

幹線道路直下での地下鉄駅の構築

シンガポール地下鉄トムソン線 T212 工区

林 伸 幸

シンガポールの地下鉄トムソン線は、LTA（陸上交通庁）の発注による工事で、マレーシア国境近くの北端ウッドランド地区からカジノ・植物園等で賑わう最南端のマリーナ地区までを結ぶ全長約 30 キロ、全 25 工区からなる。

当報文では、地下鉄トムソン線工事のうち「アパートムソン駅及びトンネル工事（T212 工区）」について駅躯体の掘削開始から底版の打設完了まで 1 年間という短い工期の中、非常に狭い作業ヤード、軟弱地盤上に立地する築 40 年以上の民家との超近接施工など厳しい制約条件下で施工した駅舎の逆巻き工法について、施工上の課題とその解決策を報告するものである。

キーワード：シンガポール、地下鉄、仮設構造物、逆巻き工法、地下埋設物

1. はじめに

シンガポールでは、1965 年の独立以来、経済成長と国際競争力強化のためインフラ事業への積極的な投資がなされている。とりわけ MRT（Mass Rapid Transit）の路線網は年々拡大しており、2022 年時点で既存の 5 路線に加えシンガポール島を南北に縦断するトムソン線のうち北部の 3 駅が 2020 年 1 月、当工区を含む 6 駅が 2021 年 8 月、2022 年 11 月に残りの 11 駅が開通したところである。現在、トムソン線の延伸線であるシンガポール東部のチャンギ空港を結ぶイーストコースト線、シンガポール西部地区を網羅するジュロンリージョン線とシンガポール島中央を東西に結ぶクロスアイランド線の建設が進行中である。

T212 工区は、トムソン線のほぼ中間地点であるアパートムソン地区に地下 2 層のアパートムソン駅、当駅と隣工区のカルデコット駅の間に位置する発進立坑および 4 本のシールドトンネル（掘削延長約 3.9 km）を構築するものである¹⁾。工事期間は、工事を受注した 2013 年 11 月から 2021 年 8 月の開業まで約 8 年間と長期にわたった。なお、新型コロナウイルスの感染拡大に伴うロックダウンなどの影響と工期終盤の 2018 年に追加発注された出入口の施工により 1 年間の工期延伸を行っている。図-1 に当工区的位置、写真-1 に完成したプラットフォームの写真、図-2 にプロジェクト全体図を示す。

当報文では、非常に狭い作業ヤード、一般民家との

超近接施工であるなどさまざまな厳しい条件下での逆巻き工法による駅舎の施工について報告するものである。

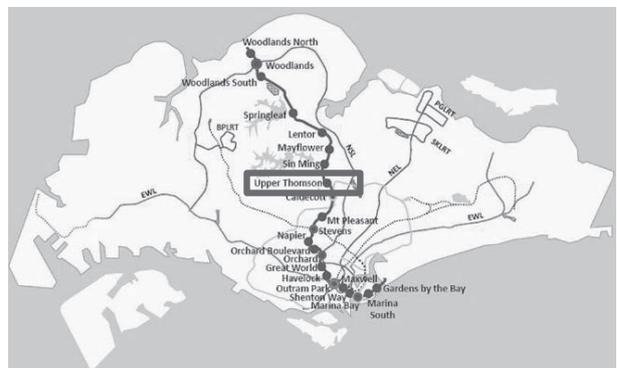


図-1 プロジェクト位置図



写真-1 アパートムソン駅プラットフォーム

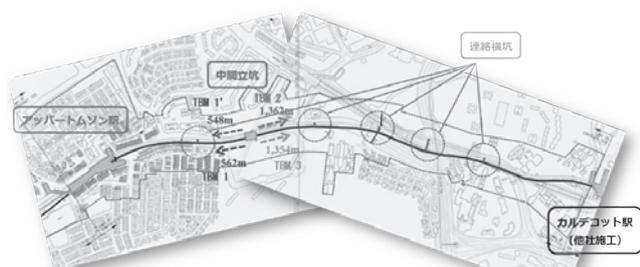


図-2 プロジェクト全体平面図

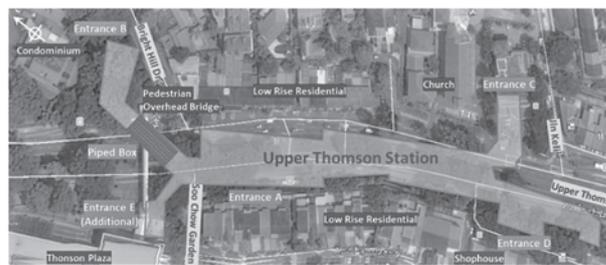


図-3 アップパートムソン駅平面図

2. 工事諸元

契約工期 2013年11月～2020年5月(78ヶ月)

