

土圧式シールドによる世界最長級トンネル掘進への取り組み

—The Singapore Deep Tunnel Sewerage System(DTSS) T-02 Contract

シンガポール大深度トンネル下水道システム T-02 工区—

佐藤 慎* 佐伯 博**
中山 保* 網野 巖**
熊崎 温*** 河又 一博*

要 旨

五洋建設(株)は、1999年12月にシンガポールにおいて大深度トンネル下水道工事 T-02 工区を設計施工工事として受注した。本工事は、深度 30m～45m に仕上内径 6m、延長 7.7km の下水道幹線トンネルを構築する工事、ならびに、脱臭施設、合流人孔、点検人孔などの付属施設を築造する工事からなる。

本工事の主要工種である下水道幹線トンネル工事は、土圧式シールド工法により掘進、一次覆工を行い、その後、全断面セントルを用いた二次覆工を施工する計画であり、2003年12月に掘進、一次覆工が完了し、現在二次覆工を施工中である。

1 台の土圧式シールドによる延長 7.7km のトンネル掘進は世界最長級であり、工事条件に定められたシールド工事の工期は 2 年と大変厳しい条件であった。また、対象土質についても、軟弱沖積層、洪積層、岩盤層を 1 台のマシンで掘進するという特異な条件の工事であり、その中でも特に、高水圧帯水砂岩層ならびに複合地盤(沖積、洪積、岩盤)の掘進は困難を極めた。

本報では、シールド工事における上記の課題を克服するため、計画、設計、施工の各段階における種々の取り組み、対策とその効果を報告する。

1. はじめに

シンガポール大深度トンネル下水道システムは、既存の下水道システムを再構築し、21 世紀のシンガポール開発に伴う将来の下水・排水処理量の増加に対応するために、シンガポール政府の Public Utilities Board (PUB、公益企業庁) が計画し、事業を推進している。

このシステムは、シンガポール島の北部～東部を網羅する北トンネル部と西部～南部を網羅する南トンネル部からなり、それぞれ 2 期に分かれて工事が行われる計画である。図-1 にシンガポール大深度トンネル下水道システムの位置図¹⁾を示す。

五洋建設(株)は、1999年12月に 1 期工事の北トンネル部の内、T-02 工区を設計施工工事として受注した。本工事の主要工種である下水道幹線トンネルは、1 台の土圧式シールドによる延長距離 7.7km の掘進を 2 年以内に完了する計画であった。トンネル対象土質は、軟弱沖積層、洪積層、岩盤層と多くの種類から成り立っていた。このため土質変化への柔軟な対応が必要であり、さらに、トンネル覆工構造の耐久性についても厳しい仕様を満足することが求められた。

本報では、シールド工事における上記の課題、長距離施工、高速施工、耐久性向上と土質変化への柔軟な対応を克服するため、計画、設計、施工の各段階における

種々の取り組み、対策とその効果を報告する。

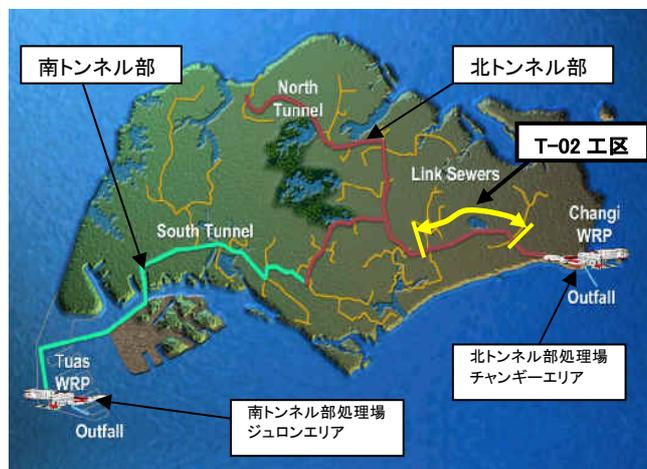


図-1 シンガポール大深度トンネル下水道システム位置図¹⁾

2. 工事概要

2.1 大深度トンネル下水道プロジェクト概要

大深度トンネル下水道システム全体としては、最大仕上内径 6m クラスの下水道幹線トンネルの総延長距離約 80 km、仕上内径 3m クラスの下水道枝線トンネルの総延長距離約 170km、日処理量 2,000,000m³ 規模の二つの集中

*シンガポール DTSS T-02 トンネル工事 **東京支店 ***中国支店

下水処理施設、そして処理水の海中放流施設からなる。

その内、1 期工事である北トンネル部は、下水道幹線トンネルが約 48km、枝線トンネルが 70km、集中下水処理施設が 1カ所、および海中放流施設 1 式を現在施工中であり、2008 年の供用開始を目指している。2 期工事である南トンネル部は 2015 年に供用開始される予定である。

2.2 1期工事の主要工事業者

シンガポールの公共工事は、一般的に、工事規模に応じて登録されている国内、国外の施工会社による、事前審査への応募→事前審査→入札→入札審査→落札契約を経て、施工が行われる。

1 期工事北トンネル部の下水道幹線トンネルは、6 工区に分けて計画され、上記の入札プロセスで厳しい国際競争を経て、表-1 に示すコントラクターに発注された。

表-1 シンガポール大深度トンネル下水道システム
北トンネル部の主要施工会社

工区	施工業者		トンネル延長 (m)	シールド台数	仕上り内径 (m)
T-01	Woh Hup-Shanghai Tunnel Engineering JV	シンガポール、中国JV	5,800 m	1	6.0 m
T-02	五洋建設	日本	7,700 m	1	6.0 m
T-03	熊谷組-Sembcorp JV	日本、シンガポールJV	5,200 m	1	6.0 m
T-04	Samsung Corporation	韓国	7,300 m	1	4.3 m
T-05	Philipp Holzmann-Sembcorp JV	ドイツ、シンガポールJV	12,500 m	2	3.6 m
T-06	ED Zublin AG	ドイツ	9,700 m	2	3.3 m
	合計		48,200 m	8	

2.3 T-02 工区の工事概要

T-02 工区の工事概要を表-2 にまとめる。この内、施工コンサルタントは、北トンネル部下水道幹線トンネル 6 工区とも共通である。

表-2 T-02 工区の工事概要

工事名	大深度トンネル下水道工事 T-02工区
発注者	PUBLIC UTILITIES BOARD (PUB、公益事業庁)
施工コンサルタント	CH2M/PB JV Pte. Ltd. (米国のコンサルタントJV)
請負業者	五洋建設(株)
設計コンサルタント	T.Y.Lin/Haley & Aldrich/Kiso-Jiban/KTP/Dr Sauer/Square Mech JV
工事期間	契約時 2000年1月4日~2004年2月23日 協議中 2000年1月4日~2005年3月18日
工事場所	シンガポール南東部ベドック~バヤレバ間
工事内容	(1) 仕上り内径 6 m の下水道トンネル、延長 7,717 m (2) トンネル掘削深度: 約 - 40 m (3) 土質(入札時): Old Alluvium (洪積層)、N値 80~100 以上 (4) シールドタイプ: EPB (土圧バランス式) x 1 機 (5) 脱臭施設(コンクリート地下構造物) x 2 (6) 発進立坑 x 1, 到達立坑 x 1, 点検用人孔 x 6 (7) 小口径トンネル(3.0~3.5m) x 200 m (8) その他付帯工事

2.4 耐用年数 100 年間の構造物を設計施工

大深度トンネル下水道システムは、発注者が定めた仕様書に基づき、受注業者が 100 年の耐用年数を満足する設計を行い施工する。特に下水道幹線トンネルは、メンテナンスフリーで耐用年数 100 年の性能保障を求められている。発注者の仕様書では、施工会社の瑕疵担保期間が 100 年ということではなく、設計時点で耐用年数 100 年を証明することと、設計上の瑕疵を施工後 8 年間担保する「専門家賠償保険」を契約することが求められた。図-2 に発注時の仕様に基づき設計したトンネル断面図を示す。

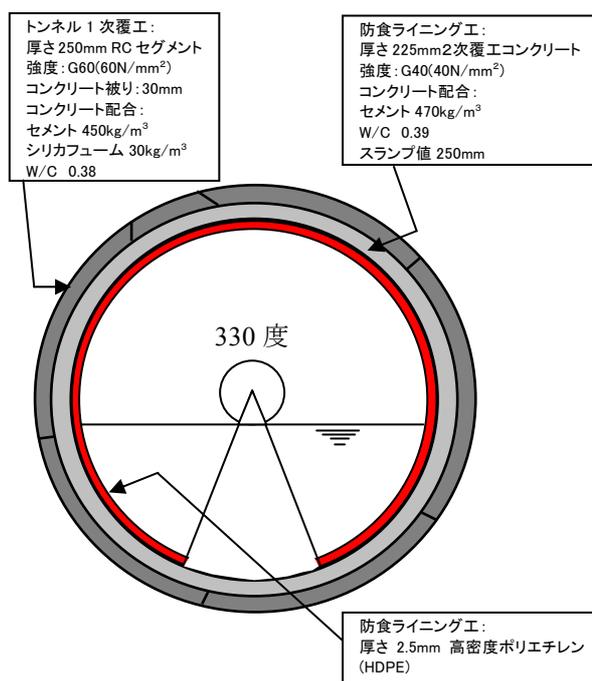


図-2 T-02 下水道幹線トンネル断面図

3. 土質条件

3.1 T-02 工区の入札時土質条件

発注者は、事前に基本計画を策定する上で、T-02 工区において 25 箇所の土質ボーリング調査と各種土質試験を実施し、その報告書が入札前に応札者へ提示された。

発注者側より提示された土質報告書を基に想定し作成した T-02 工区のトンネル縦断方向土質状況を図-3 に示す。

T-02 工区において施工の対象となる土質は、Kallang Formation (沖積層、海成/河成堆積物) と Old Alluvium (洪積層、固結砂質土、以下 OA 層という) である。下水道幹線トンネルの線形位置においては、ほとんどが OA 層と想定され、一部土被り部の Kallang Formation がトンネル天端付近まで深く分布する区間が想定された。T-02 工区の土質性状を表-3 に示す。OA 層は、砂分が 65%~85%を

