様式 11　別紙 2

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1.　研究開発分野

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

2.　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」

3.　研究開発実施体制

(1)　交付申請者氏名

吉田　延雄　一般財団法人先端建設技術センター　理事兼企画部長

〒112―0012　東京都文京区大塚２丁目１５番６号

(TEL：03-3942-3991、FAX：03-3942-0424、E-mail：yoshidan@actec.or.jp)

(2)　共同研究者名

1)　共同研究者名

氏名	所属(学校名)	役職
小山　幸則	元京都大学大学院	教授
塚原　隆夫	一般財団法人　先端建設技術センター先端建設技術研究所研究第一部兼研究第二部	部長
(前)八尋　　裕	一般財団法人　先端建設技術センター先端建設技術研究所研究第一部兼研究第二部	部長
市川　勝巳	一般財団法人　先端建設技術センター先端建設技術研究所研究第一部	次長
武田　光雄	株木建設株式会社　プロジェクト室	室長
赤岩　友和	株木建設株式会社　プロジェクト室	技術次長
横江　雄一郎	株木建設株式会社　プロジェクト室	技術課長
株木　康吉	株木建設株式会社　プロジェクト室	研究員
守屋　洋一	株式会社大林組　生産技術本部　シールド技術部	部長
船迫　俊雄	鹿島建設株式会社　機械部　企画グループ	グループ長
手塚　　仁	株式会社熊谷組　土木事業本部 トンネル技術部	部長
江戸川修一	清水建設株式会社　土木事業本部　地下空間統括部	部長
木村　政俊	大成建設株式会社　土木本部　機械部　機械技術室	室長
(前)立石　洋二	大成建設株式会社　土木本部　機械部	部長

2)　ドーナツＴＢＭ工法施工検討会委員名

ドーナツTBM工法施工検討会委員			
座長	小山　幸則	京都大学大学院	元教授
幹事	武田　光雄	株木建設	プロジェクト室　室長
委員	小澤　郁夫	大林組	土木本部企画管理部　部長
委員	守屋　洋一	大林組	生産技術本部　シールド技術部長
委員	船迫　俊雄	鹿島建設	機械部　企画グループ長
委員	手塚　　仁	熊谷組	土木事業本部 トンネル技術部　部長
委員	後藤　　博	熊谷組	土木事業本部 トンネル技術部　課長
委員	江戸川修一	清水建設	土木事業本部　地下空間統括部　部長
委員	木村　政俊	大成建設	土木本部　機械部機械技術室室長
委員	内田　正孝	大成建設	土木本部　機械部機械技術室主事
委員	(前)立石　洋二	大成建設	土木本部　機械部長
委員	赤岩　友和	株木建設	プロジェクト室　技術次長
委員	横江雄一郎	株木建設	プロジェクト室　技術課長
委員	株木　康吉	株木建設	プロジェクト室　研究員
委員	吉田　延雄	先端建設技術センター	企画部　理事兼企画部長
委員	(前)加納　敏行	先端建設技術センター	企画部　常任参与兼企画部長
事務局	一般財団法人　先端建設技術センター		
	塚原　隆夫	先端建設技術研究所	研究第一部兼研究第二部　部長
	八尋　　裕	先端建設技術研究所	研究第一部兼研究第二部　部長
	市川　勝巳	先端建設技術研究所	研究第一部　次長

3) 産学官テーマ推進委員会委員名

産学官テーマ推進委員会

職 名	氏 名	分類	所 属
委員長	今田 徹	学	東京都立大学名誉教授
委 員	足立 紀尚	学	京都大学名誉教授
委 員	小山 幸則	学	元京都大学大学院 教授
委 員	新田 恭士	官	国土交通省総合政策局公共事業企画調整課 施工安全企画室 企画専門官
委 員	砂金 伸治	官	国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループトンネルチーム上席研究員
委 員	真下 英人	産	(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 所長
委 員	安井 成豊	産	(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第一部部長
委 員	吉田 延雄	産	(一財)先端建設技術センター 企画部理事兼企画部長
委 員	(前)加納 敏行	産	(一財)先端建設技術センター 企画部常任参与兼企画部長

4) 産学官テーマ推進委員会開催一覧

産学官テーマ推進委員会開催概要

年度	会議等名	開催日	主な議題等
平成 27 年度	第1回	H27.10.30	・27年度研究開発助成制度の概要・採択経緯 ・産学官テーマ推進委員会の設立について ・今年度の研究開発の進め方 ・研究開発助成の全体スケジュール
	第2回	H28.2.4	・掘削実験結果取りまとめについて ・追加実験について ・今後の研究開発の進め方について
	第3回	H28.3.10	・平成27年度研究開発成果の取りまとめ ・今後の研究開発の進め方について ・28年度研究開発助成制度への公募について
平成 28 年度	第1回	H28.11.2	・産学官テーマ推進委員会の設立について ・平成27年度研究開発成果 ・平成28年度の研究開発の進め方
	第2回	H29.1.10	・DTBM工法によるモデルトンネル施工計画書(案)について
	第3回	H29.3.16	・第2回テーマ推進委員会課題:低強度地山区間の支保パターン判定フロー ・不良地山対策について ・DTBMの機械設計(案)について ・研究開発成果の取りまとめ ・報告書作成について

4.　研究開発期間及び研究開発予算

平成 27 年度研究開発期間：平成 27 年 9 月 1 日～平成 28 年 3 月 31 日
平成 27 年度研究開発期間：26,970 千円
平成 28 年度研究開発期間：平成 28 年 6 月 3 日～平成 29 年 3 月 31 日
平成 28 年度研究開発期間：17,940 千円
合計　　44,910 千円

5.　研究開発目標の概要

諸外国における山岳トンネル工事では、高速掘進・工期短縮・コスト縮減・施工の安全確保等を目的として、ＴＢＭ工法が数多く採用されている。我が国の山岳トンネル、とりわけ長大トンネルにおいても高速施工を目的にＴＢＭの導入が図られることがあるが、日本の複雑な地山では不良地山に遭遇することが多く、その区間ではＮＡＴＭ工法よりも遥かに施工効率が低下して、高速性を殺いてしまう事例が多く見られる。

新たに考案したドーナツ型ＴＢＭは、全断面ではなくドーナツ状に外殻だけをＴＢＭで掘削し、残りの中心部分を岩破砕機で機械掘削する二分割方式をとっている。中心部を開放して地山を直接見えるようにし、またＴＢＭの前に出ることを可能にすることは、トラブル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。また、機械的に見ても、中心部をカッタで掘らないドーナツ型は、同一の押圧力条件下で全断面型より掘削速度が早く、その分マシン荷重負担が少なく、カッタ摩耗量においても優位性があることが予備試験結果から得られている。

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、支保工等の施工法の検討から、機器構成に至るまでの検討を進めてきた。

本研究開発は、ドーナツ型ＴＢＭを活用した新たな山岳トンネル工法の実用化に向け、ドーナツ型ＴＢＭの機械的な優位性を立証するとともに、施工法全体の検証を行うことを目標とするものである。

6.　研究・技術開発の内容と成果

6.1　ドーナツ型ＴＢＭの機械的優位性の検証

平成２７年度は、ドーナツ型ＴＢＭが全断面型ＴＢＭより優位性があることを明確にするため、モルタル供試体による掘削実験をとおして掘削特性を定量的に評価するものである。その実験成果については、以下のとおりです。

(1)　実験の概要

掘削実験の回数は、本実験と追加実験を合わせて１０回実施した。

表.1　実験回数

型式	実験回数	
	本実験 総押付力 を変化(回)	追加実験 総押付力 を同一(回)
ドーナツ型φ150	1	1
ドーナツ型φ330	1	1
ドーナツ型φ498	1	1
全断面型④	1	1
全断面型⑤	1	1

表.2　本実験モルタル圧縮強度結果

試験日	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)
平成27年12月16日	28	45.8
平成28年1月26日	41	48.1
平成28年1月27日	42	48.7
平成28年1月28日	43	49.2

表.3　追加実験モルタル圧縮強度結果

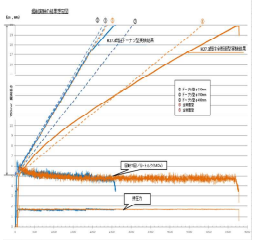
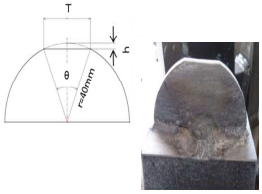
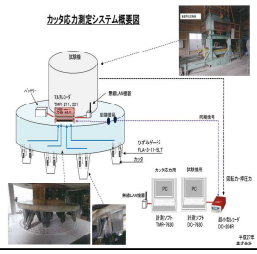
試験日	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)
平成27年11月16日	111	54.5
平成28年1月28日	184	55.0
平成28年2月16日	203	54.0

(2)　本実験の計画、結果

本実験では、モルタル供試体強度（４８N/mm²）に対して、カッタヘッド全体を押す総押付力を変化させて、ドーナツ型３種類と全断面型２種類を実験し掘削特性を評価するものである。

表　本実験の実施計画概要

		カッタヘッド	ディスクカッタ	カッタピッチ	回転数/トルク	カッタヘッド総押付力	カッタ１個当たり押付力	実施設計への反映事項
実験項目	ドーナツ型	① 外周部φ1.0m 中心部φ330mm	11個	40mm（一定）	3回転／分（一定） トルク値（変化させる）（20kN・m）	84.7kN	7.70kN／個	＜ドーナツ型＞ ・効率よく掘削する上での開口径の最小寸法の考え方
		② 外周部φ1.0m 中心部φ150mm	13個			100.1kN	7.70kN／個	
		③ 外周部φ1.0m 中心部φ498mm	9個			69.3kN	7.70kN／個	
	全断面型	④ 外周部φ1.0m	14個			107.8kN	7.70kN／個	＜全断面型＞ ・ドーナツ型と全断面型の掘削時間を評価 ・センターカッタの抵抗力の評価
		⑤ 外周部φ1.0m	14個			84.7kN	6.05kN／個	

	掘削速度の測定	カッタ摩耗量の測定	隣接破砕形態の測定	カッタ応力の測定
実験方法	各実験項目で15cmを掘削完了する時間を測定する。なお、試験誤差を考慮し供試体中央部（10cm間）の掘削速度から判定する。 	実験毎に新しいカッタで掘削し、その摩耗量を全数計測する。 	① ビデオカメラ、写真撮影 ② 隣接破砕された岩片を１０個抽出し、形状、重量を計測する。 ③ ドーナツ形状を計測する。 ④ 中心部の掘削溝形状を計測する。 	１枚当たりカッタに加わるトルク値・押圧力を「ひずみゲージ」で計測し、ゲージカッタ、インナーカッタおよびセンターカッタの負担割合を計測する。 

	掘削速度の評価	カッタ摩耗量の評価	隣接破砕形態の評価	カッタ応力の評価
評価	・総押付力を変化させて、ドーナツ型の開口径の違いによる評価、および同様に全断面型に対しても評価することで比較し、優位性を掘削時間効率として表す。	・カッタ取付け位置により転がる距離が違うことから、摩耗量と転動距離との特性を確認する。 ・センターカッタとゲージカッタは引きずり的な掘削をすることから、偏摩耗的に削り取れる状態を確認する。	・ドーナツ型において中心開口部を残し、ゲージカッタ(内部)で掘削できることを確認する。 ・全断面型と比較して、隣接破砕された破片の重量、および形状から破砕形態の違いを確認する。	・インナーカッタ、センターカッタ、ゲージカッタの種別ごとで応力の負担割合を計測することで、ドーナツ型と全断面型とのカッタ配置の特性を評価する。

■　本実験の掘削速度測定結果(実績値)

モルタル供試体強度(48N/mm²)におけるカッタヘッド全体の総押付力を変化させた結果、**下図**に示すように、全断面型との比較ではドーナツ型の開口径が大きくなるほど、掘削時間が早くなる結果となった。

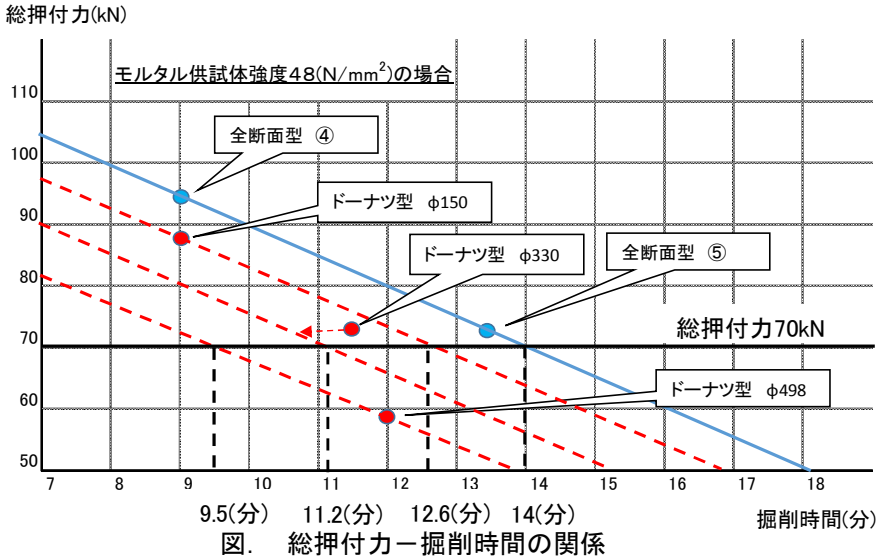


図.　総押付力－掘削時間の関係

(3)　追加実験の計画、結果

モルタル供試体強度（４８N/mm²）における本実験の結果から総押付力を変化させるこ

とで、ドーナツ型の開口径が大きくなると掘削時間が早くなることが確認できた。追加実験では、モルタル供試体強度（５５N/mm²）を大きくするとともに、カッタヘッド全体の総押付力（７０ｋN）を同一にすることで、全断面型との掘削時間を直接評価するために実施する。

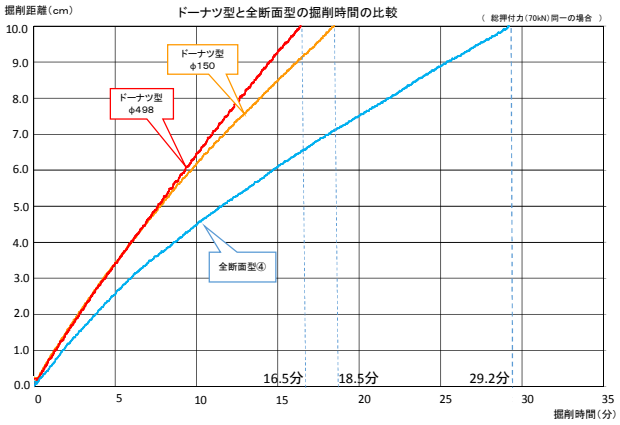
モルタル供試体掘削実験（追加実験）実施仕様計画

項　目	ドーナツ型			全断面型	
	ドーナツ型 中心部φ498	ドーナツ型 中心部φ330	ドーナツ型 中心部φ150	全断面型④	全断面型⑤ （全断面型④の実験終了後、再度同一のカッタヘッドを使用）
モルタル供試体	モルタル（1:2C=577kg/㎥）　55 N/mm² □1300×H300（15cm掘削）				
カッタヘッド	外周部φ1000 中心部φ498	外周部φ1000 中心部φ330	外周部φ1000 中心部φ150	外周部φ1000	外周部φ1000
ディスクカッタ	9 個	11 個	13 個	14 個	14 個
	インナカッタ　5個	インナカッタ　7個	インナカッタ　9個	インナカッタ　8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（外周部）　3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	ゲージカッタ（中心部）　1個	ゲージカッタ（中心部）　1個	センタカッタ　3個	センタカッタ　3個
ディスクカッタ形状	φ80mm　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	垂直押付式				
回転数（トルク）	3回転/分（一定）（20kN・m　5MPa程度）				
カッタヘッド全体総押付力（一定）	72　kN （本実験ケース①、⑤と同等）				
カッタ1個当り押付力	7．8　kN/個	6．4　kN/個	5．4　kN/個	5．0　kN/個	5．0　kN/個
実験のねらい	・全体押付力を一定にして、ドーナツ開口径の違いによる掘削速度を測定することで、最適な開口径を割り出す。 ・全断面型との掘削効率を比較する。 ・ドーナツ型（φ330）と全断面型において、モルタル強度の違い（本実験より約10N/mm²強度アップ）が掘削速度に及ぼす影響を把握する。				全断面型④で使用したカッタヘッドを再度使用して④と同一条件下で実験を行なうことにより、カッタ摩耗が掘削に及ぼす影響を把握する

