

# 堆積岩層（ジュロン層）における泥水式シールド掘進の実績 Slurry TBM Driving in Sedimentation Rock (JURONG Formation), Singapore DTSS Phase -2 T10

岡本 義洋\*                      中原 智裕\*\*  
Yoshihiro Okamoto          Tomohiro Nakahara  
山内 悟\*\*\*  
Satoru Yamauchi

## 要 約

堆積岩層であるジュロン層を、シンガポールで初めて、泥水式シールドで掘進した。ジュロン層特有の地質条件を考慮した計画を行ってきたが、大きくは次の3つの問題点が発生した。①岩盤部における想定以上のカッター摩耗、②多量湧水地盤中の圧気下におけるカッター交換、③土砂部におけるカッター面板の閉塞。本稿では、①については実績、②については中間充填剤として裏込め材をシールド胴体周囲への充填等の対策、③については掘進パラメータ、泥水管理値、加泥材の調整等について報告する。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地質概要
- § 3. シールド機概要
- § 4. トラブルと対応
- § 5. まとめ

### § 1. はじめに

シンガポール公益事業庁（PUB）発注の大深度地下水幹線建設工事は、シンガポールの水処理・供給および国土利用の改善向上を目的とした国家プロジェクトであり、2008年に完了した第一期工事に続きシンガポール南西部を対象とする今回の第二期工事をもって完了する計画となっている。第二期工事では総延長100kmに及ぶ幹・支線トンネルと新規下水処理場を建設する。（図一1、図一2参照）。当社が受注したT10工区は、トンネル3本（表一1参照）計7.5kmのトンネルと14箇所の立坑を構築するものである。

本稿は当社で初めてとなるジュロン層における泥水式シールド機1号機による掘進の実績、および施工中に発生した問題点とその対応について報告する。

発生した問題点として、岩盤部掘進において計画を上回るカッター摩耗によるカッター交換作業の増加、湧水が多い箇所でのカッター交換作業、および土砂・複合地

盤における面板の閉塞が挙げられる。

表一1 T10工区トンネル概要

シールド	掘進距離	地質	最大土被り	形式
1号機	2,979 m	堆積岩	58.0 m	泥水式
2号機	3,067 m	堆積岩/花崗岩	44.3 m	泥水式
3号機	1,497 m	堆積岩	43.9 m	土圧式



図一1 大深度下水プロジェクト全体平面図



図一2 当該工区全体平面図

\* 国際事業本部タンピネス工事事務所  
\*\* 国際事業本部ジュロンイースト（出）  
\*\*\* 国際事業本部シンガポール営業所

§2. 地質概要

ジュロン層の特徴および当工区に出現した地質の概要について以下で説明する。

2-1 ジュロン層

(1) ジュロン層の成り立ち

ジュロン層は、約1億5000万年前に形成された。この時代は、盛んな地殻運動とそれに伴う火山活動や堆積作用が活発だった時期で、シンガポール南西部沿岸の堆積物が長期間にわたって圧縮、固結して岩石が形成された。ジュロン層の岩石は主に砂岩、泥岩、石灰岩である。これら堆積岩が数十センチから数メートルの互層となっている。

図-3のシンガポールの地質マップに示すとおり、シンガポール西部に堆積岩であるジュロン層（紫着色部）が分布しており、当工区のシールド機1号機と3号機はジュロン層、2号機は到達立坑から約1kmが花崗岩層であるブキティマグラナイト層（赤着色部）を掘進する。