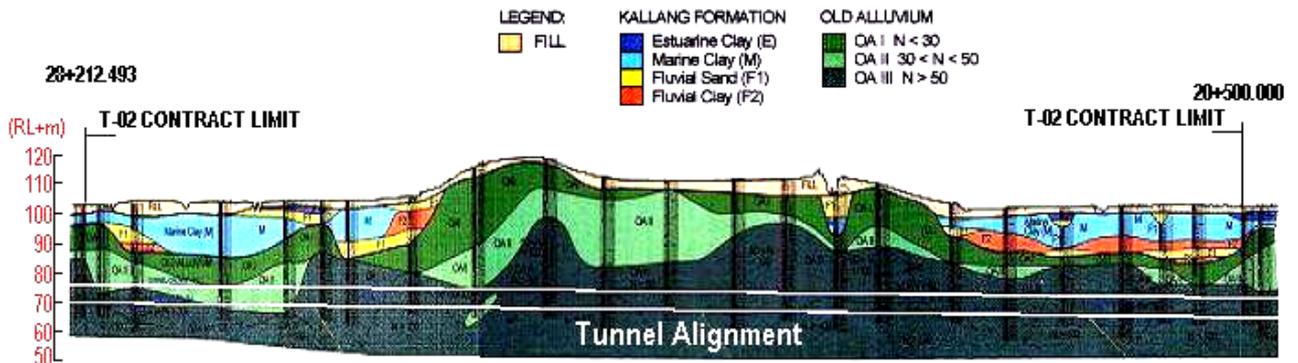


図-3 T-02 工区のトンネル縦断方向土質状況図(入札時)

表-3 T-02 工区の土質性状(入札時)

一般的層序					
シンガポール地層名					地層年代
Fill					盛土
Kallang Formation					沖積層
- Estuarine Clay(E)					河口成粘土
- Marine Clay(M)					海成粘土
- Fluvial Sand(F1)					河成砂
- Fluvial Clay(F2)					河成粘土
Old Alluvium					洪積砂質土
					約1万前~
					約150万年~1万前
土質性状(入札時)					
	Kallang Formation				Old Alluvium (OA)
	Estuarine Clay(E)	Marine Clay(M)	Fluvial Sand(F1)	Fluvial Clay(F2)	
N値	0-4	0-4	1-13	1-10	20-100以上
湿潤密度 γ (t/m ³)	1.5	1.5-1.6	1.9	1.9	1.9-2.0
有効せん断強さ C', ϕ (kPa,度)			$C'=0, \phi=30$		
非排水せん断強さ C_u (kPa)	15	10-25		51	45-150
変形係数 E (Mpa)	5	300 C_u	10		
含水比 W_c (%)		65-80		22-37	10-35
間隙比 e		1.65-2.1			
液性限界 LL (%)		60-100		44-59	35-55
塑性限界 PL (%)		25-35		19-20	10-25
塑性指数 PI		30-65		25-29	20-30
圧密降伏圧力 P_c (kPa)		30-160			
圧縮指数 C_c		0.6-1.2			
透水係数 (cm/s)	10^{-4}	10^{-8}	$10^{-1}-10^{-5}$	10^{-8}	$10^{-5}-10^{-7}$

占め、その砂分の組成は長石と石英が大部分を占める。このことから非常に磨耗性が高い土質であり、シールドの設計や後方設備の計画を行う上で最重要の課題であった。

3.2 実施工時の土質状況

2000年1月の工事着工後、発注者から提示された土質調査を補完し詳細設計に反映させるため、追加の土質調査と試験を実施した。その結果、入札時に想定した条件とは全く異なる土質が存在することが明らかとなった。発進立坑から6,890mの位置から272mに渡り出現した Granite Formation(以下、花崗岩層という)である。この花崗岩層は、入札前に提示された土質調査報告書にはその記載は無く、後に述べるように入札時想定外の土質として発注者と協議し、線形などの基本計画の変更、および対策工の

表-4 花崗岩層の土質性状

シンガポールにおける花崗岩					
シンガポール名称		Bukit Timah Granite			
地層年代		三疊紀(lower-mid Triassic Age)			
花崗岩層(G層)分類					
G4層		花崗岩性堆積物(風化度VI)および完全風化花崗岩層(風化度V)			
G3層		平均サイズが400mm以上の花崗岩転石、通常G4層に囲まれる。風化度はIII~IV			
G1/G2層		花崗岩基盤層、風化度I~II、中程度風化から高強度を呈す。			
花崗岩性状					
N値	花崗岩G4層(G4)		花崗岩G1/G2層		
	(G4)		(G2)	(G1)	
湿潤密度 γ (t/m ³)	2.0-2.15		単位体積重量 γ (t/m ³)	2.6	
有効せん断強さ C', ϕ (kPa,度)	$N < 30, C'=10, \phi=30$ $N > 30, C'=25, \phi=30$		RQD (%)	0-75 45-100	
非排水せん断強さ C_u (kPa)	6N		一軸圧縮強度 (Mpa)	73-156 (当該試験結果)	
含水比 W_c (%)	10-20			5-55 (既往報告 ²⁾) 15-300 (既往報告 ²⁾)	
間隙比 e	0.45-0.6			30-80 (採用提示) 160-200 (採用提示)	
液性限界 LL (%)	45-55				
塑性限界 PL (%)	20-30				
塑性指数 PI	20-30				
透水係数 (cm/s)	$1.9E10^{-4}-1.4E10^{-6}$ (当該試験値) 10^{-4} (採用提示)		透水係数 (cm/s)	$2.8E10^{-4}-5.9E10^{-5}$ (当該試験値) 10^{-4} (採用提示) $7.6E10^{-5}-3.6E10^{-6}$ (当該試験値) 10^{-4} (採用提示)	

表-5 高水圧帯水砂岩層の土質性状

高水圧帯水砂岩層性状 掘進距離4700m-5700m			一般的Old Alluvium ⁹⁾ (OA)
特徴(掘削土ならびに掘進距離5085mにおける切羽観察結果)	薄い砂岩層基盤、細~粗砂が強く固結。部分的に亜炭、黄鉄鉱を含有。数週間露頭しても崩壊、風化などは生じない。		固結~弱固結したシルト/粘土質砂層。大部分は数時間~数日の露頭で固結度を失う。
N値	100-400、1地点にて換算N値1500を記録(2cm/100blows)		平均的50-150、通常最大でも300以下
粒度組成	細粒分:5-14% 砂分:86-95%		一般的に細粒分15%以上 砂分85%以下
間隙比 e	0.55-0.72		0.35-0.55(OAIII)
透水係数 (cm/s)	$3.5E10^{-3}-1.6E10^{-3}$ (水平方向、試験室) $3.0E10^{-3}-5.0E10^{-4}$ (坑内排水試験)		$10^{-5}-10^{-9}$ (既往報告 ⁴⁾)

設計を行った。調査した本花崗岩層の性状を表-4に示す。

また、さらに追加土質調査においても確認できなかった High Pressure Groundwater Aquifer/Sandstone(以下、高水圧帯水砂岩層という)という特異な地盤にシールド掘進距離4,700mから約1,000mに渡り遭遇した。花崗岩層と同様に本地盤も入札時の想定に無いものであった。この地

盤で実施した対策工等について、別項**5. 2**にて詳細を記述する。**表-5**に高水圧帯水砂岩層の土質性状を示す。

4. 工事計画

4.1 工事計画の要点

T-02 工区の主要工種である下水道幹線トンネルの設計、工事計画を立案する上で考慮した本プロジェクトの課題を以下にまとめる。

- ①1 台の土圧式シールドにて世界最長級の 7.7km を掘進する。
- ②トンネル位置の大部分を占める土質 OA 層は、非常に磨耗性が高い。
- ③全体工期を守るためにシールド掘進は 2 年間で 7.7km を完了する。
- ④対象土質は、沖積層から洪積層、花崗岩層と多岐に及ぶことを想定する。
- ⑤100 年耐用年数のトンネル覆工を設計、施工する。

上記の課題①、②および③を満足するためには、シールド掘進において、平均日進量 13m を 2 年間継続し施工する必要がある。また、④の沖積層から花崗岩層まで 1 台のマシンにて掘進を行うことが求められることから、シールドの設計と製作には特段の配慮が求められた。また、シールドの性能だけではなく、シールドの後続設備、トンネル坑内運搬設備、立坑・地上基地設備ならびに定期・緊急時メンテナンス体制など、トンネル工事にかかる全体計画をバランスよく計画し、上記の課題に対応することが必要であった。すなわち、長距離施工、高速施工、耐久性の向上と土質変化への柔軟な対応が、トンネル工事計画を策定する段階から重要な項目となった。

トンネル覆工のセグメント設計については、100 年耐用の設計要求仕様を満足するとともに、セグメントの施工性が高速施工に大きく寄与することから、組立性を考慮した設計を目指した。

