

シンガポール MRT

トムソン－イーストコーストライン T207 工区

大久保 明

シンガポールで建設中の地下鉄工事トムソン－イーストコーストラインのトンネル工事である。当社は北部のトンネル工区を担当し、4台の土圧式シールドマシンを用いて延長 3.13 km の上下線 2 本のトンネルを施工している。プキティマ花崗岩と呼ばれる未風化花崗岩～マサ土の複合地盤条件の下、高速道路直下のシールド掘削では複数回の転石状岩塊に遭遇し、ローラーカッターの破損が発生した。本稿ではシンガポールの地下鉄工事特有の特記仕様、及び圧気作業におけるカッター交換作業等について述べる。

キーワード：地下鉄、シールドトンネル、圧気作業、複合地盤、高速道路直下

1. はじめに

現在、シンガポールにおける MRT (Mass Rapid Transit：大量高速輸送) は営業中 195 km であり、今後 2030 年までに総延長 360 km を目指して順次整備が進められている。その一環として、マレーシアとの国境部である北部ウッドランズを起点に島中央部を縦断し、南部マリーナ地区を経て海岸沿いを東部に至るトムソン－イーストコーストラインの建設が進められている。総延長 43 km、31 駅の巨大プロジェクトは全 38 工区に分かれ、厳しい国際競争入札を勝ち抜いた日本をはじめ中国、韓国、香港、台湾、オーストラリアなどの施工業者が鎬を削りながら施工を進めており、2024 年に全線が開業する予定である。そうした中、当社は北部郊外のトンネル工区を施工している(図-1、2)。

2. 工事概要

発注者：シンガポール陸上交通庁(通称：LTA)

設計(永久構造物)：Ty-Lin International



図-1 現場位置図

設計(仮設構造物)：Geoconsult Asia Singapore

施工監理：Ronnie & Koh Consultants

施工者：清水建設(株)

工期：2014 年 1 月 24 日～2020 年 5 月 30 日

発注方式：施工のみ(仮設構造物の設計は施工者)

契約方式：ランブサム契約

主要工事内容：

【トンネル】内径 5.8 m 延長 3.13 km × 2 本

【シールドマシン】土圧式 4 台

【避難立坑】2 箇所(うち 1 箇所は設備建屋含む)

【避難連絡路】7 箇所 + 連絡横坑 47 m

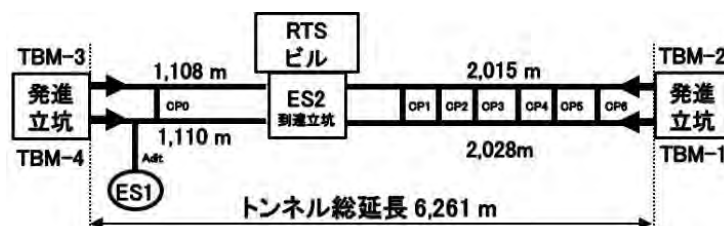
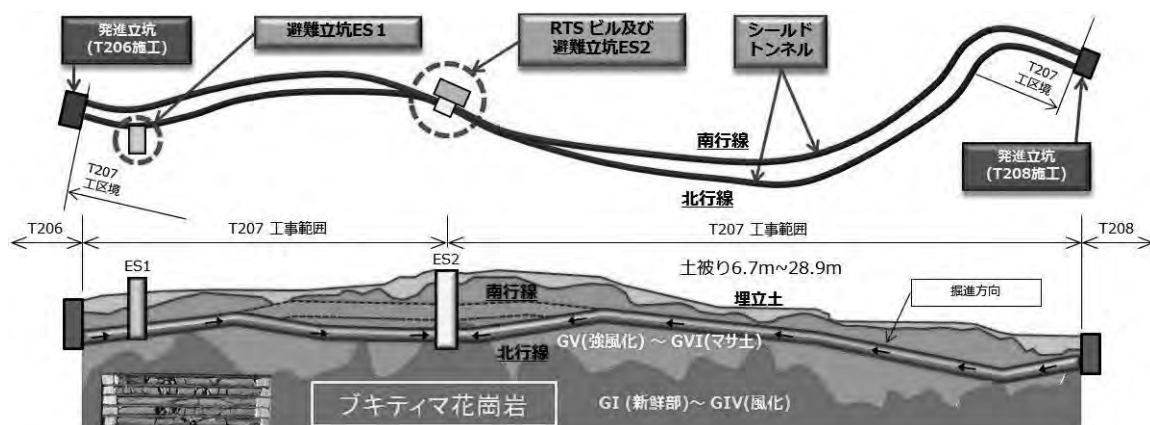


