心に開口部を設けて複雑な地質変化に対応できるように改良した「ドーナツ型TBM工法」の確立を目指すものである。



□ 研究開発の目標

本研究開発では、ドーナツ型TBMの実用化に向けて機械的な優位性を立証するため、モルタル供試体による掘削実験を行い、ドーナツ型と全断面型の掘削特性を比較する。

また、施工法全体の検証を行うため、設備全体の実施設計を行うとともに3次元モデルを活用した施工シミュレーションを実施する。

□ 実用化に向けた技術開発体制

既存の検討組織（ドーナツTBM工法施工検討会）をベースに、体制の拡大・充実を図る予定である。

表. ドーナツTBM工法施工検討会 構成員

座長	小山幸則 元京都大学大学院教授
委員	(株)大林組
委員	鹿島建設(株)
委員	株木建設(株)
委員	(株)熊谷組
委員	清水建設(株)
委員	大成建設(株)
事務局	(一財)先端建設技術センター

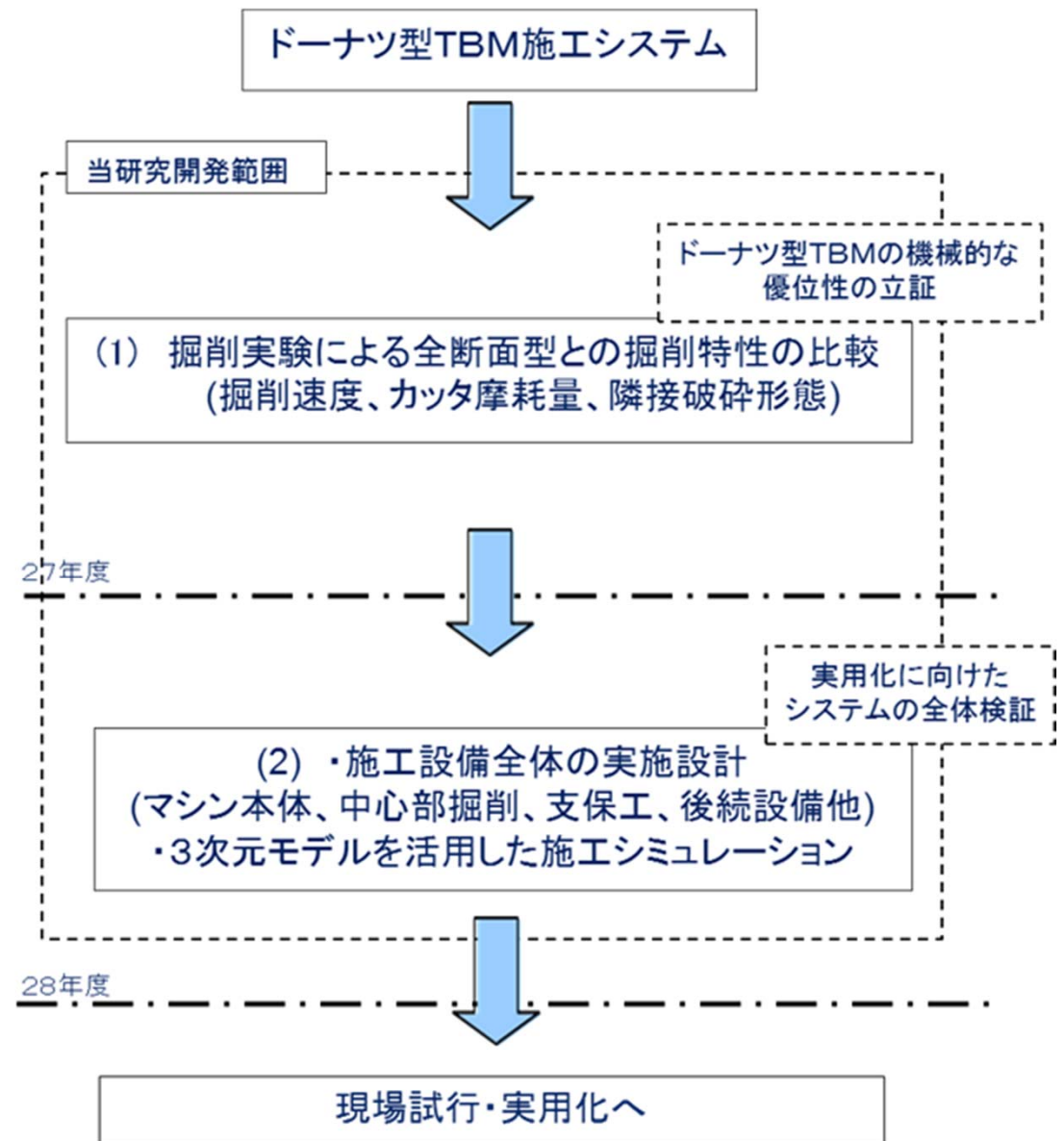


図. 研究開発の概要図

■ ドーナツ型TBMの機械的な優位性の立証(平成27年度)

H27. 3に実施した予備掘削実験により得られたドーナツ型TBMの全断面型TBMに対する優位性を明確にするため、下表に示すように押圧力の条件を変えながらモルタル供試体を掘削することにより、掘削速度、カッタ摩耗量、および隣接破碎形態を定量的に評価する。



写真.予備掘削実験の実施状況

表. モルタル供試体掘削実験仕様

項目	ドーナツ型	全断面型				
		予備試験	①全断面型	②全断面型	③全断面型	④全断面型
コンクリート供試体	モルタル(1:2C=500kg/m ³) $\sigma_{28}=45\text{N/mm}^2$ □1300×H300(15cm掘削)					
カッタヘッド	外周部 ϕ 1000 中心部 ϕ 330	外周部 ϕ 1000				
ディスクカッタ	11個/全部	14個/全部				
