

高強度地盤改良内における土圧シールド長距離掘進 Long Distance Driving of EPB Shield Machine under Cementitious Ground Improvement

亀山 克裕*
Katsuhiro Kameyama
國井 剛*
Takeshi Kunii

村川 徳尚*
Noriyoshi Murakawa

要 約

シンガポール地下鉄トムソンイーストコーストラインのうち T228 工区において、地下鉄単線トンネル 2 本（セグメント外径 ϕ 6,350 mm, 各トンネル延長 680 m）を 1 台の土圧シールド機により構築した。当トンネル上層部は埋立地でその下層に位置するマリンクレイの圧密が進行中であり、トンネルの長期沈下を抑制する目的で、トンネル掘進に先駆けてトンネル掘進断面以深までの地盤改良が実施され、1 本のトンネル総延長で 677 m, そのうち最大で 283 m 区間の高強度地盤改良体（1.0～1.5 MPa）を連続し掘削する必要があった。世界的に見てもこれほど長距離の地盤改良区間をシールド機を用い掘削した事例はほとんどなく困難が予想された。本稿は、高強度地盤改良体を掘削する上で留意した点と施工中に発生した課題の対応について述べるものである。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 懸念された技術的課題とその対応
- § 3. 施工中に発生した問題とその対応策
- § 4. 成果
- § 5. まとめ

§ 1. 工事概要

本工事は、シンガポール国の南東部に位置しトンネルは地下鉄用の上下計 2 本（仕上がり内径 ϕ 5,800 mm, 総延長 1,367 m）を土圧式シールド工法により構築するものであった。表一1 に主要な工事概要を示す。

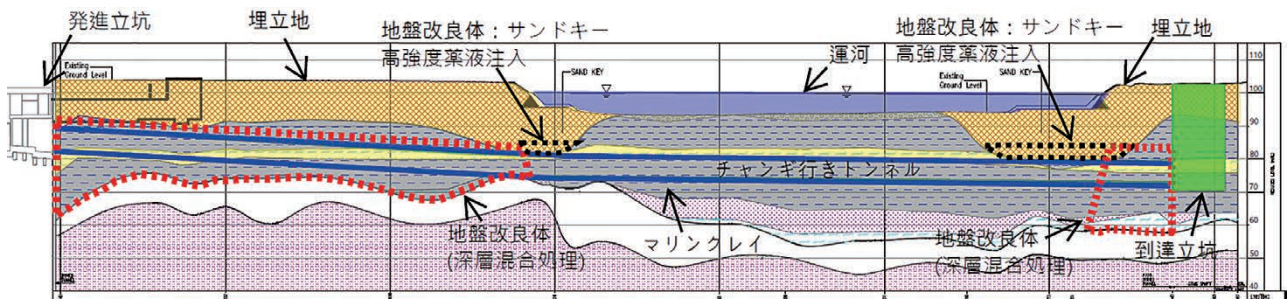
当該地区は 1970～1980 年代の埋立工事により造成され、この埋立によるマリンクレイ層（海成粘土）の圧密が未だ進行中である。トンネル掘削に先立ちトンネルの長期沈下を抑制する目的で、機械攪拌式深層混合処理（高炉セメント 200～260 kg/m³）により掘削断面以深までの地盤改良を地上部から実施した。また、トンネル河川横断面部はマリンクレイ層（海成粘土層、N 値 0～4）、運河の両岸のトンネル掘削断面上部には、サンドキーと呼ばれる細砂による埋立土が存在した¹⁾。当該箇所では機械設置場所の制約から改良体形成のため地上部からコントロールボーリングによるトンネル上部の高強度薬液注入

表一1 工事概要

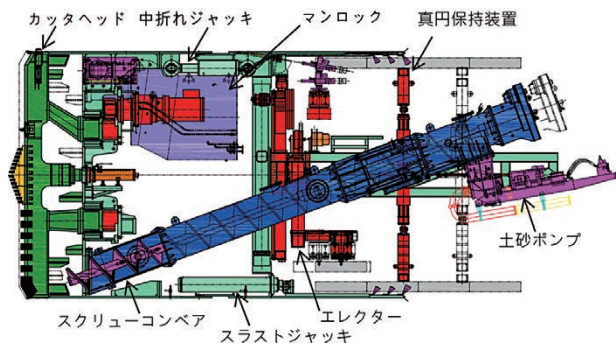
工事名称	Construction of Gardens By The Bay Station and Tunnels For Thomson-East Coast Line Contract T228
発注者	シンガポール政府 Land Transport Authority
施工者	Nishimatsu and Bachy Joint Venture
工事場所	Singapore Marina Barrage 脇から Gardens By The Bay East
工期	2014年7月25日～2020年12月30日(約77か月)
工事内容	土圧式シールド工法
掘進延長	: 687.6m (ウッドランド行きトンネル) : 679.2m (チャンギ行きトンネル) 1,366.8m (総延長)
セグメント	: RCセグメント (外径 6,350mm, 内径 5,800mm, 厚さ 275mm, 幅 1,400mm)
発進・到達立坑構築工	1式
駅舎掘削・構築	1式