変更工期 2021年5月(90ヶ月)

契約形態 施工のみ(仮設工は請負者設計施工)

- ①地下駅 L = 228 m, W = 21 m, D = 20 m
- ②出入口 4ヶ所 + 1ヶ所(追加変更指示)
- ③発進立坑 L = 41 m, W = 25 m, D = 30 m
- ④トンネル 泥水式シールド3台, 掘削延長 = 3,826 m
- ⑤道路迂回工 1式
- ⑥水路迂回工 1式
- ⑦埋設物(上下水道管・共同溝)迂回工 1式
- ⑧RC地下連続壁 (t = 800 ~ 1,200 mm) 21,000 m³
- ⑨柱列式地下連続壁 (Φ 1,000 ~ 1,200 mm) 354本
- ⑩場所打ち杭 (Φ 800 ~ 1,200 mm) 60本
- ⑪駅部主要数量
掘削 114,000 m³, コンクリート 22,500 m³,
鉄筋 5,600 t, 切梁支保工 1,500 t,
覆工板 6,660 m²
- ⑫パイプルーフ工 L = 33.0 m, 内空 W = 8.6 m, H = 6.0 m
- ⑬建築仕上げ工 1式

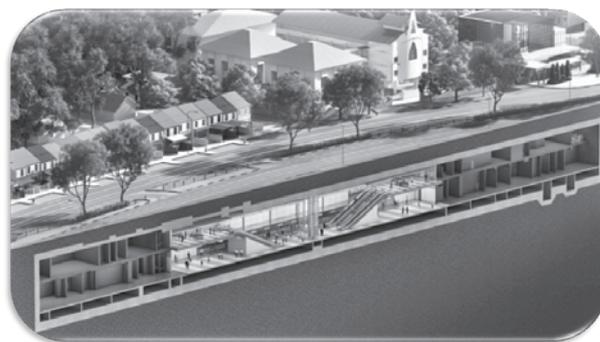


図-4 アップパートムソン駅鳥瞰図

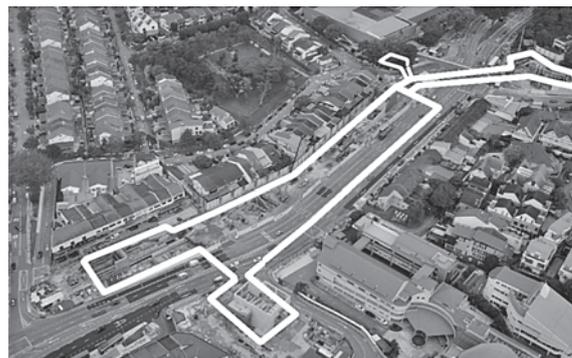


写真-2 アップパートムソン駅施工状況

3. アップパートムソン駅の施工

アップパートムソン駅は、地下2階構造の地下駅であり、出入口は追加設計変更による1箇所を含め5箇所である。

図-3, 4にアップパートムソン駅平面図および鳥瞰図を示す。

(1) 周辺環境

アップパートムソン駅は、片側3車線の主要幹線道路直下に位置し、ショッピングモール、古い一般家屋、古い商業家屋、教会、歩道橋、コンドミニウムに近接している(写真-2)。なかでも古い一般家屋との最小離隔は1.5mであった。また、掘削箇所には不明物を含め多種多様な埋設物が多重に埋設されている(写真-3)。



写真-3 多数の埋設物

(2) 地質

駅部の地質は、軟岩～中硬岩の花崗岩(Bukit Timah Granite, GIII/GII)の上部にN値10～50程度の風化花崗岩(GIV, GV)が堆積し、さらに上部の地表部はN値10以下の非常に軟弱な沖積層(Kallang