4.2 シールドの設計と計画

シールドを設計する上で、発注者からの要求仕様を満足することはもちろん、非常に磨耗性が高い地盤において長距離・高速施工を行うために、以下の点を重視し計画を行った。

- ①耐久性に優れたカッタービット・ディスクカッター・各種シール・カッターベアリングおよびスクリュコンベアを使用し、全て交換のできる構造とする。
- ②消耗品のカッタービット・ディスクカッター、またスクリュ

コンベアについては、スムーズに交換が済むように、交換方法を踏まえた構造設計を行った。

- ③切削基本性能であるカッタートルク、カッター回転数と装備推力には十分な余裕を持たせる。
- ④海外工事である点を考慮し、必要と思われる予備品をあらかじめ現場に保管する。

表-6にシールドの高速・長距離施工への対応一覧を示す。**図-4**にシールドの全体図、**写真-1**にシールド(工場組立検査時)を示す。



写真-1 シールド(工場組立検査時)

掘進距離 6.9km を越えてからの花崗岩層の掘進では、切羽全断面をディスクカッターに替えて切削するため、カッターヘッドにディスクカッター配置用のボックスを装着した。ディスクカッターの装着および面板への改造は、花崗岩層に進入する直前に地中作業にて実施することとした。**図-4**に OA 層対象のカッターヘッド、花崗岩層掘進用(改造後)のカッターヘッドを示す。

4.3 セグメント

セグメントに関して、工事仕様書の要求事項を**表-7**にまとめる。

工事仕様書の要求事項を踏まえ、T-02 工区にて設計されたセグメントの形状仕様を**表-8**にまとめる。**図-2**にセグメントコンクリートの設計仕様を示す。**図-5**にセグメント構造図を示す。

セグメントの型枠メーカーは、欧州、日本、韓国、台湾の各メーカーを候補として、製作精度ならびに製作工程を最優先にコストも勘案して検討した。その中から、日本の営団地下鉄へのセグメント納入実績もある韓国のメーカーを選定した。

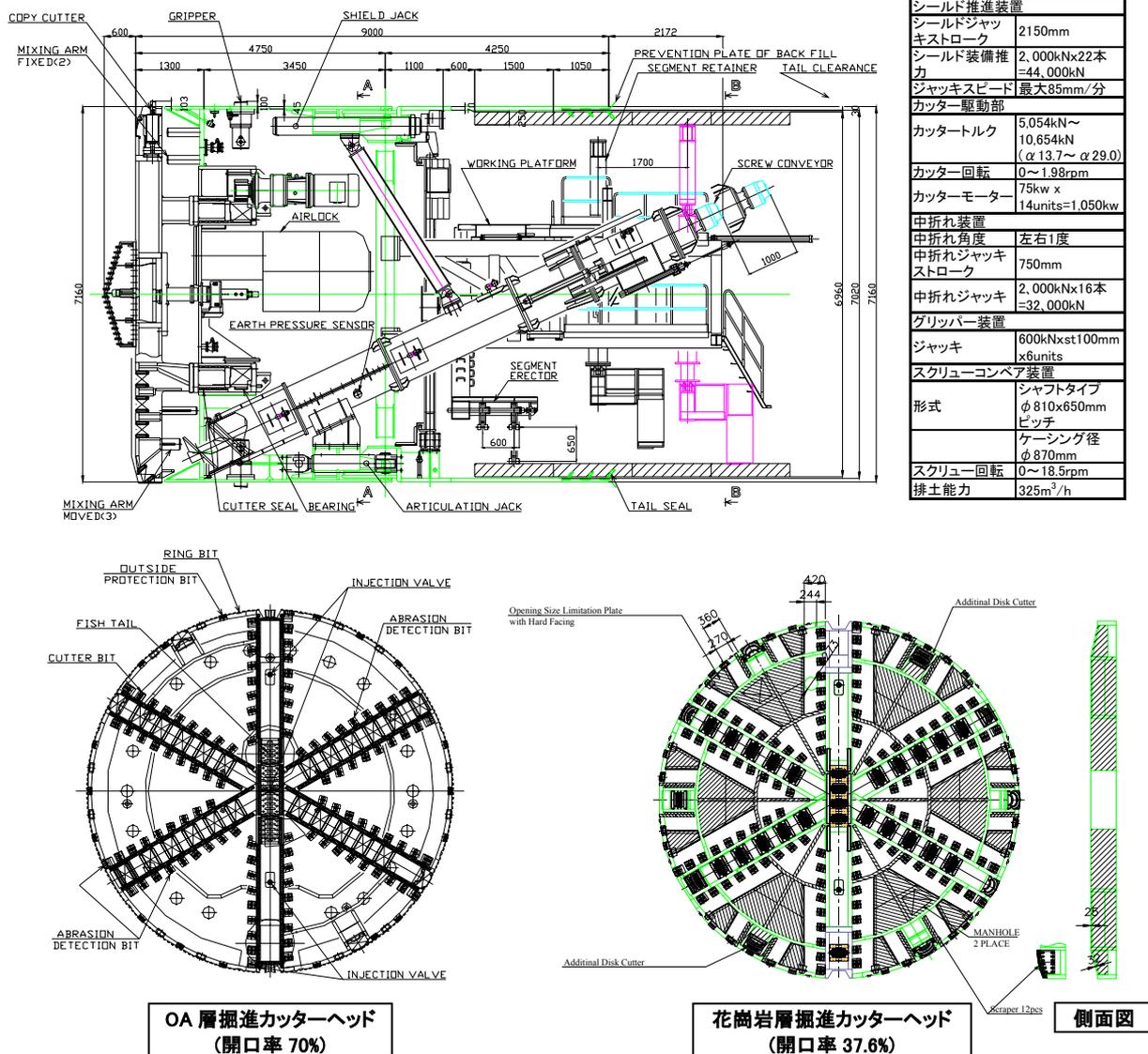


図-4 T-02 工区シールド全体図

セグメント製作メーカーは、シンガポールで地下鉄用セグメントの実績があるシンガポール国内メーカー、およびマレーシアの製作会社を第一に検討したが、品質管理体制や、5,000 リングを超える製作数など、厳しい製作工程になることを考慮し、日本のセグメント製作会社の子会社工場であるインドネシアのメーカーを選定した。

4.4 想定外土質への対策と計画

4.4.1 高水圧帯水砂岩層

高水圧帯水砂岩層については、受注後の追加土質調査においても、その存在は発見されなかったため、事前にその具体的な対応を考慮した対策計画は出来なかった。本土質が出現後、実際にシールド掘進中に行った対策工事を5.2項にて記述する。

4.4.2 花崗岩層

想定外土質であった花崗岩層の分布状況、岩性状を把握するための更なる土質調査を行った。基本的にはOA層を想定して設計、製作されていたシールドの仕様を設計変更した。また、花崗岩層掘進によるプロジェクト全体への影響を最小限とするためのトンネル線形変更、および花崗岩層部は複合地盤掘進となるため、地上への掘進影響を最小限に抑えるための地盤改良工事を、主たる対策として計画し実施した。それぞれの対策について5.3項に詳述する。

4.5 シールド後方設備、坑内設備、立坑・地上設備

長距離・高速施工に対応することを踏まえ、シールド能力とバランスの取れた後方設備、坑内資材運搬設備、立

表-6 シールドの高速・長距離施工への対応一覧

部位・項目	高速・長距離施工への対応	一般的な仕様
カッターヘッド		
カッタービット	先行ビット(Bビット)を、カッタースポーク側面に配置して、設置数量を増加させることにより、先行ビットで2パスの全断面掘削を行う。	先行ビットは切羽面に切り込みを入れるだけで、全断面掘削はティースビットにて行う。
	Bビットを、ティースビット(Aビット)よりも50mm先行させて設置し、切削土砂の取り込みをスムーズに行う。	一般的な先行量は20~30mm。
	BビットとAビットの2段切削とすることで、Bビットが全て磨耗しても、Aビットによりカッターヘッド構造を磨耗より保護する。土質条件等によりメンテナンスが実施できない場合でも、掘進可能距離を1km以上確保する。	ティースビットの磨耗により掘進可能距離が制約される。
	一部の超硬チップにE3種SINTER-HIPを採用し、ビットの耐摩耗性を向上する。	E5種が一般的。
	A,Bビットとも、両方向切削可能型(すくい角・逃げ角がない)	ティースビットはすくい・逃げ角のあるビットを使用する。
	全ビットの固定をホルダーとボルトで行う構造とする。ビット交換作業を、切羽前面に出ることなく、迅速にチャンバー内より行える。	先行ビットはカッター面やスポーク表面に溶接固定、ティースビットはピンなどにより固定。
油圧式磨耗検知ビット3ヶ所設置し、ビット交換時期の予測と確認を行う。		
カッターリング	カッターリング材質を高張力鋼(H780)とし、耐摩耗性能を向上する。	SS400を使用。
フィッシュテール	カッターリング外周面に耐摩耗板とリングビットを設置し、耐摩耗性能を向上する。	砂質土や泥岩対応としては硬化肉盛が一般的。
コピーカッター	ボルト固定交換可能型フィッシュテールを採用する。	溶接固定。
	交換可能型コピーカッターユニット採用する。	カッタースポーク内掘付式。
	コピーカッタービット固定をホルダーとボルトで行う。	溶接固定。
カッター駆動部		
カッターモーター	75kw×14台高出力インバータ制御を採用し、Old Alluvium層掘進時の高速推進、低負荷運転を目指す。花崗岩対応の高速回転およびカッターヘッド等への損傷を防止する目的で、最適回転数に調整する。	30~45kw定速モーターが一般的。
	$\alpha=2.9$ 最大回転数=1.98rpm	同一シールド径の一般的な性能の2倍程度。
土砂シールドの設置数量	長時間連続運転による高熱化を監視、防止するため、減速機内に温度計を設置する。	設置するケースは少ない。
土砂シールド掘削面の材質	4枚リップシールドを3段設置し、土砂シールド性能の耐久性を増加する。	4枚リップシールド×2段設置程度。
土砂シールド掘削面の材質	高張力鋼(H780)採用を採用し、シールド掘削面の寿命を向上する。	SS400を使用。
土砂シールド掘削面周辺	長時間連続運転による熱影響の防止のため、シールドの水冷却とシールド内温度の監視する。	
スクリーコンベア		
バルクヘッドゲート	バルクヘッドのスクリーコンベア部にゲートを設置する。スクリーコンベアの緊急時メンテナンスを想定する。	設置するケースは少ない。
本体(オーガー)	4分割構造とし、部分的な交換を想定する。耐摩耗性を考慮し、先端3ピッチ分のフライト表面裏面に硬化肉盛で補強。4ピッチ目以降も外周側面に硬化肉盛を施す。また、3ピッチ分のフライト厚みを4ピッチ以降より肉厚にする。	2分割程度で、先端フライト外周側に硬化肉盛。
ケーシング	7分割構造とし、特に先端側は半割り構造とし、部分的に磨耗激化したケーシングを交換する。また、先端内周面下半に耐摩耗板を設置する。	2~3分割程度。
	二重ケーシング(内筒・外筒)構造を採用し、耐摩耗寿命を延ばす。	単ケーシング。
排土能力	高速施工と十分に余裕を持った運転を行うため、325m ³ /hrの性能を持たせる。	同一シールド径の1.3~1.5倍。
中折れ装置		
中折れストローク	ストローク750mmを採用し、掘進組立同時施工とカッターヘッドメンテナンス時の前後後退を想定する。	中折れ角度に応じたストローク量(今回113mm+ α)。

