

シンガポール地下鉄線工事 T226 工区における 営業線交差部直下を対象とした大規模原位置地盤改良施工

大成建設(株)技術センター
国際支店

正会員 ○石井 裕泰
正会員 多田 博光

1. はじめに

アジアの経済中心国として発展を続けるシンガポールでは、環境先進国として、また都市計画推進国としての政府方針の基、地下鉄（MRT：Mass Rapid Transit）整備・拡充が精力的に進められている。既存の5路線（**図-1**）に加えて、現在、複数路線の整備が進められる中、本報が扱うトムソン線 T226 工区では、営業中の環状線（CCL：Circle Line）、南北線（NSL：North South Line）が乗り入れるマリーナベイ駅に駅舎と路線を増設する。両路線が地下にて交差する直下の地盤に、歩行者連絡地下通路（以下、地下通路）、ウッドランド方面線・チャンギ空港方面線トンネルを順次建設するもので、後発の地下鉄整備ならではの厳しい施工条件が課せられている。

一方、シンガポールでの地下工事における共通の技術的課題として、沖積軟弱層であるシンガポールマリンクレイ¹⁾の扱いが挙げられる。堆積年代が浅い正規圧密、あるいは未圧密地盤であることから、掘削や地下水移動による変状が顕著に表れる。本工事の地下通路と上下線2本のトンネルはマリンクレイ内に位置しており、既存営業線への影響を最小限にとどめるため、当該域には高圧噴射攪拌によるセメント固化改良を施した。

本報では、マリンクレイを対象とし営業線直下での特異な施工制約のなか完遂した、高圧噴射攪拌改良の施工実績を紹介する。とりわけ、地下通路建設での開放型矩形シールド施工に際しては、攪拌改良域を掘削し、その施工結果を直接観察する機会を得た。これらの提示を通して、今後の同種技術の適用検討に資する知見を提供する。

2. プロジェクトの概要

(1) T226 工区の全容²⁾

図-2に当工区全景を、**図-3**に営業線交差部の断面図、および立体図を示す。工事箇所は沿岸埋立地に位置し、付近では過去にも大規模掘削工事が多数行われるとともに、崩壊事故の報告も寄せられている³⁾。本工事は、



図-1 シンガポール地下鉄の路線図

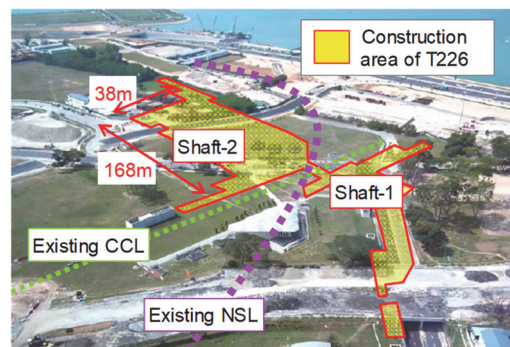


図-2 T226 工区の全景

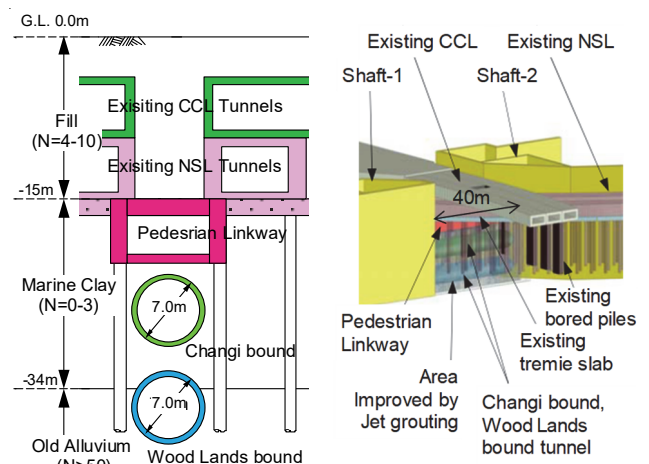
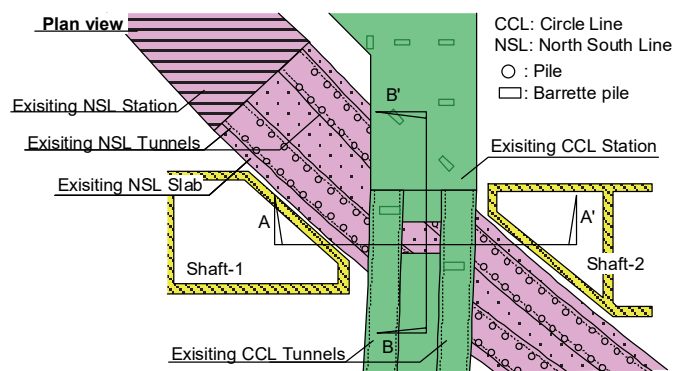