	インナカッタ 7個	インナカッタ 8個				
	ゲージカッタ(外周部) 3個	ゲージカッタ(外周部) 3個				
	ゲージカッタ(中心部) 1個	センタカッタ 3個				
ディスクカッタ形状	ϕ 80mm t=3.5mm (切削用合金材)					
カッタピッチ	40mm					
ローラビット試験機	垂直押圧式					
回転数(トルク)(一定)	3回転/分・5MPa(20KN・m)					
押圧力(パラメータ)	1.7MPa(70KN)	押圧力変化 (2.2/4.0/6.0MPa)	1.7MPa(70KN)	2.2MPa(90KN)	4.0MPa(165KN)	6.0MPa(250KN)
カッタ1個当り押圧力 (パラメータ)	6.4KN/個	押圧力変化 (6.4/12/18KN)	5.0KN/個	6.4KN/個	12KN/個	18KN/個



写真.ディスクカッタ(ドーナツ型)



写真.ディスクカッタ(全断面型)

※掘削実験の結果を踏まえ、必要に応じて追加実験の実施についても検討。

■ 実用化に向けたドーナツ型TBM工法の全体検証(平成28年度)

マシン外径の規模を設定して、施工設備全体の実施設計を行う。また、設計した施工設備全体の3次元モデルを作成し、想定地山を対象とした施工シミュレーションにより職種間の連携などを検証する。さらに、作成した3次元モデルから3Dプリンタで模型を制作し、設計の妥当性を検証する。

- 坑内・坑外設備の容量を決定し、機械仕様を設定する。
- 施工シミュレーションを実施する。
 - ✓ 設備全体を3次元CADでモデル化
 - ✓ 3次元地質構造解析ソフト「GTS NXPre/Post」による想定地山の地質モデル作成
 - ✓ 3次元モデルに時間軸を入れた、想定地山ごとの施工シミュレーションの実施
- 3Dプリンタ「Value3D Magix MF-1000」により模型を制作する。