■　追加実験の掘削速度測定結果（実績値）

本実験、追加実験結果から掘削速度を決める要因として、総押付力、モルタル供試体強度、カッタ摩耗度の３項目が大きく影響することが分かった。そのことから、ドーナツ型と全断面型の掘削時間の比較では、カッタ摩耗度が同程度のドーナツ型φ１５０、φ４９８と全断面型④を対象とした。

掘削時間の結果は**下図**及び**下表**に示すとおり、総押付力を同一にした場合には、全断面型④を１．０とすると、ドーナツ型φ１５０で３７％、φ４９８で４４％の掘削時間効率が得られる結果となった。



図．　ドーナツ型と全断面型の掘削時間

表.　全断面型に対するドーナツ型の掘削時間効率（実績値）

	総押付力(kN)	掘削時間(分)	掘削時間効率(%)	全断面型1．0に対する開口率
ドーナツ型 φ150	67.6	18.5	0.63（37%）	0．98（2%）
ドーナツ型 φ498	66.2	16.4	0.56（44%）	0．75（25%）
全断面型④	68.6	29.2	1.00	

■　掘削時間のまとめ

ドーナツ型ＴＢＭは世界的にもない技術になることから、本実験でも初めてのことになり、１０供試体の実験の条件を変えながら一つひとつ確認しながら実施した。実験結果は、実験目的であるドーナツ型が全断面型よりも機械的にも優位性があることを定量的に評価することにあり、以下のような結果を得た。

① 本実験結果から、当然であるが総押付力が大きくなると両方とも掘削時間も早くなり、ドーナツ型では掘削する面積が少ないほど、すなわち開口径が大きくなるほど全断面型より早くなることが確認できた。

② 追加実験からは、本実験結果を受けて総押付力を同一にして実施した結果、全断面型に対してドーナツ型の開口率（２%）φ１５０においても３７%、開口率（２５%）φ４９８では４４%の掘削時間効率が得られドーナツ型の優位性が評価できた。

③ １０供試体の実験結果から、モルタル強度や総押付力、およびカッタ摩耗度などの実験条件の違いから一律に並べて評価はできないが、中心部を掘削する全断面型よりは掘削しないドーナツ型が有利に働くことを立証できた。

(4)　カッタ摩耗量測定結果

下図にカッタ摩耗量の測定結果を示す。

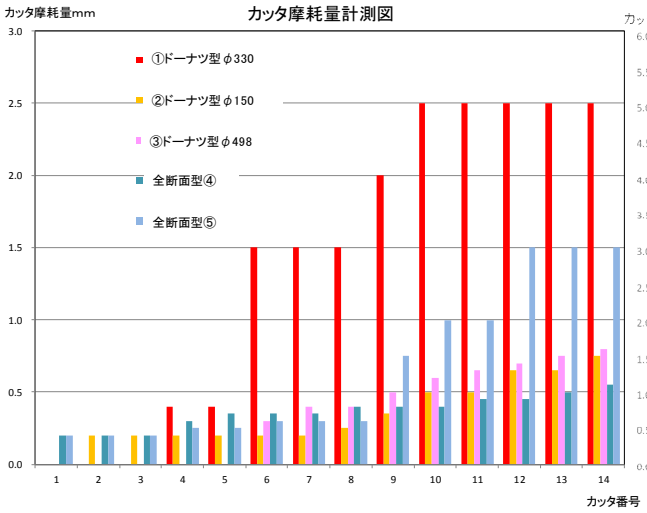


図.　本実験カッタ摩耗量

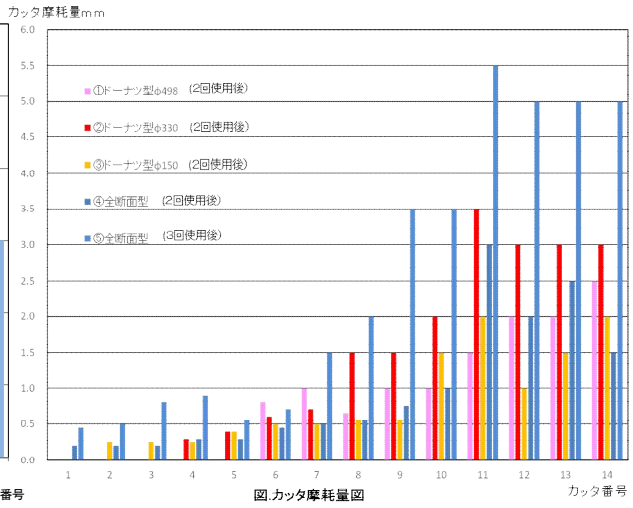


図.　追加カッタ摩耗量

＊注記：φ３３０の摩耗量が特出している要因として、切削したズリ排出が他の実験と比べて少し遅くなったことも考えられる。他に特異なこともなく、カッタの焼き入れ時の誤差等かもしれない。

(5)　隣接破砕形態測定結果

完了写真に示すとおり、ドーナツ型の形状で掘削できていることを確認した。また、下写真のようにバナナ形状に隣接破砕がされていることが確認できた。

掘削完了全景

②ドーナツ型φ150
カッタ13個

①ドーナツ型φ330
カッタ11個

③ドーナツ型φ498
カッタ9個

②ドーナツ型 φ150

④全断面型
カッタ14個

⑤全断面型
カッタ14個

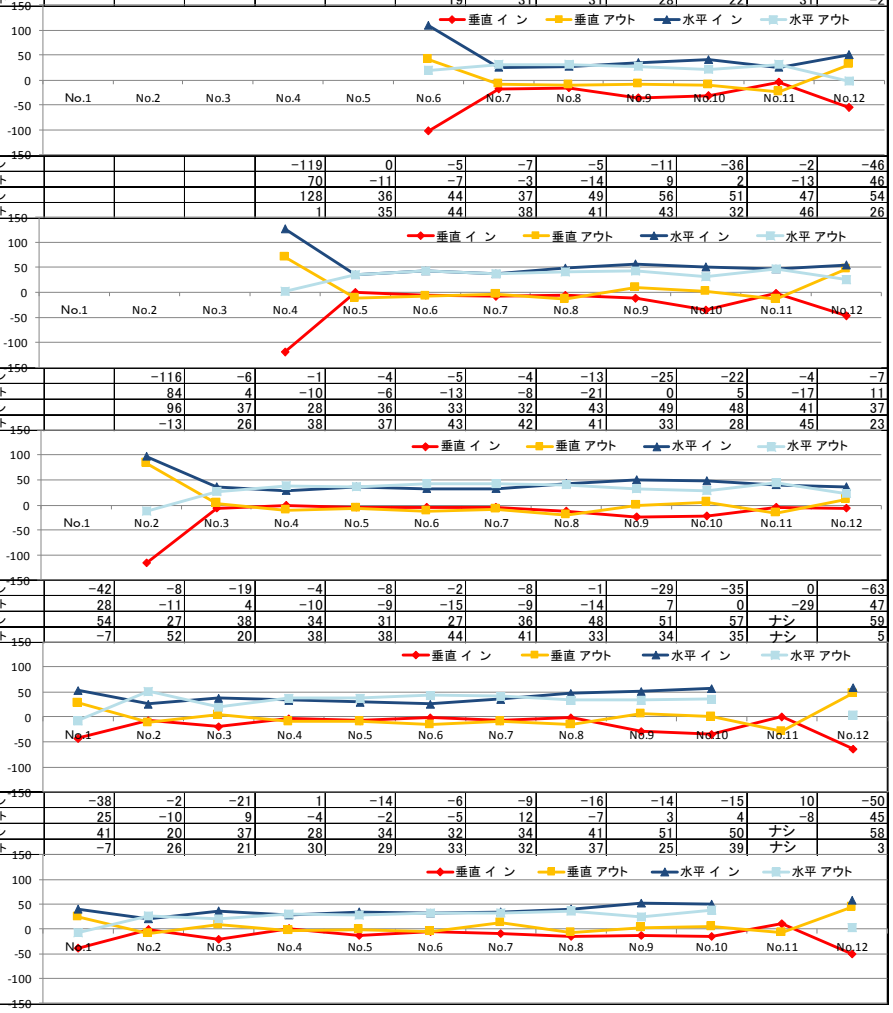
④全断面型

(6)　ひずみ測定結果

インナーカッタ、センターカッタ、ゲージカッタの種別ごとの応力の負担割合を計測する目的で、ほぼ全数について計測を実施した。その結果、下図に示すとおり、ドーナツ型ではゲージカッタ部でひずみ値が大きく、インナーカッタでは抵抗が少なく転がっていることから一定の値を示した。一方、全断面型においても基本的にドーナツ型と同じひずみ値を示しているが、センターカッタ部では、インナーカッタの形状にも関わらず最内のNO.1カッタのひずみが大きな値となった。これは、中心部を掘削するに当たっての抵抗値と見なして良く、このことが掘削時間差としてでていることになる。

ひずみゲージ測定結果

項目	位置	カッタ番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
ドーナツ型φ498	垂直	イン						−103	−18	−16	−36	−31	−4	−56
		アウト						41	−9	−11	−8	−10	−24	31
	水平	イン						110	25	28	35	41	25	50
		アウト						19	31	31	28	22	31	−2
ドーナツ型φ330	垂直	イン				−119	0	−5	−7	−5	−11	−36	−2	−46
		アウト				70	−11	−7	−3	−14	9	2	−13	46
	水平	イン				128	36	44	37	49	56	51	47	54
		アウト				1	35	44	38	41	43	32	46	26
ドーナツ型φ150	垂直	イン		−116	−6	−1	−4	−5	−4	−13	−25	−22	−4	−7
		アウト		84	4	−10	−6	−13	−8	−21	0	5	−17	11
	水平	イン		96	37	28	36	33	32	43	49	48	41	37
		アウト		−13	26	38	37	43	42	41	33	28	45	23
④全断面型	垂直	イン	−42	−8	−19	−4	−8	−2	−8	−1	−29	−35	0	−63
		アウト	28	−11	4	−10	−9	−15	−9	−14	7	0	−29	47
	水平	イン	54	27	38	34	31	27	36	48	51	57	ナシ	59
		アウト	−7	52	20	38	38	44	41	33	34	35	ナシ	5
⑤全断面型	垂直	イン	−38	−2	−21	1	−14	−6	−9	−16	−14	−15	10	−50
		アウト	25	−10	9	−4	−2	−5	12	−7	3	4	−8	45
	水平	イン	41	20	37	28	34	32	34	41	51	50	ナシ	58
		アウト	−7	26	21	30	29	33	32	37	25	39	ナシ	3



6.2　ドーナツ型ＴＢＭの実用化に向けた施工法全体の検証

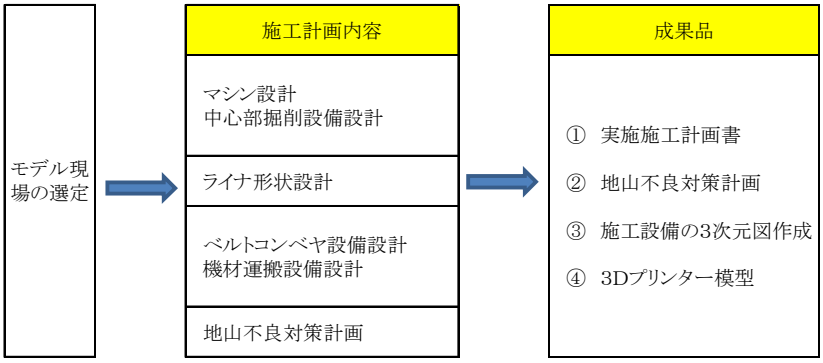
(1)　研究開発目標

研究開発目標は、実用化に向けたＤＴＢＭの施工法全体の検証を行うものである。

(1)　実施施工計画書作成

(2)　３次元モデルを活用した設計の妥当性確認

実施施工計画書作成フロー



(2)　モデル現場の選定

ＤＴＢＭ工法のトンネルモデル現場の選定に当たり、プロットタイプとしてＤＴＢＭ外径φ６ｍ程度、トンネル延長５ｋｍ程度以上、および地質条件が明確であることを条件に国土交通省北海道開発局所管の「オオヌマトンネル避難坑」を選定した。

モデルトンネル避難坑　施工諸元

項目	避難坑施工諸元
トンネル延長	L=6,970.761m
トンネル径	DTBMφ6.18m　（NATM馬蹄形w4.7m×h3.6m）
坑口位置・測点	起点側(17137.000) 終点側(24107.761)
トンネル縦断勾配	起点側からi=2%,3%,-3%(終点側へ約1327m)
掘削工法	全断面掘削工法
掘削方式	ドーナツ型TBM方式
支保工方式	SFRCライナ方式(鋼繊維補強コンクリート)
ズリ出し方式	レール式・ベルトコンベヤ方式
施工方向	片押し施工

支保パターン別施工数量

支保パターン		距離（m）		DTBM ライナ厚(ﾜﾝﾊﾟｽ)	吹付け・覆工 設計厚
坑門工		7*2	14		
標準 地山区間	CⅡ	1228	4,595	SFRCライナ 30cm (36N/mm^2)	吹付けコン 5，10cm 覆工RC 20cm
	DⅠ	2075			
	DⅡ	1259			
	DⅢ	33			
低強度 地山区間	EⅠ	1233	1,502	SFRCライナ 30cm (60N/mm^2)	吹付けコン 15，25cm 覆工RC 35cm
	EⅡ	269			
非排水 構造区間	CⅡ	225	860	SFRCライナ 30cm (45N/mm^2)	吹付けコン 5，10cm 覆工RC 40cm
	DⅠ	535			
	DⅡ	60			
	DⅢ	40			
計		6,971m			