図-2 工区概要



図ー3 トンネル線形および地質縦断概要図

3. 地質概要

シンガポールの地質は大きく分けて4種類に分かれている。中央から北部に分布する花崗岩層（ブキティマ花崗岩）、西部の堆積岩層（ジュロン層）、東部の洪積層（オールダルビウム）、東南部の沖積層（カラン層）である。

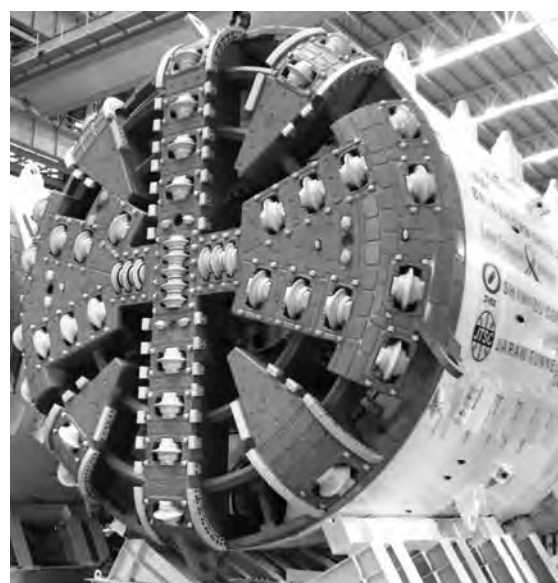
当工事の施工エリアはブキティマ花崗岩であるが、風化度合いに応じてGI（未風化）～GVI（マサ土）に分類される。掘削対象地盤は、GVIの土砂（赤茶～黄土色のシルト質砂）が主体であるが、部分的に岩盤部（GII～IV）がせり上がった箇所があり、転石が度々出現している。図ー3に地質縦断概要を示す。

発進立坑の周辺エリアにはNee Soon Faultと呼ばれる古い断層が走っており、変質の進んだ灰白色の断層影響部が広範囲に見られる。なお、地表部は基本的に埋土が数m程度覆っているものの、場所によっては沢地形になっており15m程度まで埋土が見られる。

4. シールドマシンの仕様

シールドマシンを検討するにあたり、カッター交換の回数を減らすこと及び強風化岩が粘性土化して掘削に影響することを考慮し以下の仕様とした。

- ①開口率 38%
- ②センター部の開口確保
- ③偏芯センターシャフトの採用
- ④前胴下部に25mm厚のソリ板取付け
- ⑤ローラーカッターのサイズを中心部から外周部に向かって17, 18, 19インチとなる異径サイズを採用
- ⑥カッターフェイスには耐摩耗鋼板を全面に取り付け



写真ー1 カッターヘッド全景写真

カッターヘッド全景写真を写真ー1に示す。

①開口率については、一般的なデザインである4方向対称ではなく2方向左右対称のデザインを採用することにより、大きく開口を設けた。②センター部についてもカッターフレームを中央に接続する基本概念を変更することにより開口を確保した。③センターシャフトはカッター交換時に取り外す必要のない位置に偏芯させることにより攪拌効果も得ることが出来た。④ソリ板は、最外周のカッターが下部地山を不要に切削し摩耗が進むことを防ぐとともに、マシン重心が極端に前方にあることによる突っ込み防止機能も備えている。⑤異径ローラーカッターについては、交換回数を減らすために中心部に19インチを配置することも検討したが、中心部はカッターヘッド回転に伴う円運動が小さいため、ローラーカッターの転動距離も短く摩耗量が少ないことから17インチを採用した。また、前面中間部は許容摩耗量を確保するために17インチ

表－1 シールド掘進機の主な仕様

外 径	掘 削	φ 6,710 mm
	前 胴	φ 6,650 mm
	中 胴	φ 6,640 mm
	後 胴	φ 6,630 mm
機 長		11,295 mm
総推力		44,000 kN
伸長速度（無負荷最大）		80 mm/min
ジャッキ本数		22 本
最大中折れ角度		左右 1.5° 上下 0.5°
中折れ推力		36,000 kN
カッター ヘッド	電動機出力	1,250 kW
	常用トルク	8,400 kNm
	最大トルク	10,080 kNm
	回転数	0.5 ～ 3.0 rpm
エレクター		バキューム式
スクリュー コンベア	内 径	900 mm
	最大通過礫径	735 × 325 mm
	オーガー	軸付タイプ