図-3 既設営業線交差部周りの断面図・立体図

キーワード 地盤改良，高圧噴射攪拌改良，一軸圧縮強さ，シールドトンネル

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 TEL 045-814-7217



A-A' section

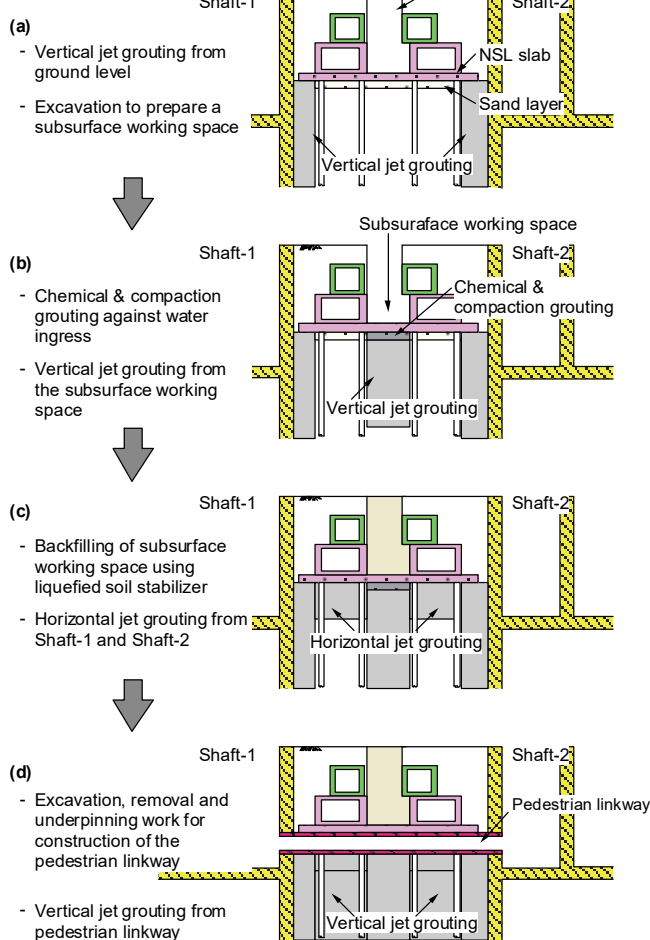


図-4 鉛直・水平高圧噴射攪拌改良手順 (A~A' 断面)

きの掘削に向けた支保として機能を担わせた。特徴の2点目は構造合理化の取組みとして、仮設構造として扱われることが多い連壁をそのまま本体構造に利用することとした。そのため、駅舎フロアのスラブ高さの鉄筋籠にはスラブ構造との一体化を図るため機械式継手を導入し、さらに連壁エレメント間の継手には止水板を設けた。

(2) 営業線交差部直下でのトンネル施工

図-4に本工事におけるトンネル施工に際しての高圧噴射攪拌改良手順を、Shaft-1, 2を含む横断面に示す。高圧噴射攪拌による地盤改良は、(a)地表面からの鉛直方向改良、(b)既存トンネルにはさまれた場所に設けた地下作業エリアからの鉛直方向改良、(c)両立坑からの水平方向改良、さらに(d)地下通路の構築に際しての鉛直方向改良、の順に段階的に行った。(d)の地下通路構築手順は図-5に示すとおりで、まず、既存トンネルを

