

シンガポール地下鉄プロジェクトに関する報告

Report on Singapore MRT Project

吉田 吉孝 (よした よしたか)
西松建設㈱ シンガポール営業所 係長

折田 博生 (おりた ひろお)
西松建設㈱ シンガポール営業所 所長

草野 孝三 (くさの こうそう)
西松建設㈱ 土木設計部 課長

1. はじめに

シンガポールでは、カジノ、大型テーマパークなどの総合リゾート施設が相次いで開業し、F1も誘致されるなど目覚ましい発展を見せており、来国者も増加している。東京都23区程度の広さ約710 km²のなかに、外国人を含めて約500万人の人々が生活するシンガポールでは、効率的な移動空間の実現に向け、長期計画のもと継続的に交通インフラ整備が行われている。このうち、地下鉄MRT (Mass Rapid Transit) についても、継続的に整備が行われている。

当社は、シンガポールにおいて1980年代から、都市中心部での駅舎・トンネル工事、チャンギ空港滑走路下のトンネル工事、操車場建設など多くの地下鉄プロジェクトを手掛け、現在新しいダウンタウン線 (以下 DTL) C929A 工区を受注し施工を行っている。この間2004年には、Nicoll Highway での土留め崩壊という痛ましい事故を招いた。

DTL C929A 工事は、最大掘削深さが30 m 弱の軟弱粘性土中の開削工事を含む工事であり、前回工事と類似のリスクも介在する。前回の工事における反省を教訓とし、今回受注のプロジェクトに最大限生かすべく取り組んでいる。新規プロジェクトの概要及び過去の工事の反省と新規工事への配慮について以下に述べる。

2. プロジェクト概要

2.1 シンガポールの地下鉄整備

当地における地下鉄プロジェクトは、1983年から始まった南北線及び東西線建設工事 (1990年開通) を皮切りに、2003年の東北線開通、2011年の環状線開通、そして現在建設中である DTL (約42 km) が2017年に全線開通となる予定である。また、将来線としてトムソン線及びイースタン・リジョン線が計画されており、2020年には営業線距離が278 km と現在の2倍以上となる¹⁾。住宅と駅をより近接させることで、シンガポール中心部の鉄道利用者は、平均して400 m 以内、徒歩5分の範囲内で駅に到達することが可能となる。図-1に地下鉄路線平面図を示す。

2.2 ダウンタウン線の整備

DTL は全路線が地下構造となっており、3 ステージ

に分けて工事が進められている。

第1ステージ (DTL1) はビジネス中心街を囲むような線形になっており、路線長4.3 km、6 駅を7 工区に分けて施工している。2013年に完成予定である。第2ステージ (DTL2) はビジネス中心街から北西に向かい、路線長16.6 km、12 駅を10 工区に分けて施工している。2015年に完成予定である。第3ステージ (DTL3) はビジネス中心街から東に向けた、路線長21.0 km、16 駅の区間を18 工区に分けて施工しており2017年に完成予定である²⁾。なお、DTL3のみ設計施工案件ではない。