坑・地上基地設備を計画することが重要であった。特にその中でも土砂搬出について、平均日進量 13m を確保して工事継続するためには、一日当たり 1,200m³ 以上の土砂搬出設備能力が必要であった。

当プロジェクトにて計画、採用した土砂搬出システムを表-9にまとめる。その他の設備詳細については、本報告書紙面の制約上より省略する。

5. 工事への取り組み

表-7 セグメントに関する工事仕様書の要求事項

設計	メンテナンスフリーで100年耐用保障 すべての設計荷重、運搬時荷重、施工時荷重に対してクラックを生じさせない断面とする ボルトナット等のセグメント付属品についても100年耐用とする BS基準に準拠する
継手締結方法	ボルト締結あるいはダウエル継手
コンクリート	水密なコンクリートとするため、ポゾラン(フライアッシュ、高炉水砕スラグ)あるいはマイクロシリカを使用 セメント量は370kg/m ³ 以上
シール材	シール材は、最大作用水圧に対して安全率2.5で設計する
セグメント覆工止水性	漏水率は1リットル/day/m ² 以内とする
グラウトホール	セグメントリングには最低2セグメントピース(Kセグメント除く)にグラウトホールを設置する
施工誤差	継手の目違い、目開き3mm以内

表-8 T-02 工区のセグメント形状仕様

形状寸法	セグメント内径: 6,455mm セグメント幅: 1,500mm セグメント厚: 250mm
リング分割	5+Kセグメント(軸挿入型)
ジョイント構造	リング継手: 平面突合せ+位置合わせ用凹凸+斜め直ボルト セグメント継手: 平面突合せ+斜め直ボルト
シール材	ダブルシール、 外側EPDMガスケット、内側水膨張シール

表-9 土砂搬出システム

設備位置	設備名称	主な仕様
シールド	スクリーコンベア	径φ870mm 排土能力325m ³ /h
後方台車	ベルトコンベア	運搬距離59.7m ベルト幅1,200mm 運搬能力348.5m ³ /h
坑内	機関車編成	編成数4セット 1編成:機関車1台 x セグメント台車 1台 x 裏込運搬台車1台(2編成に連結) x ずり鋼車 6台
	ディーゼル機関車	重量25ton エンジン出力136kw 総台数5台
	ずり鋼車	容量8m ³ 総台数25台
	軌条設備	全線7.7km複線化 ポイント:Y(移動式)1セット、X(固定式、坑口)1セット、N(固定式、坑内)3セット、トラバーサー(立坑下)1セット
立坑	門型クレーン	ホイスト25tonx2基 ホイスト巻上下:速度最大19.4m/分(全負荷時) 最大32m/分(空荷時)

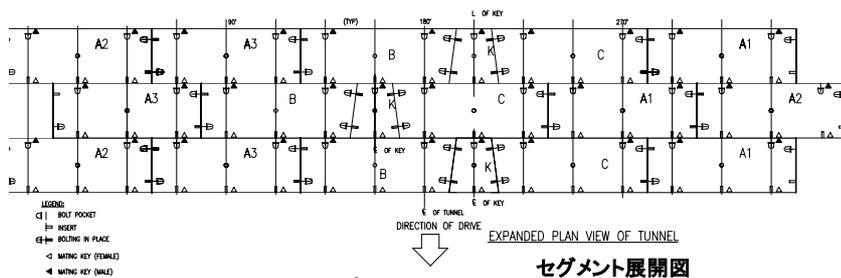
5.1 通常 OA 層の掘進

φ7160mm の土圧式シールドは、90m の初期掘進と本掘進への段取替えを行った後、7.7km先の到達立坑に向けて 2001 年 4 月 19 日に本掘進を開始した。この時点では、花崗岩層に到達する 6.9km付近まで OA 層を対象土質と想定していた。(高水圧帯水砂岩層への遭遇は未想定であった。)

この OA 層の掘進では、計画平均日進量 13m という高速施工をいかに行うか、また、非常に磨耗性の高い地盤における機械磨耗をいかに減らすか、が最重要課題であった。平均日進量 13m を確保するために最大日進量 21m 以上を目指した。これらの課題に対して、実施した対策の中で、特に重要なものを以下に示す。

① 予防措置的なメンテナンス

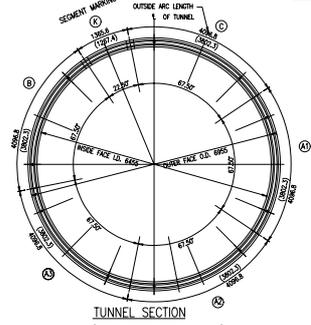
カッタービット、カッターヘッドおよびスクリーコンベアなど、切削排土を行う部分の機器設備に対して、摩耗



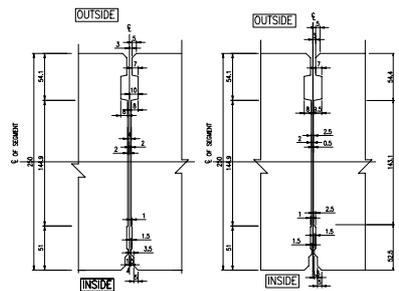
LEGEND:
 □ BOLT POCKET
 ⊕ KEY
 ⊕ MATING KEY IN PLACE
 ◊ MATING KEY (FEMALE)
 ◊ MATING KEY (MALE)

DIRECTION OF DRIVE EXPANDED PLAN VIEW OF TUNNEL

セグメント展開図

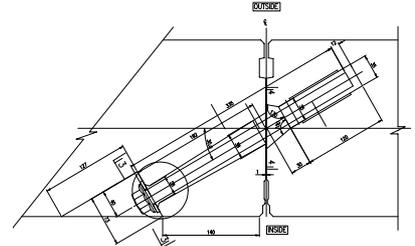


セグメントリング分割



セグメント継手構造

リング継手構造



リング継手ボルト構造

図-5 T-02 工区のセグメント構造図

の予防措置を施すメンテナンスを、時期を先取りして効率よく実施した。シールドの構造本体を磨耗疲弊させることを回避し、平均日進量の確保に影響を及ぼしかねない大きな補修、修理を発生させないことを目指した。また、その他後方設備等についても、日毎、週間、月間のメンテナンスを必ず実施した。

②シールド掘進負荷の低減

最大日進量 21m 以上を長期に継続して達成するためには、低負荷でのシールド連続掘進を行うことが重要な課題であった。特にカッタートルクの低減は、カッターモーター出力を抑制し、機器の高熱化による冷却中断・劣化を最小限にすること、カッターヘッドの磨耗の低減に大きく寄与することが期待された。カッタートルクの低減を図る上で、掘削土の適切な塑性流動化は不可欠である。シンガポールにて入手可能な添加材を種々試みたが、磨耗性が高いばかりでなく、細粒分も 20~30%と適度に含有する OA 層は粘性も高く、添加材の注入で却って粘性が増すような傾向が認められたため、水のみを添加し、掘削土の流動化・泥土化を図った。また、更にシールドの運転負荷の低減を目的として、水とともにコンプレッサーによる圧縮空気を切羽に送り込み、カッタートルクとシールド推進抵抗の低減を図った。

表-10にカッターヘッドメンテナンスの記録、写真-2にカッタービット(Bビット)の磨耗状況を示す。カッタービットの磨耗状況は当初計画していた範囲であったが、その他、フィッシュテールや攪拌翼、隔壁部の磨耗状況は想定

を超えるものであった。

図-6にシールド掘進におけるカッタートルクとジャッキスピードの推移を示す。圧縮空気の切羽送気による掘削土の粘性低下ならびに塑性流動化の効果は大きく、ジャッキスピードを 10mm/分程度増加させても、2,000KNm~2,500KNm のトルク低減が図れた。