(3)　マシン設計

標準断面決定に当たり、次のような要件からマシン外径 6.18m を決定する。

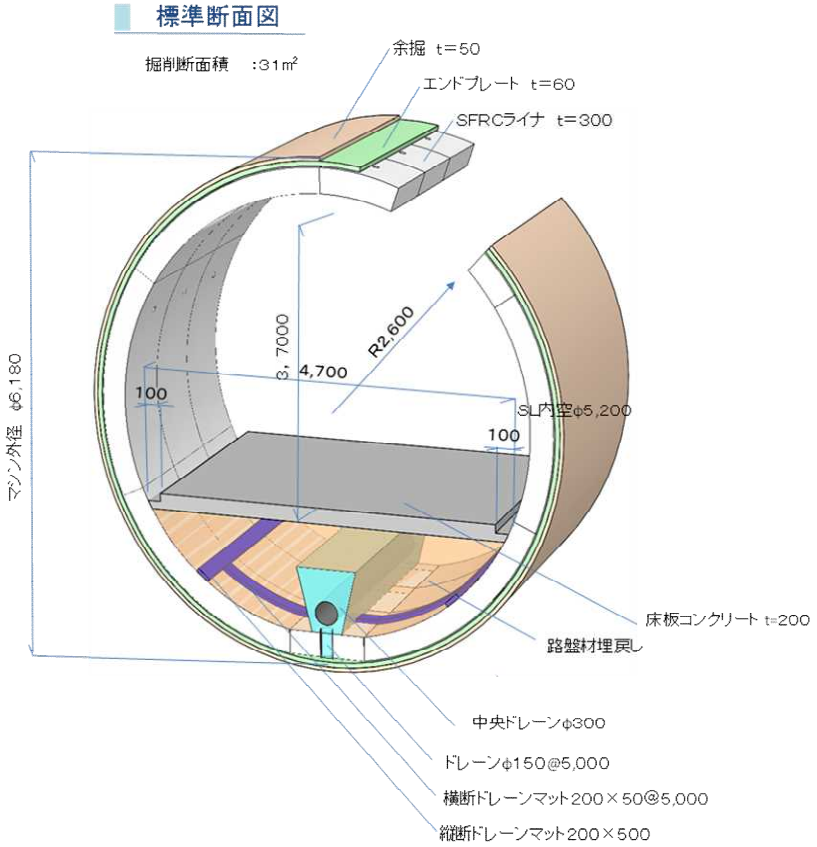
①設計内空断面を道路幅 4.7m、高さ 3.6m を確保する。

②ＤＴＢＭでは一次支保工にライナを設置するため、二次覆工と合わせてＳＦＲＣライナ(鋼繊維補強コンクリート)を基本としたワンパス(シングルシェル)方式を採用するため、ライナの厚さに裏込注入厚および施工余裕を加えたものとする。

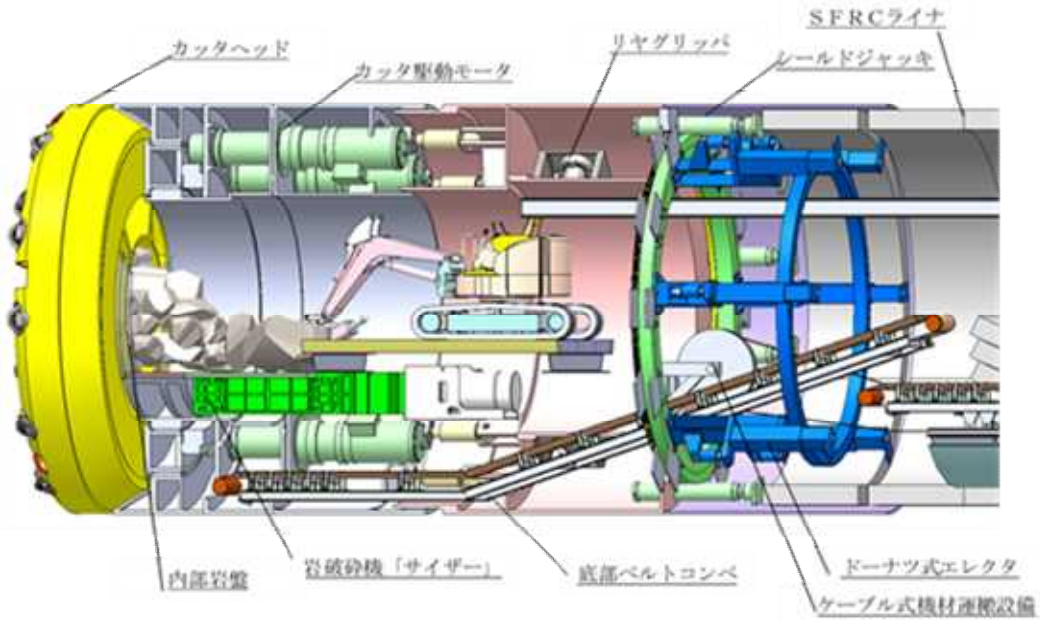
③マシン外径は、必要となる内径 5.2m に上記のライナ厚等を加え、φ6.180m で全区間を掘削する。

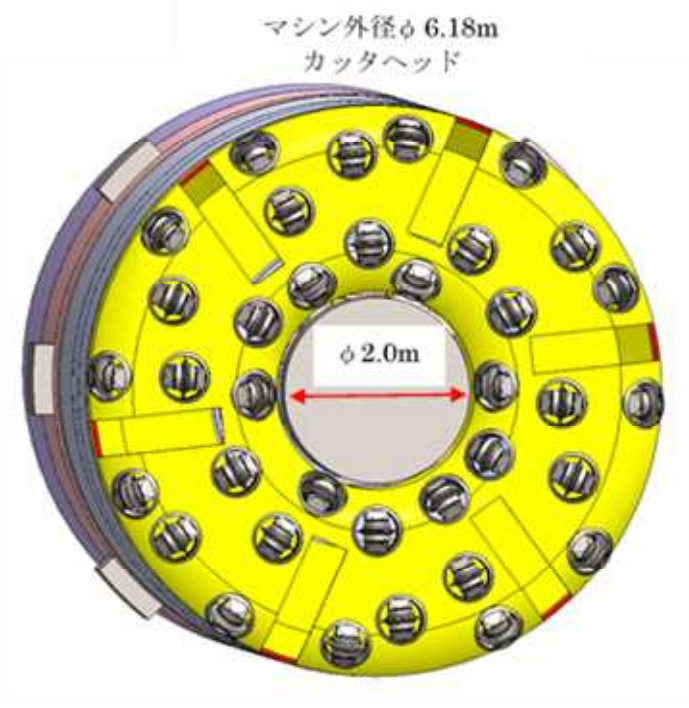
SFRCライナ構造解析結果

区　間	緩み高さ (m)	単位体積重量 (kN/m^3)	支保負担荷重 (kN/m^2)	SFRCライナ コンクリート強度 (N/mm^2)	SFRCライナ 厚さ (cm)
標準地山区間	9 m（1.5D）	22	200	36	30
低強度地山区間	90 m（15D）	22	2,000	60	30
非排水構造区間	9 m (1.5D)+100m水圧	12	1,100	45	30

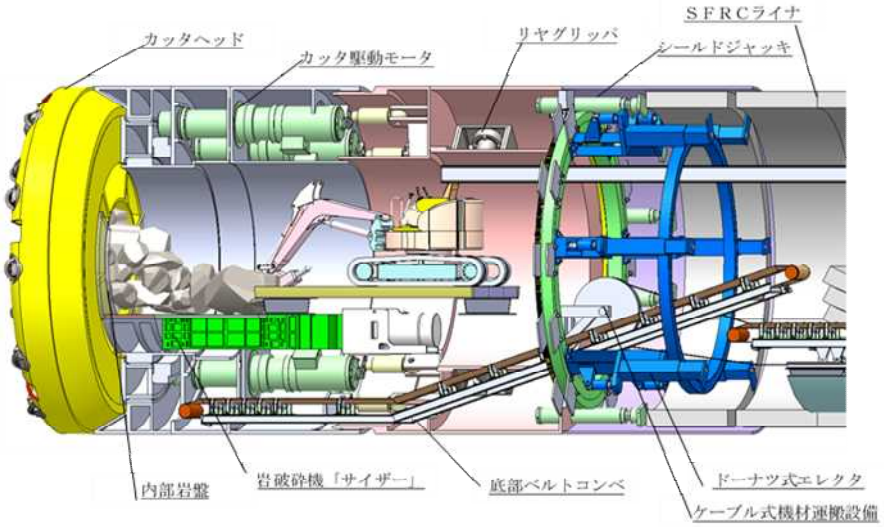


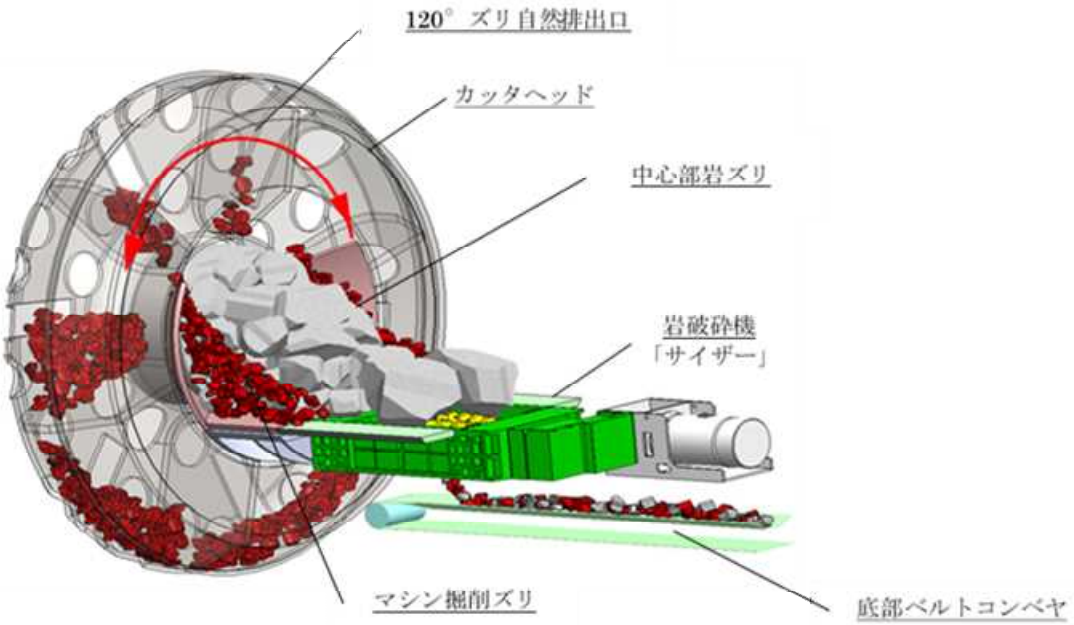
φ6.18mＤＴＢＭマシン図





マシン掘削ズリ排出フロー


カッタヘッド
カッタ駆動モータ
リヤグリッパ
シールドジャッキ
SFRCライナ
内部岩盤
岩破砕機「サイザー」
底部ベルトコンベ
ドーナツ式エレクタ
ケーブル式機材運搬設備


120° ズリ自然排出口
カッタヘッド
中心部岩ズリ
岩破砕機
「サイザー」
マシン掘削ズリ
底部ベルトコンベヤ

ＤＴＢＭ機械仕様

DTBM機械仕様		
1･2次覆工 (シングルシェル)	形式	SFRC(鋼繊維補強コンクリート)ライナー
	外径	φ6000mm
	厚み	φ300mm
	幅	φ1500mm
D-TBM本体	本体外径	φ6180mm
	本体内径	φ2000mm
カッタ･ヘッド	カッタヘッド外径	φ6180mm
	カッタヘッド内径	φ2000mm
	掘削外径	φ6280mm
	掘削内径	φ1900mm
	回転方向	1方向(機内側から見て右回転)
ディスクカッタ	カッタ径	17''(φ432)　150kg/個
	取付構造	スライドウェッジロック
	装備ピッチ	80mm以下
	インナカッター	28個
	ゲージカッタ	8個

カッタ仕様		適用
駆動トルク	2,939 (常用) / 4,408 (150%) kN-m、定トルク	ディスクカッタ最大周速から制限されるカッタ回転数 17''ディスクカッタ最大周速: 150mm/min Nmax=150/(π×6.18) =7.72min^{-1} カッタ貫入量=10mm (大きめの数値を採用)
α値	12.5(常用) / 18.7(150%)	
回転速度	1.0 ～ 6.5 min^{-1}	
駆動用電動モータ	200kW × 6P × 400V × 12 ～ 76(基底) Hz × 10台	
出力軸トルク 減速機 潤滑 冷却	24.8 kN-m 定トルク	
	遊星減速機、i=1/19.45	
	オイルバス	
	水、20L/min 以上	

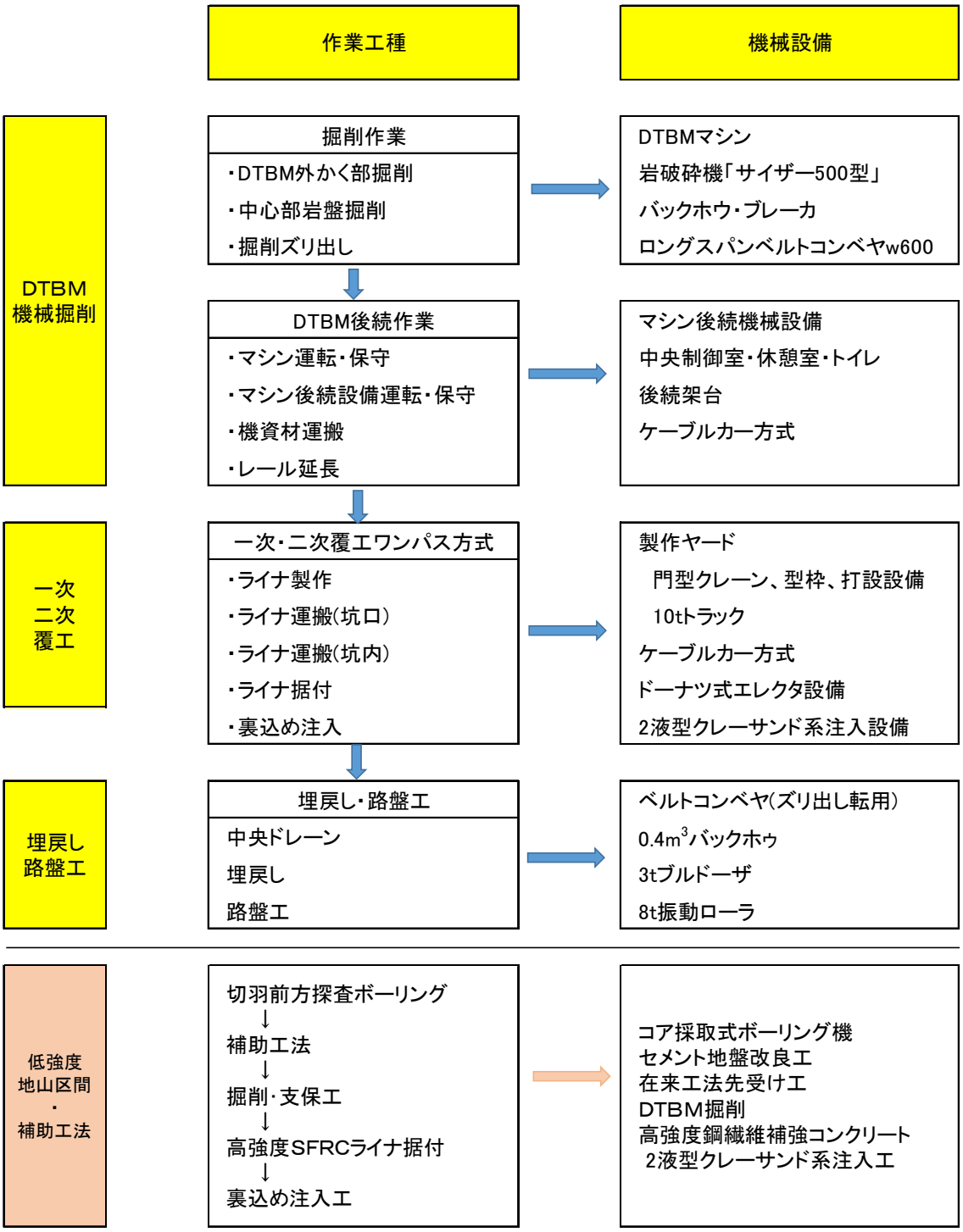
スラスト仕様			適用
伸長速度		50mm/min	ディスクカッタ1個あたりの押付力 =200kN 土と鋼の摩擦係数=0.3
総推力		30,000kN	
断面積当たり推力		1,117(中空) / 1,000(中実として) kN/m^2	
スラストジャッキ		2,500kN×1,800st×34.3MPa×12本	
方向修正ジャッキ		2,000kN×200st×34.3MPa×12本	
ローリング修正ジャッキ		800kN×100st×34.3MPa×4本	
パワーユニット	油圧ポンプ	43L/min × 34.3MPa × 1台	
	電動機	30kW × 4P × 50Hz × 400V × 1台	
	油タンク	2,700L	