Formation, E, Fs, Fc) が層厚 5 m ~ 15 m 程度で堆積している (図-5)。

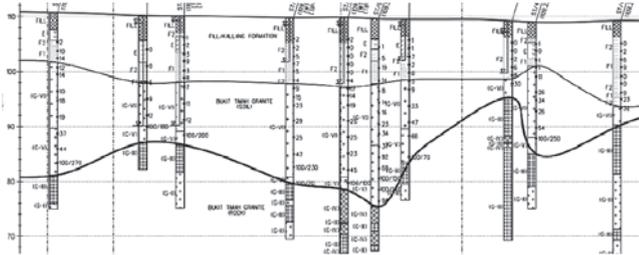


図-5 地質縦断面図

(3) 準備工

本体着工前の準備工事として駅掘削範囲内にある下水道管 (図-6, 推進工法, Φ800 mm, L = 400 m, マンホール 12 箇所) および用水路 (図-7, 2 連ボックスカルバート, 幅 6~8 m × 高さ 3 m × 延長 300 m) の切り回しを行った。これらの移設予定箇所には, 前述のとおり高圧電線や通信ケーブルなど多数の埋設物が埋設されており, 先行工事である一部の埋設物の移設作業の遅れに伴い全体工程に遅れが生じた。

また, 埋設物の切り回しに並行して駅部の掘削開始までに 4 回の道路切り回しを実施した。

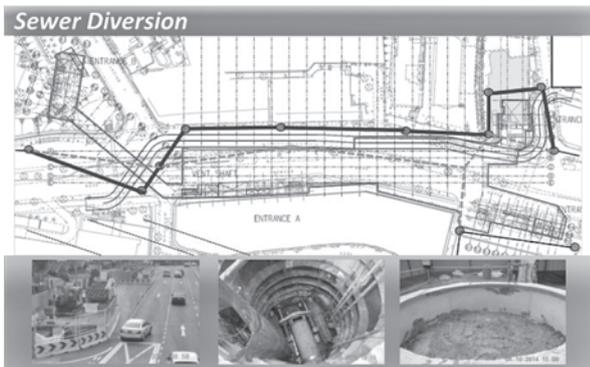


図-6 下水管切り回し工

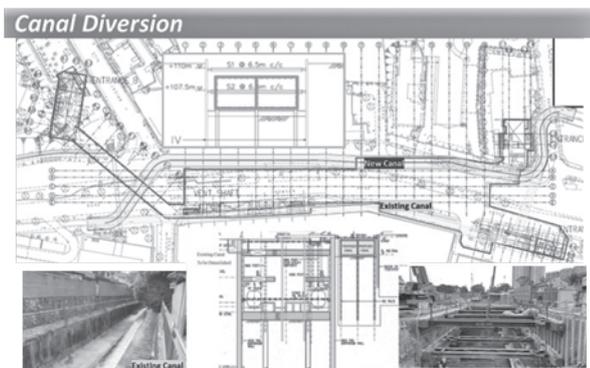


図-7 水路切り回し工

(4) 土留め壁

駅部の土留め壁としてコンクリート製地下連続壁 (Diaphragm Wall, 以下 Dwall) と一部柱列式地下連続式 (Secant Bored Pile, 以下 SBP) を施工した。Dwall は, 掘削時の土留め壁および本体構造物の側壁として設計されている。SBP は, 岩盤線の高い一部区間に仮設土留め壁として設計されており, 本体側壁は別途構築した。

Dwall は, 道路を切り回しながら北側, 駅複部, 南側の合計 3 ステージに分けて施工した (図-8)。SBP は, 南側のステージにおいて Dwall と並行して施工した。なお, これらの施工は, 防音対策はもちろんのこと近隣住民への説明を何度も行いながら 24 時間体制で実施した。Dwall の施工状況を写真-4 に示す。