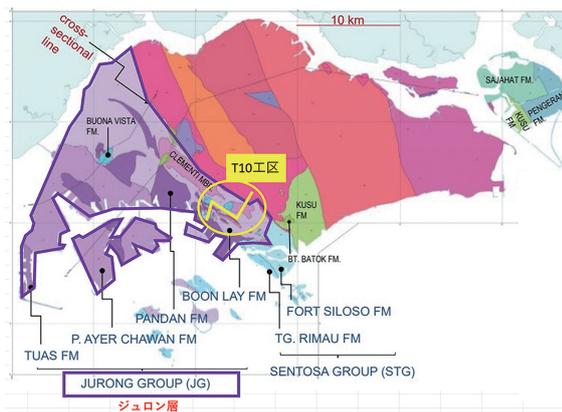


図-3 シンガポール地質マップ

表-2 ジュロン層の地盤定数

風化度	SIII	SIV	SV
	コアは手で壊せる RQD>0	コアは手で壊せる。 RQD=0	土のような状態で風化している。 水中で膨潤する
区分	岩	土砂	土砂
一軸圧縮強度	泥岩：30 Mpa シルト岩：35 MPa 砂岩：60 MPa 石灰岩：40 Mpa		
透水係数	泥岩：7x10 <sup>-7</sup> ~5x10 <sup>-6</sup> m/s シルト岩：1x10 <sup>-8</sup> ~6x10 <sup>-5</sup> m/s 砂岩：1x10 <sup>-8</sup> ~1x10 <sup>-5</sup> m/s 石灰岩：2x10 <sup>-8</sup> ~6x10 <sup>-6</sup> m/s	2x10 <sup>-7</sup> m/s	1x10 <sup>-7</sup> m/s
摩耗性 (CAI)	シルト岩：1.95 砂岩：2.88 (摩耗性が高い)		

(2) ジュロン層の特徴

① 石灰岩の出現

石灰岩は、珊瑚や貝殻、石灰藻などの炭酸カルシウム

を含む海洋生物の死骸が海底に堆積したもの、あるいは炭酸カルシウムが海水中の過飽和状態により、無機的に沈殿したものである。特に暖かい浅海で炭酸カルシウムが水中から析出し堆積しやすい。当工区のシールド機1号機においても石灰岩および石灰質砂岩が確認され、岩盤中の地下空洞の存在が懸念された。なお掘進中は泥水の逸水、切羽水圧の変動を注視し施工したが、シールド機のパラメータで判断できる空洞は存在しなかった。

② 複合地盤

ジュロン層は、プレートテクトニクスによる地殻運動の影響を受けて褶曲や断層が生じ、複雑な地質構造が見られる。このため、急激な地盤の変化が予想され、特にトンネル断面内に土砂と岩が出現する複合地盤での掘進に配慮が必要となる。

工事発注に先立ち実施されたトンネル沿線付近のボーリング調査結果でも、コアロスしている部分や、細かく破碎された岩塊、風化作用により土砂化している部分が岩盤の中に介在していることが確認されている。

掘進中は泥水処理プラントでの一次処理で篩い分けされる際、砂の量の観察、土量管理での変化、カッタートルクや推力などのシールド機のデータを注視することで、地盤の変化を早く察知し、応じて、シールド機のパラメータの設定、泥水の管理値の変更等の対応が必要となった。

③ 湧水

表-2に示す通り、土質調査報告書では当該地盤の透水係数は1×10<sup>-7</sup> m/secと低い透水性を示している。特に、土砂と岩の境界、岩の不連続面や断層部において帯水が想定されることから、地下水の影響と併せてトンネル施工に際しては、地下水を取り込まないよう適切な切羽水圧の設定、チャンバー内でのカッター交換作業については、圧気による湧水の抑制が必要であった。

④ 摩耗性

表-2に示す通り、砂岩と石灰岩でのCAI (Cerchar Abrasivity Index) は2.88と摩耗性が高いとされるため(シルト岩は1.95で『摩耗性がある』とされる。), 168 m毎のカッター交換を計画した。しかし、実際には通常摩耗以外にも複合断面掘進による振動や切羽の不均一によるカッター及び、固定治具の損傷、面板閉塞による掘進速度の低下、推力の増加が見られ、大幅にカッター交換の頻度は増加した。

2-2 シールド1号機の地質

図-4に示す事前に実施した調査結果ではシールド1号機での地質の割合は岩盤：74%、複合(切羽内に岩線がある地山)：10%、土砂：16%であった。岩盤はSIIIで、砂岩が主である。特に中間立坑となるM1およびM2付近では石灰岩の出現が想定され、トンネル線形内に空洞の存在が懸念された。そのため、この付近でのカッター交換作業時において、多量の湧水に配慮する計画とした。