グリッパ仕様			適用
リアグリッパジャッキ		2,000kN×250st×34.3MPa×6本	
フロントグリッパジャッキ		2,500kN×150st×34.3MPa×4本	
パワーユニット	油圧ポンプ	72 / 24L/min × 11.4 / 34.3MPa × 1台	
	電動機	18.5kW × 4P × 50Hz 400V × 1台	
	油タンク	スラスト系を兼用	

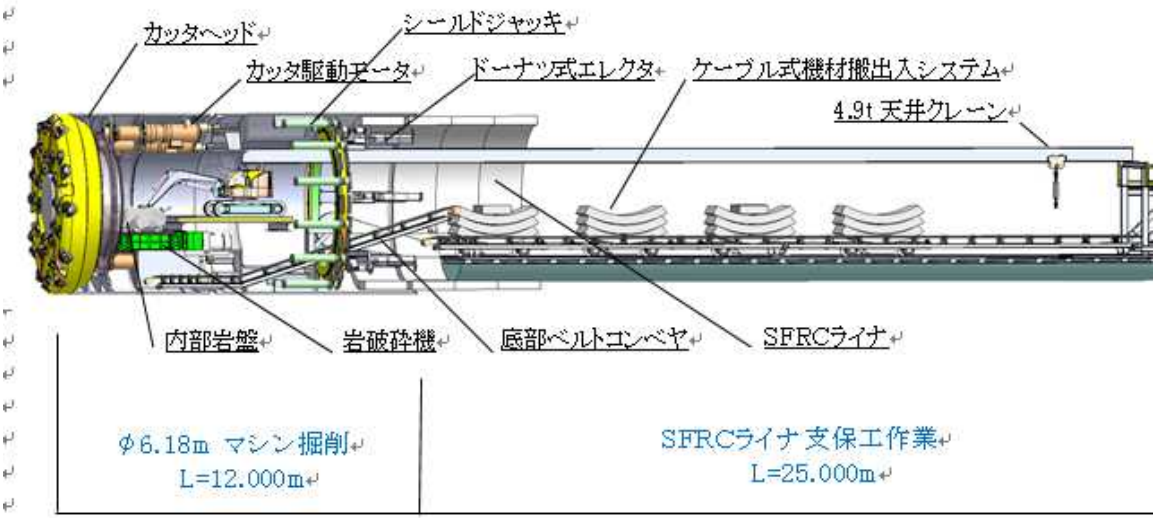
(4)　ＤＴＢＭ全体施工システム

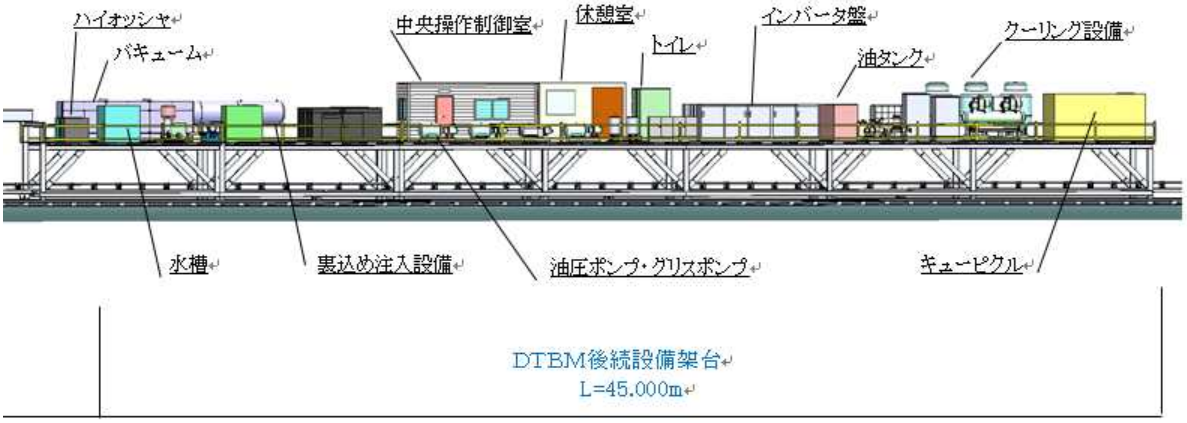
ＤＴＢＭの全体施工システムは、下図に示すとおりの作業・施工設備のフローである。

作業･施工設備フロー図

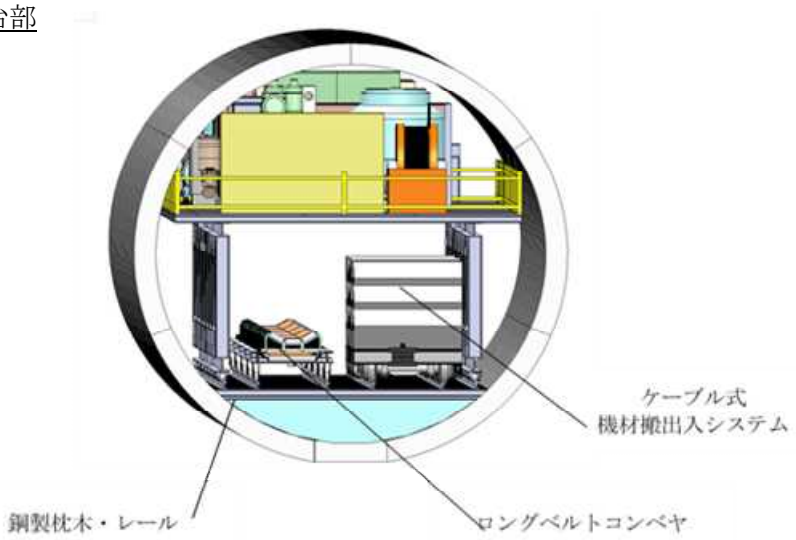


ＤＴＢＭ全体施工システム

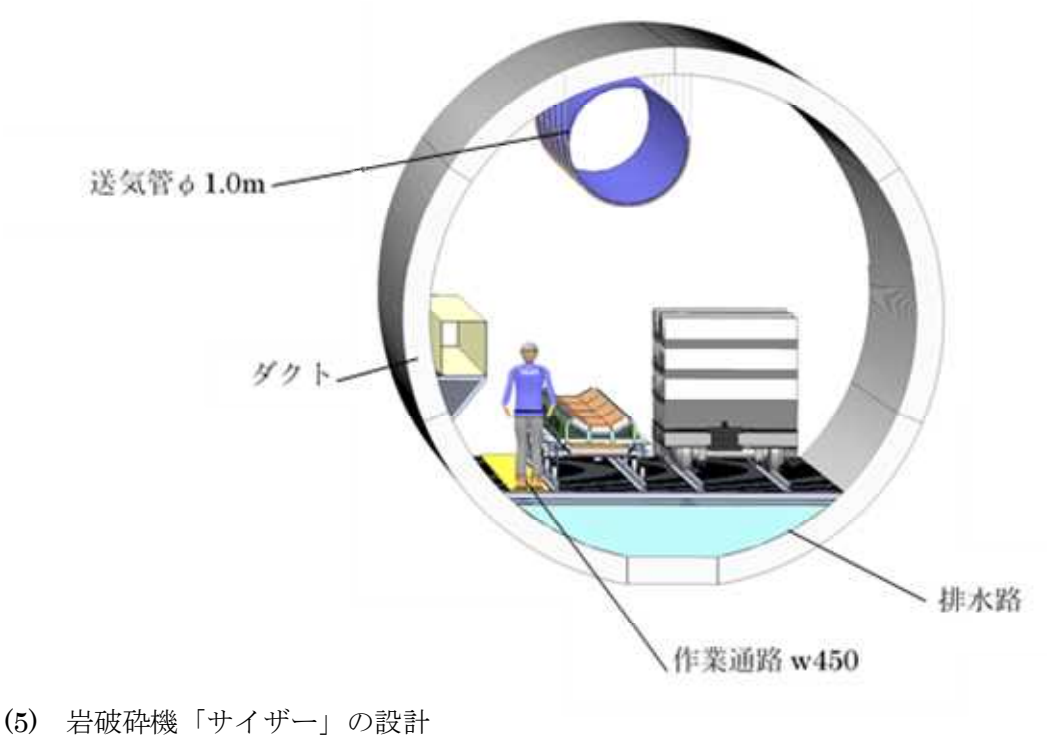




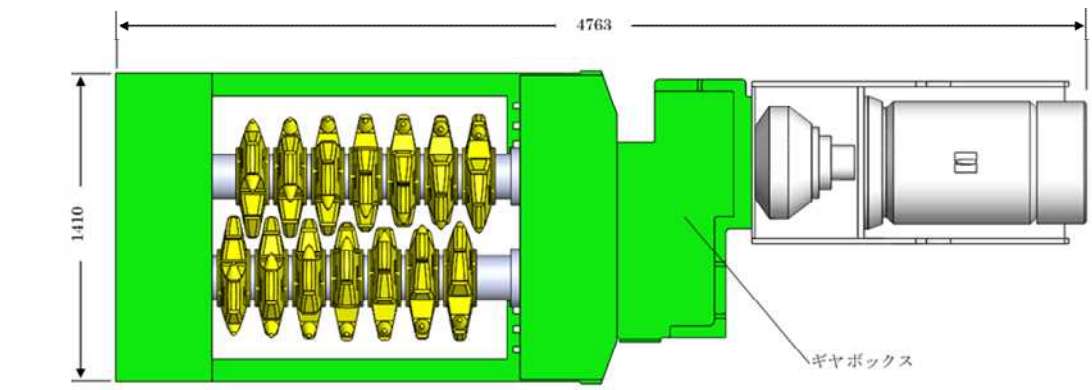
後続設備架台部

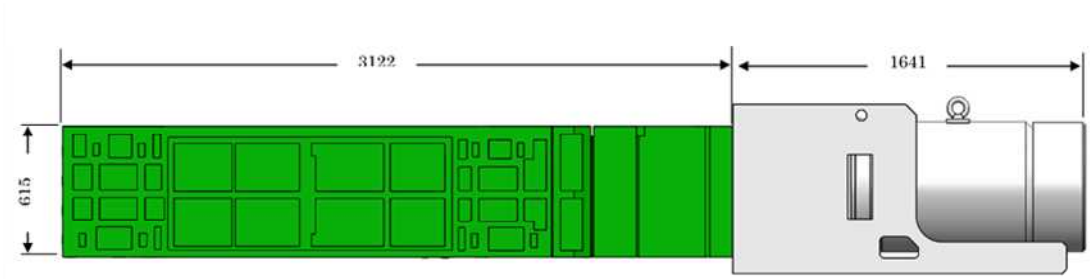


一般坑内部



(5)　岩破砕機「サイザー」の設計



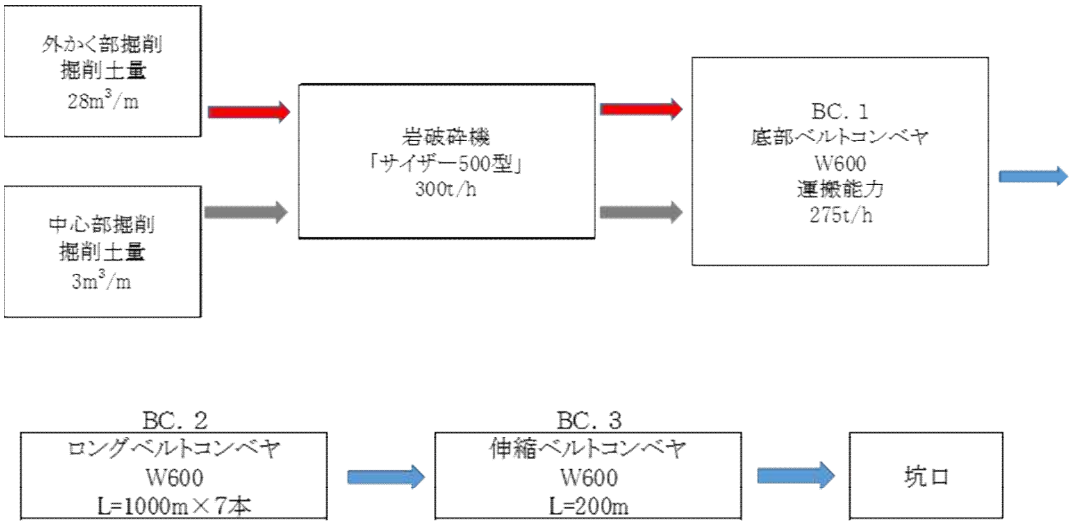


岩破砕機 500型「サイザー」仕様	
標準装備	
500サイザー　3枚歯×8リング、 ケースAssy	1　台
ブレーカバーAssy	1　台
MMD製　R200　　30:1比　　ギヤボックス	1　台
Voith製　487　　フルイドカップリングAssy	1　台
150kw　　電動モーター	1　台
速度低下センサーAssy	1　台
集中自動給脂装置	1　台
ギヤボックスモニターシステム	1　台
ギヤボックスオイルフィルター＆冷却システムAssy	1　台
シャフト構成	
歯数/1リングあたり	3枚
リング数/1シャフトあたり	8枚
軸回転数	50rpm/50Hz
ベアリング形式	SKF玉軸受
ベアリング潤滑油	グリス
ギヤボックス	
型式	MMD R200 Spur Parallel Shaft
変速比	30 : 01 : 00
段数	3
潤滑方式	Oil splash
ライフタイム(理論値)	20,000 hours
重量(概数)	1,650kg including oil
推奨使用電力	150kW @ 50Hz
消費電力	55%を消費
モーターリスト	
サイザー用モーター	150kW、 400V、 3ph、 50Hz
自動給脂用モーター	0.37kW、 230V、 3ph、 50Hz
ギヤオイルポンプ用モーター	1.0kW、 230V、 3ph、 50Hz
ギヤオイル冷却用モーター	2.0kW、 230V、 3ph、 50Hz

(6)　ロングベルトコンベヤの設計

ＤＴＢＭ工法による機械掘削は、マシンによる外かく部掘削（φ6.18m）と岩破砕機による中心部掘削（φ2.0m）とに分けて掘削する。下図に示すように、外かく部はマシンにより掘削され切削ズリはカッタヘッド頂部開口（120°）より岩破砕機に投入される。中心部掘削は、掘削進行につれて二軸式岩破砕機にそのまま押し出されて、マシン切削ズリと混ざり一緒に破砕され底部ベルトコンベヤから搬出される。破砕ズリは、底部のベルトコンベヤ（w600）から坑内ロングベルトコンベヤ（w600）、伸縮ベルトコンベヤ（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 2m/h として 31 ㎥×2m/h＝62 ㎥/h（100t/h）以上を確保するためにベルトコンベヤ W600 運搬能力 172 ㎥/h（275t/h）を配置する。