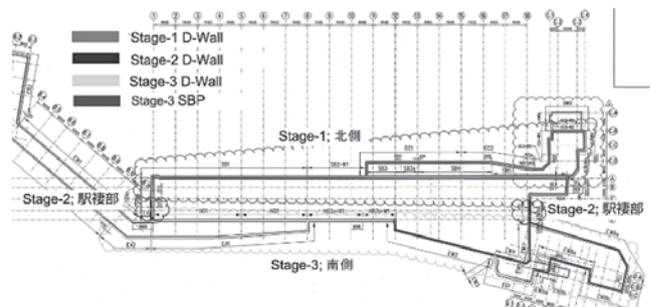


図-8 土留め壁平面図



写真-4 地下連続壁施工状況

(5) 土留め支保工および仮設構台

駅上部に設置した仮設構台上に道路 3 車線分を通し, 残ったスペースを施工ヤードとして利用した。施工ヤードの幅は 18 m ~ 25 m であった。仮設構台と上床版までの離隔が小さいことに加え, 上床版上部に高圧電線用のトレンチおよび一段切梁が設置されるため, 覆工受桁と桁受材を同一高さとしてボルトにより結合した。掘削順序は, 上から順に鋼製 1 段梁, 上床版, 中床版, 鋼製 2 段梁, 底版である。切梁間隔の広がる仮設開口周りには剛性の高いコンクリートの切梁, 腹起しを設置した。図-9 に土留め支保工断面図を示す。

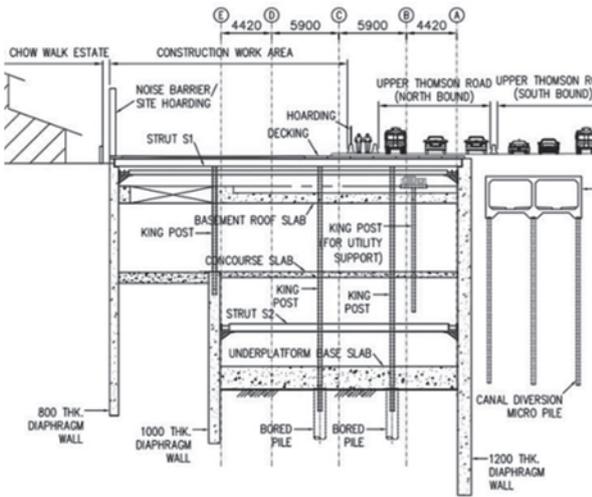


図-9 土留め支保工断面図

(6) 逆巻き工法による掘削および床版構築

掘削は起点側 (GL-1) より開始し、掘削開始から約1年で全ての掘削および底版コンクリートの打設が完了した。上床版より下層の掘削および躯体の構築は、3箇所仮設開口部 (6 m × 12 m) を利用し (図-10)、開口部毎に作業箇所を区切り、掘削→床版打設のサイクルを繰り返して施工した。掘削には14t級のバックホウ (Excavator) を開口部1箇所当たり3台から5台使用し、リレー方式にて開口部まで土砂を運搬した。掘削残土は、深度30 mまで対応可能なテレスコピック型バックホウにて積込み、20tダンプトラックにて発注者指定の土捨て場まで運搬した。各段の掘削完了後に厚さ75 mmの均しコンクリートを打設し、縁切り用に厚さ6 mmの薄ベニヤ板を敷設してその上に直接床版コンクリートを打設した。中床版の施工が完了した箇所からDwallの化粧壁 (Skin Wall) や柱などの内部構造物の施工を先行して進めた。

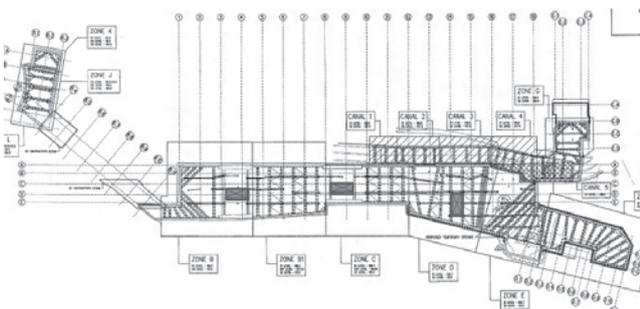


図-10 仮設開口位置図

4. 施工上の課題と対策

シンガポールでは、電線や通信ケーブルを含む多数の埋設物が地下に埋設されており、特に当工区のように

な古い幹線道路直下には使われていない古いケーブルも多数存在し、その確認作業にも多大な時間と労力を要する。また、契約上地下3 m以内の人工物は予知可能なものとして扱われ、全て請負者側の責任となる片務契約となっており、設計変更の対象とはならない。本工事においてもこれらの埋設物の処理に時間がかかり、掘削開始前に全体工程に大幅な遅れが生じていた。これに対し、幹線道路直下を横断する地下通路構築用のパイプルーフの施工に引抜型推進機を採用し³⁾、また仮設水路による水路の早期切り回しにより概ね計画工程どおりに掘削に着手した。しかしながら、想定より高い岩盤線、DwallやSBPの進捗の悪化、周辺地盤の沈下による工事中断命令などの懸念があったため、工程遅延防止策として以下の対策を実施した。