を行った²⁾。図一1 にトンネル地質縦断図を示す。シールド機の主な特徴としては、1) 玉石等の出現に対応するためカッターヘッド開口部に脱着式邪魔板が装着可能、2) 護岸直下掘削時にスクリュコンベアからの土砂噴発防止を目的として最大 0.6 MPa 対応の土砂ポンプをコンベア端部に設置、などが挙げられる。図一2 にシールド機概要、表一2 に主要諸元を示す。

* シンガポール営業所地下鉄マリナベイ（出）



図ー1 トンネル地質縦断面図



図ー2 シールド機概要

表ー2 シールド機主要諸元

掘削外径	6,710 mm
TBM本体長さ	10,475 mm
前・後胴外径	6,680 mm
総推力	48,000 kN
スラストジャッキ本数	16 nos.
カッタートルク	8,119 kN・m
最大カッターヘッド回転数	4 rpm
最大切羽圧	0.6 MPa
スクリーコンベア外径	900 mm

§2. 懸念された技術的課題とその対応

2-1 技術的課題

地盤改良内を長距離にわたり掘削する特殊条件下の掘進となるため、掘削機械・設備計画段階において表ー3に示す点に留意した³⁾。

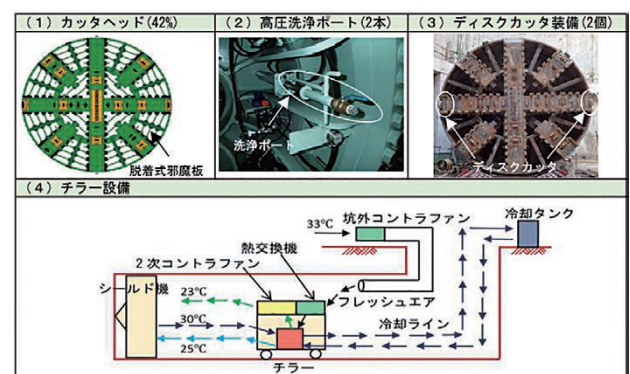
表ー3 計画段階における技術的課題

番号	課題	予測された事象
(1)	改良土が面板に付着	急激な推力上昇とともに掘進不能の事態が発生
(2)	改良土がチャンバー内で閉塞	スクリーコンベアによる排泥不能
(3)	ゲージビット損耗が顕著	所定断面を満足した掘進ができなくなり掘進不能
(4)	チャンバー内での改良土再固結に伴う硬化熱	坑内作業場が高温となる

2-2 課題の解決策

- (1) シールド機設計当初はカッターヘッド面板開口率を30%としていたが、面板閉塞を危惧し42%に変更した。またサンドキール部で大径の玉石等を取り込まないための脱着式邪魔板を面板に搭載できる設計とした。
- (2) チャンバー内閉塞時の対応策とし、20 MPa 対応の高圧洗浄ポート（2本）を前胴に装着した。
- (3) 切削ビット交換回数低減を目的に、最外周ゲージビット部には一般的な超硬ビットではなく、17 inch ディスクカッタ 2 個を同一パスに配置した。
- (4) 掘削土の発熱による作業場環境の悪化防止を目的とし、チラー設備（324 kW）を後続台車に設置した。

これら解決策を図ー3に取り纏める。また改良土がチャンバー内で閉塞する懸念に対し、地盤改良体内の原位置試料を採取し、改良土再固化および材料分離に対する性状の把握、基本配合の決定を目的に加泥剤の試験練りを実施した。表ー4に改良体試料を用いた試験練りの結果から得られた排土特性を示す。ここで、ケース1（加水のみ）の場合、約3時間後に改良土の再固化現象が見られた。結果とし、再固化防止および材料分離に効果的かつ経済面で優れたケース3の基本配合（遅延材27%、気泡材13%）を施工に適用することとした。図ー4にケース1と3の土砂性状を示す。