図-11に全体のシールド進捗状況を示すが、OA 層の掘進では、日最大掘進量 28.5m、月間最大掘進量 614m、年間最大掘進量 4,779m を達成した。



写真-2 カッタービット(Bビット)の磨耗状況

5. 2 高水圧帯水砂岩層の掘進

5. 2. 1 高水圧帯水砂岩層のシールド掘進経緯

シールド発進後約1年間は、磨耗と取り組みながら OA 層を順調に掘進してきたが、2002 年 3 月末に、高水圧帯水砂岩層という特異な地盤に遭遇した。本地盤は、入札時の想定地盤と大きく異なり、追加土質調査においても確認し得なかった。その区間は、シールド掘進距離 4.7km か

表-10 カッターヘッドメンテナンスの記録

作業開始日	掘進リング		主な作業内容	ビット交換数量(個/コビーはセット)					
	年月日	完了数		区間数	A	B	磨耗検知	コビーカッター	外周
1	01.05.26	311							
2	01.06.16	477	166	ビット点検	0	0	0	0	0
3	01.06.22	511	34	ビット交換	0	0	0	0	4
4	01.07.14	716	205	固定攪拌翼交換・SC点検	0	0	21	1	0
5	01.07.27	838	327	ビット交換	0	29	2	0	0
6	01.08.22	1,056	218	FT交換・ビット交換・SC補修	0	30	1	0	18
7	01.09.05	1,192	136	チャンバー内・外周ビット・外周リング点検・攪拌翼切断	0	0	0	0	0
8	01.09.22	1,319	127	コビーカッタービット交換(SP4)・チャンバー内点検	0	0	0	1	0
9	01.09.29	1,399	80	外周ビット交換・添加材吐出口逆止弁2箇所交換・SC点検	0	0	0	0	12
10	01.10.17	1,562	163	固定攪拌翼交換・ハルクヘッド鉄板溶接・SC補修	0	0	0	0	0
11	01.11.03	1,747	185	ビット交換	0	33	2	0	0
12	01.11.09	1,797	50	ハルクヘッド鉄板溶接・SC点検	0	0	0	0	0
13	01.11.26	1,950	153	ビット交換・ハルクヘッド鉄板溶接・SCケージ溶接	0	16	1	0	0
14	01.12.10	2,095	145	SC補修・ビットホルダー補強・ハルクヘッド補強	0	0	0	0	0
15	01.12.17	2,164	69	FT交換・外周ビットスペーサ挿入	0	0	0	0	0
16	01.12.24	2,221	57	ビット交換・ハルクヘッド補強・SP補強	0	7	0	0	0
17	02.01.02	2,280	59	No.3 添加材吐出口清掃	0	0	0	0	0
18	02.01.18	2,487	207	ビット交換・ハルクヘッド補強・SP補強・SC補修	0	5	1	0	18
19	02.01.28	2,576	89	コビービット交換(SP4)・ビット交換・外周ビットホルダー点検	0	1	1	1	0
20	02.02.24	2,796	220	ビット交換・SC点検・外周ビットホルダー新設	0	18	0	0	0
21	02.03.16	3,014	218	ビット交換・SC補強溶接・FT補強溶接	0	8	0	0	0
22	02.08.26	3,375	361	ビット交換・FT交換・補助リング補修・ビットホルダー補修他	7	69	3	2	11
23	02.11.11	3,806	431	ビット点検・コビーカッター点検・地山確認	0	0	0	0	0
24	02.11.17	3,889	83	コビーカッター修理・カッタービット交換	0	5	0	1	0
25	02.12.04	4,042	153	コビーカッター修理・ビット交換・中間立坑-B4メンテナンス	0	28	0	2	12
26	03.02.05	4,580	538	花崗岩層掘進用面板改造作業 花崗岩総区間のディスクカッター交換は本表より除く					
27	03.09.11	4,755	175	面板復旧作業	36	72	0	1	12
28	03.10.19	4,782	27	コビーカッター油圧ライン 油漏れ補修					
カッタービット交換数量 合計				43	342	12	8	101	

備考: SC-スクリーコンベア
FT-フィッシュテール
SP4-カッタースポークNo.4

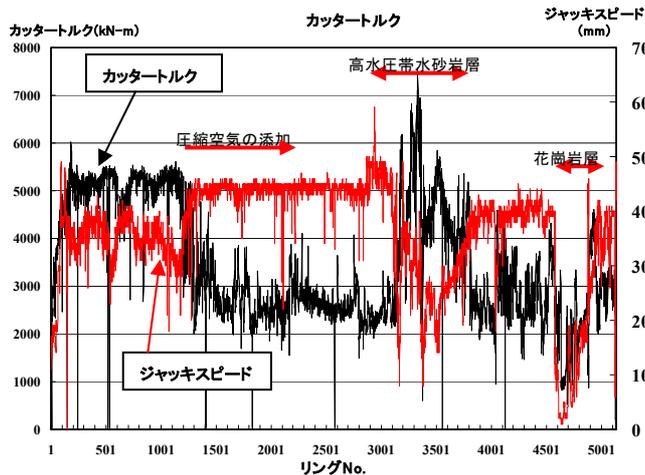


図-6 シールド掘進におけるカッタートルクとジャッキスピードの推移

ら約1km続いた。

この高水圧帯水砂岩層の掘進では、以下の問題が発生した。

①切羽作用圧の上昇

OA層掘進時の切羽作用圧としては0.02MPa程度であったものが、0.2~0.3MPaまで切羽圧が上昇した。

②高圧地下水の切羽への流入

シールドチャンバーからの排水試験を実施した結果、毎分5~10m³の流入量が確認された。

③スクリーコンベア排土ゲートからの土砂噴発

掘削土がスラリー化し、スクリーコンベア内でプラグ形成が不可能となり、掘削土砂のスクリーコンベア排土ゲートからの噴発が頻繁に発生した。

④ベルトコンベアによる掘削土の搬出不能

スラリー化した掘削土砂は、ベルトコンベアにて搬出不能となり、ベルトコンベアの下、トンネルインバート部に滞積し、人力による搬出を強いられた。

⑤カッタートルクの急激な上昇

OA層掘進時には2,000~3,000kNmの範囲(圧縮空気送気後)で推移していたものが、最大で4,000kNm程度上昇し、6,000kNmを超え一時的には8,000kNmに達した。図-6を参照。

⑥カッターヘッドメンテナンスの実施不可能

5.1項の表-10に示すように高水圧帯水砂岩層に遭遇するまでは、予防措置的なカッターヘッドメンテナンスを定期的実施してきた。高水圧帯水層では切羽への多量の地下水流入のため、カッターヘッドメンテナンスが実施できなかった。

高水圧帯水砂岩層遭遇後、吸水性ポリマーの切羽添加、シールド掘進パラメーター(カッターチャンバー圧力、カッタートルク、掘進スピード、スクリーコンベア回転数等)の調整などにより、約400mは掘進を継続した。しかし、掘進距離5.1km付近を掘進中、ベルトコンベア上の排土中にフィッシュテールの部品が発見されたので、直ちに掘進を中断した。シールドメーカーとも協議した結果、カッターヘッドに修復不可能な損傷が生じることを防ぐため、この位置にて補修・修理メンテナンスを実施することとした。表-11に高水圧帯水砂岩層におけるシールド掘進経緯状況一覧を示す。

5.2.2 カッターヘッドメンテナンスを行うための対策工の選定

カッターヘッドのメンテナンスを実施する上で、毎分5m³以上の高圧地下水の流入をどのように処理するかが最大の課題となった。圧気工法、凍結工法などの適用性を検討したが、透水係数が10⁻³オーダーの多孔質な地盤であることによる漏気の問題や、多量の地下水の流れにより凍結が効かない可能性が高いこと、また、凍結管を設置する

表-11 高水圧帯水砂岩層におけるシールド掘進経緯

日付(2002年) (月/日)	掘進距離 (発進立坑より)	掘進経緯
3/25~3/26	4662m~4707m	掘削土がスラリー化する。シールド推力が7,000kNから急激に13,000kNまで上昇。ジャッキスピードを45から25mm/分まで減速させる。
3/27~5/7	4707m~5055m (4950m付近)	スクリーコンベアゲートからの掘削土噴発が頻繁に発生。 掘削土の性状が明らかに変化。色:茶系→グレイ系、粒度組成:細粒分が減少、砂分が増加。 掘削土の中にOld Alluvium層には含まれない炭化した木片、黄鉄鉱片、砂岩片を確認。 掘削土のスラリー化のため、ベルトコンベアによる搬出不可、人力搬出を行う。 切羽作用圧が0.25MPaまで上昇。 シールド推力35,000kNまで上昇。 カッタートルク6,000kNm以上。 カッターモーターの高熱化による掘進中断を強いられる。 ジャッキスピード10mm/分以下で推進。 吸水性ポリマーによる切羽添加を実施。 裏込材の配合を高強度、早強化。 シールド直後のセグメント周りに止水注入(Stage-1)実施。 チャンパーよりの排水試験実施。
5/10	5059m	フィッシュテール部品をベルトコンベア上に発見、シールド掘進を中断。
5/11~8/25	5085m	地盤止水注入(Stage-2,3,4,5,6,7)を実施。 各地盤注入Stage終了毎にチャンパー排水試験を実施。
8/26~9/14	5085m	カッターヘッドメンテナンス、修理実施。
9/15~9/16	5085m	シールド掘進再開準備。
9/17	5085m	高水圧帯水砂岩層のシールド掘進再開。
9/18~11/7	5085m~5672m	高水圧帯水砂岩層のシールド掘進を継続。 切羽添加材の調整・作用効果ならびにシールド掘進パラメータの調整により、噴発などの発生頻度はシールド中断前より減少傾向。
11/8	5688m~5713m	切羽管理圧を0.1MPa以下に下げても掘進可能。 掘削土の性状が変化。色:グレイ系→茶系、粒度組成:細粒分が増加。
11/9~11/11	5713m~5731m	通常のOld Alluvium層の掘進状況。
11/11	5731m	切羽の地山状況確認、カッターヘッド状況確認。

