

シンガポールにおける TBM 急曲線施工 Construction of tight curve by TBM in Singapore

岡本 義洋 * 有村 真二郎 *
Yoshihiro Okamoto Shinjiro Arimura
上田 幸生 **
Yukio Ueda

要 約

シンガポールにおけるシールドトンネル工事は、地下鉄工事と上下水道工事が中心であり、これまで急曲線施工は実施されていない。曲線半径 75 m のトンネルは、シンガポール国内では最小半径のトンネルであり、工事開始時より企業先からの注目も高い工事であった。企業先からは、急曲線部における高い精度および品質の確保を求められた。急曲線区間対応として、幅 1.0 m の合成セグメントを採用し、セグメント位置の保持とシールドマシンの運転性を確保するために補助工法として限定注入用袋付きセグメントによる充填工法を使用した。これらの対応により、大きなトラブル無く曲線部の施工を完了することができた。本報告は、急曲線施工への対応策、補助工法の概要および施工実績について述べるものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 全体工事概要
- § 3. シールドマシンの特徴、土質条件
- § 4. 急曲線部の施工計画
- § 5. 施工実績および計測結果
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

ケーブルトンネル工事はシンガポールパワーアセットが発注者となり、次世代の電力需要に備え整備される超高压送電線用トンネルである。東西地区と南北地区に伸

びる総延長 35 km におよぶトンネルは 6 工区に分割発注された。ケーブルトンネルは地下幹線道路や地下鉄、下水道幹線を避け 30 m から 60 m の深さに建設される。

本施工区間の EW3 工区は東西線の最東部に位置し、トンネル延長 5.5 km、仕上がり内径 6.0 m のトンネルを 2 台の土圧バランス式シールドマシンを使用して建設するものである。本報文では、このうちの曲線半径 75 m の急曲線部の施工に採用した対応策、補助工法および施工実績について述べる。

§ 2. 全体工事概要

本工区のトンネルは、エアポート立坑にてシールドマ

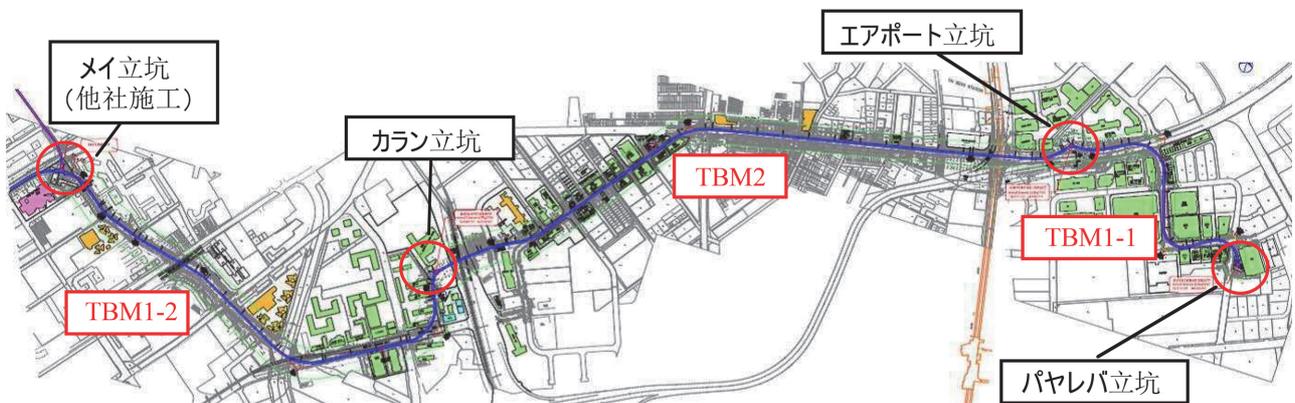


図-1 全体平面図

* シンガポール営業所ケーブルトンネル(出)

