

シンガポール地下鉄 C929A 工区 土圧式シールド掘進に関する技術的課題および考察 Technical Issues and Discussions for Tunnel Mining by Earth Pressure Balance Machine, Singapore MRT C929A

吉田 吉孝*

Yoshitaka Yoshida

星 光二郎**

Kojiro Hoshi

要 約

本 C929A 工区は、市街地において、シールドトンネル延長約 6km を合計 4 台の土圧式シールド機で掘進する工事であった。主な技術的課題として、① 2 km 以上の長距離掘進、② 供用中高速道路トンネル直下の掘進、③ 立坑内シールド通過、④ 大土被り下（52 m）における商業ビル直下の掘進および⑤ 3 本併設シールド（最小離隔 1.8 m）が挙げられ、これらに対する事前の計画および実測計測データ等を基にした考察について、本論文にて報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 長距離掘進
- § 4. 高速道路トンネル直下の掘進
- § 5. 立坑内シールド通過
- § 6. 大土被り下、ビル直下の掘進
- § 7. 3 本併設シールド掘進
- § 8. おわりに

§ 1. はじめに

シンガポール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および東西線建設工事（1987 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、現在建設中であるダウンタウン線が 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、東部地域線、横断線、ジュロン地域線が事業化あるいは計画されており、2030 年には地下鉄の総延長が 360km（現在 178 km）となる。当社の施工実績は、1984 年着工の City Hall 駅から、現在施工中の案件を含め 10 駅、シールドトンネル延長約 24.4 km となっている。

今回報告する C929A 工区が属するダウンタウン線は、全線が地下構造となっており、総延長 42 km、34 の駅を合計 35 工区に分けて発注されている（図-1 参照）。

本論文では、C929A 工区における泥土圧シールド掘



図-1 地下鉄路線図¹⁾

進に関する以下の技術的課題（位置関係は、図-4 参照）について、その対策および成果を報告するものである。

- ① 2 km 以上の長距離掘進
- ② 高速道路トンネル直下の掘進（離隔 4 m）
- ③ 立坑内シールド通過
- ④ 大土被り下、ビル直下の掘進（最大土被り 52 m）
- ⑤ 3 本併設シールド（離隔 1.8 m）

§ 2. 工事概要

工事名：ダウンタウン線第 3 期 C929A 工事

企業先：Land Transport Authority of Singapore

工 期：2011 年 2 月 25 日～2016 年 12 月 30 日

施工者：当社単独

* 国際事業本部地下鉄UBI(出)(現:地下鉄マリーナベイ(出))

** 国際事業本部地下鉄UBI(出)

2-1 土質概要

シンガポールの地層は大きく4つに区分され(図-2)、今回工事エリア付近は Old Alluvium (以下, OA 層)と呼ばれる洪積土が支配的となっている。この OA 層は、シンガポール東部を中心に広がっており、現在施工中であるケーブル・トンネル工事を含め前述した将来線においても多く出現する地層である。

本工事の土質は、シールド掘進区間の95%が洪積層である OA 層であり、カラン層と呼ばれる沖積層が局所的に出現する。図-3に土質縦断面図を示す。なお、シンガポールでは海拔0mを RL100m と表記する。

OA 層の一般的な特徴として、N 値が高く、均等係数が10以上、細粒分含有率が20%以上という、硬質で粒度分布が良く、自立性の高い過圧密地盤である²⁾ことが挙げられる。そのため、シールド掘進に伴う先行沈下や後続沈下等の地盤変位は発生しにくい、透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-8}$ cm/s と幅を持っているため、切羽圧の設定には注意を要する地盤でもある。また、N 値50以上の砂質 OA 層は石英分を多く含む^{3), 4)}場合があるため、ビットの早期摩耗が懸念された。

2-2 シールド工事概要

シールド工に関する主要数量を表-1に、全体平面図を図-4に示す。なお、最小掘進半径は190mである。

§3. 長距離掘進

シールド1号機および2号機の掘進延長がそれぞれ2km以上となる。また、石英分(写真-1)を多く含む可能性のある硬質な砂質 OA 層が路線の内約30%を占めるため、カッタービットの早期摩耗が懸念された。なお、ビット交換は圧気作業による機内からの交換方式とした。