掘削ズリ搬出フロー



ロングベルトコンベヤ

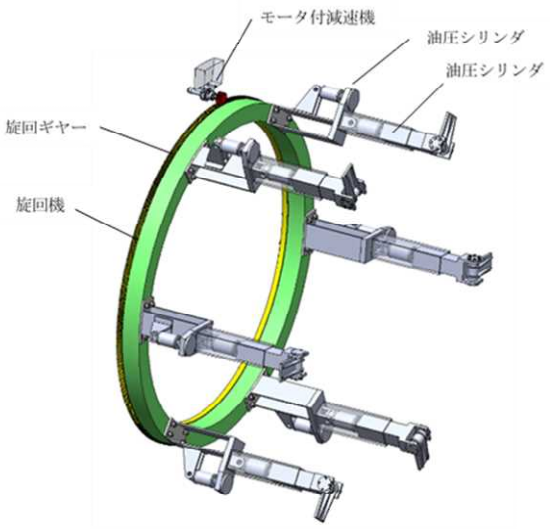
ベルトコンベヤ仕様

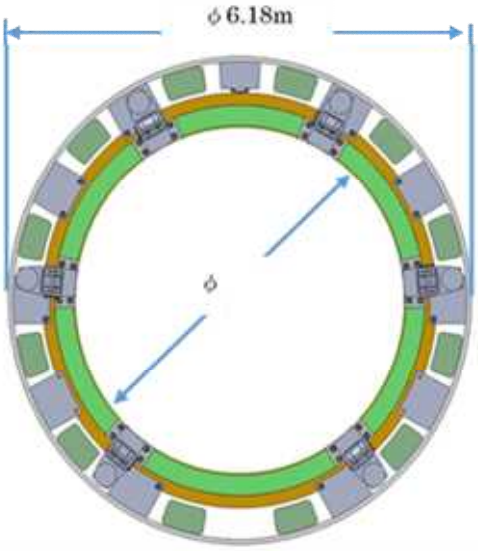
ベルトコンベヤ名称	ズリ搬出ベルトコンベヤ
運搬物	岩ズリ
見掛け比重(t/m3)	1.6
能力（t/h）	275
ベルト幅（mm）	600
ベルト速度（m/min）	80
水平機長（m）	1029
揚程（m）	1.5
動力（kw）	90
特記仕様	レール車輪付移動式

(7)　ＳＦＲＣライナ据付エレクタの設計

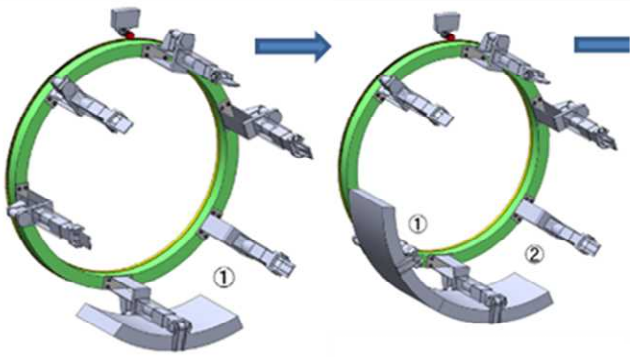
ＤＴＢＭ工法の特徴は、マシン中心部が開口していることで地山リスクに対応することにある。マシン後部のエレクタ設備は、従来方式では狭くなるため機構を外側に配置したドーナツ式エレクタを採用する。開口面積が大きくなるため、機材の出入りが容易になり地山リスクに対して素早く対応ができる。

SFRCライナ据付エレクタ仕様		
項　目	仕　様	備　考
油圧シリンダー(前側)		
推力 ストローク	20tf×50mmst	
シリンダー 1箇所あたりの能力	4t	20×0.2=4t＞3.4t
油圧シリンダー(後側)		
推力 ストローク	20tf×50mmst	
シリンダー 1箇所あたりの能力	4t	20×0.2=4t＞3.4t
モータ付減速機		
動力　極数	0.75kw×4P	
減速比	1/71	





組立順序

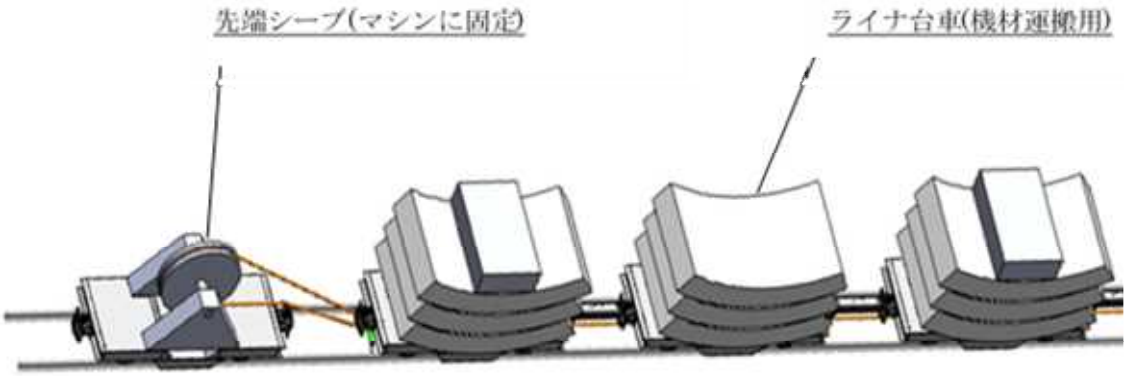


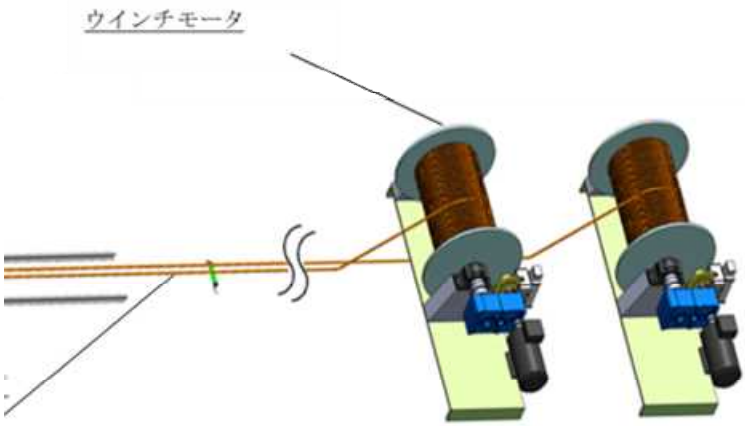
(8)　ケーブル式機材搬出入システムの設計

ＳＦＲＣライナ、機械類、材料および人員運搬する坑内機材搬出入設備は、±３％の縦断勾配に対する安全性や無人自動運転による簡単化の施工性から求められている。ワイヤー式ケーブルカー方式は、１回当たりの牽引量を大きく取れることや、ワイヤーで前後に繋がれていることでの安全性などの利点などがあり、また、レール式にすることでさらに自動搬送が簡易になる。

ケーブルカー仕様

項　目	仕　様
トンネル延長	7000m
トンネル最大勾配	±3%
レール間	914mm
レール重量	22kg/m
台車総重量　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
ワイヤーロープ切断荷重	28.9tf/m
ドラム径	D＝1200mm
ドラム幅	B＝2000mm
モータ	150kW
シーブの径	D＝1200mm





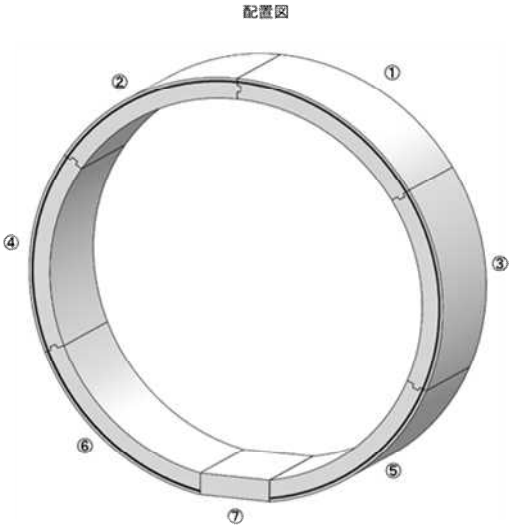
(9)　覆工・ＳＦＲＣライナ方式

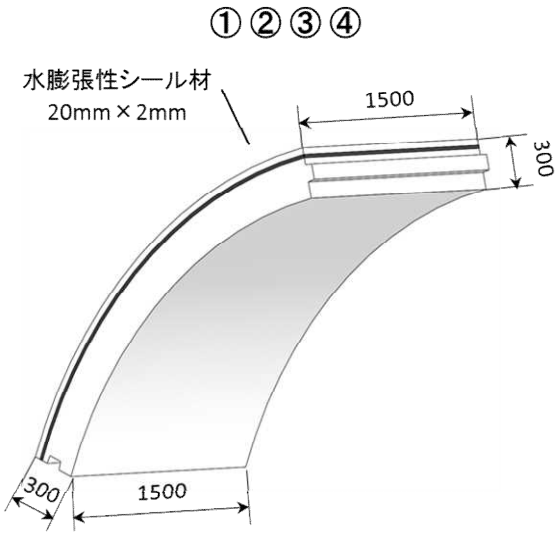
1)　現地ライナ製作

現場近郊１０ｋｍ程度以内に２００ｍ×１００ｍ程度の広さの製作ヤードを設ける。その中を、コンクリート打設、コンクリート養生、型枠解体･移動、型枠組立の４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７０基×４セット＝２８０基を用意する。１日の製作数は、トンネル１５ｍ分（１．５ｍ×１０セット）とし、養生期間は２８日以上を取り、気中散布養生としてヤードを確保する。なお、１１～３月の冬期間はコンクリート打設を休止とする。

SFRCライナ製作概要

名称	規格	数量	備考
ライナ形状	t=300,L=1500	4,583 ﾘﾝｸﾞ	6,884m/1.5m、のび9m
鋼製型枠（メタルホーム）	コンクリート打設	10 ﾘﾝｸﾞ	7枚/ﾘﾝｸﾞ
	コンクリート養生	10 ﾘﾝｸﾞ	
	型枠脱型･ケレン	10 ﾘﾝｸﾞ	
	型枠組立	10 ﾘﾝｸﾞ	
製作日数	10 ﾘﾝｸﾞ/日	459日(21月)	4,583/10=459日

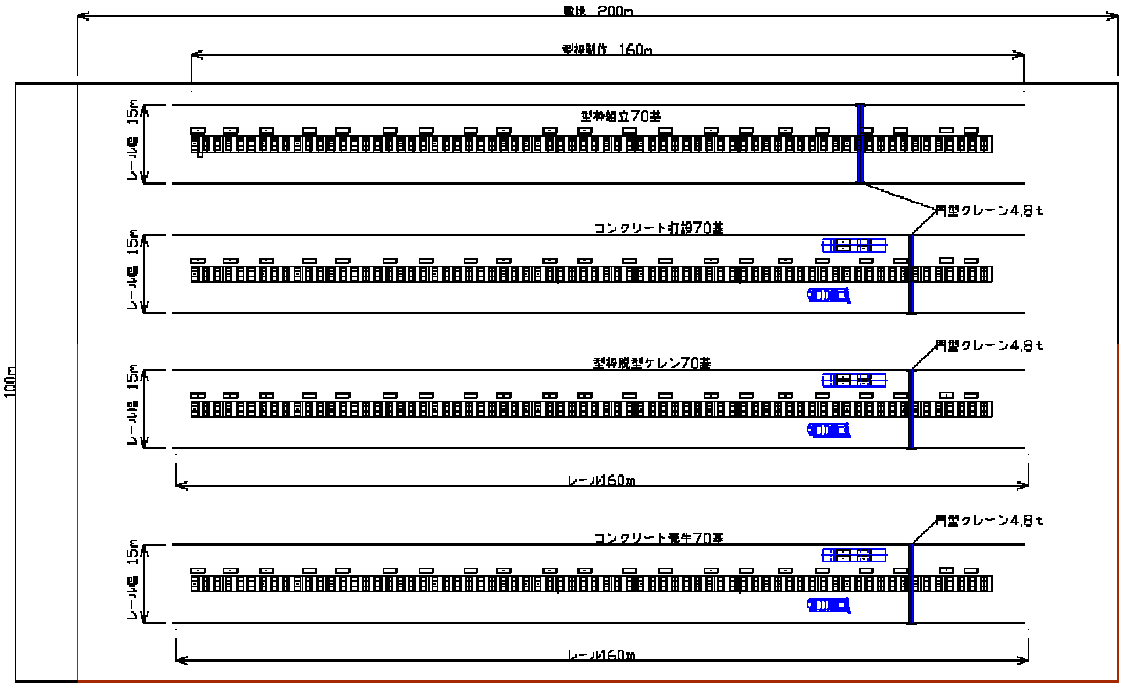




t=300mm　6分割ライナ重量表

番号	①、②、③、④	⑤、⑥	⑦
1枚当たり重量（kg）	3,153	3,185	1,134
1枚当たり体積（㎥）	1.261	1.274	0.453
内周長（m）	2.658	2.658	1.006
外周長（m）	2.953	3.010	1.005
1リング当たり重量（kg）	20,113		
1リング当たり体積（㎥）	8.045		

現地製作ヤード計画



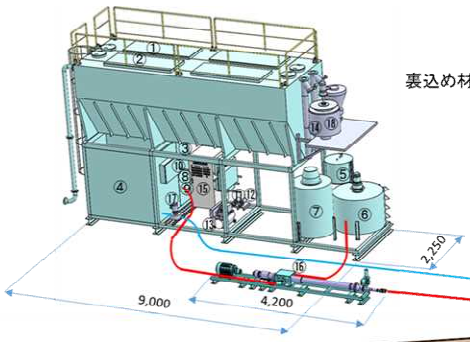
2)　ライナ裏込め注入工

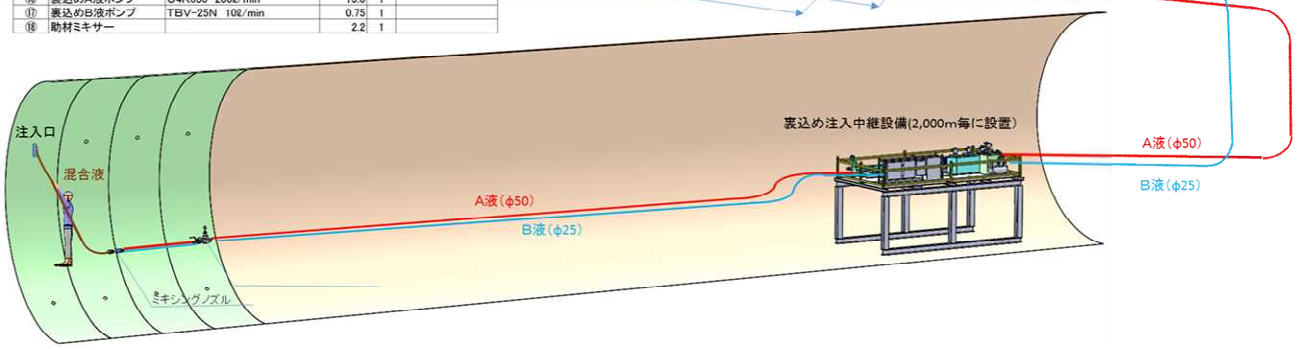
裏込め注入は、ＳＦＲＣライナの裏側空間にクレーサンド系裏込め材を即座に充填し、ライナを固定して岩盤の沈下を防止するために実施する。施工性に求められるのは、１進行毎に注入する必要があり、材料の硬化を防止するため先端で２液混合型が適していることから、シールド工事で実績の多い、「ＮＥＯ－ＴＡＣ工法」を選定する。