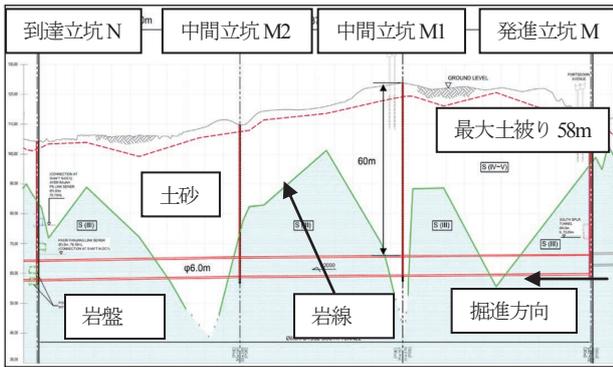


図-4 シールド1号機地質概要（事前調査時）

シールド1号機において実際に出現した地山の割合は、岩盤：60%，複合（切羽内に岩線がある地山）：9%，土砂：31%であり、調査結果より岩盤が少なく、複合地盤区間が多い結果となった。発進立坑から700m及び、2000m付近で出現した地層については非常に粘性が高く、面板の閉塞が発生した。

### §3. シールド機概要

シールド機はドイツのヘレンクネヒト社製の泥水式シールドを採用した。泥水式の採用理由として、最大土被りが約60mあるため、必要切羽圧も6.0bar程度が必要となり、高圧下における排土の制御に適している点、シンガポールでの過去工事での実績が主な理由である。

主な特徴として、岩盤部での岩塊による排泥管閉塞を防止するために岩塊を挟んで破碎するジョークラッシャーを装備している（図-5参照）。

土砂部分、複合地盤部での対応として送泥の一部を面板中心部に向け噴射するセンターフラッシング設備（写真-1参照）および開口を大きくできるように取り込み調整板をボルトにより脱着式にしている。

ディスクカッターはヘレンクネヒト社製の同種工事での実績のある18インチインチを装備し、設置間隔は100mmである。

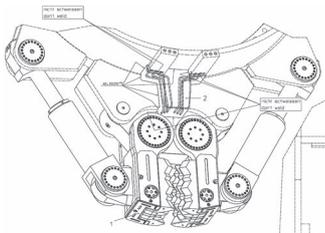


図-5 ジョークラッシャー

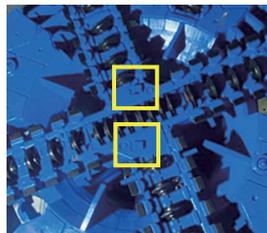


写真-1 センターフラッシング設備

表-3 シールド1号機の主な仕様

項目	仕様	
トンネル	セグメント内径	6,505 mm
	セグメント外径	7,055 mm
	セグメント厚	275 mm
	セグメント長	1,600 mm
	トンネル延長	2,979 m
	勾配	1/2000 下り勾配
	曲線率	23.6 %
	最小曲線半径	150 mR
シールド機	掘削外径	7,465 mm
	カッターヘッド長、径	925 mm, 7,465 mm
	前胴長、径	3,580 mm, 7,415 mm
	中胴長、径	3,700 mm, 7,405 mm
	後胴長、径	3,470 mm, 7,395 mm
	全長	11,675 mm
	ドライブユニット	最大カッタートルク 最大カッター回転速度 $\alpha$ 値 (トルク/掘削外径 <sup>3</sup> )
推進ジャッキ	推進ジャッキ数	32
	総推進力	57,906 kN
	ストローク長	2,300 mm
	最大伸速度	50 mm/min
中折ジャッキ	ジャッキ数	12
	中折れジャッキ推進力	48,858 kN
	最大中折れ角度	120 mR 対応
	ストローク長	400 mm
カッターヘッド	開口率	32.0 %
	ディスクカッターサイズ	18 インチ
	センターカッター	8 個
	フェイスカッター	33 個
圧気設備	ゲージカッター (2 pass)	4 個
	マンロック	3名+2名x2基 8.0 bar
泥水輸送設備	ジョークラッシャー (チャンパー内)	1基
	ロータリークラッシャー	1基
	排泥ポンプ (P2.1)	900 m <sup>3</sup> /hr
	送泥ポンプ (P1.1)	850 m <sup>3</sup> /hr