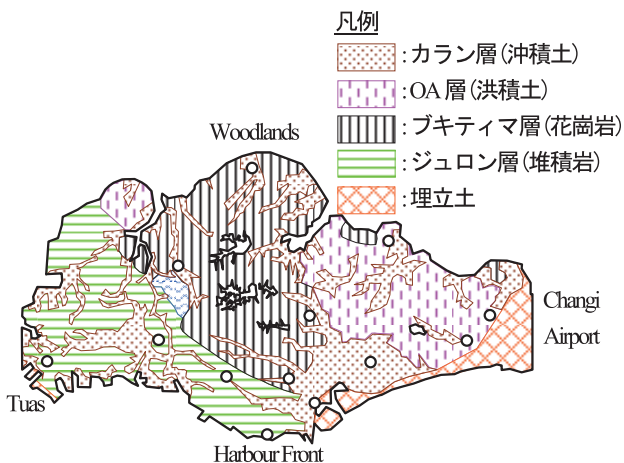


図-2 地層分布図¹⁾

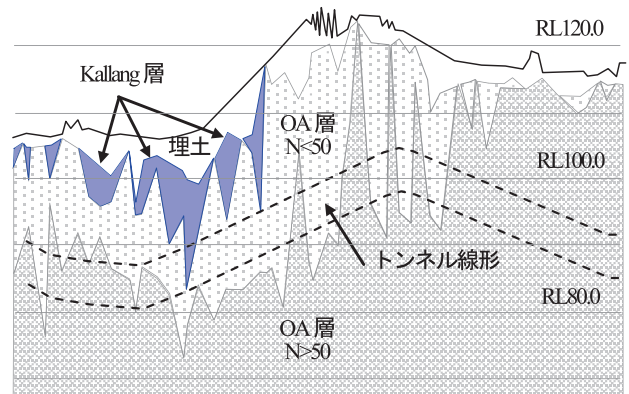


図-3 土質縦断面図¹⁾

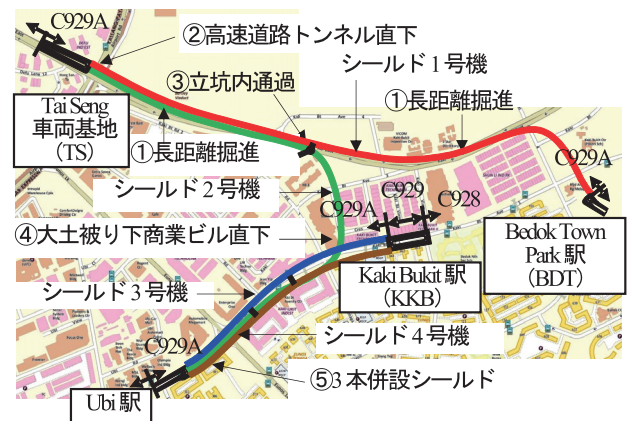


図-4 929A 工区全体平面図¹⁾

表-1 シールド工主要数量

マシン	ルート	延長	リング数
1号機	TS ⇒ BDT	2,109m	1,508
2号機	UBI ⇒ TS	2,022m	1,446
3号機	UBI ⇒ KKB	909m	651
4号機	UBI ⇒ KKB	909m	651
合計		5,949m	4,256



写真-1 OA 層中の石英分

3-1 OA 層の摩耗特性

企業先が事前に実施した摩耗試験結果⁴⁾によれば、図-5に示す通り、N値が50を超える砂質OAにおいて、他のOAと比べビットの摩耗が激しいことが予想された。なお、この試験方法はノルウェー工科大学が開発したNTNU-SATと呼ばれる試験⁵⁾である(図-6参照)。一般的な試験方法であるCERCHAR試験は細い針を使用するため、土砂山の場合、供試体中に石英分が浮いた状態となり、実際の摩耗特性を危険側に推定する可能性があるため、今回は不採用となっている。NTNU-SAT試験による摩耗度合いの区分を表-2に示す。

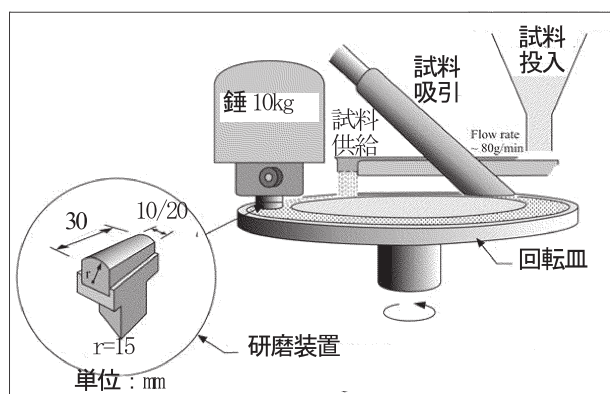


図-6 NTNU-SAT 試験概要

3-2 ビット摩耗量

カッタービットの配置を図-7にそれぞれ示す。先行ビット超硬チップの高さは45mmであるが、スクレーパービット超硬チップとの高低差は35mmであるため、先行ビット交換の目安は摩耗量35mmとしている。先行ビットのパス数は、最外周のみ2パスである。