図-2 に DTL 路線平面図を示す。

受注企業の国別内訳では、日系ゼネコンも奮闘しているが、韓国勢の躍進が目玉に留まる。なお、日系で受注し

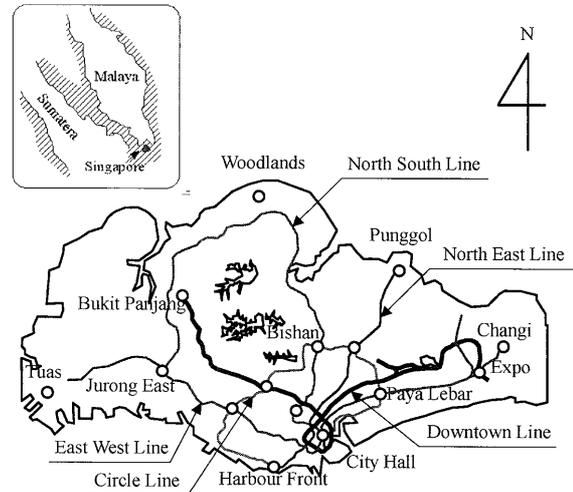


図-1 シンガポールの地下鉄路線平面図

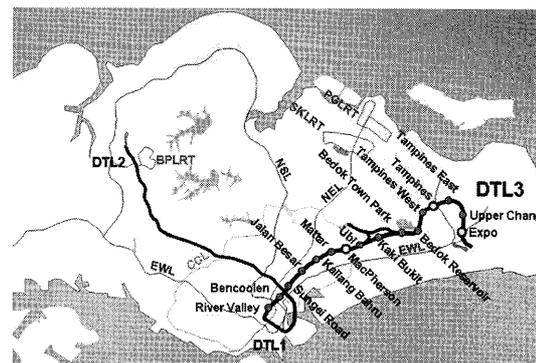


図-2 DTL 路線平面図²⁾

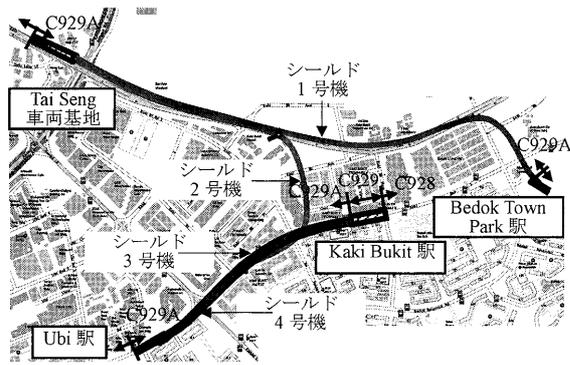


図-3 C929A 工区全体平面図

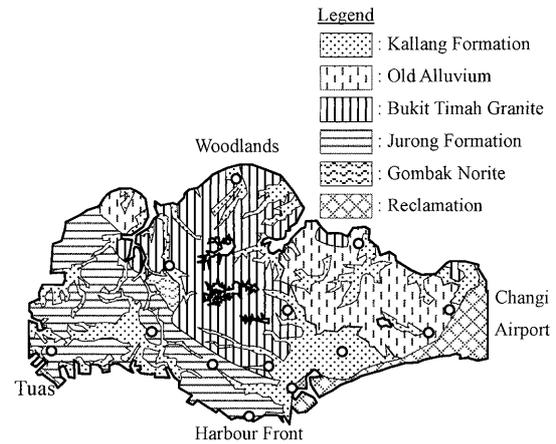


図-4 シンガポールの地層分布平面図

た企業は、当社を含め5社となっている。

2.3 C929A 工区概要

当社が受注したC929A工区は、DTL3の内、Ubi(ウビ)駅~Kaki Buki(カキ・ブキ)駅間(L=900m)の上下線トンネル2本、Ubi駅~Tai Seng(タイセン)車両基地間(L=2000m)のトンネル1本、Tai Seng車両基地~Bedok Town Park(ベドック・タウン・パーク)駅間(L=2100m)のトンネル1本及び発進立坑2か所を含む開削トンネル300mの施工を主に行うものである。図-3にC929A工区の全体平面図を示す。

工期は2011年2月25日から2016年12月30日までとなっており、2012年4月末における進捗は23%である。なお、TBM1号機の発進は2012年6月末を予定している。

3. シンガポールの地層

図-4に各地層の平面的な分布を示す³⁾。大きくは、場所によりKallang Formation(カラン層)、Old Alluvium(オールド・アルビウム)、Bukit Timah Granite(ブキティマ・グラナイト)、Jurong Formation(ジュロン層)の四つに区分され、それぞれ次のような特徴を持つ。

Kallang Formationは全域に広く分布しており、主に河川により運搬され堆積した地層である。

次章において後述するが、河川及び海岸付近においては基盤層となるOld Alluviumの起伏が激しく、海成粘土であるMarine Clay(マリン・クレイ)は厚い箇所では40m程度堆積しているため、土留め及び杭の設計・施工に十分な配慮が必要となってくる。また、Marine Clayの細粒分含有率は95%(粘土分、コロイド分の含有率は40~70%)と高く、自然含水比も50~90%と高い。

Old Alluviumは主に風化したBukit Timah Graniteが河川により運搬され堆積したものであり、東部地域に広く分布している。当該地層の上部は風化されておりN値も30未満であるが、風化部は深は深度方向に30~100以上とよく締まっており、構造物基礎の基盤となる。また、自然含水比は20~30程度、均等係数も10以上あり、盛土あるいは埋立材として利用されている⁴⁾。