(1) 鋼矢板止水壁による早期掘削開始

当初設計では、地下水低下防止のため全ての土留め壁完了後に上床版の掘削を開始することになっていたが、GL-8およびGL-12に鋼矢板を設置して止水性を確保するよう設計の変更を行った (図-11)。また、GL-1からGL-5の中床版の掘削開始時点においてもGL-18付近の一部の土留め壁の施工が終わっていなかったため、揚水試験により止水性の確認を行って掘削を進めた。これらの対策により、急激な地下水位の低下を防ぐとともに中断することなく掘削を進めることが可能となった。

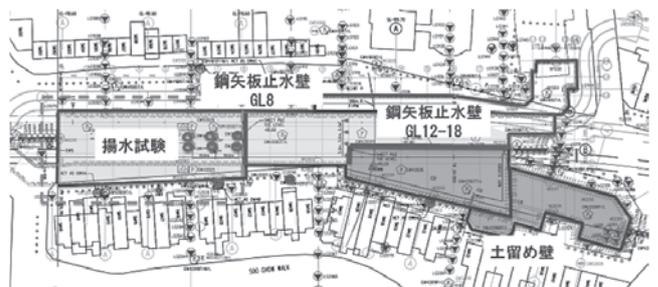


図-11 鋼矢板止水壁設置位置図

(2) 中硬岩への対応

駅終点側の岩盤線が想定より最大で8 m程度高く、岩盤自体も非常に硬質 (GII, 一部RQD = 100%) であった。Dwallや止水注入ボーリングの施工速度が極端に低くなったため、発破併用掘削の準備を進めた。地表付近には砂層 (Fs) が厚く堆積していたため、事前に弊社東京本社の協力を得て発破振動による液状化評価を行い、発破による周辺構造物への影響が許容範囲内に収まることを確認した。また、地元住民への説明会を開催し、警察からの許可ももらい準備を整え

た。しかしながら、発破併用掘削となると最低でも2ヶ月程度の工程の遅延が懸念された。

そこで、掘削の施工協力会社と協議を重ね、弊社施工のDTL C936工区においてBoulderの小割りで実績のある大型ブレイカ(2t)を14t級バックホウに搭載することにした。固い岩盤の出現直後に試験施工を実施したところ、時間はかかるものの破碎可能であることが判明した。発破を行うよりも掘削スピードは圧倒的に速かったため、大型ブレイカを3台に増やして全ての岩盤を発破なしで破碎した。

(3) 中間杭の撤去

中間杭の撤去は、当初設計では上床版を埋戻して交通荷重等上載荷重を分散させた後に開始することになっていたが、出入口の仕上げや道路の切り回しを待っているのは到底工期に間に合わないため、上床版の埋戻し前に撤去できる方法として覆工板上の上載荷重を受け替える方法を検討した。受け替え方法として、構造壁および柱による床版の支持、または覆工受け桁を支柱にて受け替え上床版に作用する集中荷重を分散させる方法を採用した。中間杭毎に受け替え計算書を設計者に提出して承認をもらいながら撤去を進め、駅躯体の部分竣工前に全ての中間杭の撤去を完了した。

(4) 施工図

逆巻き工法では上床版よりコンクリートを打設していくため、開口や埋設物の位置はあらかじめ決めておく必要がある。MRT工事では、構造図、建築仕上げ図、設備計画図など3種類以上の図面があり、お互いの整合が取れていないことがほとんどである。そのため、仮設開口を含め全ての図面を加味した施工図が必要不可欠になる。当工事においては、経験のある日本人技術者が中心になり、コンクリート打設の1ヶ月以上前に施工図(図-12)を完成させながら打設を進めた。