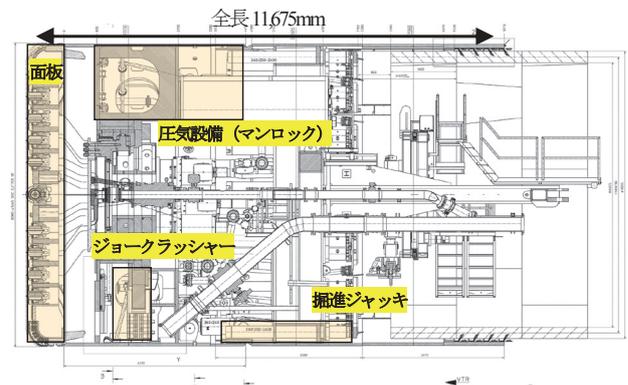


図-6 シールド1号機概要図

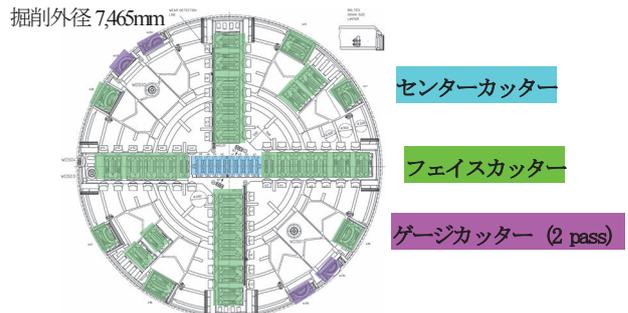


図-7 カッターヘッド概要図

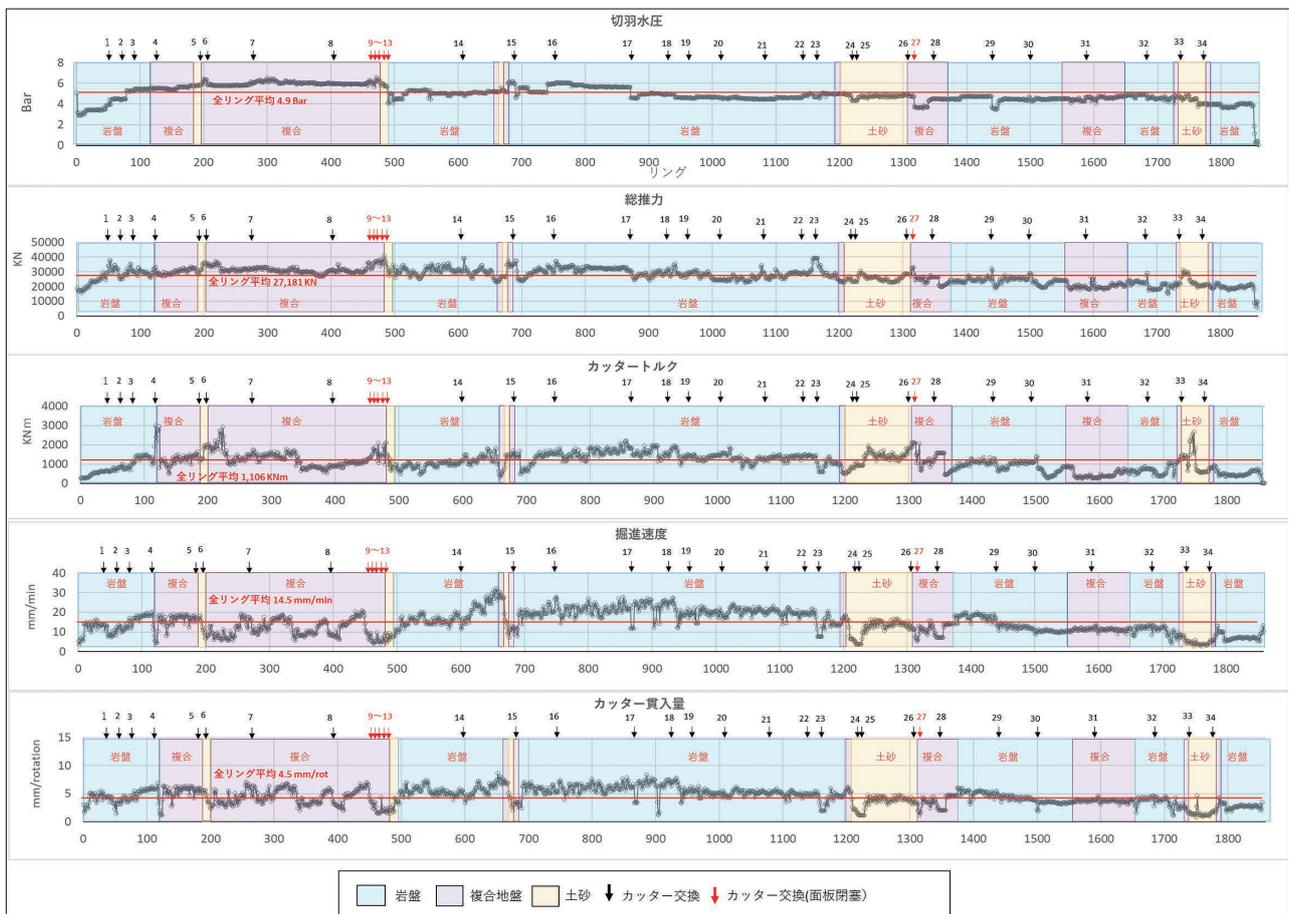


図-8 シールド1号機掘進パラメータ

表-4 地質別掘進パラメータ実績値

パラメータ	単位	計画		実績 (平均値)		
		岩盤 複合	土砂	岩盤	複合	土砂
切羽水圧	Bar	6.0		4.8	5.3	4.8
総推力	kN	41,000		27,162	27,552	26,817
カッタートルク	kN*m	規定せず		1,130	1,065	1,324
掘進速度	mm/分	15	30	16.5	12.8	9.5
カッター貫入量	mm/回転	5	15	4.8	4.2	2.9

#### §4. シールド機掘進実績

##### 4-1 掘進パラメータ実績

パラメータで特筆すべき点として、土砂部におけるカッタートルクの上昇および掘進速度の低下が挙げられる。計画段階では土砂部の方が掘進速度が速く、進捗が良いと想定されていた。しかし、出現した土砂は粘性が高く、高い推力をかけ掘進を行った場合、掘削した土砂が面板開口部を閉塞し掘進ができない状態となった。450リングから500リングの間で5回のカッター交換作業を実施しているが、主目的としては閉塞した土砂を人力で取り除く作業である。その後、土砂区間においては、カッタートルク値をもとに閉塞の判断を行った。カッタートルクの上限 (1,400 kN\*m) を決めて、掘進速度を調整した。