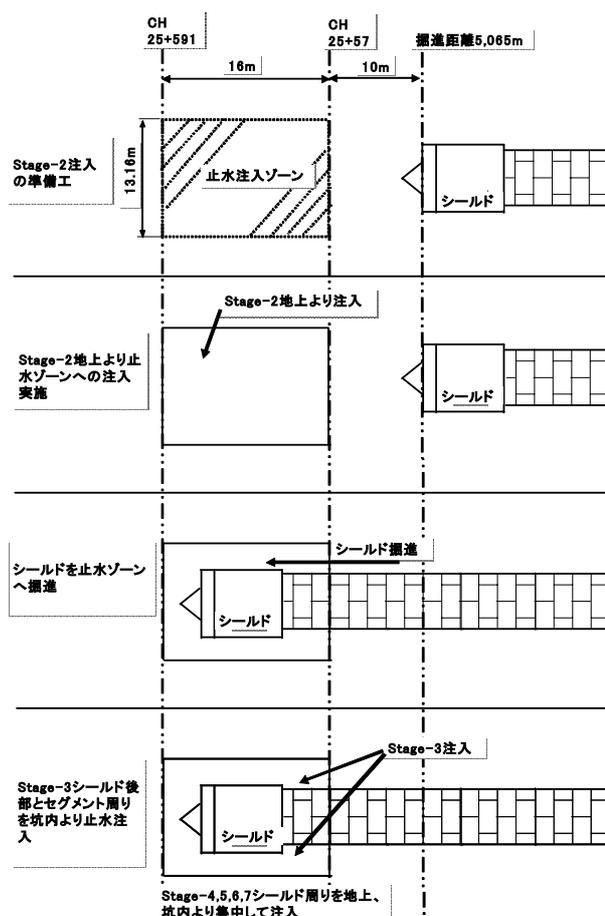


図-7 高水圧帯水砂岩層における地盤止水注入

上での地上の作業基地確保の制約があることなどから、これらの採用は見送った。最終的には、地盤止水注入にて極力地下水の流入を抑え、排水工法を併用し、カッターヘッドのメンテナンスを実施することとした。

5.2.3 地盤止水注入工

前項5.2.2の地盤止水注入工について、切羽への地下水流入量 5~10m³/分を1m³/分以下に抑える事を目的として、以下の手順にて計画し実施した。

- ①Stage-1:高水圧帯水砂岩層遭遇後 250m 付近にて後方からの地下水流入を遮断することを目的として、シールドの直後のセグメント覆工周り24m 区間に止水注入を実施。
- ②Stage-2,3:高水圧帯水砂岩層遭遇後 400m 付近、シールド掘進を中断した後、カッターヘッドメンテナンスを行うため、シールド前方 10m の位置に止水ゾーンを形成するために地上と坑内より止水注入を実施。

図-7を参照。

- ③Stage-4,5,6,7:Stage-2,3 の止水注入を補完し、切羽への流入量1m³/分以下を確保するために、地上と坑内よ

りシールド周りに集中して止水注入を実施。

図-7を参照。

Stage 毎における地盤止水注入の効果は、切羽からの排水試験を行い確認した。Stage-1~7 の地盤止水注入を実施した結果、当初 5~10m³/分の流入量を 0.1m³/分以下に抑えることができた。各 Stage において使用した止水注入材料種類、注入量ならびに排水試験結果を表-12に示す。

5.2.4 カッターヘッド、その他の破損状況

地盤止水注入+排水工法により、切羽前面における安全な作業環境を確保した後、カッターヘッドメンテナンスを2週間にわたり実施した。その期間において、確認されたカッターヘッドの破損状況は、以下の項目である。

- ①フィッシュテール、ビットの脱落
- ②カッタービットホルダーの脱落
- ③補助スポークの変形と溶接部損傷

表-12 地盤止水注入工と排水試験結果

排水試験/ 地盤止水注入工	期日・期間 (2002年)	排水試験結果		地盤止水注入実績	
		排水量 (リットル/分)	切羽圧変化 (切羽天端圧力)	注入箇所 注入方法/注入材	注入量 (リットル)
第1回排水試験	4/8	800			
止水注入Stage-1	4/26~4/28			シールド直後のセグメント外周 単管/懸濁型(LW)/溶液型(Nタイト)	18,456
第2回排水試験	4/29	1,000	0.26MPaから 0.21Mpaへ降下		
第3回排水試験	5/9	4,000~4,500	0.25MPaから 0.14Mpaへ降下		
止水注入Stage-2	5/21~6/15			地上より シールド前方10m 2重管/溶液型(Nタイト)	244,798
止水注入Stage-3	6/23~6/30			地上/坑内より シールド周り 単管/溶液型(Nタイト)	92,532
第4回排水試験	6/30~7/2	1,000~2,500	0.25MPaから 0.10Mpaへ降下		
止水注入Stage-4	7/2~7/15			地上/坑内より シールド周り ダブルバッカー/マイクロアインセメント/ 溶液型(MGD77)	54,606
第5回排水試験	7/16	1,200	0.26MPaから 0.15Mpa降下		
止水注入Stage-5	7/17~8/18			地上よりシールド 周り ダブルバッカー/溶液型(MGD77)	132,904
止水注入Stage-6	7/25~8/6			坑内より シールド周り 単管/溶液型(MGD77)	69,048
第6回排水試験	8/13	80	0.26MPaから 0.04Mpaへ降下		
第7回排水試験	8/14	85~650	0.26MPaから 0.00Mpaへ降下		
止水注入Stage-7	8/18~8/25			坑内より シールド周り 単管/溶液型(MGD77)	10,652
第8回排水試験	8/26	40~100	0.26MPaから 0.00Mpaへ降下		
総注入量					622,996

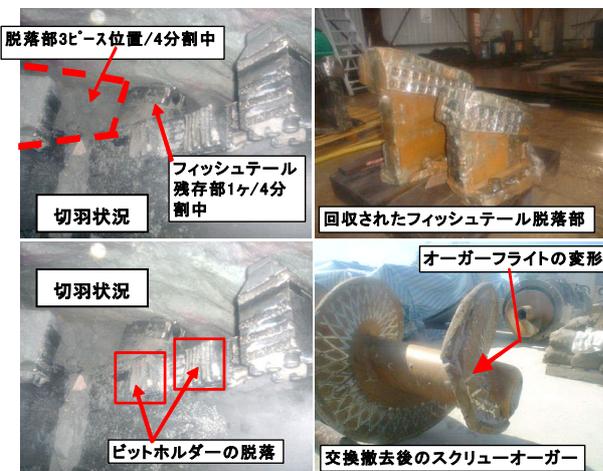


写真-3 カッターヘッド破損状況

- ④チャンバー内隅角部の鋼板破損
- ⑤スクリーコンベアオーガーの破損

写真-3にカッターヘッド破損状況を示す。

①～⑤の破損状況をシールドメーカーの設計担当者とともに詳細に調査し検討した結果、①の脱落したフィッシュテールが切羽前面よりチャンバー内に取り込まれる過程で、②～⑤の損傷・破損状況を引き起こしたものと考えられた。①のフィッシュテールの脱落は、3. 土質条件の項

で示したように換算N値1500を超えるような強度を持つ砂岩層に遭遇したため、カッターヘッドへのフィッシュテール本体固定部ボルトが破損したものと推定された。実際に切羽に出現している砂岩層状況、ならびに回収されたフィッシュテールの状況よりそのことが確認された。

5. 2. 5 カッターヘッドの補修とその後の掘進

5. 2. 4の⑤スクリーコンベアの損傷について、残る掘進距離がまだ2,700m以上と長いことから、地盤止水注入工の実施期間中に、隔壁部のスクリー取込ロケットを閉鎖することで止水性を確保し、スクリーコンベア1式を予備品のスクリーコンベアと交換した。②～④については、溶接による応急措置的な補修を行い、後の高水圧帯水層脱出後、本格的な補修を実施した。

5. 2. 4の①フィッシュテールについて、今後も想定を超える強度の砂岩層に遭遇する可能性があることから、フィッシュテールの地山貫入時のカッターヘッド取り付け部へのモーメント力の低減を図るため、フィッシュテール高さを当初655mmから430mmに変更し、取り付けた。

シールド掘進を4ヶ月間中断し、地盤止水注入工とシールド補修・修理を実施後、掘進を再開した。シールドの負担を極力軽減するため、掘進スピードを抑え、カッタートルクや推進力を低減させながら、625mを掘進、2002年11月初めに高水圧帯水層砂岩層を脱出することができた。