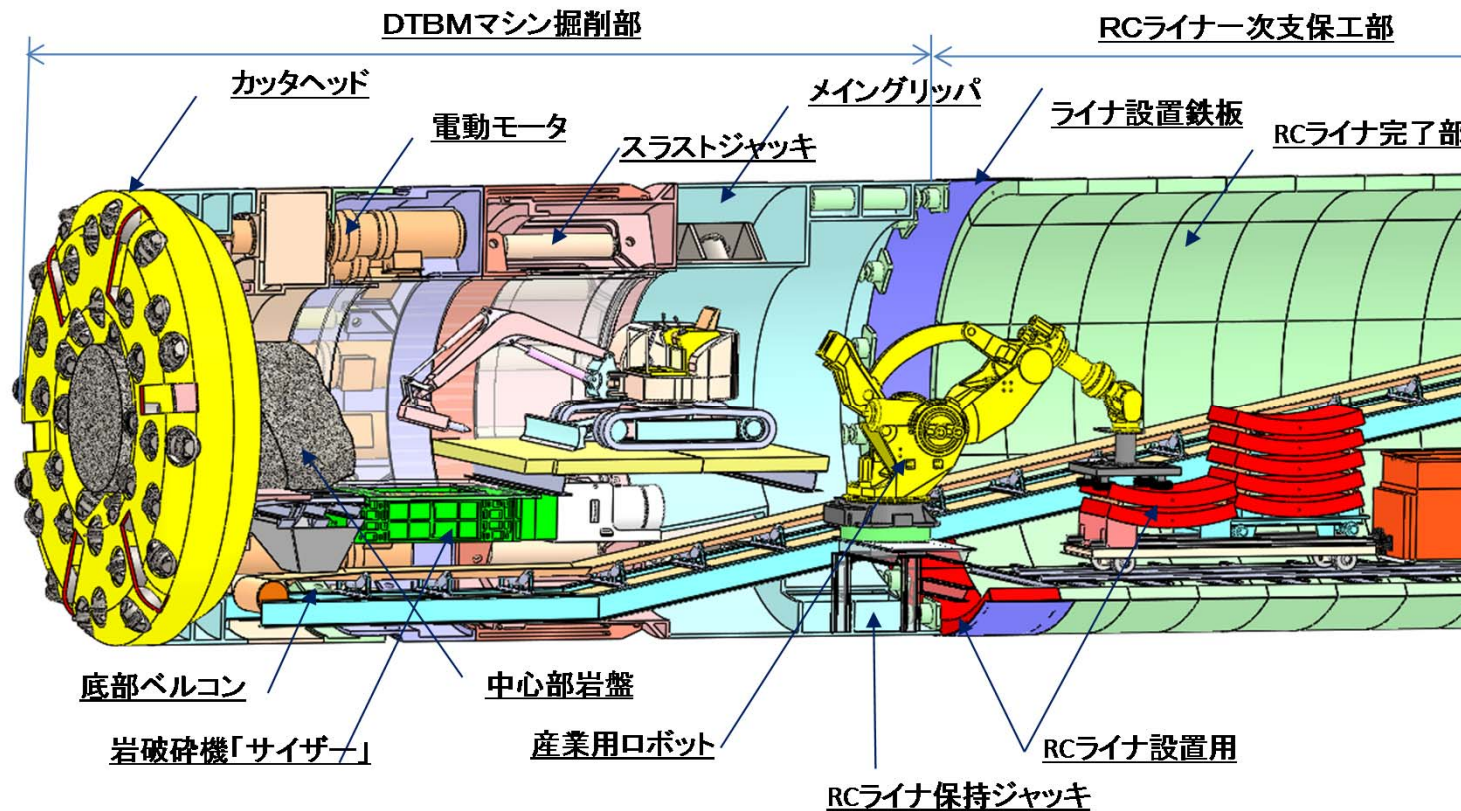


図. ドーナツ型TBMの主要機械

新規性

□ 新規性

TBMの中心部が開口しているドーナツ型TBMは、世界的にも開発されていない。特許は、海外を含めて8カ国に出願しており、日本、米国、中国、インドネシアの4カ国で取得済である。(出願中:ドイツ、ベトナム、インド、ブラジル)