企業先原設計がNOMST連壁であったため、NOMSTビットが配置されているが、実際の発進方法はジャンボブレイカーにより連壁を研る計画とした。変更の理由として、連壁コンクリートの一軸圧縮強度が 60 N/mm^2 を超え、ディスクローラー・ビットへの変更が必要となるためである。なお、先行ビットの早期摩耗を防ぐ目的として、NOMSTビットは配置することとした。

シールド1号機掘進におけるビット摩耗量の実績を表-3に示す。約2.1kmの掘進でビット交換を5回実施した。このデータは地山転送距離が最も長い外周ビットについてまとめたものである。特に4回目手前から5回目のビット交換地点において、石英分含有率が当地の花崗岩並みとなる35%程度となり、ビットの摩耗が激しかった。これは、同じ砂質OA層であっても、石英分含有量に大きな差があることを示している。

この1号機の結果を基にして、以降の2, 3, 4号機のビット交換位置について、ボーリング調査(調査間隔は50m以下)結果を基に、砂質OA層は石英分が多い

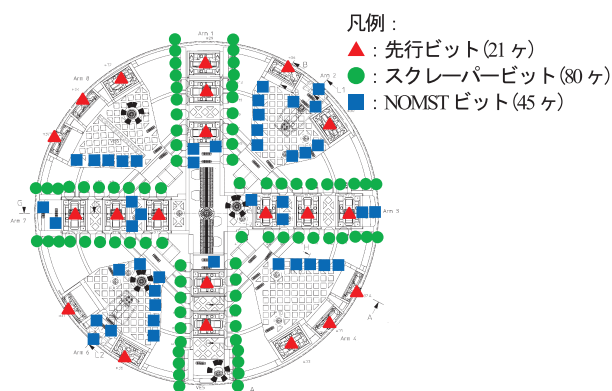


図-7 カッタービット配置図

表-2 摩耗度合い区分 (NTNU-SAT)

摩耗指数	摩耗度合い	岩種 (参考)
< 1	極端に低い	
2-3	非常に低い	石灰岩
4-12	低い	泥岩
13-25	普通	OA層
26-35	高い	
36-44	非常に高い	シルト岩
> 44	極端に高い	砂岩、珪岩

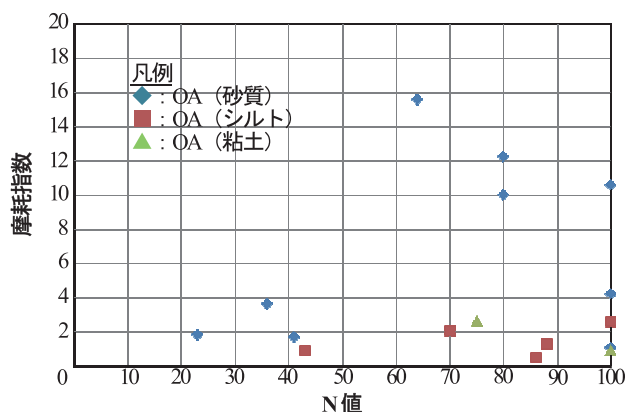


図-5 摩耗試験結果 (OA層)

表-3 ビット転送距離と摩耗量の関係

ビット交換	平均値		カッター総回転数 R	外周ビット	
	カッター回転速度 rpm	掘進速度 mm/min		ビット転送距離 km	平均摩耗量 mm
1回目	1.8	19.3	36,700	382	32
2回目	2.2	26.2	50,500	526	19
3回目	2.4	22.4	55,100	574	7
4回目	2.3	20.4	36,000	375	45
5回目	2.2	17.2	12,400	129	15

と仮定し計画した。2号機については、ビット交換回数を9回と想定したのに対し、結果は7回。3及び4号機については、計画回数が4に対し、結果は2回であった。掘進における摩耗の確認方法は、掘進速度の低下およびシールド機胴体に発生する摩擦力の増加を判断基準とした。また、近接構造物手前において目視確認を行った。

図-8に2号機の最外周先行ビット摩耗量の予測値と実測値の比較を表したグラフを示す。なお、予測上限値とは砂質OA層に石英分が多いと仮定した場合、予測下限値とは反対に石英分が少ないと仮定した場合の予測値である。この図から、予測下限値と実測値がほぼ同一であることが読み取れ、2号機の通過した砂質OA層の石英分含有率が多くなかったと考える。なお、3号機および4号機についても予測下限値と似た傾向を示している。