** 国際事業本部技術部土木設計課

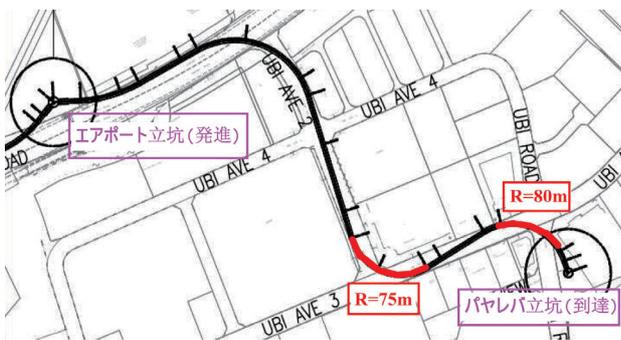


図-2 急曲線部位置図

シンを2台組立て、パヤレバ立坑に向かい東へ1.0 km (TBM 1-1)、カラン立坑に向かい西へ2.6 km (TBM 2)を同時に掘進する(図-1参照)。パヤレバ立坑に到達したシールドマシンは解体し、カラン立坑へ運搬後に再度組立て、さらにメイ立坑(隣接工区)に向かい東へ1.9 km (TBM 1-2)を掘進する。エアポート立坑～パヤレバ立坑区間には、半径75 mと80 mの急曲線区間が存在する(図-2参照)。

§3. シールドマシンの特徴, 土質条件

(1) シールドマシン

シールドマシンは、日立造船社製のマシンを採用した(写真-1)。シールドマシンの仕様を表-1に示す。

シールドマシンの仕様は、契約条件書の要求に対応し、下記のような特徴的な機能を装備した。

- ①硬岩に対応できるようにカッタービットとディスクローラービットが変更可能な構造とした。
- ②最大土被りが60 mのため6 barの土圧に対応できる仕様とした。
- ③カッター交換時の圧気作業に対応できるように圧気設備(Man lock, Material lock, Medical lock)を設置した。
- ④テールからの漏水を防ぐため、テールブラシを4段設置した。
- ⑤作業箇所の温度を29℃以下に保つよう冷却装置を設置した。
- ⑥機内からの先行探査ができるシステムを装備した。

(2) 土質条件

トンネル掘進部分の地盤条件は、全線においてオールド・アルビウム層 Old Alluvium (Old Alluvium, 洪積の固結砂質土; 以下 OA 層)である。OA 層は、固結度に応じて分類され、風化度が小さい方から大きい方に A ~ E に区分される。本論文で対象とする急曲線施工区間の地盤は、主に OA (A), OA (B) となり、N 値は50 以上と風化度が非常に低く固結した土質となる。図-3 および図-4 に、全体および急曲線施工区間の土質縦断面図を示す。

表-1 シールドマシン諸元

シールドマシン諸元(日立造船株式会社)

シールドマシン	
マシン外径	6880 mm
最大推力	1291 KN/m ²
最大速度	70 mm/min
シールドジャッキ	3000 KN x 2100 st x 35 Mpa x 16 本
中折れジャッキ	3000 KN x 900 st x 35 Mpa x 12 本
中折れ角度	左右:±5.5度 上下:±1.0度
カッター	
タイプ	セミドーム
カッタートルク	6730~2560 KN・m
回転速度	0.34~3.57 rpm
スクリュウコンベア(No.1, No.2)	
内径	845 mm (シャフト含む)
最大搬送量	285 m ³ /h
トルク	127/75.4 KN・m
回転速度	1~14 rpm



写真-1 シールドマシン

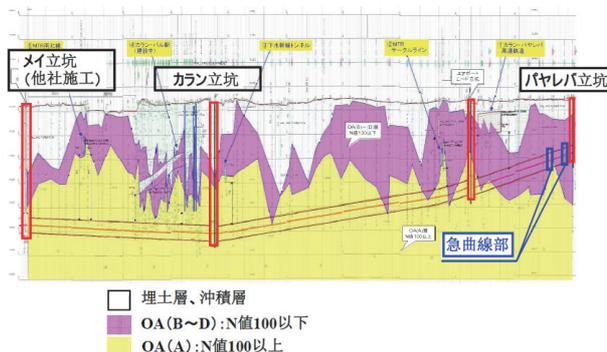


図-3 全体土質縦断面図

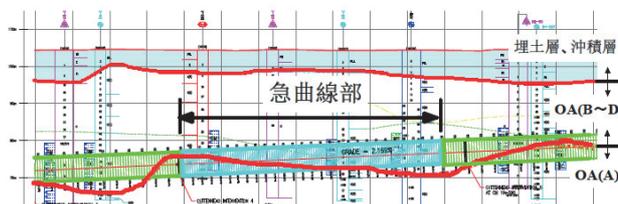


図-4 土質縦断面図(急曲線部)