□ 既存技術との比較、優位性

全断面型TBMに対してドーナツ型TBMは、「施工上」及び「機械的」な優位性がある。

■ 施工上の優位性

全断面型TBM工法の最大の課題は、不良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TBM工法は、その改善を図るためにカッタヘッドの中心に開口部を設けることに大きな特長を有するものであり、これにより次のような措置が可能となる。

- 開口部から、切羽を常に直接目視観察しつつ、遅滞のない対策を実施
- 開口部から、100～150m前方の探査ボーリングによるコア採取・湧水量の確認、及びボーリング孔を利用した水抜き(水量によっては水抜き孔を追加)
- 破碎質の地山では、開口部からの礫などの取り込み
- 切羽が泥流する場合、開口部からの注入により地盤を改良
- 脆弱帯が長い区間では、先進導坑(NATM施工)を用いて地盤を改良

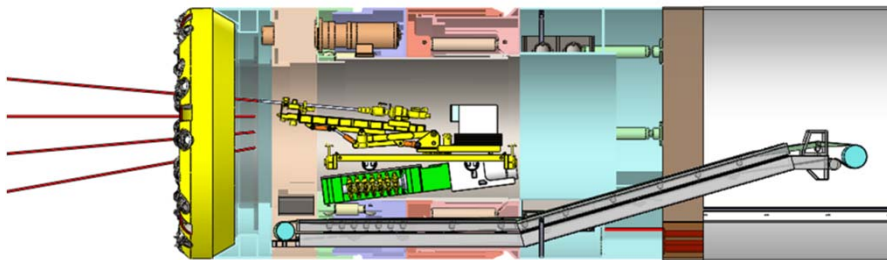


図. 不良地山対策工(コアボーリング、水抜き孔、地盤改良孔)