§4. 高速道路トンネル直下の掘進

シールド1号機の初期掘進中および2号機の到達直前において、TS立坑より約40m離れた地点から Kallang Paya Lebar Expressway（以下、KPE）と呼ばれる高速道路トンネル（写真-2参照）の直下（離隔約4m）を約36mにわたり直交交差する形で掘進した（図-9参照）。掘進にあたって、過小／過大な切羽圧あるいは裏込め注入量および注入圧による沈下や隆起とともに、構造目地からの加泥材や裏込め材の噴発が懸念された。

4-1 トライアル計測

シールド1号機初期掘進時において、KPE直下におけるシールド掘進パラメーター設定のため、発進立坑からKPEまでの約40m区間にトライアル計測を3断面設けた。計測項目は地表面および地中沈下量であり、計測配置図を図-10および図-11に示す。なお、地中沈下量はシールド機直上2mの位置を計測している。

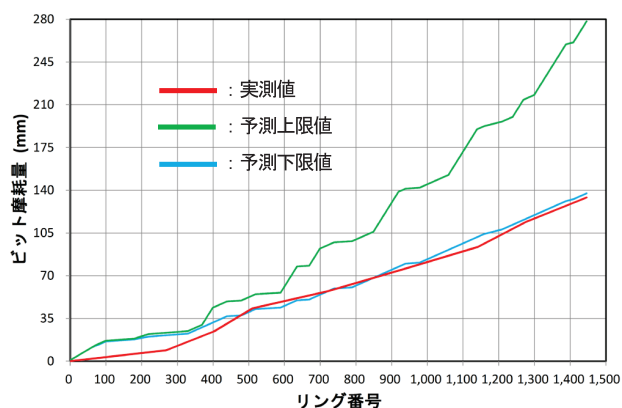


図-8 最外周先行ビット摩耗量の比較（予測と実測）



写真-2 KPE トンネル

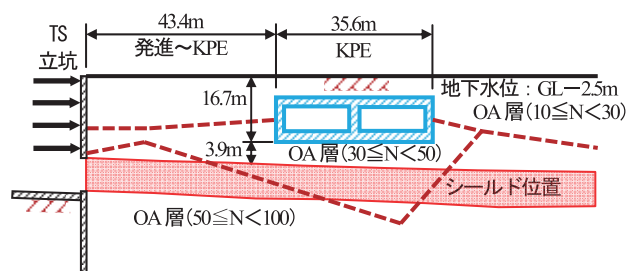


図-9 KPE トンネル付近縦断面図

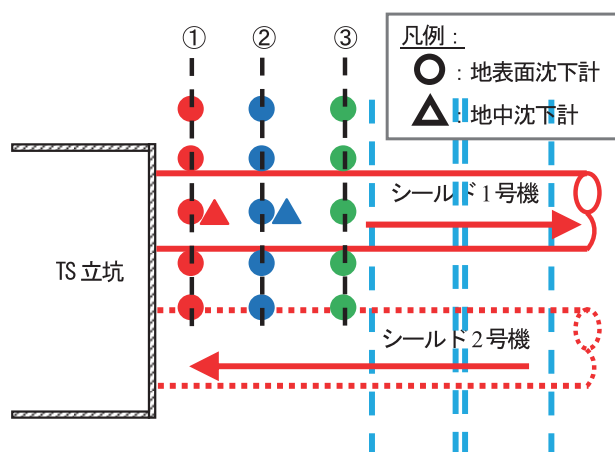


図-10 トライアル計測配置平面図

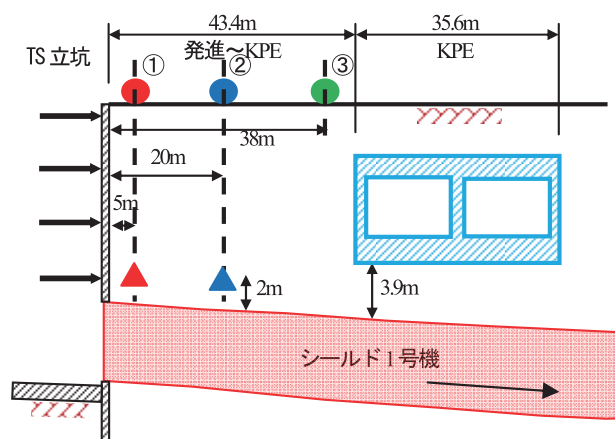


図-11 トライアル計測配置縦断面図

§ 5. 立坑内シールド通過

シールド2号機発進後、約1,140 m先のR190 mカーブ区間内において、避難立坑構築用の円形立坑（掘削径14 m）が位置しており（図-16参照）、シールド掘進方向は、図面向かって右から左側となっている。なお、本立坑の掘削は、地山の状態が良いと想定されたため、バックホウで掘削し（1回の掘削深度は1～2 m）、地山表面にコンクリートを吹付ける方法を適用した。