図ー3 計画段階における技術的課題の解決策

表一4 改良体試料を用いた試験練り結果

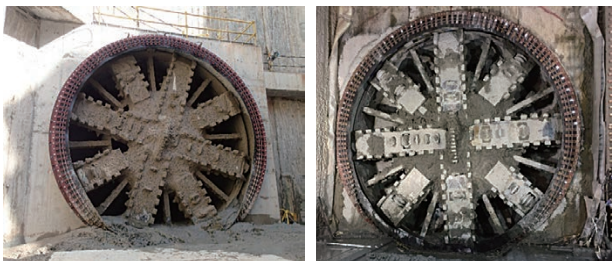
Case	加泥材	考察
1	水のみ	添加率 40%で掘削に必要な塑性流動性を得ることができるが、練混ぜ開始後、1時間で硬化が始まり3時間で再固化した。また土と水分の材料分離が見られた。
2	遅延材	添加率 33%で掘削に必要な塑性流動性を得ることができ、遅延剤の効果により再固化を防止できた。また、材料の分離傾向が見られた。
3	遅延材+気泡材	添加率 27%(遅延材)+13%(気泡材、5倍発泡)で必要な流動性を得るとともに、再固化を防止できた。
4	ベントナイト溶液+遅延剤	添加率 20%(ベントナイト溶液)+30%(遅延材)で掘削に必要な塑性流動性を得ることができ、遅延剤の効果により再固化を防止できた。また材料の分離は見られなかった。
5	クレーショック+遅延材	添加率 40%(遅延材)+20%(クレーショック)で必要な塑性流動性を得られ流動性も確保できた。



図一4 改良土物性 (左: ケース1, 右: ケース3)

2-3 解決策を講じた成果

(1) 面板開口率変更により、改良体掘削時において急激なカッタトルク上昇は発生しなかった。図一5の1本目(ウッドランドバウンド)、2本目(チャンギバウンド)、各トンネル貫通時の面板閉塞状況写真で見られるように、中心部付近は若干閉塞ぎみであるが外周開口部における閉塞は見られなかった⁴⁾。



図一5 貫通時面板状況 (左: 1本目, 右: 2本目)

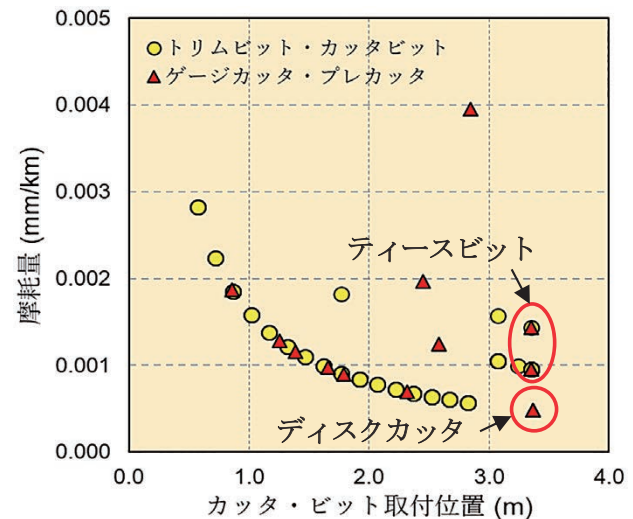
(2) リング別で掘削土性状に合わせ加泥材調整を行うことで、チャンバー内閉塞は発生しなかった。実施工では遅延剤 27%・気泡剤 13%を基本に、スクリーコンベア電流値、排土性状目視確認を指標としリング毎に添加量を調整することで、チャンバー・スクリーコンベア内ともに閉塞することはなく、実平均添加量は遅延剤 30%、気泡剤 25%であった。図一6にその際のズリ缶内での排泥土砂



図一6 排泥土砂性状

性状を示す。

(3) カッタ摩耗量についてディスクカッタとビットの摩耗量を転動距離あたりで図一7に取り纏めた。ここで取付位置は、カッタヘッド中心からの距離を示している。ディスクカッタ摩耗量は 0.0005 mm/km 程度に対し、同一パスに設置したティースビットは 0.001~0.003 mm/km であり、ディスクカッタの摩耗量は比較的小さく、1本のトンネル掘削途中におけるゲージカッタの交換作業は発生しなかった。



図一7 ビット摩耗量実績

(4) 改良体掘削中、チャンバー内温度はセメント成分の再固化熱により約 50℃近くまで上昇したが、セグメント組立作業場付近は坑内環境 30℃以下で良好な作業環境を維持することができた。