5. ローラーカッターの選定

ローラーカッターの選定では以下の条件を考慮した。

- ①カッターの交換回数を減らす事
- ②予期せぬ転石（一軸圧縮強度 200 MPa 以上）の出現に対応できる事
- ③強風化岩（粘性土）の掘削条件においても、カッターが偏摩耗せず回転する事
- ④岩盤掘削においても掘削速度を確保できる事

計画段階ではチップインサートタイプを検討していたが、突如出現する可能性のある転石状の花崗岩や、到達部付近の岩盤が非常に硬いことが先行している立坑掘削時の情報によって予想できた。そのため、チップインサートタイプでは非常に困難な掘削となると判断し、リング交換タイプを採用した。

リング素材は、海外で主流の熱間ダイス鋼ではなく、長寿命の冷間ダイス鋼を採用した。この素材は主に日本で取り扱われており、長距離の無交換掘削には最適と判断した。海外、特にヨーロッパ方面では硬岩掘削が多く、また高速回転での掘削が多いため、衝撃に強く、リングの割れ・欠けの心配が少ない熱間ダイス鋼が、交換頻度、位置の計画が立てやすいことから採用されているようである。

アジア圏内においては、日本・韓国・中国・イタリア・アメリカ製のローラーカッターが主に流通しているが、実際に数社の工場を視察し、工場の生産体制や

品質管理、実績等を調べた結果、韓国の 1 社のみが日本製のダイス鋼及び TIMKEN USA のベアリングを採用し、シンガポール市場において多くの実績があることからこの会社の製品を採用した。

中国国内におけるシールドマシン市場は非常に大きく、それを狙ったヨーロッパ系のシールドマシン製造企業が現地に進出している。それに伴いローラーカッターの製造も中国国内で多数の工場が行っているが、やはり「コピー物」のイメージは拭えず、素材や熱処理等の見えない部分についても、中国製品の品質を信頼するにはもう少し時間が必要という結果に至った。しかし、中国の工場にとっては品質を上げれば製造量が減るというジレンマもあり、小さなローラーカッターを巨大な工場で製造する上で必要な受注バランスを安定させることに苦慮している事がうかがえた。

一方、日本製については昨今のシールド工事の減少に伴い事業を縮小している企業が散見され、その中でも数社はマシンメーカーの手配品として当地にも納めているようであるが、特にチップインサートタイプについては評判が良いようである。中国を訪れ工場を見学していると、その工場には

- ①自社で開発製造
- ②外国企業の指導を受けて委託業務として製造
- ③日本企業の中国工場として製造

という分類があることが分かった。

このように、海外工事のチャンスを得たことを最大限に利用し、今まで国内工事では考えなかった部分まで深く突っ込み、足を運んで経験を重ねながら今回のマシンの計画に反映させて実施運用している。

6. ローラーカッターの運用結果

4 台のマシンのこれまでのカッター交換の実績について、交換回数、場所（掘削リング数）および、交換したカッターリング数を表－2 に示す。

この中で特に交換頻度、枚数が多い 3 号機に関し

表－2 カッター交換数と交換位置のまとめ

	1 号機	2 号機	3 号機	4 号機
全リング数	1447R	1437R	793R	792R
掘削リング	1190R	1098R	780R	746R
1 回目	458R/ 2 ケ	468R/ 5 ケ	552R/ 18 ケ	239R/ 14 ケ
2 回目	578R/ 0 ケ		553R/ 16 ケ	
3 回目			624R/ 21 ケ	
4 回目			631R/ 23 ケ	
5 回目			780R/ 11 ケ	

2017.2.18 現在

て、以下のように考察する。

まず着目すべき点として、2回目及び4回目のカッター交換が、前回の交換から3～10m程度の短い掘進距離で交換を余儀なくされていることである。

2回目のカッター交換（前回の交換から3mのみ掘進後）は、16個という多数のローラーカッターの破損による交換作業であった。破損原因は、摩耗したリングが許容を超え薄くなりすぎてリング割れを起こし、カッターヘッド前面の下部（地山との間）に残った状態で前回（1回目）の交換作業を終え、掘削再開時に下半断面の岩盤との間に挟まり多数のローラーカッターを破損したことであった。写真—2に破損したカッターリングを示す。