シールド掘進という観点からは、立坑掘削をシールド天端から2D程度の位置で中断し、シールド通過後に立坑掘削を再開する手順が考えられた。しかし、工程上、シールド2号機の当該位置への到達時期が、立坑内底版スラブおよび躯体壁立ち上げ打設時期の後になると予想されたため、立坑掘削を優先させることとした。

14 m 径立坑内、かつ、R190 m 内でのシールド再発進は、シールド掘進用反力受の設置に困難を伴うため、躯体構築後にシールド天端約 1 m 上（実測は 0.8 ～ 1.2 m）まで流動化処理土で埋戻し、その中を通過する計画とした（図－17 参照）。なお、シールド機通過部の土留め用吹付けコンクリート（有筋、40 cm 厚）は、坑口部躯体構築後、流動化処理土打設前に取り壊した。

5-1 施工管理

施工管理上、最も懸念されたのがクラックの入った流動化処理土表面から裏込め材が噴発し、シールド機が立坑内通過後において裏込めの圧管理が不可となり、周辺からの水の流入、周辺地盤および構造物への悪影響が発生することであった。

流動化処理土の配合は一軸圧縮強度で 600 kN/m^2 としたが、シールド機通過後の再掘削作業手間を考慮し、被り厚を 1 m 程度と薄くしたため、シールドテール部が坑内を通過する間の裏込め管理については量管理（テールボイド体積の 100% ）で行うこととした。なお、テール部が立坑を抜け、2リング分掘進後、グラウトの流出を目視確認しながら圧管理に切り替える計画とした。

切羽圧については、前方地山の安定が問題とならないため、チャンバー内を掘削土砂で充填させるだけで加圧しないこととした。なお、チャンバーおよびスクリーコンベヤ内のセメント固結防止を目的とし、加泥材として遅延剤を使用した。

シールド機坑内通過時には、立坑内に監視員を配置し、シールド機オペレータと無線連絡を常時取れる体制を整えた。

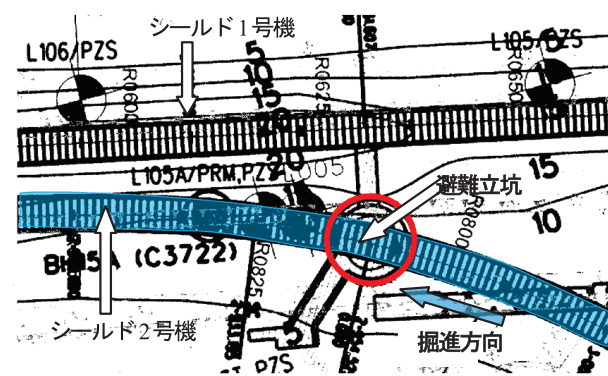
5-1 流動化処理と表面の挙動

シールド掘進に伴い流動化処理土表面に隆起が発生し、表面にクラックが入ることが懸念されたため、シールド線形中心位置に沿って隆起計測を行った。

シールド機面板が立坑内に進入後、隆起およびひび割

れといった現象は起こらなかったが、シールドテール部が立坑中心位置を通過後、ひび割れ（最大幅 10 mm）が発生した（写真－3 参照）。原因は、裏込め材の量管理が不十分（注入過多）だったことによる。その後、掘進を一時中断し、裏込め材が強度発現するのを待って掘進を再開した。

掘進再開後、裏込め材の流出といった事象は発生しなかったが、ひび割れ発生位置付近の表面が約 10 cm 隆起した。なお、裏込め材注入管理を圧管理に切り替え後においても、噴発といった事象は発生しなかった。