裏込め注入設備計画

裏込め材プラント

No	名称	形式	kW	数量	適用
①	硬化材サイロ	THR-40W1/2 16㎥	7.5+3.7	1	
②	助材サイロ	THR-40W2/2 16㎥	7.5+3.7	1	
③	水タンク	4㎥		1	
④	B液タンク	7㎥		1	
⑤	モルタルミキサー	TS-200-22 0.2㎥160rpm	2.2	1	
⑥	モルタルアジテータ	TS1400-37 1.4㎥30rpm	3.7	1	
⑦	助材アジテータ	TSSU-1500-37 1.5㎥40rpm	3.7	1	
⑧	混練水ポンプ		0.75	1	
⑨	混練水ポンプ		0.75	1	
⑩	安定剤起泡剤タンク	0.2㎥、0.1㎥		1	
⑪	安定移送ポンプ		0.2	1	
⑫	起泡材移送ポンプ		0.2	1	
⑬	コンプレッサー		1.5	1	
⑭	助材移送ポンプ		0.75	1	
⑮	プラント制御盤			1	
⑯	裏込めA液ポンプ	U4R630 200ℓ/min	15.0	1	
⑰	裏込めB液ポンプ	TBV-25N 10ℓ/min	0.75	1	
⑱	助材ミキサー		2.2	1	



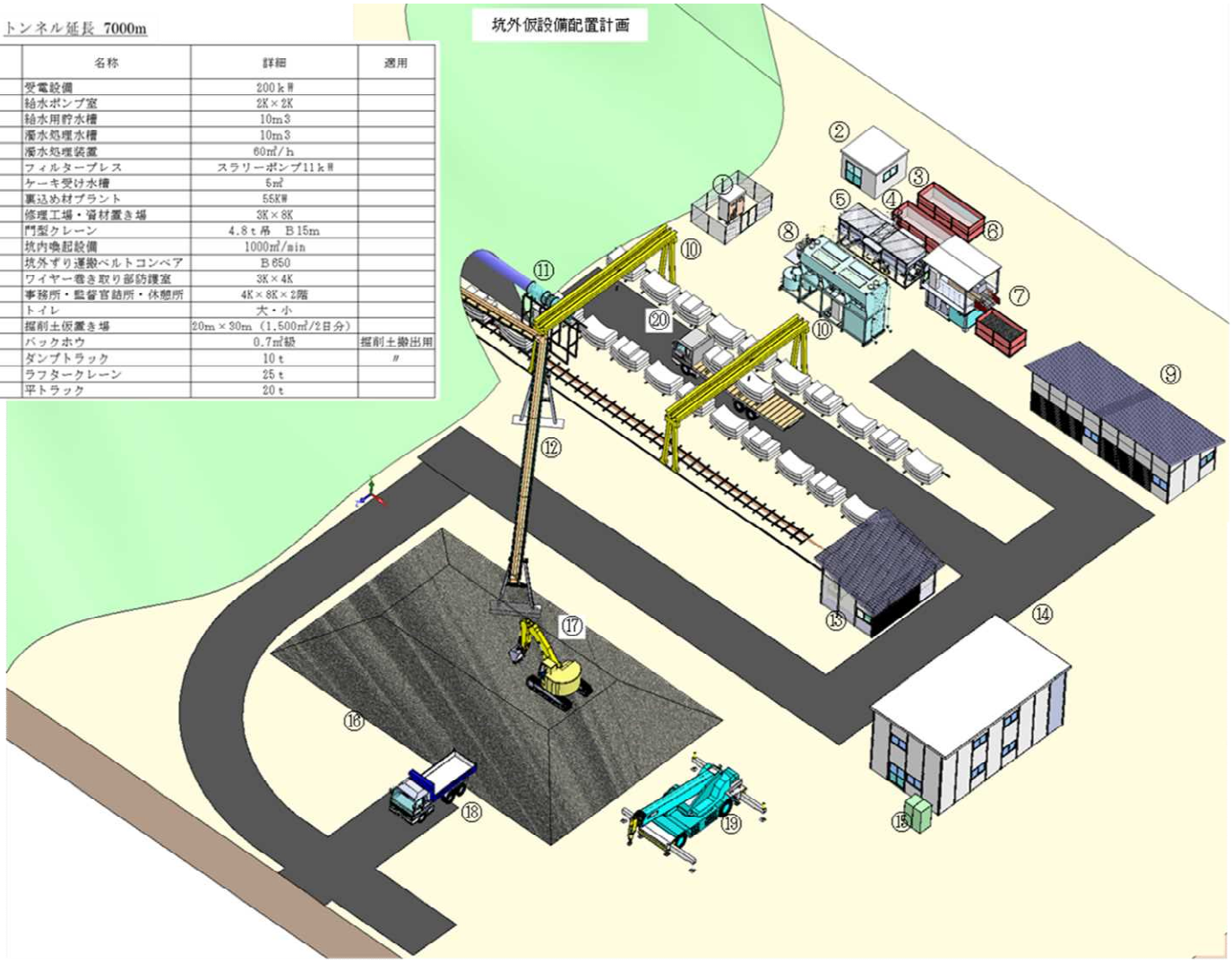


(10)　仮設備配置計画

坑外仮設備の配置を下図に示す。

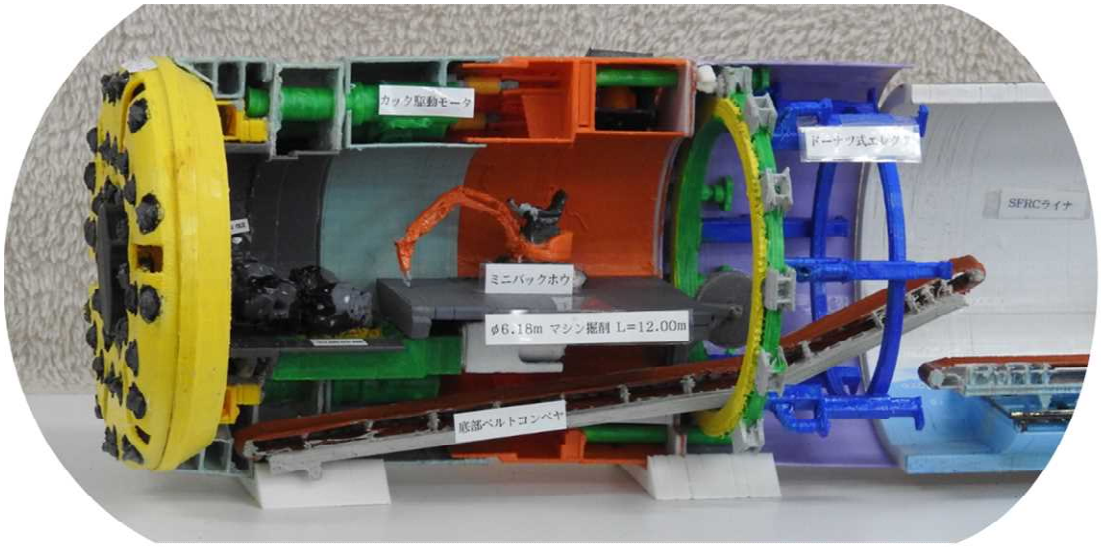
トンネル延長 7000m

番号	名称	詳細	適用
①	受電設備	200ｋＷ	
②	給水ポンプ室	2K×2K	
③	給水用貯水槽	10m3	
④	濁水処理水槽	10m3	
⑤	濁水処理装置	60㎥/h	
⑥	フィルタープレス	スラリーポンプ11ｋＷ	
⑦	ケーキ受け水槽	5㎥	
⑧	裏込め材プラント	55KW	
⑨	修理工場・資材置き場	3K×8K	
⑩	門型クレーン	4.8ｔ吊　B15m	
⑪	坑内喚起設備	1000㎥/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（1,500㎥/2日分）	
⑰	バックホウ	0.7㎥級	掘削土搬出用
⑱	ダンプトラック	10ｔ	〃
⑲	ラフタークレーン	25ｔ	
⑳	平トラック	20ｔ	



（11）　ドーナツ型ＴＢＭ工法の３Ｄプリンタ模型

ＤＴＢＭマシン部



ＤＴＢＭ支保工作業部

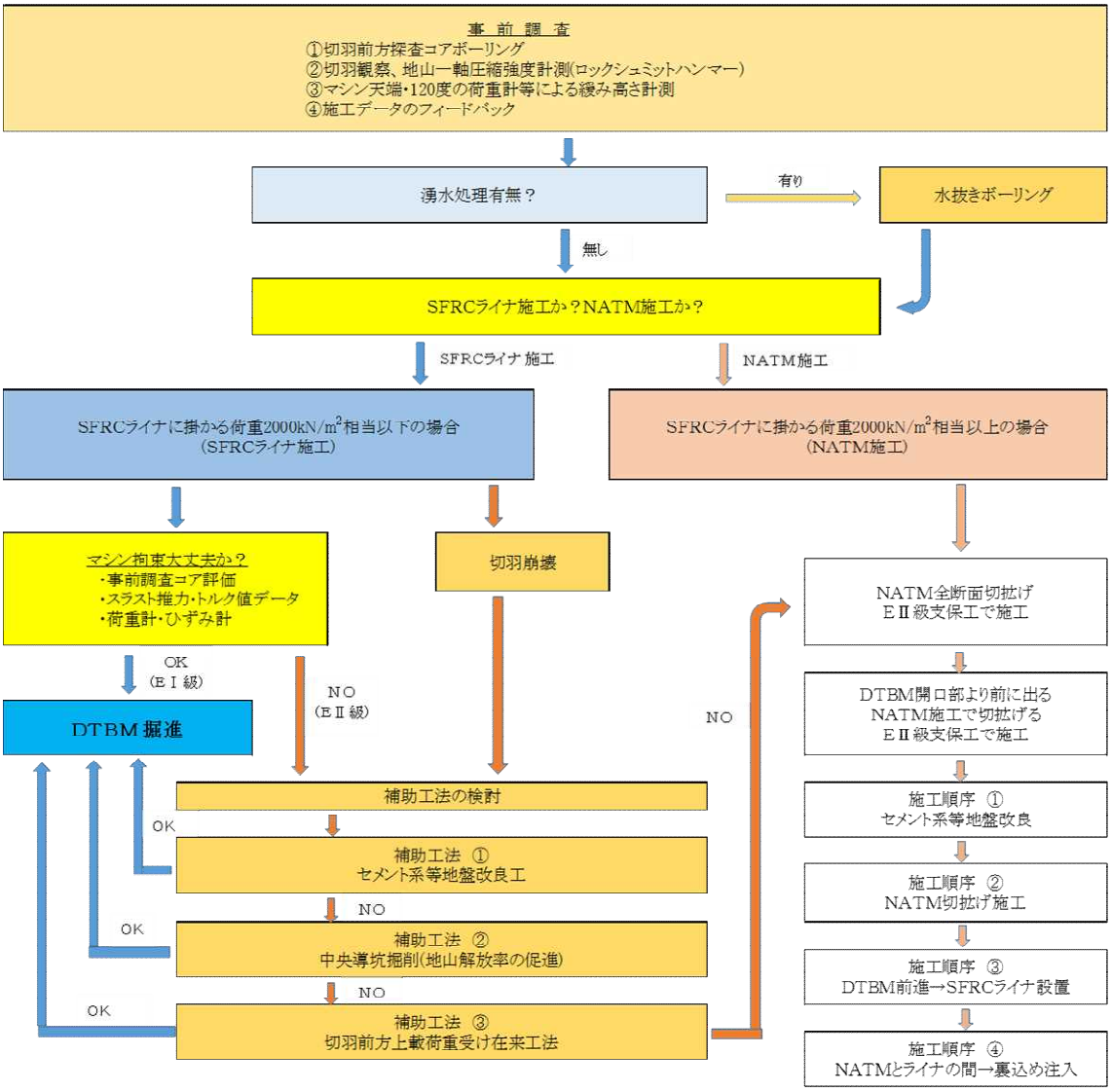
ＤＴＢＭマシン後続機械設備

6.3　不良地山対策

(1)　低強度地山区間の支保パターン判定フロー

低強度地山区間におけるＥ級支保パターンの判定フローは、切羽観察、コアボーリング等の事前調査結果から、湧水量の有無を確認するとともにＳＦＲＣライナ施工か、ＮＡＴＭ施工かを地山荷重 2000kN/m^2 相当で分ける。地山荷重 2000kN/m^2 相当以上の場合は、ＳＦＲＣライナでは支えられないのでマシンより前に出て全断面をＮＡＴＭでＥⅡ級支保パターンで施工する。ＳＦＲＣライナ施工は、コンクリート強度で３種類(60N, 45N, 36N)に分ける。それぞれの選択は、事前調査の結果などから、トータルで判定する。低強度地山区間Ｅ級支保パターンでは、マシンが拘束されないで掘進可能かどうかでＥＩ級、ＥⅡ級を判定する。掘進不能(ＥⅡ級)と判断された場合は、補助工法を実施する。補助工法の実施順序は、最初に補助工法①のセメント系等地盤改良工を行い改良が良好であればマシン掘進と移行する。改良ができない場合は、補助工法②の中央導坑掘削による地山解放を促進させる「いなし工法」を取る。次の対応策として、補助工法③の切羽前方に出て、マシン上載荷重を受けるために上部 120°を在来工法により支保する。最終的に補助工法で改良できなければ、最初の全断面ＮＡＴＭ施工による施工方法を取る。

低強度地山区間ＥＩ級、ＥⅡ級支保パターンの判定フロー



■　判定に必要な計測項目
①　前方探査ボーリング：コア観察・岩質・湧水量
②　切羽観察：切羽スケッチ・ロックシュミットハンマー・一軸圧縮試験
③　マシン負担荷重：荷重計・ひずみ計・各部位電力値
④　ＳＦＲＣライナ：コンクリート応力計・変位測定
⑤　施工データのフィードバック

(2)　支保パターン分類

・等級判定は、地山強度比 1.0 以上は標準地山区間、1.0 以下は低強度地山区間に分ける。
　ＥＩ級は、地山強度比 1.0～0.5
　ＥⅡ級は、地山強度比 0.5 以下
・ＳＦＲＣライナはコンクリート強度によって、３種類に分かれる。
　標準地山区間：ＣⅡ、ＤＩ、ＤⅡ、36N-30cm
　低強度地山区間：ＥＩ、ＥⅡ、60N-30cm
　非排水構造区間：始点側坑口、45N-30cm
　ＤⅢ区間：ＮＡＴＭ施工、NATM＋45N-30cm