§ 3. 施工中に発生した問題とその対応策

3-1 掘進中セグメントに発生するクラック

企業先の施工管理基準において、掘進中・組立時の RC セグメントに発生するクラックはゼロであることが要求され、その管理方法は、企業先の現場監督官による指示のもとセグメント表面を散水しクラックの有無を確認するほど厳密なものであった。1本目のトンネル掘進において、72リング以降で 0.1 mm 未満のクラック発生問題が企業先の大きな懸念事項となった。

そのため、テールブラシ部の裏込材閉塞状況確認(1・2段目)、スプレッダーとセグメント間に緩衝材を設置し 94~118 リング区間を掘進するなどの対応を行ったが、掘進中のクラック発生率を低減させる顕著な効果を確認することはできなかった。また、クラック発生の手がかりを掴むべくセグメントと本体のクリアランス、セグメント真円度、掘進時の機械データ、クラック発生位置の集計、掘進時のジャッキ選択など多岐にわたり分析を行うなかで、掘進中のセグメントに押し付けている推進ジャッキのスプレッダーが機体のローリングと同調し回転する現象に気づき、掘進中の後胴ローリング量に制限値

を設け、図-8に示す掘進方法を試みた⁵⁾。現段階では、図-9に示すように機体のローリング力が推進ジャッキ・スプレッダを経由しセグメントに反作用とし伝達されクラックを誘発している可能性を考えている。

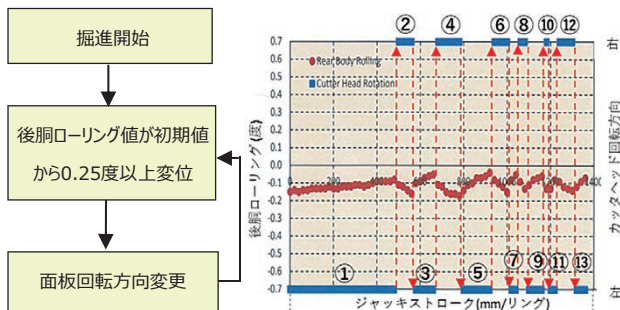


図-8 後胴ローリング量に制限を設けた掘進方法

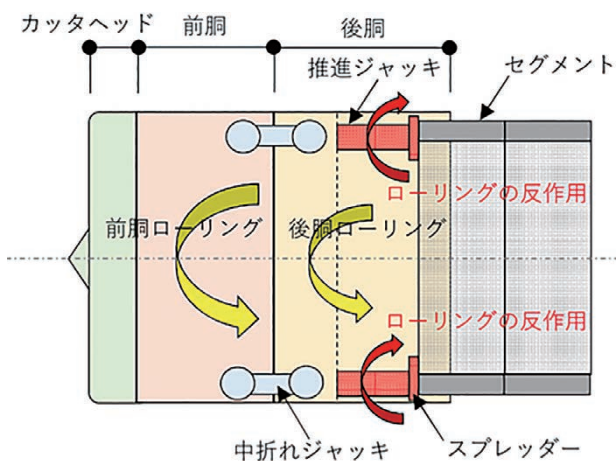


図-9 機体ローリングによる反作用概念

図-10に1本目トンネルにおけるセグメントクラック発生頻度、本数、クラック幅を示す。特にクラックの発生が顕著に現れた地盤改良体セメント量 260 kg/m³ 添加区間において、クラック幅別で比較した場合、クラック発生率は、0.1 mm 未満においては 41%，0.1～0.2 mm で 5.4%，0.2 mm 以上で 12.5%に対し、後胴ローリング管理を実施したのちは、それぞれ 0%，12.5%とその発生率は低減しており 0.2 mm 未満のクラック抑制に対し効果を発揮していることがわかる。