§4. 急曲線部の施工計画

4-1 急曲線部施工に対する対策工

急曲線部の施工イメージを図-5に示す。施工にあたっては、以下の対策を考え施工計画を行った。

- (1) 中折れ機能を装備したシールドマシンの使用
シールドマシンは、曲線施工に伴う余掘り量を低減さ

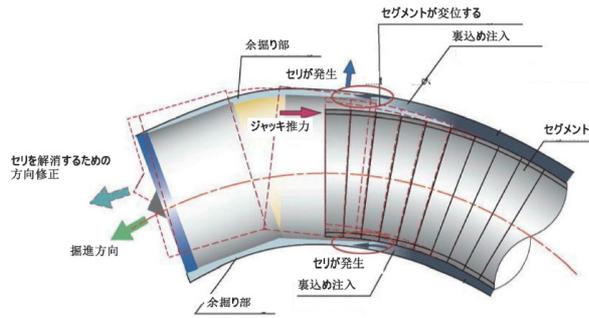


図-5 急曲線部イメージ図

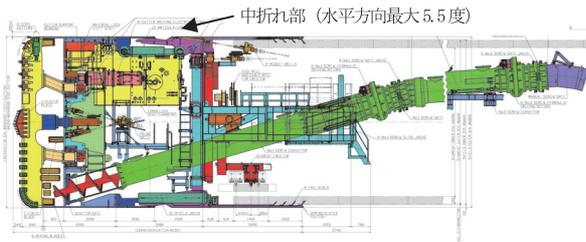


図-6 シールドマシン構造図

せるため、中折れ機能を装備したものを採用した。中折れ機能は中折れ角度4.8度を許容できるものとし、余掘り量は最大で95mmとした。(図-6参照)。

(2) 幅1mの合成セグメントの使用

急曲線箇所を使用するセグメントは、鋼材とコンクリートの合成セグメントタイプとし、推進作用方向の偏芯によって増大するジャッキ反力に対する安全性を確保できる構造とした。セグメント幅は、テールクリアランスを確保するため1.0mとした。シンガポールではシールドトンネル施工においては、セグメントはすべてテーパ付のものを使用し、キーセグメントの位置を調整することで線形の調整を行うのが一般的である。一般部では60mmのテーパを採用したが、合成セグメントはテーパ量を110mmとし、急曲線に対応できるようにした。またリング間のボルト本数は、1リング当たりRCセグメントの11本に対し、32本とした。図-7に合成セグメント構造図を示す。また、RCセグメントと合成セグメントの接合部用特殊セグメントの構造を図-8に示す。合成セグメントは、鋼製部分を中国の工場で作製し、マレーシアの工場にて中詰めコンクリートを打設した。写真-2にセグメント製作状況(打設後)を示す。

(3) 局部充填が可能な裏込め方法の採用

急曲線の施工では、余掘りによる地山の緩み防止と、シールド推進に必要な地盤反力を確保するため、シールドマシンの余掘り部およびテールボイドの充填を適切に行うことが重要である。本施工においては、マシン前胴部から粘土系の中間充填材を同時注入する計画とした。また、テールボイド部は、限定注入用袋付セグメントを使用し、シールド機より出た直後のセグメントを地山に