Bukit Timah Graniteは中央部から北部にかけて広く

分布している。風化の度合いによりI~VIに分類されるが、最も風化の激しいVIは完全に土砂化している。

Jurong Formationは西部及び南西部に広く分布しており、泥岩、砂岩、礫岩、石灰岩等が層状に重なっている。また、地殻変動により複雑に褶曲している。

今回は、このうちMarine Clay、Old Alluviumを主体とした土層である。

4. 過去のトラブル事例からの教訓

工事の安全性の確保のため、官、企業先、コンサルタント、請負者を含む全体の管理体制が見直された。当社は、請負者として、入札時、工事受注後の計画に際しては、徹底的にリスクを洗い出し、その対処方法を検討した。

4.1 企業先管理体制の見直し

2004年の事故以降、企業先であるLTA(Land Transport Authority:陸運交通局)の設計基準及びプロジェクトの組織体制が大きく見直された。主な変更内容は以下である。

企業先側の現場責任者であるQP(S)(Qualified Person(Supervision))をLTA内からではなく、外部(設計コンサルタント会社)へ委託した。

設計責任者であるQP(D)(Qualified Person(Design))による設計をLTAによる承認過程を経てBCA(国土交通省)へ提出し最終承認を得る手順から、LTA承認前に独立審査機関であるAC(Accredited Checker)による承認過程が追加された。以前からすべての設計計算書に技術士(建設部門)(Professional Engineer(Civil))のサインが必要となっていたが、掘削深度が6mを超える土留めの設計については技術士(土質)(Professional Engineer(Geotechnical))のサインが必要となった。

計測工について、設置から計測管理までを元請業者が行っていたが、LTAから委託された計測業者により行うことになった。

上記のように、責任者を明確にし、責任ある技術者による重層の照査・管理体制が構築された。

報 告

4.2 開削工事における配慮事項

(1) 開削工事の概要

開削トンネルは、土留め壁はすべて RC 地中連続壁であり、壁厚1.0～1.2 m、壁下端は N 値100以上の層に5 m 以上根入れ（壁体長30～50 m）する設計となっている。掘削深度は、Ubi 発進立坑部で約28 m（8 段支保工）、Tai Seng 発進立坑部で約24 m（5 段支保工）となっている（図—5）。

(2) 設計における配慮事項

① 本設構造物相当の安全率の考慮

仮設構造物である土留め壁及び切梁支保工を本設構造物として設計することを義務づけられた⁵⁾。使用する設計基準書及び設計手法に変わりはないが、側圧に掛ける荷重係数が、本設構造物の設計に用いられる1.4の値を使用することが仕様書に明記された。

② FEM 感度解析の実施⁵⁾

特に鋭敏性の高い Marine Clay 及び脆性破壊性の高い高圧噴射攪拌工等の改良体について、せん断強度及び弾性係数について上限下限値を用いた解析の実施が求められる。また、OA 層、G 層及び S 層については、透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-9}$ m/s のオーダーで幅を持っているため、非排水及び排水の両条件での解析が求められる。

この感度分析により、土質定数のばらつきがあった場合においても一定の安全性を担保する設計となっている。

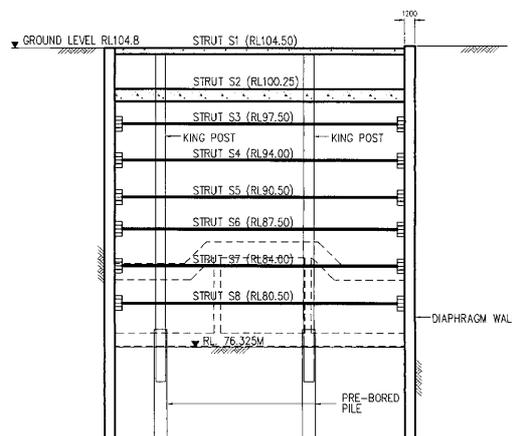
(3) 施工における配慮事項

① 地中連続壁根入れ層（OA 層）の確認

土留め構造物においては、堅固な OA 層に十分に根入れすることで、安定性が確保され、土留め壁の変形抑制が発揮される。一方、シンガポールの OA 層は図—6 に示すように溺れ谷になっている箇所がある。