3-2 工期遅延に対する対応

前述したゼロクラック対応に多くの時間を費やしたことで、1本目のトンネル掘削完了は図-11に示すように予定工程に対し 63 日の遅れが発生した。トンネル掘削の

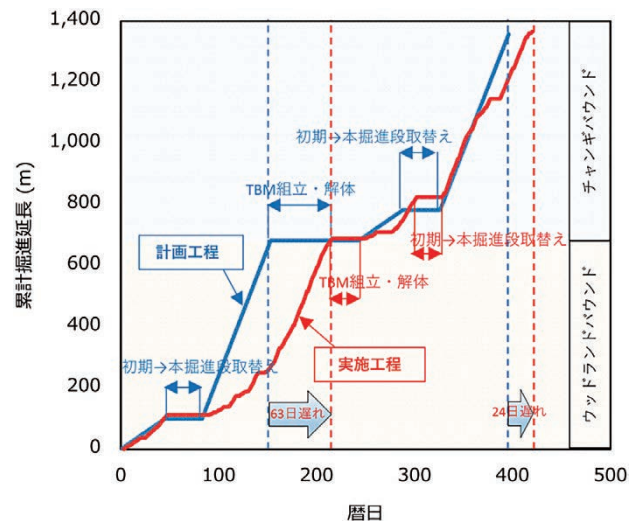


図-11 予定工程と実施工程の比較

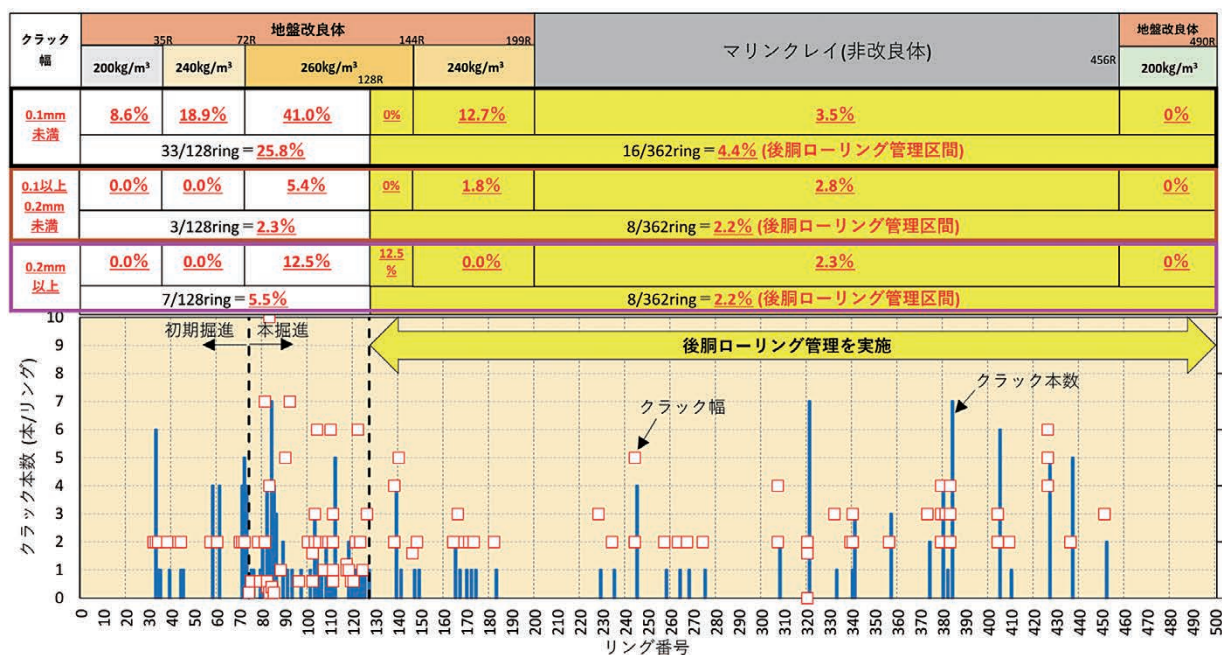


図-10 1本目(ウッドランドバウンド)トンネルにおけるセグメントクラック発生状況

工期遅延は、駅舎本体構築工程にも影響がおよぶことから、工期回復の方策が求められた。そこで、表―5に示すの2つの案を1本目のトンネル施工中に立案・計画して2本目のトンネル掘削時に適用し、ターンテーブルによるシールド機の180度回転、シンガポールでは前例のない掘削土砂全線配管圧送の採用により、1本目のトンネルの遅れを2本目のトンネル掘削終了時に39日間短縮することができた。図―12にターンテーブルを用いたシールド機本体の回転、図―13に土砂ポンプを使用したトンネル坑内から地上部までの全線土砂圧送状況写真を示す。

§4. 成果

本章では、高強度地盤改良内を掘削するにあたり予測できた課題と、実施工において発生した課題、その対応策と結果を要約する。

4-1 予測できた課題と対策

(1) 改良土の面板付着による急激な推力上昇の懸念

面板開口率を30%から42%へ変更することで、掘進中に面板が閉塞することはなかった。

(2) 改良土がチャンバー内で閉塞し排泥不能となる懸念

高圧洗浄ポート（20 MPa 対応）を前胴に装備した。また、掘進開始前に原位置試料を用い加泥材添加量決定のための試験練りを実施し、遅延材と気泡材を用いることを決定した。その上で、掘進時は試験練り結果を指標にリング毎に排泥物性・スクリーコンベアの電流値を確認しながら添加量を調整することで排泥不能の事態に陥ることはなかった。