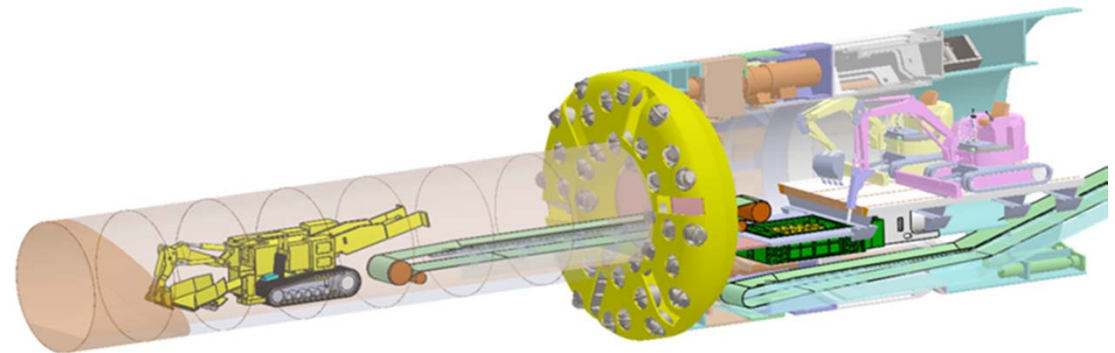


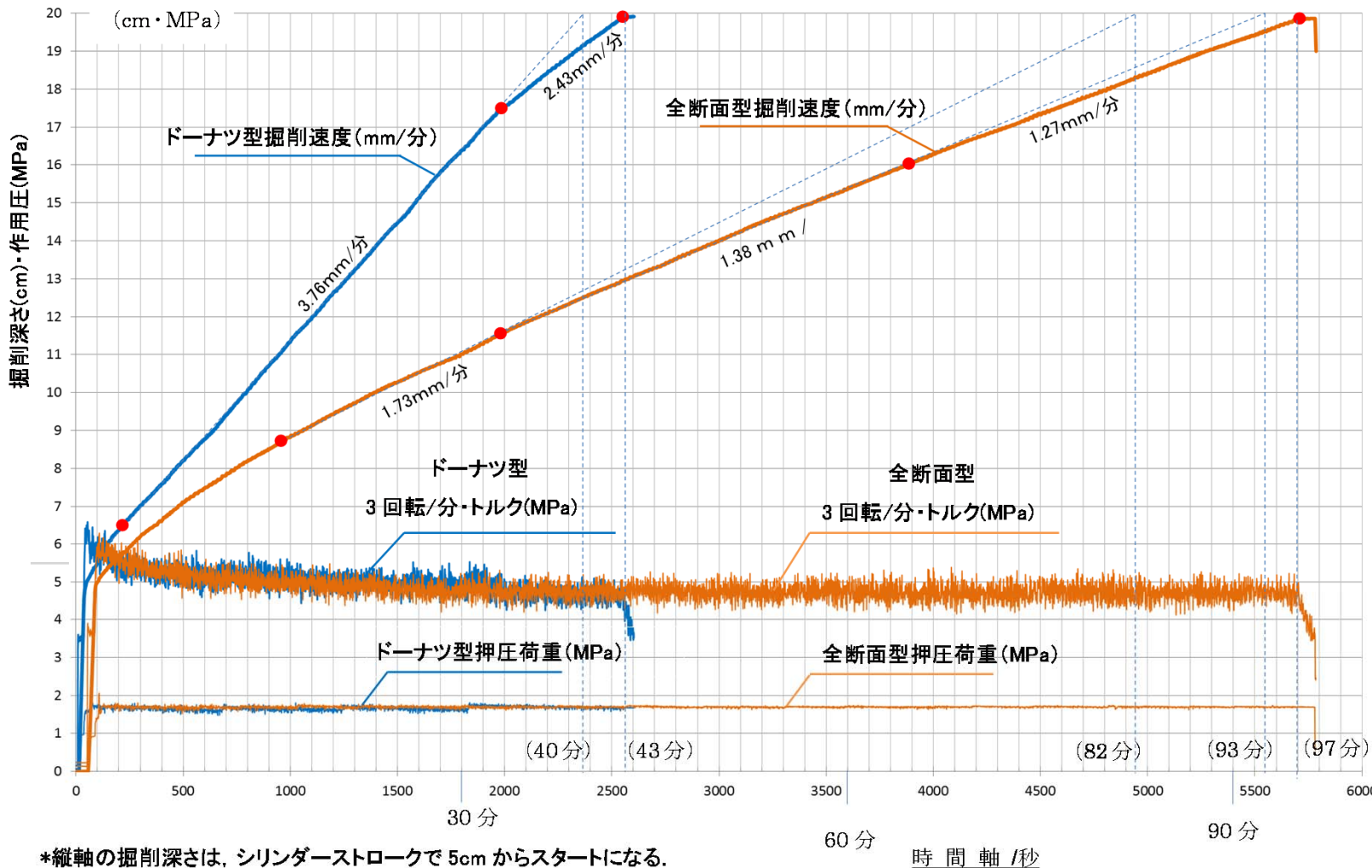
図. 先進導坑による地盤改良

■ 機械的な優位性

予備掘削実験結果からは、下図のとおりドーナツ型の方が全断面型よりも大きな掘進速度が得られることが確認できている。ドーナツ型TBMの機械的な優位性を立証することにより、工期短縮、コスト縮減などに大きく寄与することが明らかとなる。

<ドーナツ型TBMの優位性>

- 同じ掘削力(トルク+スラスト)であれば、全断面型よりも早い掘進速度が得られる。
- 掘削力や反力をより小さくすることが可能であり、軟弱層への対応上有利となる。
- 掘削量あたりのディスクカッタ摩耗量を減らすことができ、コスト縮減効果が得られる。
- カッタ交換頻度の減少による工期縮減効果が得られる。