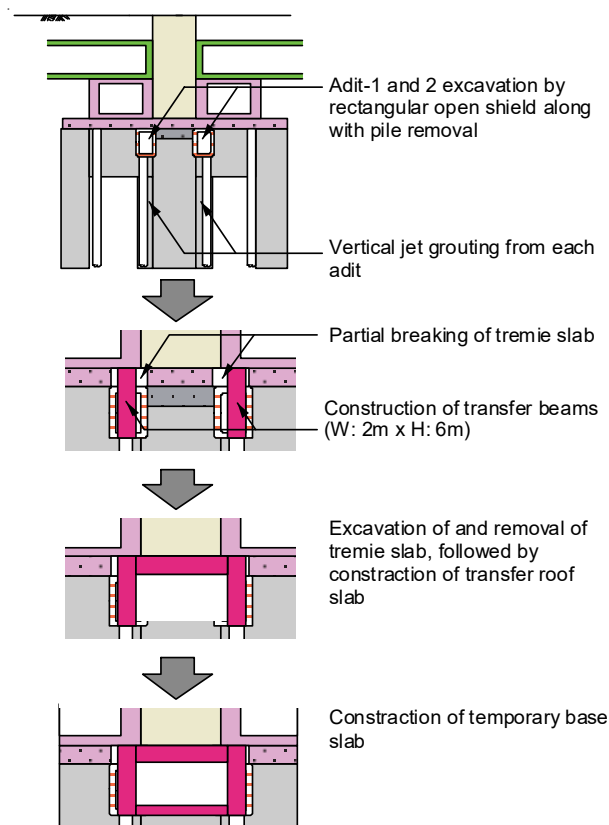


図-5 地下通路トンネルの構築手順 (図-4 中 B~B' 断面)

既存の南北線、環状線交差部に隣接して地下駅舎を構築するとともに、交差部を挟んだ立坑から事項で詳述する約 40m の地下通路と二本の地下鉄トンネルを鉛直方向一列に配して建設する。

図-2のShaft-2側に位置する駅舎の概形は、延長168m、幅38m、深さ40mで、地下4~5階にそれぞれチャンギ空港方面、ウッドランド方面の乗降ホームが個別に設けられる。駅舎工事の特徴として、まず、安全性と施工性のためマリンクレイを含む342,500m³の土砂掘削を逆巻きに進めることとした。その特徴の1点目として、89,600m³の地中連壁構築後、掘削と並行して構築されたスラブには、引き続き