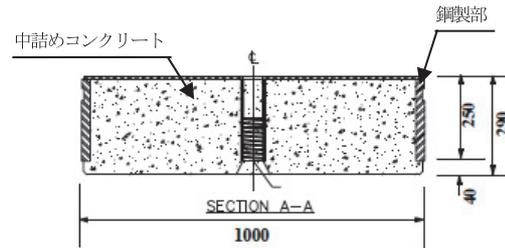
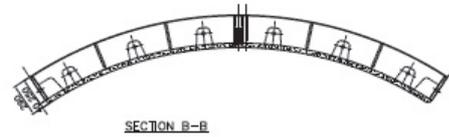
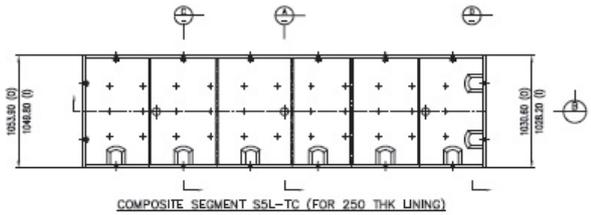


図-7 合成セグメント構造図

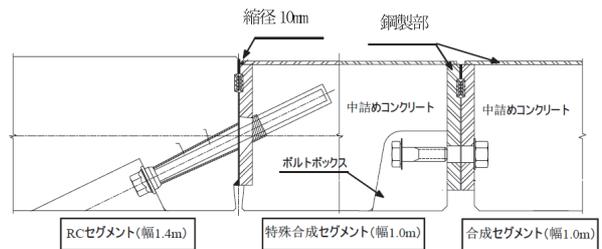


図-8 RCセグメントと合成セグメント接合部構造

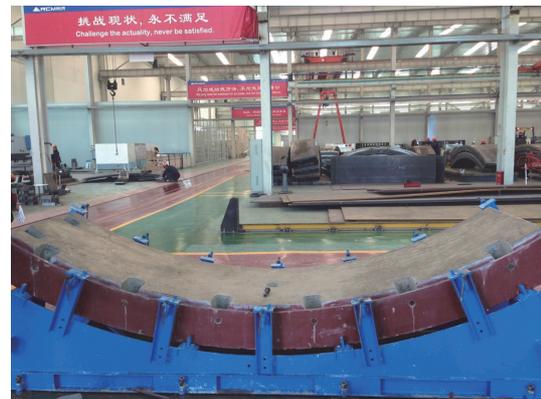


写真-2 セグメント製作状況(打設後)

固定し、急曲線施工に必要なシールド反力を確保した。

限定注入用袋付セグメントの配置図を図-9に示す。設置する数量はカーブの外側に1リング当たり4個、内側に2個とした。注入材のは通常の裏込め材を使用し、B液を増やすことにより、目標とする一時間後の圧縮強度0.3MPaを満足できるようにした。また、限定注入用袋の有効径は膨張時で600mmを確保した。

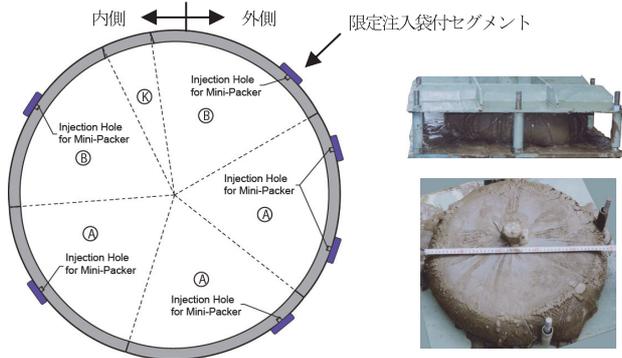


図-9 限定注入袋付セグメント配置図

4-2 施工手順

前述した対策を踏まえ、施工手順を以下のようにした。

- ①シールドマシンがカーブに入る手前のカッター交換時にコピーカッターの磨耗量を確実に把握し、コピーカッターストロークを適切に設定する。
- ②シールドマシンによる掘進、セグメント組立、充填材注入、裏込め注入について計画のシミュレーションを確実にフォローする。シールドマシンの姿勢、ジャッキストローク差、地上の変位計測結果をモニターし、必要に応じて、余掘量、中折れ角、グラウト注入量、注入圧を変更する。
- ③シールドマシンより、遅効性裏込め材を注入開始する。(同時注入)
- ④所定のストロークに達したら、限定注入袋付セグメントのグラウトホールから裏込め材を注入する。(即時注入)