*縦軸の掘削深さは、シリンダーストロークで5cmからスタートになる。

図. 予備掘削実験により得られた掘進速度の比較結果

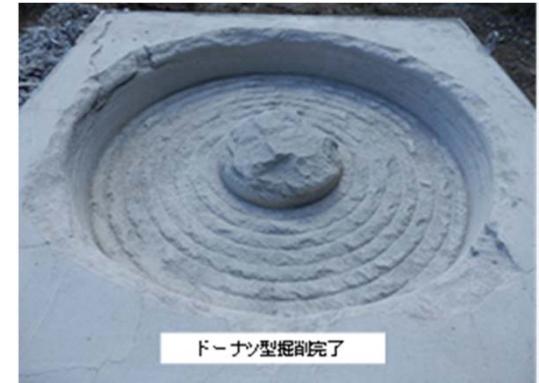


写真. 掘削完了状況(ドーナツ型)

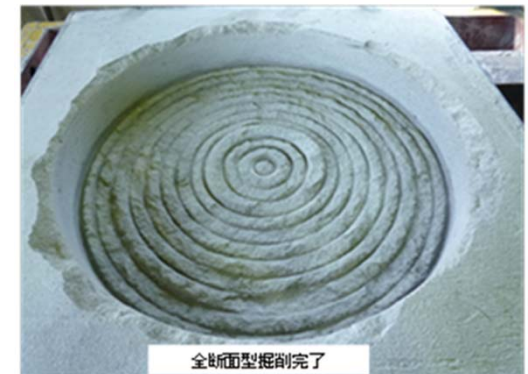


写真. 掘削完了状況(全断面型)

実現可能性

□ これまでの研究開発経緯

ドーナツ型TBMによるトンネル工法については、平成23年度に(一財)先端建設技術センターに「ドーナツTBM工法施工検討会」を設置し、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の検討から、機器構成に至るまでの検討を進めてきた。この間、平成24年8月にはトンネル専門家を招いた報告会を開催している。

□ 主要技術の概要

現時点までの到達状況として、主要技術の概要を以下に示す。

1)ドーナツ型TBMの掘削メカニズム

※次頁に詳述

2)ディスクカッタの取替方法

カッタヘッドの区切板を作業台として利用することにより、カッタヘッドの内側から取替。

3)カッタヘッド摩耗対策

掘削ズリをカッタヘッド前面に滞留するよう構造上の工夫を施した摩耗対策を実施。

4)支保工の選定

不良地山への対処方法や

施工性、経済性を重要項目として検討した結果、RCライナ方式を有力案として選定。

5)RCライナの据付け方法

据付け箇所360度鉄板を配置し、地山の露出をなくすことで作業の安全性を確保するとともに、地質によらずスパンを1mに統一することで作業を簡略化。

6)資機材運搬設備

運搬はレール方式とし、坑内は単線とする。後続架台下は複線とし、材料の荷卸し及びRCライナの退避場所を確保。

表. 検討会等の開催経緯

会議等名	開催日	主な議題等
第1回準備会	H23.9.16	工法説明、準備会の進め方
第2回準備会	H23.9.29	発破掘削・RCライナ方式の施工概要
第1回勉強会	H23.10.13	発破掘削・RCライナ方式のまとめと課題、今後の進め方
第3回準備会	H23.10.26	発破掘削・RCライナ方式の手順とサイクルタイム
第1回検討会	H23.12.9	検討会覚書締結、機械掘削方式の検討
第2回検討会	H23.12.22	機械仕様説明、ECL方式による施工方法の検討
「サイザー」現地調査(中国)	H24.3.4~7	中華人民共和国山西省太原市の石灰岩採掘場におけるサイザー使用実態等の調査
第3回検討会	H24.4.19	施工方法のまとめ、ECL方式のまとめ、特許共同出願について
第4回検討会	H24.6.29	特許共同出願覚書の承認、一次支保工におけるNATM方式の施工法、研究成果報告書案について
研究成果報告会	H24.8.1	トンネル専門家へのこれまでの検討成果の報告
第5回検討会	H24.10.5	現在の活動状況報告、特許共同出願覚書の修正
第1回「サイザー」破砕試験	H25.2.20	堅固岩(10m ³ 程度)による破砕試験
第6回検討会	H25.5.15	現在の活動状況、今後の活動展開について
第7回検討会	H25.11.11	現在の活動状況について
第2回「サイザー」破砕試験	H25.12.11	巨岩(10個)による破砕試験
第8回検討会	H26.10.7	現在の活動状況について
予備掘削実験	H27.3.5	ドーナツ型、全断面型カッタヘッドによるモルタル供試体の掘削実験
第9回検討会	H27.6.16	現在の活動状況、予備掘削実験結果について