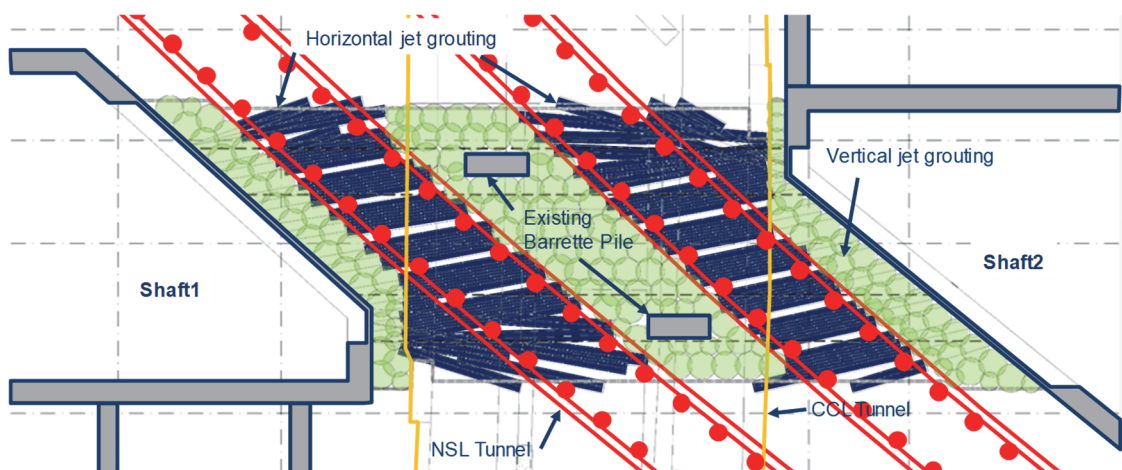


図-6 高圧噴射攪拌による改良杭配置（平面図）

支えるコンクリート杭を撤去しながら、開放型矩形シールド工法で端部 2 列に先行導坑を貫通させた。その上で既存トンネルの荷重が基礎に確実に伝達されるよう、壁体構築時に装備したフラットジャッキにて所定の受け替え荷重を確保した。なお、本報では詳細を扱わないが、下層 2 段に配する外径 7.0m の上下線トンネルについては、出水によるトラブルリスクを最小限に収めるため、両トンネルを挟む位置に凍土壁を完備した。その上で、Sprayed Concrete Lining により建設を進めた。

3. 高圧噴射攪拌改良の施工

(1) 施工方法

図-4に示した高圧噴射攪拌改良のうち、一般的な形態である鉛直方向改良については、シンガポールにおける豊富な施工実績^{4), 5)}を踏まえ、高圧水と空気を併用した方式を採用した。現地で施工性、達成品質を確認の上、水切り攪拌を前処理として行うこととし、グラウト配合としてセメント・水重量比 1.1 : 1、水噴出圧 25MPa、セメントミルク吐出圧 40MPa、同吐出量 170L/min、空気圧 0.7MPa で、三角形配置とした改良間隔 1,500mm に対して目標改良径 1,800mm、目標強度 0.6N/mm^2 の仕様を定めた。一方、水平方向改良については我が国を含めて過去の取り組み^{6), 7)}は挙げられるものの施工実績は限られる。その上で、水平施工ではエアだまりの要因となる空気は利用せず高圧水との併用方式を採用し、グラウト配合としてセメント・水重量比 1 : 1、水噴出圧 20MPa、セメントミルク吐出圧 5MPa、同吐出量 80L/min にて、改良間隔 600mm に対する目標改良径 800mm、目標強度 0.6N/mm^2 を施工仕様に定めた。

図-6に改良体配置の平面図を示す。水平施工については実績の少ない手法であることから、施工長は最小限の15m程度にとどめて滞りなく排泥ができるよう配慮した。改良体はShaft-1, 2側とも1段30本×12段=360本の配置で上段から順次施工を進めることを基本とし、施工機械を4台導入し、昇降機能を有する作業構台（写真-1）で作業にあたった。施工機械配置に制約が生じたものの、待機時間を生じぬよう一部では隣



(a) 作業構台の全景



(b) 作業構台上での状況

写真-1 水平方向高圧噴射攪拌改良の施工

接施工での干渉を避け下段を先行改良した。高圧噴射攪拌に伴い生じる排泥は、ロッドの口元部分に回収ホースを取り付け、まず、作業構台下部の仮受けタンクに回収したのち、およそ 25m の高さとなる地上部に設置した排泥ピットに圧送した上で、所定処分場へ排出処理した。

(2) 事後調査

原位置で確保された改良品質を確認するため、鉛直、水平施工の双方で事後調査を行った。本報では紙面の都合、水平施工についてのみ詳述する。

事後調査では各立坑側から 4 本、合計 8 本の水平ボーリングを行い、コアサンプルを採取した。固結体が連続的に採取できた長さ比であるコア採取率 (TCR : Total Core Recovery) は、1 本が 96% となった以外は 100% を確保した。ここからランダムに一軸圧縮試験用供試体を採取して得られた一軸圧縮強さの頻度分布は、**図-7(a)** に示す結果となった。必要強度 0.6N/mm^2 に対して平均値は 3 倍程度を確保するとともに、**図-7(b)** に列記したシンガポールでの過去の施工実績⁵⁾ と比べて、品質のばらつきを同等以下に抑制することができた。

(3) 開放型矩形シールド掘削に際しての観察

開放型矩形シールドでの施工に際しては、切羽前方に設けたボーリング孔からの漏水をモニタリングし、毎分数に抑制されていることをもって改良効果が確認できた。その上で、開放型矩形シールドに装備されたバックホウでの掘削、及び杭、バレット基礎の撤去を繰り返しながら、2 本の導坑掘削とその後の拡幅掘削を滞りなく完了した。