圖一 16 避難立坑位置平面圖

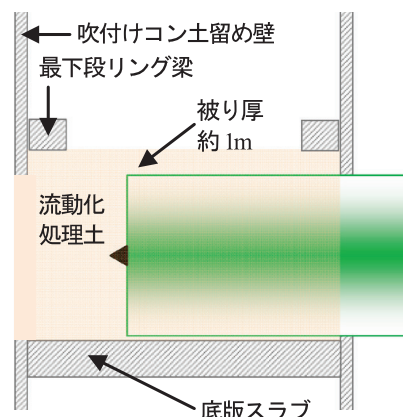


圖-17 避難立坑断面図

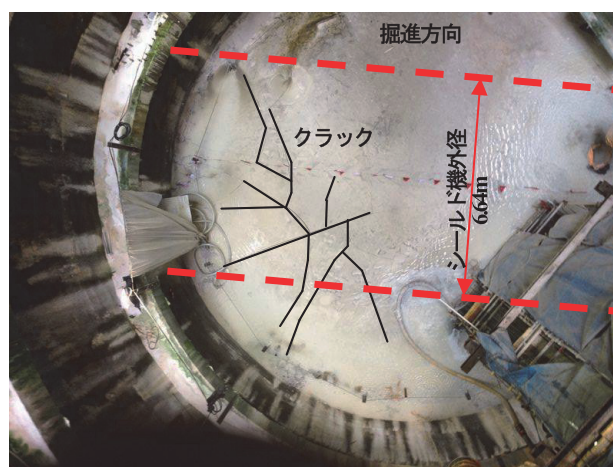


写真-3 流動化処理土表面ひび割れ発生

§ 6. 大土被り下、ビル直下の掘進

シールド 2 号機発進後、約 750 m 先の R190 m カープ区間内において、既設商業ビル基礎杭（場所打ち杭径 1.5 m）直下を約 1D の離隔で通過する線形となっている。土被りが 52 m と大きいため、高水圧による噴発およびビル直下においてビット交換した場合の影響が懸念された。図-18、図-19 に商業ビルとシールド機の位置関係を示す。

6-1 掘進パラメータの設定

シールド通過部の土性は、N 値 100 以上の砂質シルトが連続すると想定され、透水係数も 10^{-6} cm/s ~ 10^{-8} cm/s である。しかしながら、大深度であり、帯水層の存在も否定できないため、スクリーコンベヤーからの水の噴発に対するリスクを考える必要があり、対策として高吸水性樹脂系添加材を準備した。また、切羽面における急激な水頭差に起因する流砂（土粒子同士のかみ合いで保っていた土構造の崩壊に伴う土の流動化現象）の発生については、① N 値が 50 以上と高い、② 細粒含有率が高い（20% 以上）、③ 均等係数が高い（10 以上）ことより、発生確率としては低いと考えていたが、商業ビル直下であり、トラブルが発生した場合の影響が非常に大きいため、地盤改良（シールド機からの注入が可能）が実施できる体制を整えた。

切羽圧の下限値は、企業先からの指示である最低切羽圧 180 kN/m^2 に上載荷重として商業ビルを考慮（杭の支持力より算定）した 250 kN/m^2 とし、緩み土圧に静水圧を加味した 640 kN/m^2 を上限値として設定した。なお、シールド 2 号機は高水圧対応（ 750 kN/m^2 ）となっている。

6-2 加泥材の選定

既述の通り、OA 層は土性に幅があり（砂質～シルト質～粘土質）、当該位置 100 リング手前においても硬質粘土から透水性の高い砂質土へ急変しており、かつ、ビル直下においてボーリング調査が実施されていないこともあり、加泥材の選定に十分な配慮が必要とされた。

特に当該箇所手前に出現したレンガ色の硬質粘土（OA 層）は、面板への固着が問題となった（写真-4 参照）。図-7 に示す通り、面板中心付近の開口率が小さく、粘土の固着が中心付近から始まり、面板全体へ広がる事態に至った。面板清掃後、4 種類の気泡材を用いて個別に掘進を行い、最も塑性流動化に優れた付着防止剤を含有する気泡材を選定した。

その直後には、スクリーコンベヤー排土口から多量の水が奮発する砂層（OA 層）に遭遇した。これに関しては、スクリーコンベヤーに取り付けた注入孔から吸水性ポリマーを注入することで対応した。

既存ボーリング調査結果では、上述の問題が懸念され

る砂質粘土～シルト質砂と想定されたため上記の付着防止剤入りの気泡材を選定した。水の噴発対策として、吸水性ポリマー材を即時注入可能な体制で掘進を行った。

6-3 商業ビルの実挙動

既設商業ビル直下の掘進は約 20 m であるが、直下におけるビット交換というリスクを回避するため、ビルに対し影響範囲外となる約 50 m 手前において、ビット摩耗状況の確認を行い、ビット交換を実施した。また、事前のトライアル掘進時に選定した当該地盤に最適の加泥材を使用し、スムーズに通過することが出来た。