施工フローを図-10、各裏込め材の配合計画を表-2に示す。

4-3 注入管理方法

袋付セグメントへの裏込め材の注入は、シールドマシンおよびセグメントの位置を考慮して毎リングごとに注入量を計算し、管理することとした。施工に使用した注入管理シートを表-3に示す。

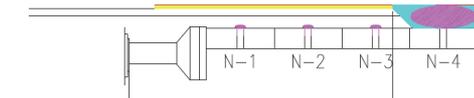
4-4 線形管理

線形確保のため、表-4に示すカーブシミュレーション表を作成した。カーブ手前より中折れ角度を調整し、線形を維持できると考えた。また、測量結果よりシールドマシンの姿勢、セグメントの出来形を注視し、計画の余掘量、中折れ角が適正か判断した。

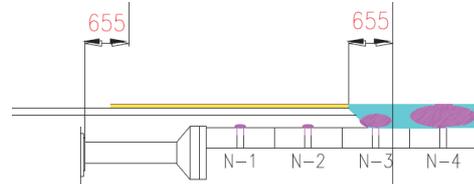
4-5 施工サイクル

1リング当たりのサイクルタイムを掘進からセグメント組立完了まで195分と設定した(図-11)。

①セグメント組立完了後、局所充填用袋材をグラウトホールからねじ込む。使用しないグラウトホールは逆止弁とグラウトキャップを設置する。



②Net stroke 655mmで袋材への裏込め注入を開始する。遅効性裏込め注入後3時間以内にミニパッカーへの注入を完了する。注入量はマシン位置とセグメント位置から求める。



③所定量注入し、次の袋材にバルブを繋ぎかえる。

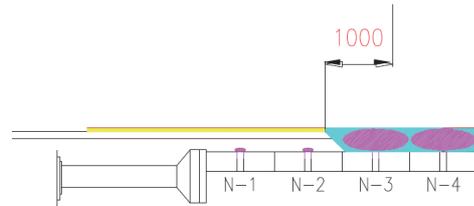


図-10 限定注入裏込め工 施工フロー

表-2 裏込め材 配合計画

裏込め材配合計画(1m³あたり)

速固型 (限定注入袋用に使用)									
A液					B液		ゲルタイム	強度	
セメント	ペントナイト	気泡剤	安定剤	水	空気	珪酸		1時間	28日
350 kg	15 kg	0.1 kg	3.5 kg	645 L	135 L	100 L	10秒以下	0.3 N/mm ²	2.0 N/mm ²

遅固型 (TBMより充填)									
A液					B液		ゲルタイム	強度	
セメント	ペントナイト	気泡剤	安定剤	水	空気	珪酸		1時間	28日
377 kg	16.2 kg	0.1 kg	3.8 kg	695 L	146 L	30 L	5秒以下	—	2.0 N/mm ²

標準部(参考)									
A液					B液		ゲルタイム	強度	
セメント	ペントナイト	気泡剤	安定剤	水	空気	珪酸		1時間	28日
260 kg	15 kg	0.1 kg	2.5 kg	695 L	139 L	75 L	15秒以下	0.1 N/mm ²	2.0 N/mm ²

表-3 注入管理シート

Injection Instructions Sheet

Ring No. 511 DATE 14-Dec-14
Key Position L1

		Displacement from the Tunnel Centre (mm)	
TBM Centre (injection ring excavation)		H: -23	V: 21
Segment Centre		H: 38	V: 47

Mini-packer Position

Packr No.	θ (deg)	Copy Cut Stroke (mm)	Jack No
OUTSIDE			
No.1	45.00	45	3
No.2	67.50	45	4
No.3	112.50	45	6
No.4	135.00	45	7
INSIDE			
No.5	45.00	45	15
No.6	135.00	45	11

Mini-packer Injection Volume & Pressure Setting Table

Packer No.	Thickness of Tail Void (mm)	Injection	
		Volume (L)	Pressure (Mpa)
OUTSIDE			
1	83	66	0.5
2	100	75	0.5
3	77	63	0.5
4	62	56	0.5
INSIDE			
5	83	66	0.5
6	62	56	0.5