図―12 ターンテーブルによるシールド機回転



図―13 掘削土砂トンネル全線圧送

表―5 2本目トンネル工程促進対

検討項目	当初案	変更案
➤ 1台のシールド機を用いた2本のトンネル掘削方法	1本目のトンネル掘削終了後、到達立坑から2本目のトンネルを掘進する場合、段取り替え（初期掘進→本掘進）が、河川直下（非改良体区間）となりシールド機停止期間中の本体拘束の懸念から、到達立坑で解体、駅舎部の発進立坑で再組立てののち、2本目のトンネル掘進を行う。	1本目のトンネル施工中、河川直下の非改良体区間において掘削停止期間中に、本体が拘束傾向となり推力が上昇する現象はなく、非改良体区間で段取り替えを行う安全性を確認できた。そのため到達立坑でシールド機をターンテーブルを用い180度回転させ、再掘進する。
➤ 掘削土砂搬出方法	バッテリーロコに3台のズリ缶台車（容積 10m ³ /台）を連結し搬出する。	バッテリーロコの待ち時間を削減し、進行を向上させることを目的に全線土砂圧送を採用する。

- (3) ゲージビットの損耗が顕著となることで予期せぬ
カット交換が発生する懸念

ゲージビットに17インチディスクカットを採用することで、カットビットと比較し摩耗量を小さくできることを確認した。

- (4) チャンバー内での改良土再固化に伴う硬化熱の発生による坑内作業環境悪化の懸念

後続台車にチラー設備を装備することで良好な環境で作業を行うことができた。

4-2 実施工における課題と対策

- (1) 掘進中セグメントに発生するクラック

テールブラシ点検、セグメントとスプレッダー間に緩衝材を設置、掘進中の後胴ローリングに制限を設けた掘進、スプレッダーをウレタンからテフロンタイプへ変更などの対策を講じた。特に、後胴ローリング管理がクラック低減に効果を発揮することがわかった。

- (2) 1本めのトンネル掘進時に発生した工期の遅れ

1本目のトンネル掘削完了後、シールド機本体をターンテーブルにより到達立坑で回転させ2本目のトンネル掘進を速やかに開始した。また、工期促進を目的にズリ缶を用いた掘削残土坑内搬出からシンガポール国内では初の試みであるトンネル全線土砂圧送方式の採用により工期遅延の挽回を図った。

§5. まとめ

世界的に見ても例のない長距離にわたる高強度地盤改良内をシールドマシンで連続して掘削する工事であり、既往の類似経験がないなかでの施工のため困難が予想された。面板・チャンバー閉塞の防止が大きな課題であったが、問題となる閉塞は発生せず無事2本のトンネル掘削を2017年12月上旬に終えることができた。

また、施工中に発生したセグメントクラック問題に対し、掘進中のシールド機後胴ローリングがセグメント表面のクラック発生要因のひとつとなっている可能性を見出し、ローリング量に制限値を設けることで、掘進中RCセグメント表面に発生するクラック発生率の低減に寄与する実績が得られた。現時点では、経験的に得られた知識の域を逃れることはできないが、今後工学的なアプローチにより、シールド工法におけるセグメントのクラック抑制の効果的な対応策へと発展すれば幸いである。

参考文献

- 1) Land Transportation Authority : Geotechnical Interpretative Baseline Report-Contract T228, 2014
- 2) 山崎, 村川, 吉田, 藤田: シールド河川横断に伴う護岸基部改良工(曲がり削孔による砂置換部の高強度地盤改良), 西松建設(株)技報, Vo1. 41, 2018
- 3) 村川, 國井, 星, 亀山, 草野: 高強度地盤改良内における土圧シールド長距離掘進(その1)問題点とその対策, 第73回土木学会年次学術講演会, VI-165, 2018
- 4) K.Kameyama, N.Murakawa&J.Nithiananthan : A Study of TBM Borability under Marine Clay with Cementitious Ground Improvement, Session 1-2-5, Underground Singapore, 2018
- 5) 亀山, 村川, 草野: 高強度地盤改良内における土圧シールド長距離掘進(その2)高強度地盤改良内におけるシールド機の掘削特性, 第73回土木学会年次学術講演会, VI-166, 2018