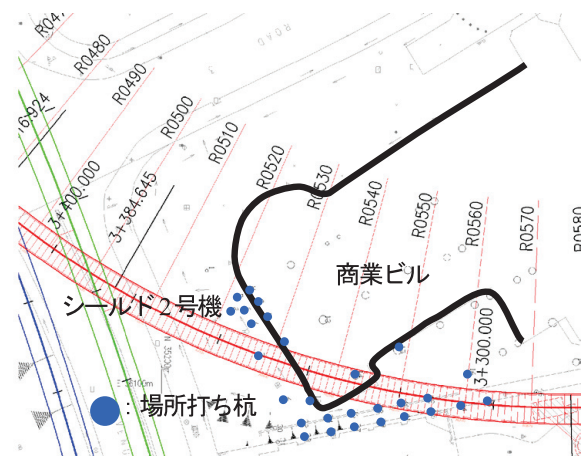


図-18 商業ビルとシールドの位置関係

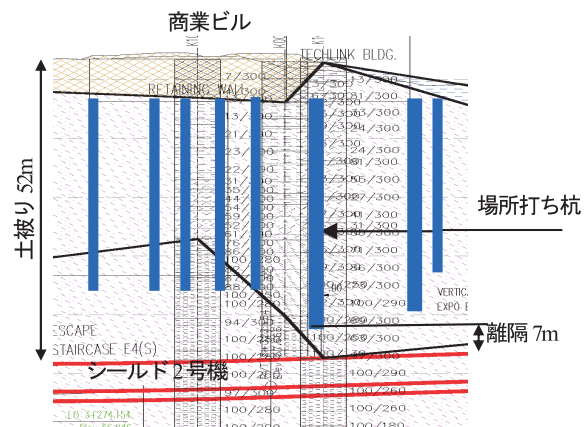


図-19 商業ビルとシールドの位置関係

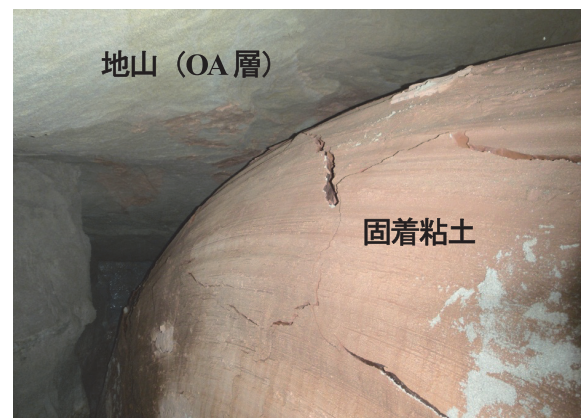


写真-4 面板閉塞状況

事前に商業ビルの柱へ設置した 3D プリズムによるリアルタイム計測を実施し、全く影響の無いことを確認した。

§7. 3本併設シールド掘進

UBI 立坑からの発進は、シールド 2 号機、3 号機、4 号機の順に発進するが、最小離隔は 1.8 m となっており、3 号機および 4 号機の掘進が 2 号機トンネルへ構造的に悪影響を与えることが懸念された。写真－5 に発進立坑基地の全景を示す。

UBI 発進立坑下における正面写真を写真－6 に示す。現状は、シールド 2 号機が 2013 年 8 月に発進し、3 号機が同年 10 月に、4 号機が 2014 年 1 月に発進した。なお、4 号機の初期掘進は、発進立坑上部土砂ピットまで土砂圧送とすることで、狭い発進立坑内における、シールド 3 台の同時掘進を可能とした（写真－6 参照）。

7-1 発進防護用地盤改良

発進立坑付近の土層構成を図－20 に示す。シールド面板前面は N 値 30 以上の OA 層となっているが、シールド直上は N 値が 20 程度の OA 層である。

しかしながら、シールド機発進前、ジャンボ・ブレイカーにより事前に連壁を研る施工手順としたため（原設計は NOMST 壁の切削）、シールド機発進直前（連壁研り後）における地山の安定が問題となった。シールド直上付近の OA 層について、安定計算上必要とされた一軸圧縮強度は 250 kN/m^2 であった。また、エントランス・パッキンの有無にかかわらず、発進立坑からシールド機長 + 2 リングの区間において、シールド機通過部の地山透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 未満であることを要求された。

これら設計要求事項を確認するため、発進立坑からシールド機長 + 2 リングの区間において、追加ボーリング調査を実施し、現場透水試験および N 値 20 程度の OA 層における UU 試験を行った。その結果、発進から 8 m の範囲において、透水性 ($k = 9.3 \times 10^{-4} \sim 4.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$) および強度 ($q_u = 164 \text{ kN/m}^2$) とともに設計要