Total V = 382 L

表-4 カーブシミュレーション表

シミュレーション用 掘削セグメント番号 RING NO.	SEGMENT セグメント				SHIELD シールドマシン制御			対称リング番号 WORKING RING NO.
	タイプ	外径(mm) UT DIAMETER	幅(mm) Max. WIDTH	テーパ量 (mm) TAPER	中折れ角度	余量(右)	余量(左)	
-14	Si	6600	1400	0.0	0.00	0.0	0.0	P492
-13	Si	6600	1400	0.0	0.00	0.0	0.0	P493
-12	Si	6600	1400	0.0	0.00	0.0	0.0	P494
-11	Si	6600	1400	0.0	0.00	0.0	5.0	P495
-10	Si	6600	1400	0.0	0.00	10.0	5.0	P496
-9	Si	6600	1400	0.0	0.00	10.0	10.0	P497
-8	Si	6600	1400	0.0	0.02	10.0	10.0	P498
-7	Si	6600	1400	0.0	0.13	10.0	10.0	P499
-6	Si	6600	1400	0.0	0.27	15.0	15.0	P500
-5	Si	6600	1400	0.0	0.52	15.0	20.0	P501
-4	Si	6600	1400	0.0	0.95	25.0	25.0	P502
-3	Si	6600	1400	0.0	1.48	40.0	40.0	P503
カーブ(初期)	-2	Si	6600	1400	0.0	2.22	30.0	P504
BEGIN	-1	Si	6600	1400	0.0	2.83	45.0	P505
CURVE	0	Si	6600	1400	0.0	3.82	45.0	P506
	1	T	6580	1000	84.0	4.78	25.0	P507
	2	T	6580	1000	84.0	4.79	0.0	P508
	3	T	6580	1000	84.0	4.79	0.0	P509
	4	T	6580	1000	84.0	4.79	0.0	P510
	5	T	6580	1000	84.0	4.79	0.0	P511~P632
	6	T	6580	1000	84.0	4.79	5.0	P633
	7	T	6580	1000	84.0	4.79	5.0	P634
	8	T	6580	1000	84.0	4.79	20.0	P635
	9	T	6580	1000	84.0	4.48	20.0	P636
	10	T	6580	1000	84.0	3.98	15.0	P637
	11	T	6580	1000	84.0	3.32	10.0	P638
	12	T	6580	1000	84.0	2.51	10.0	P639
	13	T	6580	1000	84.0	1.55	5.0	P640
カーブ(終期)	14	T	6580	1000	84.0	0.68	5.0	P641
END	15	T	6580	1000	84.0	0.66	5.0	P642
CURVE	16	So	6600	1400	0.0	0.41	0.0	P643
	17	So	6600	1400	0.0	0.00	0.0	P644

項目	0	1h	2h	3h	所要時間
掘進	計画	-----	-----	-----	掘進速度 10mm/min 135分
限定注入袋への 裏込注入	計画		-----		30分
セグメント組立	計画		-----		60分
1リングあたり合計	計画	-----			195分

図-11 サイクルタイム (計画)

項目	0	1h	2h	3h	所要時間	比較
掘進	計画	-----	-----	-----	掘進速度 10mm/min 135分	
	実績	-----	-----	-----	掘進速度 24mm/min 73分	-62分
限定注入袋への 裏込注入	計画		-----		30分	
	実績		-----		52分	+22分
セグメント組立	計画		-----		60分	
	実績		-----		115分	+55分
1リングあたり合計	計画	-----			195分	
	実績	-----			187分	-8分

図-12 実際の施工サイクル



写真-3 ボルト締付け作業状況

§5. 施工実績および計測結果

5-1 施工実績

実際の施工サイクルを図-12に示す。1リング当たりの施工サイクルは187分であり、想定していた計画サイクルとおりに施工することができた。掘進速度に関しては、計画ではセグメントへの影響を懸念し10mm/分と想定していたが、実施工ではセグメントへの影響がほとんど見られず、より早い24mm/分で掘進することが可能であった。ただし、セグメントの組立てに想定以上の時間を要した。これは、リングボルトの取付けに時間がかかったためである。ボルトの本数が各ピース6本と通常の3倍の本数を取り付けることに加え、ボルトポケットが非常に小さかった。写真-3に示すように特殊なトルクレンチを使い作業時間の短縮を試みたが、締付け作業に多大な時間を要した。ボルトポケットの構造については、今後の検討課題と考えている。