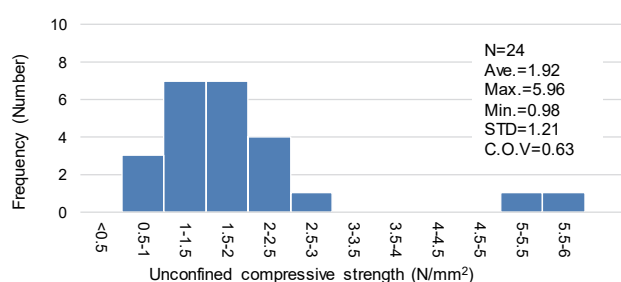
掘削時の観察記録を抜粋して、**図-8** にまとめる。

鉛直施工、水平施工で使用したセメント、空気併用

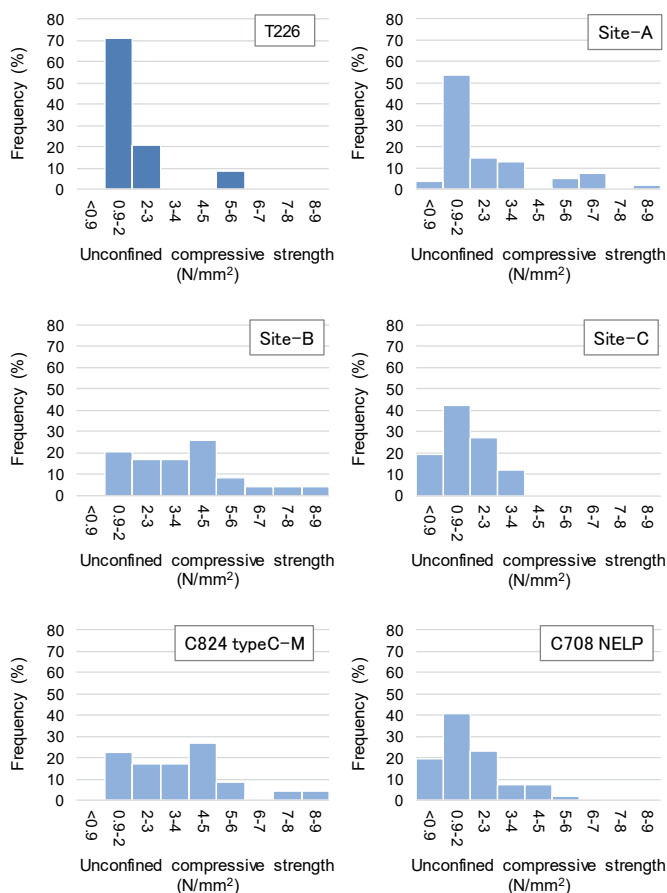
の有無等の違いに起因して、色調の違いから両者を目視で区別することが出来た。上記の漏水モニタリングと調和して掘削時の漏水は部分的に見られるのみで、まとまった領域でマリンクレイが残存した領域も限定的であった。いずれも施工に支障をきたすレベルには至らず、一方で施工中、常時モニタリングに当たった上部営業路線トンネル等の構造物に特段の変状は見られなかった。開放型矩形シールドでの掘削に際して、確実性と安全性の確保・向上に、改良目的を十分達成できたといえる。

4. 結語

軟弱粘性土地盤での地下工事に際して営業線や重要構造物が隣接する場合、掘削等による地盤変状を抑制するため特段の配慮が必要となる。圧密促進や締め固めによる方法では課題となる地下水位変動や圧密沈下の影響を抑制できる点で、固化改良の活用性は高い。旺盛な社会インフラ整備が進むアジアの諸地域で、シンガポールマリンクレイに類する地盤における高難度工事が今後も計画・実践されていくものと考えられる。本報の内容がその参考になれば幸いである。