写真—2 カッターリング破損状況

高速道路直下における圧気作業下でのカッター交換ということで、発注者も路面沈下に対して非常に神経質になっていたため、チャンバー内の掘削土を30%残した状態で交換作業を実施せざるを得なかった。そのため、割れたカッターリングが下部に残置されているのは認識していたものの、除去することができずこのような結果を招いてしまった。

2回目交換後から4回目までの区間（775m～884m）では、突如現れる転石と下部の岩盤線をかすめるように掘進していた状態であったことに気付かず、外周部のローラーカッターの損傷が発生した。原因としてシールドマシンの装備能力が高く、土圧をかけていることから、通常感じられる岩盤掘削の兆候（音や振動）が捉えにくい上に、掘進速度等のパラメーターからも異常を感じ取れなかったためである。

対策として、センターシャフトに集音器を取り付け、振動が音としてオペレーターに認識できるようにしてからは比較的安定した掘削を行えるようになった。

掘進中に遭遇した転石については、自然に風化が進み転石としてマサ土部分に残ったものは少なく、明ら

かに谷地形等における過去の埋戻し土に紛れ込んだ転石状の岩塊が多いように感じられた。排土された転石を確認すると、切羽部に出現した際にカッターヘッド前面で転石が動き、ローラーカッターで上手く割ることができないままチャンバー内に取り込まれたことが容易に想像できた。このことから、カッターヘッド前面で動いた転石状の岩塊がカッターリングに横方向の荷重を作用させてしまいリングの破損に至ったことも考えられる。写真—3に排出された転石状の岩塊を示す。



写真—3 転石状の岩塊排出状況

現在、4台のシールドマシンについて、適宜これまでの経験を生かしたローラーカッターの破損防止対策を講じており、順調な掘削を続けている。

今回のローラーカッターの破損状況を顧みると、リング交換タイプと冷間ダイス鋼の採用が妥当であったかを再度考察する必要があると感じており、4台のシールドマシンが無事到達した後に整理検証したいと考えている。

7. 圧気作業によるカッター交換

現在、日本では圧気によるビット交換作業や圧気シールド工事はほぼ皆無に近いが、シンガポールではBS規格によってチャンバー内作業は圧気作業が基本となっている。

小職も人生半ばを大きく超えたが、先輩諸氏からの経験談は聞くものの圧気作業は今回が初めての経験であった。というのも、私が建設業界に入った頃には既に圧気作業は一部の特別な工種のみになっており、基本的に地盤改良工事によって切羽を自立させ、無圧気で作業をしていたからである。

設計コンサルタントによって設定されたチャンバー内気圧の中で作業することになるが、本工事では1.5～2.2気圧の圧気環境下で主にローラーカッター及びビット交換作業を実施した。圧気作業従事者は事前に

専門医による健康診断と専門病院等で1気圧の適性試験に合格した後に従事者手帳（ログブック）が発行され、半日の安全教育を受講後に従事可能となる。

圧気作業に従事する際には、専門の気圧管理資格者がマンロック外とメディカルロックに待機し、我々の健康状態に注視しながら加圧減圧を行う。この一連の作業はすべてシンガポール政府の労働監督部署が定めたルールに則り進めることになっており、1回の潜函（通称、ダイブと呼ぶ）は5時間以内と定められている。例えば、2.2気圧の場合は加圧30分、減圧に120分を要するため、実質のチャンバー内作業時間は2時間30分となり、作業開始前の準備や片付けを差し引くと、カッター交換作業は2時間以内で終えなければいけないことになる。この総ダイブ時間の上限5時間について法的拘束力はないが、当地の圧気作業の統計によると、5時間を超えるころから急に圧気障害を訴える作業員が増加するため自主的に制限をかけているということである。ちなみに、実際の圧気作業においては、減圧後に地上で30分間の酸素吸入を行っている。

また、1回のダイブは3名までと決められており、実質的に24時間作業で換算しても4ダイブ（3名×4回）が最大であった。しかし、カッターの交換作業はインドやバングラデシュ人等の外国人普通作業員だけでは不可能であり、職長クラスが1名と作業員2名という班構成が必要である。