5. 3 花崗岩部の対策と掘進

5. 3. 1 花崗岩出現エリアにおける追加土質調査

工事着工直後に実施した追加土質調査ボーリングに加え、花崗岩出現エリアに集中して、20以上の更なる追加ボーリングを実施した。図-8に花崗岩部の縦断図を示す。

5. 3. 2 トンネル線形の変更

トンネル水平線形を下記の3ルートに絞り、それぞれのリスク調査、コスト評価の検討を行った。

- ①基本設計案：高速道路境界内の南側を沿う線形。
- ②北側ルート案：高速道路の北側にシフトする線形。
- ③南側ルート案：高速道路境界外側の南側へさらにシフトする線形。①基本設計案よりトンネル中心を約20m南側へシフトする。

検討の結果、花崗岩部掘進が直線かつ最も短くなり、トンネル中心直上と高速道路との離隔が確保できる③案を採用し、承認を得た。

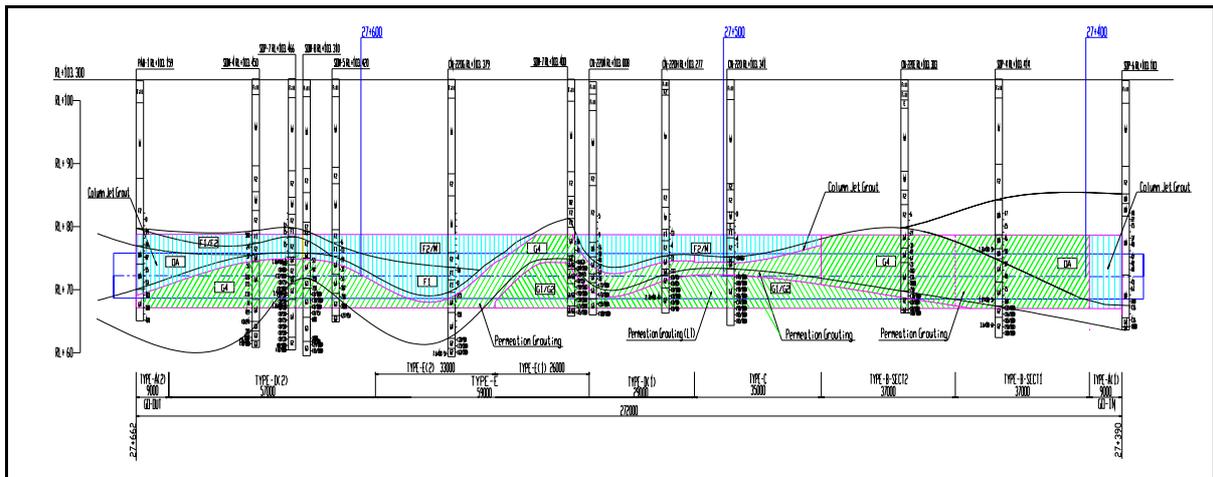
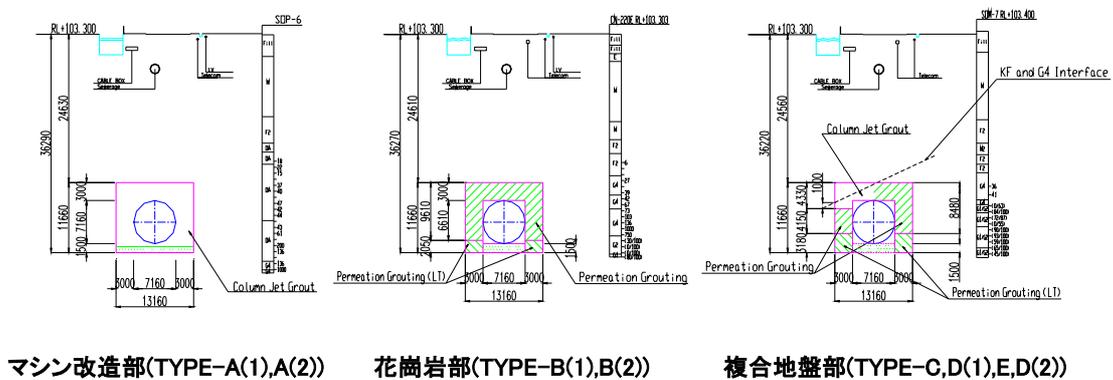


図-8 花崗岩部の縦断面



マシン改造部(TYPE-A(1),A(2)) 花崗岩部(TYPE-B(1),B(2)) 複合地盤部(TYPE-C,D(1),E,D(2))
図-9 地盤改良断面

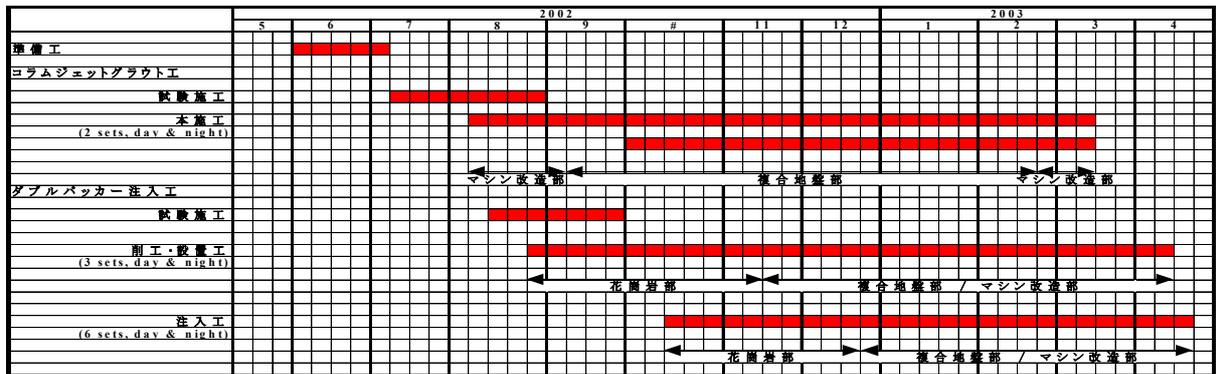


図-10 花崗岩部の地盤改良工の工程

5.3.3 地盤改良工事

花崗岩 G1、G2層とG4層および Kallang Formation の F1、F2、M 層の複合地盤をシールド掘進するに際して、岩対応土圧バランスモードによる掘進ではシールド前面上部の G4 層、kallang Formation の崩落が予期された。また、花崗岩強度(100Mpa~200Mpa)を考慮するとカッタービット、ディスクの交換をかなりの頻度で強いられる事にな

り、交換時(1日~3日間)の切羽安定の確保は不可欠の条件であった。以上より、上部高速道路や周辺構造物への影響を最小限に止め、ディスク交換時の安全を確保するため、地盤改良を計画実施した。

花崗岩掘削には OA 層を対象としたシールドでは対応できない。花崗岩区間に入る前と花崗岩掘削完了後に、OA 層対応シールド⇔岩対応シールドの改造が必要であった。

改造には約一ヶ月を要すると考えられた。そこで、花崗岩区間の両外側で、シールド改造位置を限定し、その位置で切羽前面を一ヶ月開放しても崩壊や地上への地盤変形が生じないようにそれぞれの区間にて地盤改良を行うこととした。図-9に地盤改良断面を示す。図-10に地盤改良工の実施工程を示す。表-13に地盤改良工全体数量をまとめる。

表-13 地盤改良工全体数量

目的	仕様	数量			
		施工間隔	平均改良長	施工本数	改良土量
		(m)	(m)	(本)	(m ³)
コラムジェットグラウト (OA層およびF1,F2,M層を対象) - 地盤強化					
マシン改造部	φ900mm全断面改良	1.55	11.66	65	1,381
	φ1800mm全断面改良		9.98	65	1,182
複合地盤部	φ1800mm門型改良		3.75	1,082	8,864
ダブルパッカー注入 (G4層およびG1/G2層を対象) - 地盤止水					
マシン改造部	全断面改良	1.00	1.65	95	317
花崗岩部	門型改良		6.50	799	7,561
複合地盤部	全断面/門型改良		4.20	1,421	9,528

5.3.4 シールドの岩盤掘削対応への改造

花崗岩区間の土質調査を基に、シールド改造計画を詳細に検討した。その結果、改造はカッターヘッド改造に留め、カッター心臓部(カッターモーター、モーター減速機、カッターベアリング)の改造を行わなくとも、シールド掘進スピードは極端に減速するが、岩掘削が可能との結論に至った。

カッターヘッドの改造は、岩盤区間に進入する 6,900m まで OA 層を掘進することを踏まえ、その大部分を岩盤区間進入前に実施することとした。OA 層の掘削だけを考えても、その高磨耗性ならびに契約工程から求められる高速掘進性は、今までの経験や常識を遥かに超えるものである。したがって、カッターヘッドのデザインは OA 層掘進を優先したスポーク配置とビット配置を行った。その上で、花崗岩対応の改造を計画した。カッターヘッド改造の主要点としては次の2点である。

①ディスクカッターの装着

OA 層掘進を最優先させたため、ディスクカッター装着ボックス形状寸法の制約から、ディスク径としては、通常このマシン径クラスの岩盤掘進に対して用いられる17インチのディスクではなく、14インチ(36cm)となった。装着ディスク全個数としては、一般部1パス、外周部2パス、ゲージ部3パスの全35ヶとなった。14インチ(36cm)ディ

スクの許容押し付け力は20ton/個である。オーバーカット量は 31.5mm を確保する。

②カッターヘッド開口率の改造

OA 層掘削時のカッター開口率は、掘削土の取り込み最適化と泥土圧掘進を鑑み、70%を設定した。これに対し岩盤掘進では、チャンバーおよびスクリュー内閉塞の防止ならびに岩盤破砕塊や風化岩塊の取り込み制限を行うため、37%の開口率を設定した。この開口率を基にカッタースポーク間にリブと面板の装着を行った。