事故の発生した工事においては、一定の間隔で土質調査が実施されていたが、その間を縫う形で局所的な OA 層の落ち込みが確認され、事故の一要因となった。

OA 層は、Brown/Blue Sand Stone と称されることもあるが、風化が認められない場合には、 N 値も100を超え、粗粒分が85%程度を示すにもかかわらず100 kN/m² 超の粘着力を有し、透水係数も 10^{-8} m/sec オーダーと非常に小さいという特徴を持つ。しかし、風化の度合い



図—5 開削トンネル断面図（Ubi 発進立坑部）

が大きい場合には、粘着力分をほとんど期待できず、透水係数も大きくなる。このため、大深度掘削では、土層の変化に対し、良質の OA 層へ確実に根入れするための施工管理が極めて重要である。

連壁の溝壁掘削はバケット方式であるため掘削中に土質性状を確認できるが、風化した OA 層はその土層判定が難しい。また、掘削中のパネル長の見直しについても配筋の段取り替えが生じる等の課題がある。本工事においては、地中連続壁の掘削前に標準エレメント幅相当の6 mの間隔で支持層付近の確認を目的とした標準貫入試験を行い、良質の OA 層の天端レベル、土層変化を把握して連壁長を決定した。本試験により支持層に1～3 m 程度深い箇所が見られたが、幸い大きな支持層の落ち込みは認められなかった。

② 計測体制について

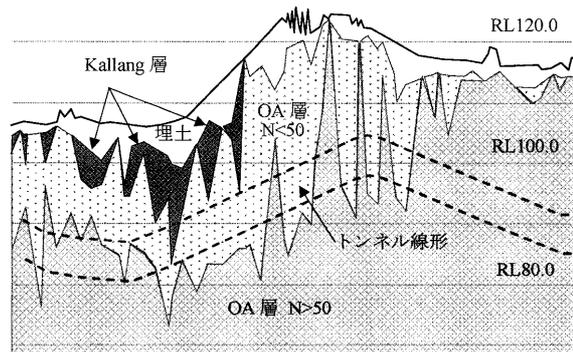
開削部の計測については、傾斜計による土留め壁の変位計測、切梁軸力計測、及び土留め壁周辺の沈下計測が主たる計測である。FEM 解析を実施している断面においては、土留め壁背面の地盤沈下を掘削深さの5.5倍の範囲で計測する。また、切梁の軸力管理については、各段において全切梁本数の15%について計測を実施し、その内の25%については荷重計により計測を行い、75%についてはひずみ計を用いている。計測点数が多いことで計測精度は上がるが、単に上がってくる膨大なデータの処理に追われないよう留意する必要がある。

計測については、各部署の関係技術者が参加する計測ワーキングを毎週開催し、施工状況、計測値の動向を関係者が共通認識し工事を進めている。地盤変状の兆候を早期にキャッチすることが重要であり、計測機器周りの整理整頓、作業開始前に計測機器位置の確認の徹底を作業員へ指示している。また、土日においても工事及び計測が実施されており、休日の連絡体制の確認の徹底等にも留意して工事を行っている。

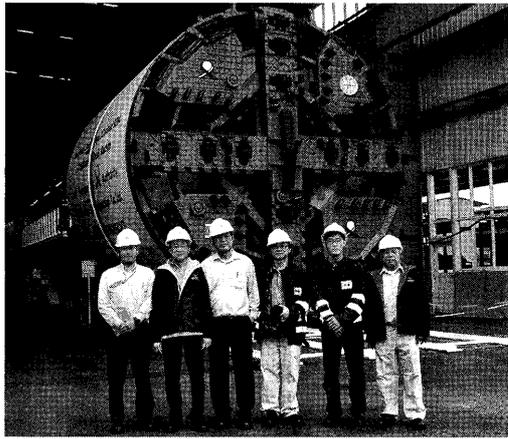
4.3 シールド工事における配慮事項

(1) シールド工事の概要

当工区の地層概要であるが、シールドトンネル区間において局所的に沖積粘性土が出現するが、洪積砂質土である OA 層（ N 値30以上、細粒分含有率20～40%）が支配的となっている（図—6 参照）。なお、OA 層は石英分を多く含み、ビットの早期摩耗が懸念され、特記仕



図—6 C929A 土質縦断面図



写真一 1 シールド機 (外径 $\phi 6.64$ m)