土砂区間で掘進速度の低下はそのためである。今回はカッタートルク値に着目したが、他に排泥水の温度変化などに着目することも重要である。

計画時、複合地盤に出現する地盤は風化が進んだ岩盤層であり、土砂と岩盤の中間と考え、複合地盤は岩盤と同様のパラメータでの掘進を計画した。しかし、実際には掘進により岩塊は細かくなり、粘性が高くなったことから、土砂と同様の対応を要した。

#### §5. トラブルと対応

##### 5-1 カッター交換作業の増加

###### (1) 発生事象

シールド1号機で出現するジュロン層の砂岩は摩耗性が高く、計画段階より168m間隔、合計で17回のカッター交換作業を計画したが、実際には34回を要した。また、約2km掘進後の区間においては、ボルトの脱落や、ホルダーのがたつきなど、長距離掘進に起因した疲労によるカッター損傷も見られた。土砂部分については、面板の閉塞時にディスクカッターにも土砂が閉塞し、リングの偏摩耗が見られた。

表-5にカッター交換の計画と実績の比較を示す。摩耗係数の算出には、フェイスカッター33個の摩耗係数のうち、最大値を用いている。

表一5 シールド1号機カッター交換実績

	交換回数	交換平均間隔	岩盤部 摩耗係数
計画	17回	168 m	0.022 mm/km
実績	34回	82 m	0.047 mm/km (砂岩) 0.033 mm/km (シルト岩)