圧気作業の従事候補者は80名超の人数を確保したが、健康診断と加圧適性試験を受けた後に実際にダイブし異常を訴えるものを除くと最終的には20数名しか適応しなかった。この人数も単なる数合わせにしかすぎず、当初はダイブしてもローラーカッターを1個も交換できない状況が続いた。その他の要因も多々あるが、結果として3回目のカッター交換時には合計156ダイブを要した。写真—4に圧気作業状況を示す。

圧気をかけることによって地下水の流入を抑え、切

羽を安定させることが主たる目的であるが、時に地山の崩落を抑えるというように間違った解釈をされることもある。結果的に今回のカッター交換作業では、下半に岩盤が出現した状態で進めることになったが、上半は強風化岩であったため、掘削に伴う地山の緩みが発生し切羽の自立性が著しく悪かった。複数カッターの交換作業は、作業が行いやすい位置へカッターヘッドを都度回しながら進めていくが、カッターヘッドを動かす度に残された土砂を介しながら地山に振動を与えるため、少しずつ崩落が進んで行くような事象が発生した。そのため、カッター交換作業を途中で中断し、チャンバー内をベントナイトで満たした後に、地上より緊急の地盤改良を行わざるを得なかった。

このように、シンガポールにおけるカッター交換作業は、圧気作業の特殊性に伴う時間の浪費とコストの上昇を招くことも事実として記したい。

8. 高速道路直下での掘削作業

当プロジェクトの路線は約70%がSLE（Seletar Expressway）という高速道路の直下を掘進する工事であり、路面沈下等の一般車両に与える影響がないように厳しい管理基準のもとで施工を進めている。

基本的に客先発注の地下鉄工事における計測業務（山留変位や路面沈下等）は、別途発注された計測業者が行う。シールド掘削に伴う計測項目としては、地表面沈下、層別地中変位計が主であるが、近接する構造物に対しては、傾斜計やプリズムによる自動変位計測などが追加される。

今回、高速道路直下の長距離シールド掘削という条件を踏まえ、高速道路の路面沈下計測に3次元スキャナーを用いた自動計測が追加された。該当エリアを5mメッシュで分けし、路面沈下を24時間体制で計測しており、異常値が計測された場合には携帯電話にショートメッセージが速やかに配信される。

また、客先及び施工監理コンサルを交えた定例打ち合わせは朝晩2回行われ、打ち合わせの中で掘進パラメーター、進捗、安全、品質及び計測結果等の確認がタイムリーに行われる。

施工者側への客先要求事項として特記すべきものは、シールドマシンの切羽位置に通称ウォッチマンと呼ばれる路面状況の監視人を、緊急資機材と共に高速道路の路肩もしくは中央分離帯位置に24時間体制で配置している。これに加え、万が一路面変状が発生した際には速やかに高速道路の車線規制を行うため、TMAと呼ばれる衝撃干渉装置を搭載したトラックも



写真—4 圧気作業状況（マンロック外から撮影）

現場ヤード内にスタンバイしている。写真—5に車線規制状況を示す。なお、緊急時に高速道路を通行止めにすることを想定し、緊急迂回路計画についても関係諸官庁との協議・合意を求められる。

これまでのところ、シールド掘削に伴う高速道路の路面沈下は $\pm 5\text{ mm}$ 程度と管理値以内で推移しており、良好に管理されている。



写真—5 高速道路における車線規制状況

9. おわりに

当プロジェクトのトンネル掘削は、2017年2月現在で約90%まで進んでおり、これから順次4台のシールドマシンが避難立坑に到達する。未風化花崗岩～完全風化マサ土の複合地盤条件でのシールド掘削は、ローラーカッターに予期せぬダメージを与えるなど様々な困難に遭遇したが、ローカルスタッフ、客先、コンサル、協力業者の皆が一致団結し一つ一つの問題をクリアしてきた。トンネル掘削後も一次インバートコンクリート及び避難連絡坑の施工が続くが、無事故無災害での竣工を達成すべく努力する所存である。また、今回の工事で得られた知見を広く水平展開していきたいと考えている。

J|C|M|A

【筆者紹介】

大久保 明（おおくぼ あきら）
清水建設㈱
国際支店
工事長