裏込め注入は余掘量を考慮した数量の100%を目標値として管理を行った。袋付セグメントからの局部充填裏込め注入圧は上限0.5MPaで行い、セグメント固定の目的から注入量管理とした。シールドマシンからの同時注入は注入圧上限0.4MPaの注入圧管理とした。結果として局部充填裏込め注入とシールドマシンからの裏込め注入の合計は平均101.5%の注入率となり、適切な裏込め注入ができた。注入実績のグラフを図-13に示す。また、限定注入袋付きセグメントからの注入状況を写真-4に示す。施工性を考慮し、袋付セグメントからの注入は下部より順番に行った。

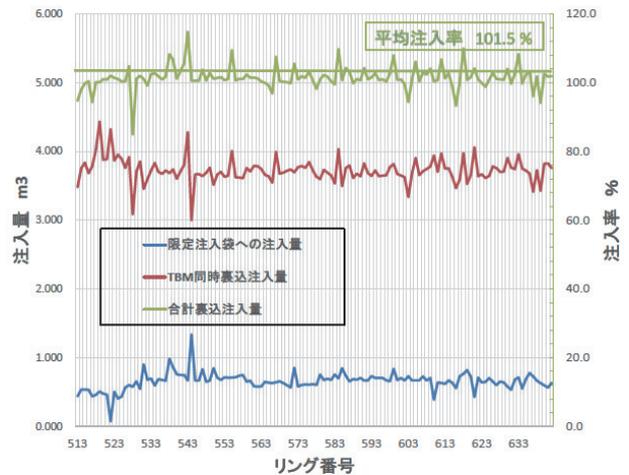


図-13 裏込め注入実績

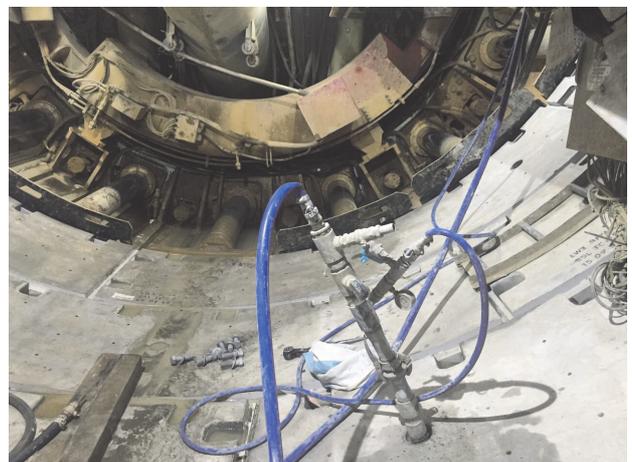


写真-4 裏込め注入状況 (限定注入袋付き部)