オオヌマトンネル避難坑　地山支保パターン分類

設計NATM施工								DTBM施工		
								SFRCライナ60N-30cm	SFRCライナ45N-30cm	SFRCライナ36N-30cm
設計等級	支保別距離(m)	累計距離(m)	地山区分	qu:地山の一軸圧縮強度(kN/m²)	r:地山の単位体積重量(kN/m³)	h:土被り高さ(m)	地山強度比 qu/r h	低強度地山区間 ゆるみ高さ50m～90m 地山荷重2000kN以下	非排水構造区間 低強度地山区間 ゆるみ高さ50m～9m 地山荷重1100kN以下	標準地山区間 ゆるみ高さ9m以下 地山荷重200kN以下
坑門工	7	0								
DⅢ	40	47					NATM	NATM	○	
DⅡ	60	107		13710	22	23	27.7		○	
DⅠ	424	531	非排水構造区間	13710	22	45	14.0		○	
CⅡ	161	692		13710	22	94	6.7		○	
DⅠ	22	714		28250	22	118	10.9		○	
CⅡ	64	778		13710	22	119	5.2		○	
DⅠ	169	947		28250	22	121	10.6		○	
CⅡ	90	1037	標準	13710	22	102	6.1			○
DⅠ	133	1170	標準	28250	22	93	13.9			○
EⅠ	13	1183	低強度	1410	22	110	0.6		○	
DⅠ	704	1887	標準	13710	22	144	4.3			○
EⅡ	29	1916	低強度	1410	22	183	0.4	○		
DⅠ	72	1988	標準	13710	22	187	3.3			○
CⅡ	106	2094	標準	41520	22	181	10.4			○
DⅠ	95	2189	標準	13710	22	200	3.1			○
EⅡ	29	2218	低強度	1410	22	221	0.3	○		
DⅠ	51	2269	標準	13710	22	240	2.6			○
CⅡ	212	2481	標準	41520	22	247	7.7			○
DⅠ	75	2556	標準	13710	22	237	2.6			○
EⅡ	35	2591	低強度	1410	22	239	0.3	○		
DⅠ	423	3014	標準	13710	22	242	2.6			○
EⅡ	55	3069	低強度	1410	22	233	0.3	○		
DⅠ	169	3238	標準	13710	22	218	2.9			○
CⅡ	117	3355	標準	27460	22	241	5.2			○
DⅠ	50	3405	標準	13710	22	257	2.4			○
EⅠ	549	3954	低強度	13710	22	309	2.0			○
DⅡ	249	4203	標準	15870	22	290	2.5			○
EⅠ	92	4295	低強度	4960	22	246	0.9		○	
DⅡ	1010	5305	標準	47860	22	215	10.1			○
CⅡ	113	5418	標準	27460	22	173	7.2			○
DⅠ	223	5641	標準	13710	22	173	3.6			○
EⅡ	18	5659	低強度	1410	22	159	0.4	○		
CⅡ	155	5814	標準	41520	22	185	10.2			○
EⅡ	251	6065	低強度	450	20	162	0.1	○		
CⅡ	435	6500	標準	75290	22	74	46.2			○
EⅠ	431	6931	低強度	450	20	36	0.6		○	
DⅢ	33	6964	標準				NATM	NATM	○	
坑門工	7	6971								
							計(m)	417	1509	5031

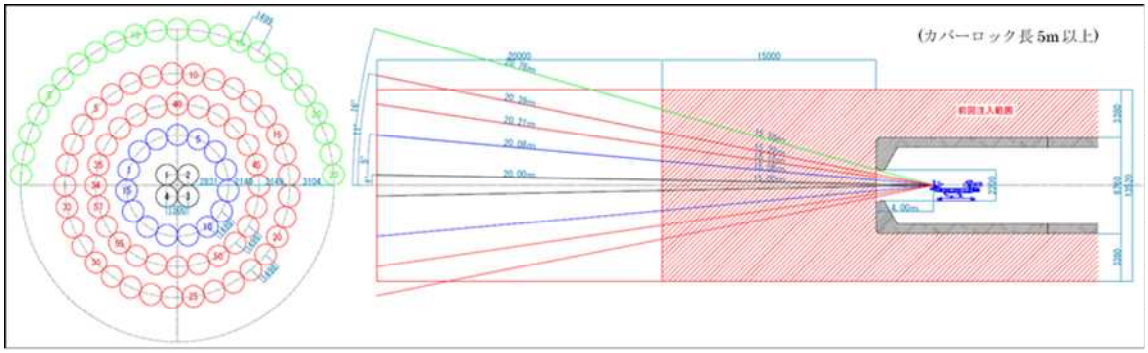
(3)　不良地山対策

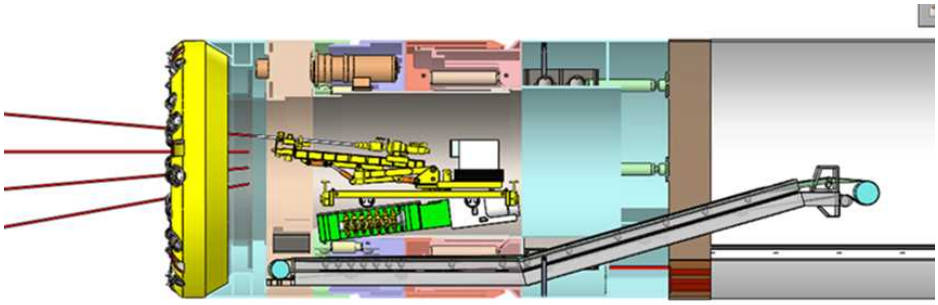
本トンネルの低強度地山区間における不良地山対策は、ＤＴＢＭマシンが掘進可能の場合はＥＩ級として補助工法なしでマシンを掘進させる。マシン拘束がある恐れの場合は、ＥⅡ級扱いとして補助工法を次に示すとおりの順序で実施する。

補助工法の施工順番は、最初に補助工法①のセメント系等注入工、それでも改良できないときは、補助工法②の中央導坑掘削に進み、改良でなければ補助工法③の切羽前方上載荷重受け在来工法と進める。最終的に改良ができなければ、ＥⅡ支保パターンによるＮＡＴＭ施工で地山を支え、その後にマシンを通過させＮＡＴＭとＳＦＲＣライナの隙間にセメント系等で充填処理する。

■　セメント系等注入工

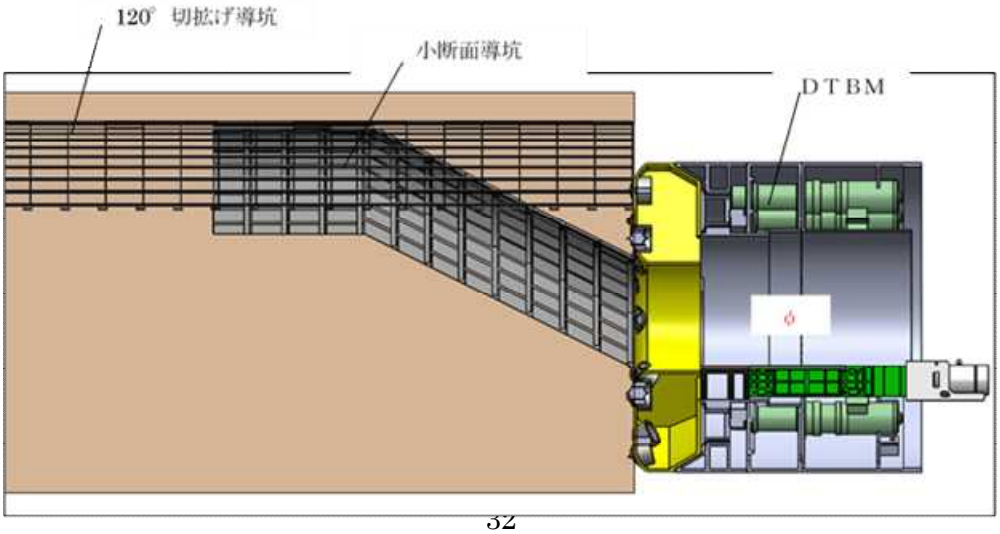
補助工法①：セメント系等地盤改良	
発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破砕帯・切羽崩壊・泥流化
具体的な現象	・破砕質の地山に遭遇し、岩塊がカッタヘッドの回転に合わせて動くため掘進不能となる。 ・カッタヘッドの回転に伴い、岩塊がスリットにかかり回転不能となる。 ・切羽が崩壊・泥流化して押し出されてくる。
補助工法の目的	・トンネル上部の荷重支持、地山の強度改良 空洞部の充填。
具体的な対策	・切羽前方地山をボーリング機により削孔し、地山に適したセメント系材を注入する。 ・注入材は、普通セメントを中心に改良具合で超微粒子、極超微粒子セメントを使用する。湧水量・周辺環境への影響を考慮して、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	セメント改良区間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

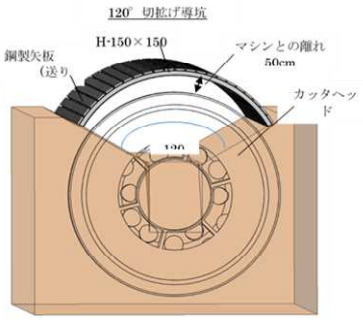




■　補助工法③：上載荷重受け在来工法

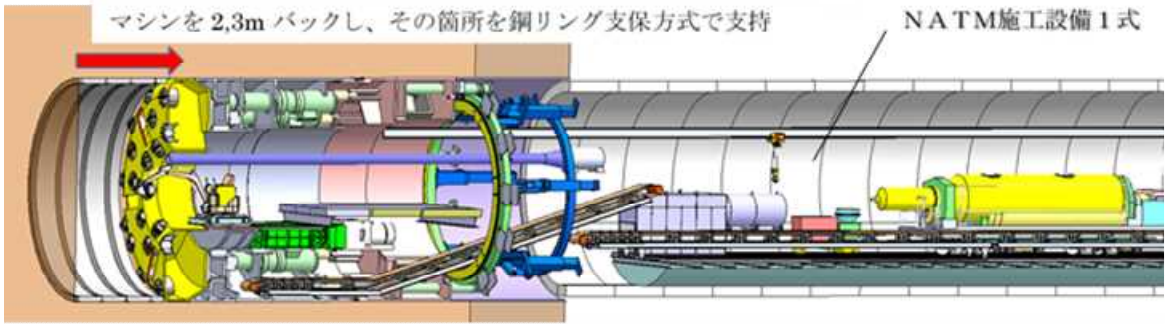
補助工法③：上載荷重受け在来工法	
発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破砕帯・切羽崩壊
具体的な現象	・マシンに掛かる地山荷重により、マシンが拘束され掘進ができない恐れがある。
補助工法の目的	・トンネル上部荷重を在来工法で支持し、マシン通過を補助する。
具体的な対策	①荷重受けをするための小断面作業坑を10m程度天端付近まで在来工法で施工する。 ②マシン前方を0.75mスパン毎に鋼製支保工と木矢板による在来工法で上部120度を掘削・支保工をする。 ③上載荷重受けが完了後、マシンを掘進し、ＳＦＲＣライナで覆工する。 ④在来工法とＳＦＲＣライナの間、裏込め注入する。
施工日数	①小断面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

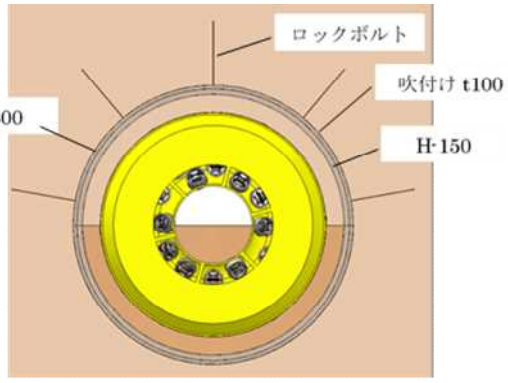




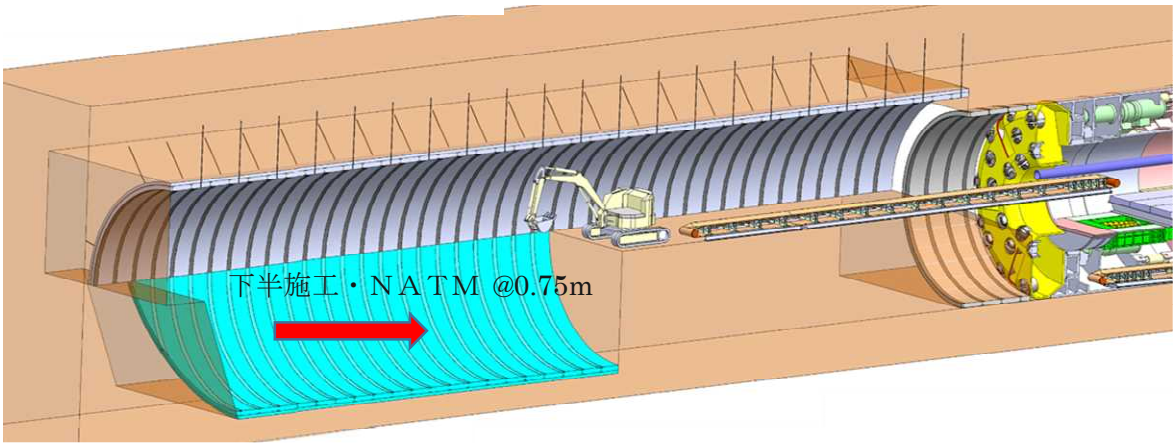
■　マシン前方ＮＡＴＭ施工

マシン前方ＮＡＴＭ施工	
発生箇所	切羽前方
発生原因	多亀裂・断層・破砕帯・切羽崩壊
具体的な現象	・ＳＦＲＣ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、ＳＦＲＣライナ方式では地山支持ができない場合、マシン前方に出てＮＡＴＭ工法に切り替えて施工し、ＳＦＲＣ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マシンを後ろに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マシンを前進させるため、鋼材架台を設置し、ＳＦＲＣライナ据付後にＮＡＴＭ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マシン前方2,3m施工：4日　(0.75×4スパン) ③ＮＡＴＭ上半施工：10日　(30m/3m/日) ④ＮＡＴＭ下半施工：10日　(30m/3m/日) ⑤マシン前進・一体化：架台設置2日、前進･ライナ･注入2日 合計：34日　≒1日/m

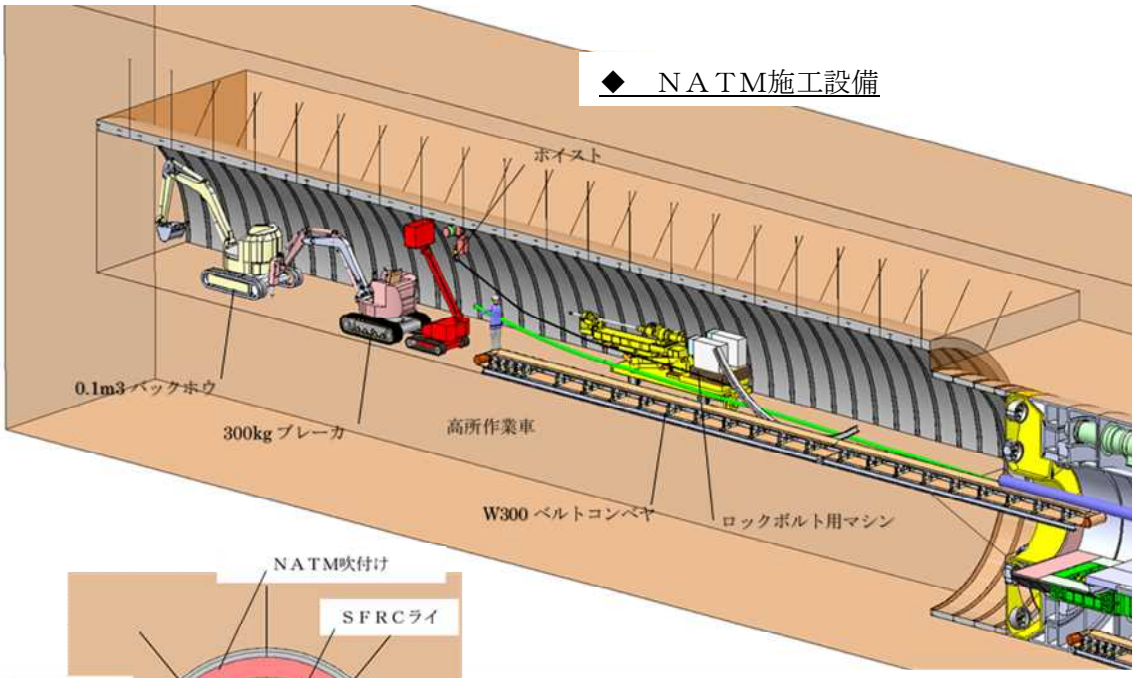


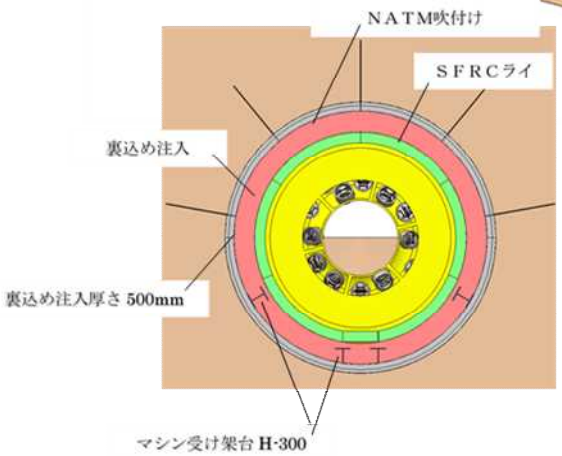


④ＮＡＴＭ下半施工



◆　ＮＡＴＭ施工設備





6.4　導入効果（オオヌマトンネル避難坑への適用例）

(1)　建設現場における生産性の向上

1)　高速施工

ＤＴＢＭシステムは、各部位が連続的に作業できるようにＩＣＴ制御された中央運転操作室で全体管理が行われている。その結果、避難坑の掘削工期はサイクル作業になるＮＡＴＭ工法では 98 月に比べて、ＤＴＢＭ工法は連続作業ができるため、マシン製作月数を含めて 37 月で完了する。