写真一2 ディスクカッター摩耗測定状況

(2) 対応

カッター摩耗に関しては、摩耗データ、次のカッター交換までの地質情報を元に、交換時期を予測して、設定値を超える摩耗がおり、ディスクカッター以外のスクレーパーやシールド機面板を損傷しないよう管理を行った。設定値はフェイスカッターで25 mmとした。上記の管理を行うことで、ディスクカッター以外の交換や修理を回避することができた。ボルトの脱落については、カッター設置時のボルト締め付けをトルク管理するとともに、ボルトに鉄板を溶接し(写真一3)、ボルトの脱落、ゆるみを防止した。ホルダーについても振動に伴う擦り減りが見られた。擦り減りに部分に薄鉄板を設置することにより、がたつきを無くす処置を行った。(写真一4)この処置により、脱落した部品によるカッターの二次摩耗(損傷)について防ぐことができた。

5-2 岩盤部湧水箇所でのカッター交換

(1) 発生事象

カッターの摩耗に伴い、推進力を上げてもカッタートルクが上昇するだけで、掘進速度は向上しない。そのため、本工事では200 m以内に1回の頻度でカッター交換を計画した。カッター交換はチャンバー内の作業となるが、地山からの湧水量が25 L/分以下という環境下での作業が企業先から義務付けられていた。今回のシールド機には圧気設備が搭載されており、圧気下での湧水量を制御しながらの作業は可能である。しかしながら、25 L/分の湧水量に抑えるためには高い圧気下(他工区では3.0 bar以上で実施)での作業となり、作業効率の大幅な低下が見込まれた。

以下、特に湧水量の多かったM1およびM2立坑付近でのカッター交換作業時に実施した対応策について述べる。

(2) 対応

① シールド胴体周りへのグラウト (Body Grout)

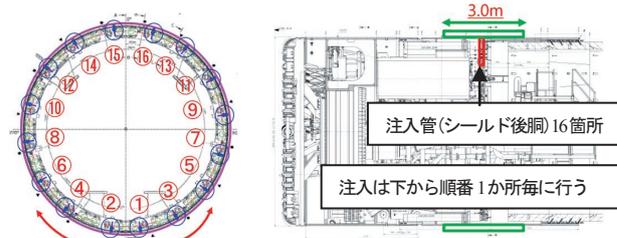
シールド胴体周りにグラウト注入(裏込め注入と同じ材料)を掘進時の切羽水圧下で行い、シールド周りおよびセグメントからカッターへ回り込む湧水を低減させる。グラウト注入は量による管理を基本とし、胴体周り前後方向3 mを注入範囲に設定した(図一9参照)。特に胴体頂部においては、所定注入量を超えても、チャンバー内圧+1.0 Barにて打ち止め管理を行った。図一9に示す注入手順により、胴体周りを2周行うことを基本とするが、注入前に計測を行い、チャンバー内圧2 Bar下で湧水量が25 L/分を超える場合は注入を3周行う計画とした。



写真一3 偏摩耗したディスクカッター (左) ボルト脱落防止のための補強 (右)



写真一4 擦り減ったカッター固定治具 (左) 薄鉄板設置 (右)



図一9 Body Grout 概要図

② 圧気作業

グラウト完了後、圧気圧を段階的に掘進時の切羽水圧から0.5 barずつ降下させ、チャンバー内のレベル計で湧水量を測定し25 L/分の湧水量を超えない圧気圧にてカッター交換作業を行った。

(3) 結果

圧気、Body Groutの併用により、湧水の多い岩盤部においても、予定の位置でカッター交換作業を行うことができた。圧気圧は湧水が特に多い(500 L/分以上)と想定された14回目から17回目、22回目から29回目までのカッター交換作業箇所を25 L/分に減少させるために

2.0 Bar の圧気圧と 3 周の Body Grout が必要であった。圧気と Body Grout（2 周）は他のそれほど湧水量が多くない箇所でも実施し、0.5 bar ~ 1.5 bar の圧気圧下で Cutter 交換作業を行うことができた。