(a) T226 工事による頻度分布



(b) シンガポール他工事との比較

図-7 原位置採取試料の一軸圧縮強さの頻度分布

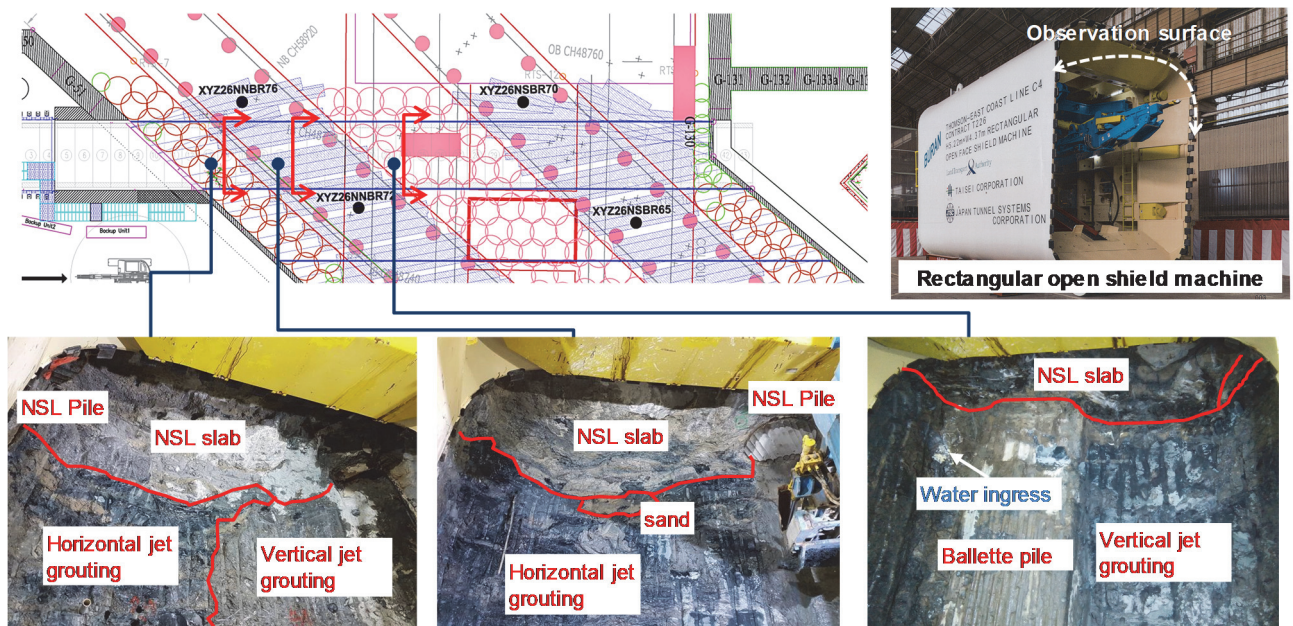


図-8 開放型矩形シールド掘削時に観察した高圧噴射攪拌改良状況

参考文献

- 1) Arulrajah, A. and Bo, M. W. : Characteristics of Singapore Marine Clay at Changi, *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, pp.431-441, 2008.
- 2) 橋田薫, 西田与志雄 : 計画的に進むシンガポール地下鉄工事 シンガポール・トムソン線建設工事-226工区-, 土木施工 Vol.55, No.12, pp.57-60, 2014.
- 3) Shirlaw, J. N., Tan, T. S. and Wong, K. S. : Deep excavations in Singapore marine clay, *Proceedings of 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.13-28, 2006.
- 4) Ganeshan, V. and Yng, J. Yi: Jet Grouting and its Applications, *Ground Improvement Technologies and Case Histories*, pp.209-220, 2009.
- 5) Ng, C. C. : The importance of quality control in jet grouting for deep excavation -A Singapore perspective-, *Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.1669-1674, 2011.
- 6) 加藤 貴代, 田中 孝典, 影山 雄, 本田 幸一郎, 佐藤 弘, 長崎 康司 : 水平方向の噴射攪拌工法を用いた耐震補強工事(試験施工), 土木学会第 56 回年次学術講演会講演集, pp.265-266, 2010.
- 7) Claudia Santos, Alexandre Santos-Ferreira and Ana Paula Silva: Jet-grouting horizontal slab for reinforcement of the foundations of two cylindrical tanks, *Proceedings of Geotechnics for Sustainable Development -Geotec Hanoi*, pp.457-464, 2013.