ＮＡＴＭ工法では始点側と終点側からの２工区に分けても 49 月になり掘削で４年間は必要とする。工期が早くなることは、それだけ道路の供用時期が早まることになり、道路開通による経済効果の発現が早くできることになる。

オオヌマトンネル避難坑　NATMとDTBMの工期比較

区間	支保パターン	距離 (m)	NATM		DTBM	
			月進(m)	月	月進	月
標準地山区間	ＣⅡ	1,228	105.6	11.6	417	2.9
	ＤⅠ	2,075	88	23.6	366	5.7
	ＤⅡ	1,259	66	19.1	344	3.7
	ＤⅢ	33	66	0.5	344	0.1
低強度地山区間	ＥⅠ	1,233	53	23.3	264	4.7
	ＥⅡ	269	44	6.1	66	4.1
非排水構造区間	ＣⅡ	225	88	2.6	417	0.5
	ＤⅠ	535	66	8.1	366	1.5
	ＤⅡ	60	53	1.1	344	0.2
	ＤⅢ	40	---	2.0	---	2.0
その他					マシン製作	12.0
計		6,957	(片押し)	98.0	(片押し)	37.3

＊　NATM工期は、国交省積算基準により算出（ＣⅡ-4 サイクル@1.2m,ＤⅠ-4 サイクル@1.0m,ＤⅡ-3 サイクル@1.0m）。

掘削･支保工サイクルタイム

支保パターン	掘削支払断面積 (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)	SFRCライナ t=30cm (分)	1サイクルクリティカル作業時間 (分)	日当たり掘進長 (12h/日) (m/日)	月当たり掘進長 (22日/月) (m/月)
ＣⅡ	φ6.180 m 30m^2/m	1.50	2.42	37	20	57	19	417
ＤⅠ			1.98	45		65	17	366
ＤⅡ			1.84	49		69	16	344
ＥⅠ			1.29	70		90	12	264
ＥⅡ		1.00	20m当たり:セメント系等注入日数 4日 掘削日数 2日 計 20m/6日				3	66

2)　作業の簡単化

機械化・ＩＣＴ化、およびプレキャスト化により、オオヌマトンネル避難坑の掘削･覆工の期間内の全作業員数は、ＮＡＴＭよりＤＴＢＭでは約 60%の低減が図れ、併せてトンネル特殊工の専門職種でも大幅な低減ができる。

DTBM工法　1方当たり編成人数

	世話役	1方当たり	職種
全般	トンネル世話役 機械世話役	2人	世話役
DTBM掘削	DTBM運転管理	2人	トンネル特殊工
	バックホウ遠隔運転	1人	トンネル特殊工
	機械運転保守	2人	トンネル特殊工
	坑内雑作業	2人	トンネル作業員
覆工	ライナ据付け ・エレクタ操作 ・ライナボルト締め ・ライナ搬入 ・裏込め注入	4人	トンネル作業員
	機材搬出入作業	2人	
坑外作業	ズリ出し･裏込め運転	2人	トンネル作業員
	機材搬出入作業	2人	
	整備鍛冶工	1人	鍛冶工
合計	1方当たり作業員数	20人	

オオヌマトンネル避難坑延長7kmに対する掘削･支保工作業員数

ドーナツ型TBM	20人/方×2方×22日×23月=20,240人	掘削･ワンパス
NATM	13人/方×2方×22日×98月=56,056人	上半7人下半6人*0.2 覆工9人/2

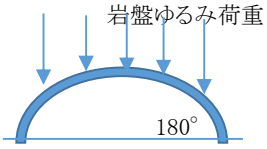
3)　ＳＦＲＣライナ方式により補助工法の減少

一次･二次覆工を合わせたシングルシェル方式のＳＦＲＣライナ方式は､ＤＴＢＭ推進反力を地山でなく、ＳＦＲＣライナに取れることで地山強度に左右されなく掘進ができることになる。そのことで補助工法の必要性は、マシンが拘束されたり、切羽が泥流になりマシンが掘進できない場合だけになる。

マシンが拘束される要因には、地山強度比 0.5 以下程度の地盤においてマシン径 5D (30m)程度以上の岩盤ゆるみ荷重が掛かった場合､あるいは切羽が泥流化して飛騨トンネルの事例のように粘土化された断層帯が高水圧により押し出された場合、または急激な膨張性を伴う地盤に遭遇した場合などが想定される。

その結果､本避難坑の補助工法の必要地山区間は、ＥⅡ区間 269m のセメント地盤改良や先受け工法などを考慮することになる。標準地山区間、非排水構造区間の 5,455m 区間、および低強度地山区間で地山強度比 0.5 以上のＥＩ区間 1,233m では補助工法を減少できる。

拘束力に対するDTBMの必要スラスト力

緩み高さ(m)	必要スラスト推進力(kN)	摘要
36 (6D)	28,809	 マシン長12.5m,受圧面積9.7m2 岩盤比重22kN,スラスト負担割合0.3 緩み高さ1m当たり必要スラスト=12.5*9.7*22*0.3
30 (5D)	24,008	
24 (4D)	19,206	
18 (3D)	14,405	
12 (2D)	9,603	
6 (1D)	4,802	

4)　施工用拡幅部の削減

ＮＡＴＭ工法ではズリ出し･機材搬出入にタイヤ方式が標準工法になるため、車両変換･交差箇所が 150m 程度に 1 箇所設置される。

ＤＴＢＭ工法の連続施工システムでは、トンネル機械類の搬出入がないのでレール方式が選択可能になり、施工用拡幅部は必要としない。

施工用離合場所の箇所数

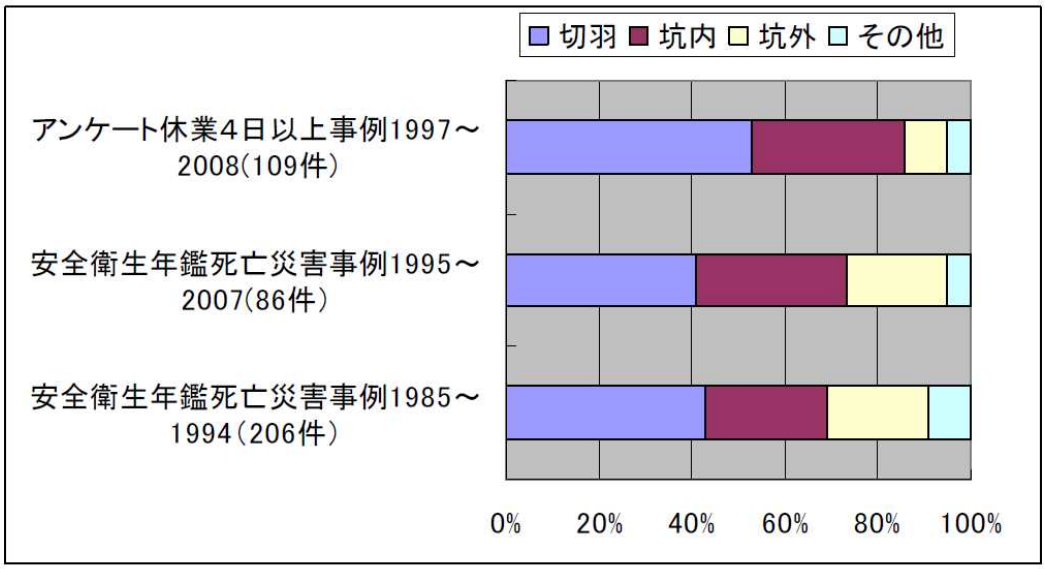
	DTBM	NATM
完成時離合部	17 箇所	17 箇所
施工用拡幅部	0	18 箇所

(2)　安全性の向上

1)　作業の安全性向上

ＳＦＲＣライナの設置場所は、マシン後部のテールプレート内作業になり地山と接触することがないため、切羽で多い落盤災害などの地山に起因する災害の防止が図れる。また、地山状態に左右されず計画したルーティン作業が確保でき、安全対策の基本に繋がる。

山岳トンネルの災害発生場所の割合



＊山岳トンネルでは坑内での事故割合が70～80％程度を占め、さらにそのうち切羽での災害が半数以上を占めている。やはり、山岳トンネルの重要対策場所は切羽であり、切羽周辺での落盤対策と機械接触防止対策が欠かせない。

2)　耐久性・耐震性が強化される

ＤＴＢＭ工法の特長は、地山を傷めないで余掘りの少ない掘削ができ、また、真円形断面になることからグランドアーチ形成に有利になり、できあがる構造物は耐久性・耐震性が高く、ライフサイクルコストが低減できる。

■　耐久性が高い

ライナコンクリートの欠点を改善するため、スチールファイバー（ＳＦ）補強して鋼繊維補強コンクリート（ＳＦＲＣライナ）で製作する。その補強効果は、次のような耐久性を増進する。

・じん性（タフネス）、曲げ強度
・衝撃荷重抵抗性、ひび割れ抑制能力
・せん断強度、疲労強度

■　耐震性が強化される

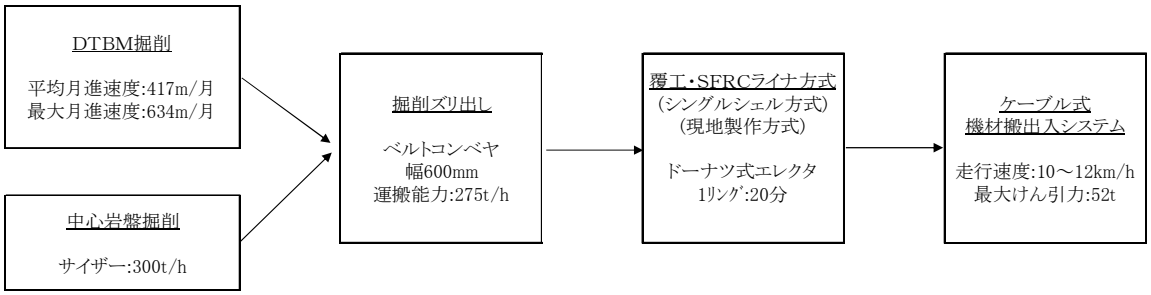
馬蹄形では、インバートが無いと盤膨れに対する度合いが違ってくる。ＤＴＢＭでは、真円形になることから構造的に荷重に対して有利に働き耐震性が強化される。

6.5　研究開発のまとめ

本研究開発の目標は、不良地山に遭遇するとマシンが拘束されてしまうというＴＢＭ(トンネルボーリングマシン）の課題を克服するために、カッタヘッドの中央に開口部を設けたドーナツ型ＴＢＭ（ＤＴＢＭ）を、新たな山岳トンネル工法として、実用化できるレベルまで開発を進めることである。

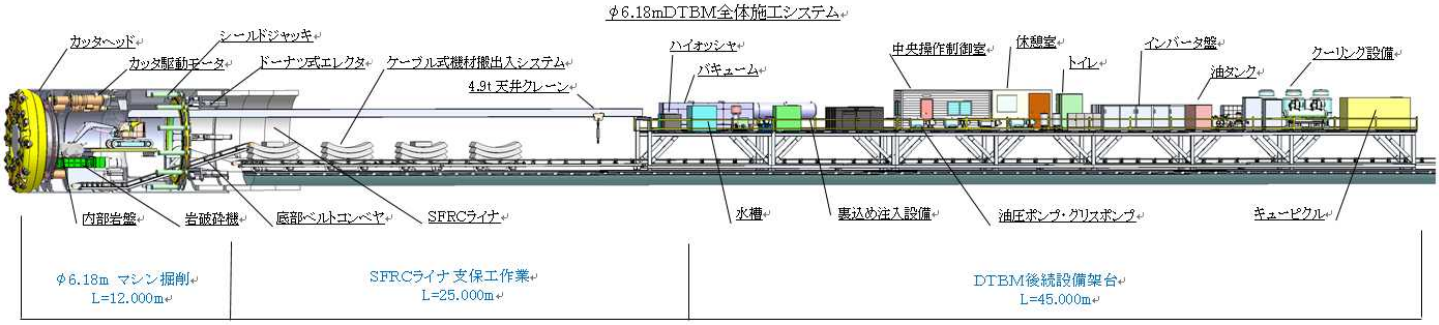
学識者、建設会社等の８者の共同研究として平成 23 年度より検討を行ってきたが、平成 27，28 年度には国土交通省研究開発助成を受けて、簡易実験によりＤＴＢＭは通常の（全断面型）ＴＢＭに比して掘削速度が速くなることが明らかになるとともに、モデルトンネルにおいて施工計画を立案することにより、限られた空間にＤＴＢＭ全体のシステムが確実に配置できることの確認や、不良地山における対策検討など、ＤＴＢＭ施工法全体の検討が終了したことから、概ね実用化できるレベルに到達したものと見込んでいる。

φ6.18mＤＴＢＭ・ＳＦＲＣライナ方式設備能力フロー



掘削・支保工サイクルタイム

支保パターン	掘削支払断面積 (m²/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)	SFRCライナ t=30cm (分)	1サイクルクリティカル作業時間 (分)	日当たり掘進長 (12h/日) (m/日)	月当たり掘進長 (22日/月) (m/月)
CⅡ	φ6.180 m 30m²/m	1.50	2.42	37	20	57	19	417
DⅠ			1.98	45		65	17	366
DⅡ			1.84	49		69	16	344
EⅠ			1.29	70		90	12	264
EⅡ		1.00	20m当たり:セメント系等注入日数 4日 掘削日数 2日 計 20m/6日				3	66



7．研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
刊行なし			

8．研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
取得なし				

9．成果の実用化の見通し

掘削実験により、従来型の TBM に比べてドーナツ型 TBM の機械的な優位性を立証できた。さらに、モデルトンネルにおいて施工計画を立案することにより、限られた空間にＤＴＢＭ全体のシステムが確実に配置できることの確認や、不良地山における対策検討など、ＤＴＢＭ施工法全体の検討が終了したことから、概ね実用化できるレベルに到達したものと見込んでいる。

10．その他