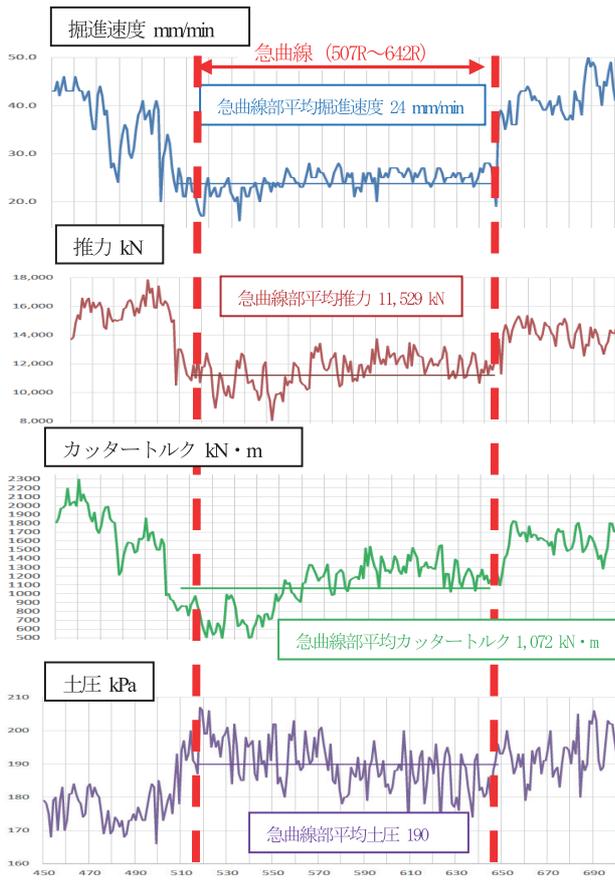


図-14 掘進パラメータ

また、当該施工区間における各掘削パラメータを整理したものを図-14に示す。当該施工区間の平均切羽土圧は190 kPa、平均推力は11,529 kN、平均速度は24 mm/分、平均カッタートルク1,072 kN/m (カッター回転数1.4 rpm)であった。

5-2 計測結果

急曲線部施工箇所においては、周辺地盤の変状を把握するため、地表面沈下および地下水位計測を行った。結果を図-15, 16に示す。その結果、急曲線部でも大きな沈下は認められなかった。

5-3 出来形および品質

写真-5に急曲線区間完成後のトンネル写真を示す。セグメントのクラックおよび目開き等はみられず、目違い、漏水もなく施工することができた。

5-4 安全管理

急曲線施工時の安全管理として直線、緩曲線部分の管理に加え以下の点に留意した。

- ・後続台車の脱線のこまめな監視
- ・後続台車内でのレール材、枕木材の接触を防ぐため、材料台車への材料の置き方
- ・セグメントのボルト本数が増し、組立精度が要求され

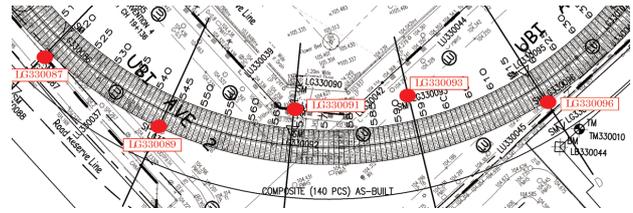


図-15 地表面沈下測定位置

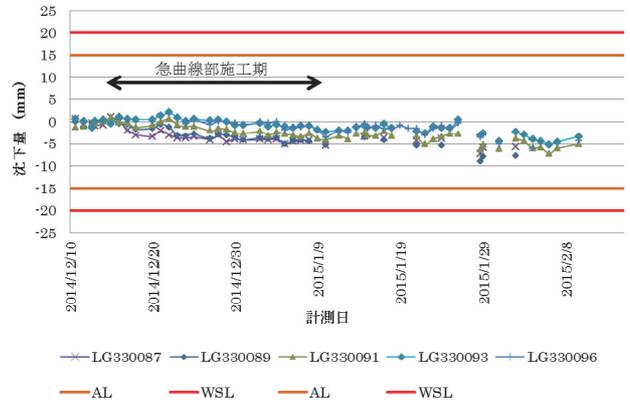


図-16 地表面沈下計測



写真-5 完成後トンネル写真

- るが、指でのボルト穴の位置の確認禁止
- ・即時注入はこまめに注入位置を変える必要があるため、確実な圧抜きの実施と保護具の着用
- ・合成セグメントはRCセグメントと比べ表面の摩擦が小さいため、立坑下への吊降ろしの際吊具が滑り抜けないようベルトスリングに幅止めの使用

§6. まとめ

曲線半径75mのトンネルは、シンガポールにおける最小半径のトンネルであり、初めての施工であったが、適切な対応策、補助工法の採用により、無事工事を完了し企業先からも高い評価を得た。

現在、ケーブルトンネル工事は2016年4月のトンネル掘進完了に向け、鋭意施工を進めているところである。最後に、本工事を進める際し、ご指導、ご協力をいただきました関係者各位様に深く感謝の意を表します。