図-4に改造後の岩掘削対応のカッターヘッド構造を示す。

5.3.5 花崗岩区間の掘進方法

シールド断面に現われる土質分類別に、花崗岩区間を詳細に区分して、その区分毎の掘進方法、掘進管理方法を検討した。特に岩盤がシールド前面に露頭してからシールド掘削断面に対して支配的な面積になるまでの移行区間(この反対の区間も含む)は、切羽前面の安定、掘削土の取り込み制御、土圧管理、シールド方向制御など、困難な問題に遭遇する事が不可避である。詳細な掘進方法の策定だけでなく、コンティンジェンシープラン(突発的なトラブルへの対処法)を出来る限り想定しておくことが肝要となる。24 時間対応の監視・連絡体制、緊急時道路封鎖と通行車両の安全確保体制、ならびに地盤注入チームの常時配置を徹底した。

掘削土のバインダー分不足、G 層の境界部や F1 層からの湧水に対して有効となる切羽添加材の適用を検討し、ポリマー系の増粘材、吸水性樹脂材などを準備した。

5.3.6 花崗岩層掘進経緯

(1) 複合地盤の掘進

写真-4に示す花崗岩部の代表的な複合地盤におけるシールド掘進は、切羽下部に出現する花崗岩強度に支配され、1mm~2mm/分のスピードでの掘進を強いられた。この掘進スピードでは、切羽スプリングラインから上部に位置する強風化花崗岩 G4 層あるいは Kallang Formation の部分的な取り込み過多は避けられなかったが、事前に計画、実施した地盤改良工の効果により地上への影響は概ね 20mm 以下の沈下に抑えられた。

(2) 想定を超える高強度花崗岩の出現

花崗岩部の掘進を開始してから 98m 地点では、予想を上回る岩強度の出現によりシールド掘進は中断を強いられた。切羽より採取した岩試料のコア強度は 250~300MPa のオーダーであった。この区間では、特にマシン外周の余掘量を確保するゲージカッターの破損が著しく、



写真-4 切羽の複合地盤の状況



写真-5 ディスクカッター、カッターヘッドの破損状況

Controlled Blasting(PCF, Non-Explosive Rock-breaking Method, 非発破-岩破砕法)による事前の余掘量確保を行い、シールドを押し出すという手順の繰り返しにより、この高強度花崗岩部を乗り越えた。写真-5にディスクカッターおよびカッターヘッドの破損状況を示す。

(3) 残置木杭の遭遇と地盤沈下

花崗岩区間に入ってから145m地点では、G4層内で残置木杭に遭遇した。写真-6参照。木杭の先端は、シールド天端からスプリングライン付近まで達し、切羽下部の花崗岩掘進と木杭自体の切削時に生じる振動の影響により、上部G4層ならびにKallang Formationの部分的な小崩落が生じ、直上地表面において、花崗岩区間最大の地盤沈下を生じさせた。緊急時を想定して地上・坑内に待機していた地盤注入チームにより、小崩落部の空洞充填、およ

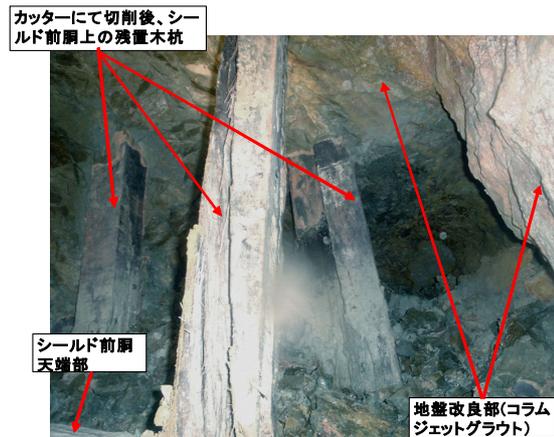


写真-6 シールド前胴上の残置木杭

び強度増加注入を実施し、影響は最小限に止めることができた。

花崗岩部の実施工程としては、前後のマシン改造と再改造に約2ヶ月、花崗岩部272mの掘進に6ヶ月を要した。花崗岩部に要した実掘進期間6ヶ月は、計画時に最も厳しい条件を想定し算定した期間と同様となった。想定を上回る高強度の花崗岩の出現と、残置木杭との遭遇が大きく影響している。

5.4 掘進工程

図-11に全体のシールド掘進工程を当初計画と実施工程を比較して示す。実掘進日当りの平均日進量は14.2m(想定外土質区間の掘進日含む)であり、計画平均日進量13mを上回ることが出来た。全体掘進工程としては、想定外土質である高水圧帯水砂岩層と花崗岩層遭遇による掘進中断、ならびにシールド改造などにより、約10ヶ月の掘進の遅れを生じることとなった。現在、想定外土質による工期延長に関する協議を発注者と行っている。

T-02工区のシールドは、土圧式シールドでは世界最長級の7.7kmの掘進を終え、2003年12月19日に到達立坑にその全姿を再度現した。到達時の状況を写真-7, 8に示す。

6. おわりに

シンガポール大深度トンネル下水道システムの一部を構成するT-02工区トンネル工事は、土圧式シールドによる7.7km掘進という長距離施工であったが、沖積層、洪積層から岩盤までと多岐に及んだ土質に対して、磨耗、水、岩等の障害をいかに克服し、また、計画平均日進量13mという高速施工をいかに実現するか、という戦いであった。

本報では、数々の計画と対策工の中で、シールドや地盤改良工などに焦点を絞って報告したが、紙面の都合上

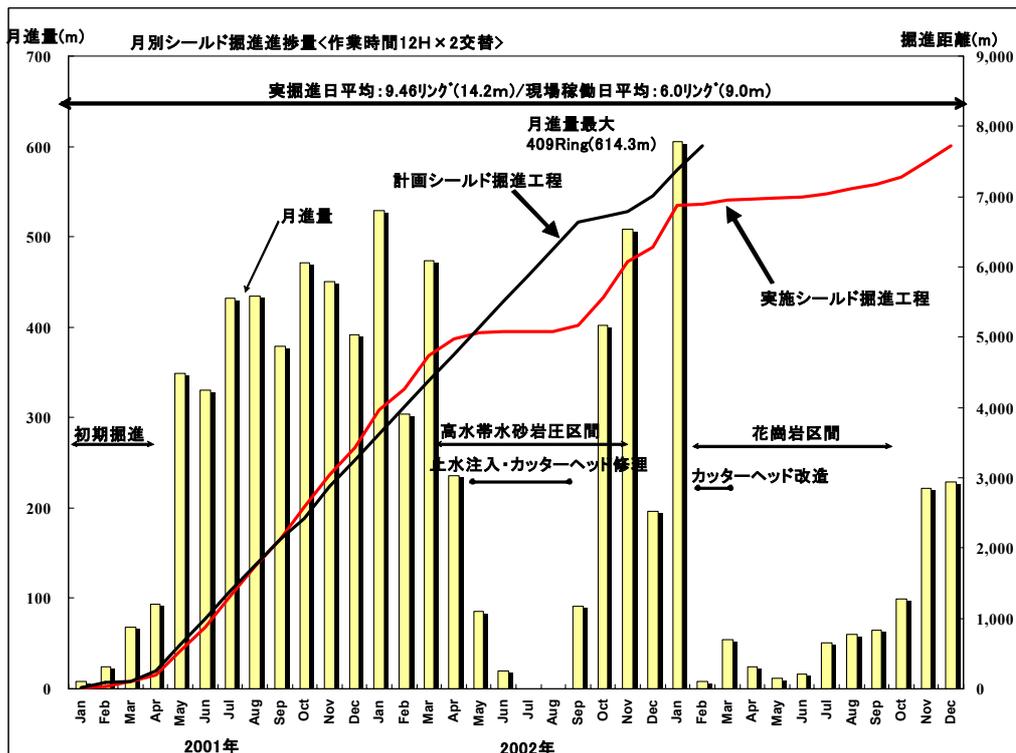


図-11 全体シールド掘進工程(計画と実施)

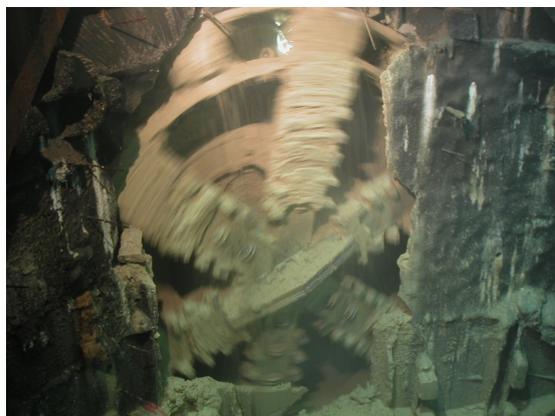


写真-7 シールド到達時-到達鏡部の切削状況



写真-8 シールド到達完了

省略した後方設備、立坑・地上機器設備、工事組織などを含めたプロジェクト全体の各構成要素が、バランス良く計画され、運用されることが肝要であることを改めて痛感した工事であった。

最後に、この世界最長級の土圧式シールド工事に対して、数々の提言、助言、実際のサポートを行って頂いた全ての関係者に感謝致します。

参考文献

- 1) シンガポール大深度トンネル下水道システム発注者 Public Utilities Board HP: <http://www.pub.gov.sg/deeptunnelseweragesystem.htm>
- 2) Dames and Moore (1983)
- 3) The report in Geology of Singapore (PWD, 1976)
- 4) The Old Alluvium in MRT Changi Airport Line (Peart et al., 2001)