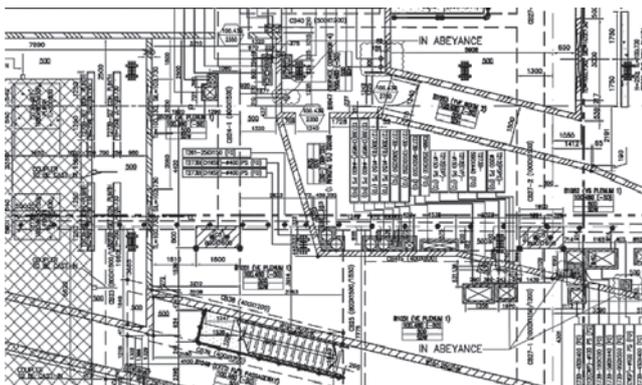


図-12 床版施工図

しかしながら、施工中に開口部や壁の位置が変わることなど頻繁にあり、施工図の改訂が10回以上に及ぶことも珍しくなかった。それでも殆ど躯体の手直しが無かったことを考えると極めて精度の高い図面であり工期、品質を遵守する上で重要な要因であった²⁾。

(5) 仮設開口部の追加による施工速度の向上

駅終点側(GL-12～GL-18)は、駅幅が始点側に比べると約2倍あるが、当初設計では仮設開口部は1箇所のみであった。各段の掘削が完了しないと次工程である床版と切梁の施工が開始できないため、並行作業ができるようさらに仮設開口部を増やす計画に変更した。開口部の位置は、切梁と干渉しないこと、内壁や柱などの永久構造物と干渉しないこと、機械室など早期に設備業者(SWC: System Wide Contractor)への引渡しが必要な箇所は避けること、床版の応力が小さいことを条件に合計3箇所選定した(図-13)。設計変更は、当社からの提案をもとに設計会社にて構造計算、設計図の変更を行った。開口部の追加により掘削とコンクリート工事または切梁設置の輻輳作業が可能となり、作業の平準化も図ることができた。また、開口部の一部は当社および設備業者の資材運搬ルートとしても活用し、建築仕上げ工事等の進捗促進にも貢献した。

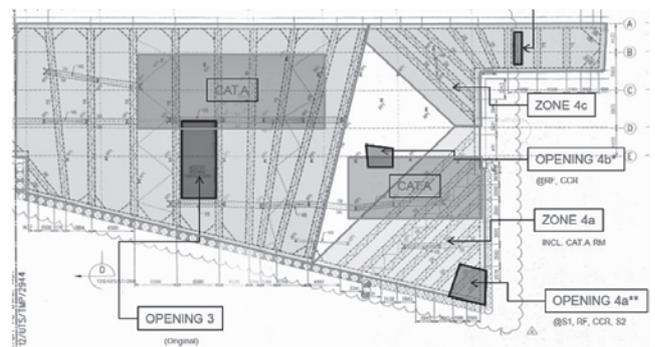


図-13 追加仮設開口位置図

5. おわりに

シンガポールでは地下鉄工事以外に南北を結ぶ地下高速道路とサイクリングパスからなるノースサウスコリドーの建設が進行中である。チャンギ空港では、コロナ禍の影響で計画に遅れが出ているものの既存の第1～第3の3つのターミナルを合わせた大きさよりも広い敷地の第5ターミナルの建設が予定されており、引き続き旺盛な建設投資が見込まれている。

当地での事業を継続するため当社も入札に取り組ん

でいるが、ローカル企業や中国企業との価格勝負では分が悪いため、必然的にこれまでの経験と実績を活かせる難易度の高い工事の入札に取り組むことになる。コロナ禍以降の労働者不足とシンガポール人労働者に対する外国人労働者の割当数が政府により減らされているため、直近の入札では省力化が強く求められている。省力化に加えて効果的な安全、騒音、振動対策が可能な新技術を積極的に提案していくことが重要であり、日本の施工協力会社やサプライヤーの新規参入に期待したい。

JCM/A

《参考文献》

- 1) トンネル岩盤掘削における RQD 値とシールド掘進速度について 第 28 回トンネル工学研究発表会
- 2) シンガポール地下鉄工事-鉄道設備・システムとの調整 電力土木 415 2021.09
- 3) シンガポールでの地下鉄工事 土木施工 2022 年 12 月号

【筆者紹介】

林 伸幸 (はやし のぶゆき)
佐藤工業(株)
シンガポール支店 土木部
T212 作業所
所長