表一 1 近接対象物一覧

近接対象物	近接状況	最小離隔	工事停止レベル	
			沈下	傾斜
1.KPE 高速函渠	直下横断	3.9m	15mm	1/1500
2.高架橋橋台	杭横通過	1.5m	15mm	1/1500
3.高架橋橋脚	杭横通過	1.0m	15mm	1/1500
4.商業ビル	杭下通過	5.2m	15mm	1/1500
5.擁壁下	杭下通過	6.2m	10mm	1/1000
6.歩道橋基礎	杭下通過	杭切断*	30mm	1/500

*支持杭を事前に盛替え, シールド内から掘削撤去する

様書において, 200 m 毎のピット交換を要求されている。

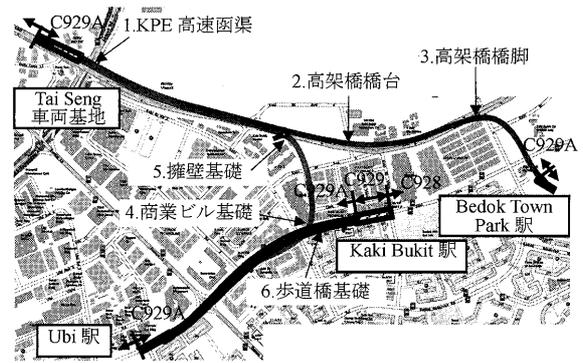
シールドトンネルの施工は泥土圧式シールド機 (マシン外径6.64 m) 4 台で行い, セグメントはすべて RC セグメント (コンクリート設計基準強度60 N/mm²) となっており, 外径6.35 m, 厚275 mm, 幅1.4 m である。トンネルの土被りは 2D 以上あり, 17~50 m である (写真一 1)。

(2) 施工における配慮

今回の工事の特徴として, シールドの路線に多くの重要構造物が近接している。近接状況を表一 1 及び図一 7 に示す。

工事においては, 工事停止レベル (Work Suspension Level: WSL) が設けられており, この値に達した場合には, 工事停止命令 (Stop Work Order) が出され, 工事中断となる。再開には, 適切な対策を講じた上で, BCA を含む関係各署の承認を要するため, 工事再開には時間を要する。安全面はもちろん工事遅延のリスク回避の意味でも, きめの細かい計測管理を実施することで, WSL に達しないように慎重な施工管理を行う必要がある。

本工事では, これらへの対応の一例として下記のような対策を講じている。



図一 7 近接対象構造物

- Alert Level (WSL の70%), WSL に達した時は関係者へ携帯にて通知する
- 近接構造物はリアルタイムモニタリングとする
- 商業ビル下部の通過は, 休日となるよう調整する

5. おわりに

本工事の進捗は23%程度であり, 大深度掘削や近接施工といったポイントはこれからである。先の工事での教訓を忘れることなく, きめ細かい現場管理のもと安全な工事の進捗と, 無事の竣工を目標に日々工事を行っていく所存である。

2012年 3月 15日, 16日に開催された第一回シンガポール-日本トンネルセミナーでは, 複雑化する日本の地下鉄, 道路トンネル工事における新技術について産学官関係者から発表された。いずれもシンガポールでは採用されていない技術であり, 政府の進めるクールジャパンに相応しく日本の底力を感じさせる技術が多かった。コスト面, 特許, 設計基準の相違等クリアにしなければならない障害も多いが, 今後もこのような技術交流を続け, 日本の技術が広く世界へ発信されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) Land Transport Master Plan 2008: Land Transport Authority.
- 2) Downtown Line DTL Stages At A Glance in Land Transport Authority Website: http://www.lta.gov.sg/content/lta/en/projects/downtown_line_/dtl_stages_at_a_glance.html, (2012/04/26確認)。
- 3) J. Nicholas Shirlaw et al: Design and Construction Issues for Excavation and Tunnelling in Some Tropically Weathered Rocks and Soils, *GeoEng* 2000, Australia.
- 4) 足立格一郎: 海外工事と土-東南アジアと中近東のケース-, 土質工学会, pp. 69~84, 1984.
- 5) Land Transport Authority Engineering Group: Civil Design Criteria for Road and Rail Transit Systems, Feb 2010.

(原稿受理 2012.5.17)