□ ドーナツ型TBMの掘削メカニズム

トンネル掘削の流れは次のとおりである。

- ✓ 外周部はカッターヘッドによりドーナツ状に、回転と推進力とで剥ぎ取るように掘削する。切削ズリは、頂部の120°排出口から動力を使わずに自然排出される。
- ✓ 残された中心部は、核残しの役目を果たしながら突き出てきた岩塊を、二軸式岩破碎機「サイザー」により20cm以下に破碎する。バックホウ型ブレイカは、マシン掘削ズリの目詰まり除去や中心部岩塊の補助掘削用として、オペレータにより遠隔運転する。
- ✓ 掘削ズリは、底部に配置したベルトコンベヤにより坑外まで運搬される。

中心部の開口率については、開口部を汎用機械類が通過できることや中心部の破碎掘削がクリティカル作業にならないことなどを考慮しつつ、地質性状に合わせて設定する。

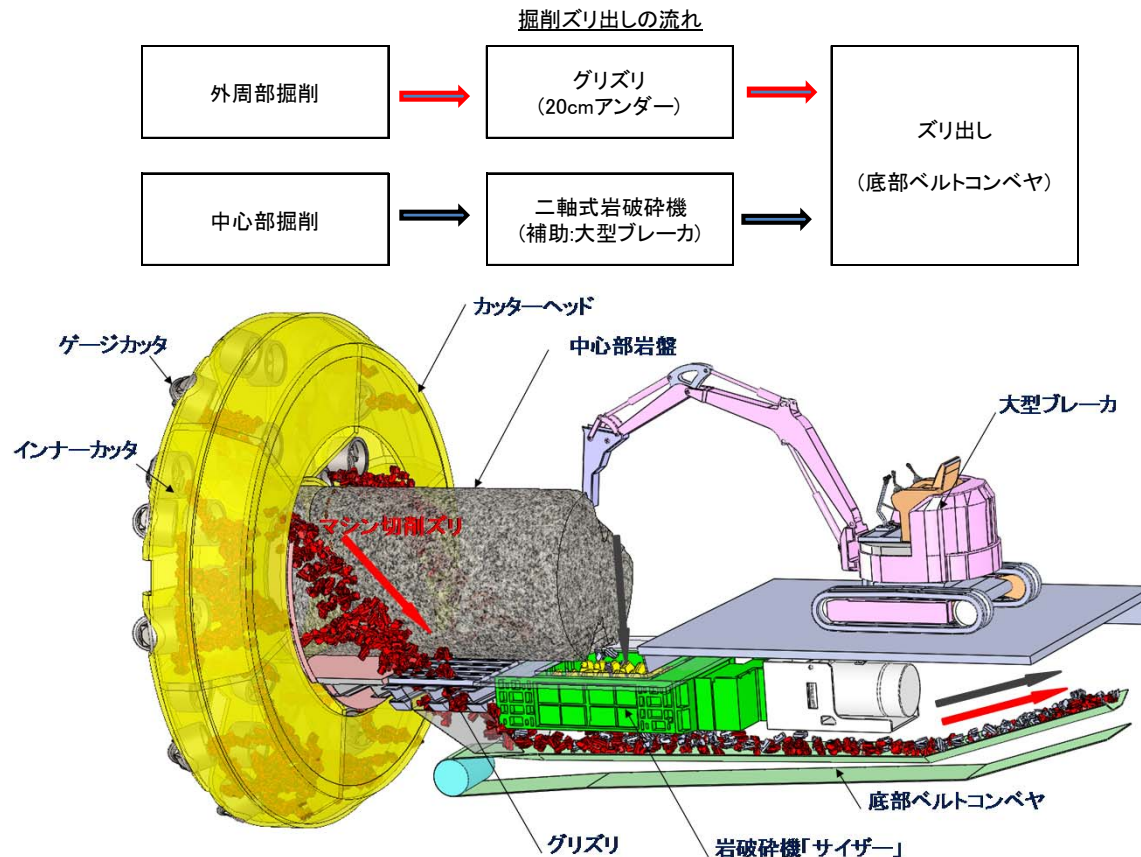


図. 掘削フロー図

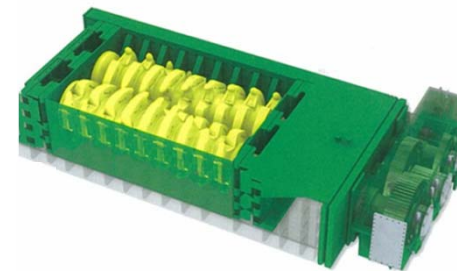


図. 二軸式岩破碎機「サイザー」



写真. サイザーによる試験破碎状況

※二軸式岩破碎機「サイザー」について

- ✓ 高さが低くコンパクト、軽量で高い生産性を有する破碎機である。
- ✓ わが国では使用実績はないが、欧州アルプストンネルの花崗岩帯での実績がある。
- ✓ 「ドーナツTBM工法施工検討会」では、中国における使用実態を調査するとともに、試験的に導入して各種試験を実施している。

導入効果

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、全断面型TBMよりも機械的に優位で、かつ、その最大の弱点である不良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。