### 5-3 土砂、複合地盤における面板の閉塞

#### (1) 発生事象

発進立坑から 450 リング付近で岩盤から複合地盤、土砂への急激な地質の変化が見られた。推進力とカッタートルクの上昇が見られたため、掘進速度を低減させる必要が生じた。チャンバー内を点検したところカッターヘッドスポーク内に切削した土砂が閉塞していた。センターカッター前面付近は計画段階より閉塞が懸念され送泥水を噴射するセンターフラッシング設備を搭載していたが、それ以外のスポーク間の閉塞、チャンバー内のセンタースポーク回りに土砂の付着が見られた。一度閉塞すると、装備されていたセンターフラッシング設備でも閉塞を回避することは困難であり、チャンバー内で人力での閉塞した土砂の除去（カッター交換 9 回目）を行った。その後の 10 回目から 13 回目のカッター交換時に同様の地盤中において、閉塞トラブルに遭遇したため（写真-5 参照）、抜本的な対応策を講じることとした。

#### (2) 対応

##### ① 掘進パラメーター

面板閉塞の発生は、高粘性の土砂が高いシールド推力により圧密され最終的に固結化するというメカニズムである。そこで、カッタートルクの上限值を 1,400 kN\*m とし、管理を行った。

##### ② 泥水比重の管理値の見直し

1.20 以下としていた掘進開始時の送泥比重を 1.03 とした。また、上限値を 1.15 とし、掘進中に 1.15 へ上昇した場合、掘進を一時中止し、泥水比重を調整した。

##### ③ 送泥位置の変更

図-10 に示す通り、送泥設備はバルブ操作によりチャンバー内に 2 系統、ジョークラッシャー部に 4 系統、センターフラッシングに 1 系統の送泥が可能である。本トラブル発生以前は、全系統から送泥を行っていたが、閉塞を回避するため、全送泥量の内、約 6 割以上をセンターフラッシングに送り、かつチャンバー内へは 1 系統のみの送泥とした。これにより、面板前面へより多くの泥水を送ることが可能となり、その後、閉塞トラブルは発生しなかった。

##### ④ 分散剤の使用

掘進停止中において高圧下での土砂の面板への固着化を防ぐため、分散効果が期待できる重曹をチャンバー内へ添加した。具体的には表-6 に示す配合で 1 m<sup>3</sup> 添加、5 分間の攪拌を行った。

#### (3) 結果

上記対策をカッター交換の 12 回目から実施し、1,200 リングから 1,370 リングで同様の地盤が出現したが、こ



写真-5 閉塞した開口部

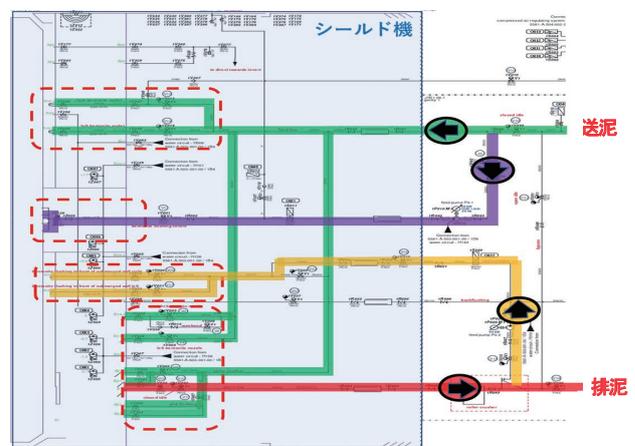


図-10 切羽への送泥設備

表-6 分散剤配合

分散剤	重曹	水
	10 kg	200 L

これらの対策を講じたことで閉塞に起因するトラブルは発生しなかった。

## § 6. まとめ

- (1) ジュロン層岩盤の摩耗係数は想定より高く、計画以上のカッター交換作業が必要となった。岩盤部の平均摩耗係数は 0.047 mm/km であった。又、長距離掘進におけるカッターのボルトやホルダーに疲労が見られ、対応が必要となった。
- (2) 湧水を 25 L/分以下に抑えるため、シールド胴体周りに Body Grout を行った。圧気と併用し、湧水を抑えカッター交換作業を行うことができた。
- (3) ジュロン層土砂部において粘性の高い地山の出現により、カッター開口部の閉塞が生じた。シールド機のパラメータの制御、泥水比重の管理、送泥位置の変更、分散剤の使用を行い、同様の閉塞を防ぐことができた。