ドーナツ型TBM工法が実用化されれば、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、山岳トンネル工法に大きな変革をもたらすものと期待される。

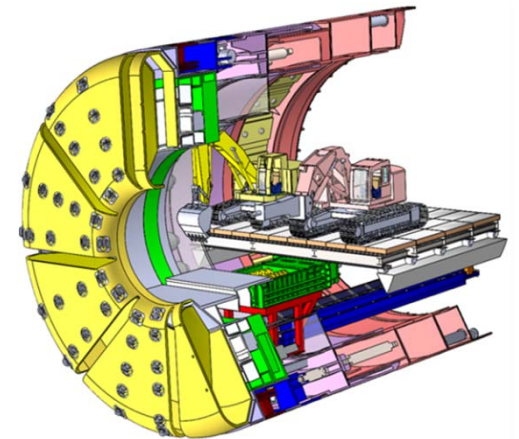


図. ドーナツ型TBM(外径15m)

□ 工期短縮

1日当たり作業時間をロス時間を見込み12時間稼働、1月当たり22日稼働として、標準地山に対する掘進速度を試算すると、月間平均で528mの進行が見込まれる。
(マシン外径6m、一次支保工としてRCライナを採用した場合)

□ 省力化

ドーナツ型TBM工法のメリットである高速施工が実現できれば、全体作業員の大幅な減少が可能となる。また、産業用ロボットの導入等による機械化や自動化により、作業を簡単化できる。

■ 例えば、トンネル延長5kmに対する作業員数

ドーナツ型TBM:15人/方×2方×22日×15月= 9,900人(平均月進528mとした場合)

NATM :10人/方×2方×22日×52月=22,880人(標準的な月進速度である100m/月を採用した場合)

□ コスト縮減・環境への影響・安全性

- ✓ コスト面では、ディスクカッタの摩耗量が少ないと見込まれることから、取替作業を含めたランニングコストの低減が図られる。
- ✓ 環境面では、工期短縮による自然環境への負荷の軽減が図られる。
- ✓ 安全面でも、全断面型TBMと同様に鋼製殻の中での作業によるメリットが確保できる。

□ 事業化計画

本研究開発助成の採択を受け、従来の産、学に官を加えた体制を構築して研究開発を進めることにより、実現場での試行(実証実験)、さらには実用化への道筋を見出していきたい。