求事項を満たさなかったため、発進防護工として地盤改良を実施した。

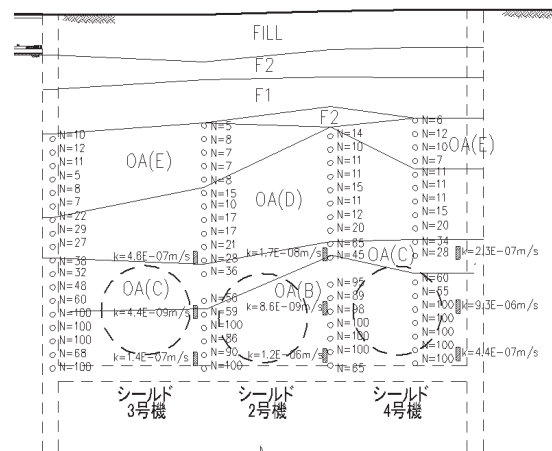
改良範囲は発進から 8 m 区間におけるトンネル全断面が対象であり、補足注入が可能な二重管ダブルパッカー工法にて実施した（図－21 参照）。



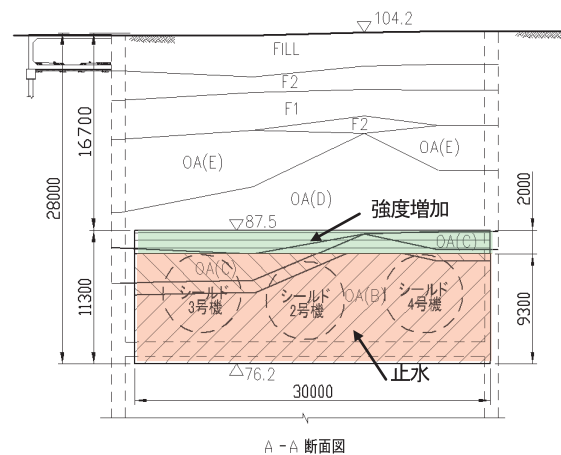
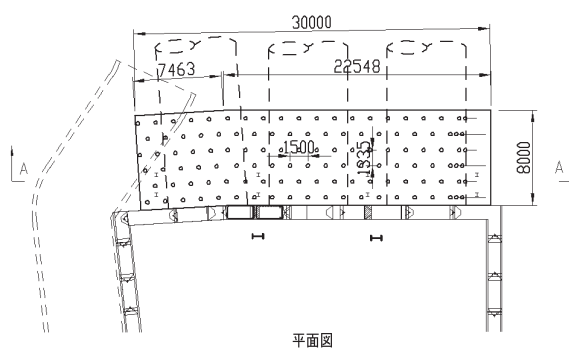
写真－5 発進立坑基地全景



写真－6 3台同時掘進状況



図－20 発進立坑付近土層構成



図－21 発進防護用地盤改良

地盤の強度増加を目的とする改良は、超微粒子の特殊スラグに硬化促進剤を反応させて水和結晶を生成させる注入材（シラクソル）を採用し、改良体の一軸圧縮強度 q_u が 250 kN/m^2 以上あることを確認した。

止水性の向上を目的とする地盤改良は、水ガラス系注入材としてシリカライザーを採用し、改良後の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 未満であることを確認した ($k = 9.5 \times 10^{-6} \sim 4.9 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$)。

7-2 掘進手順

発進立坑地点において各トンネルが最も近接し、最小離隔が 1.8 m となっており、シールド掘進により生じる地中内応力の蓄積を防ぐため、真ん中のトンネルを先行して発進させ、その後、両側のトンネルを発進させることとした（シールド2号機⇒3号機⇒4号機の順）。

7-3 先行トンネルへの影響検討

企業先の設計指針によれば、隣り合うトンネルの間隔が1D未満の場合、後行シールド機掘進による先行シールドトンネルへの影響を考慮する必要がある⁶⁾、今回は発進から 30 m 区間が該当する。

具体的な評価手法（図-22 参照）は、各土層に対するボリュウム・ロスから後行シールド機周囲の地山変位量を算出し、先行シールドトンネルの最遠近位置に発生した変位 (u_a , u_b) の相対変位量 δ を求める。この相対変位量により生じる増分曲げモーメントが先行セグメントに発生する⁷⁾。

ただし、今回採用している全てのセグメントは、トンネル近傍における将来工事等による影響を見越し、セグメント直径方向に $\pm 15 \text{ mm}$ の変形を許容する構造として設計しているため、前述の相対変位量が 15 mm 以内に収まっていれば、後行シールド機掘進による影響は問題とならない。

今回の場合、相対変位量はボリュウム・ロスを1%と仮定して約 4 mm であったため、セグメント補強の必要は無いが、用心部材として H150 をリング状にセグメント内面へ縦断方向 1.4 m 間隔に設置した。

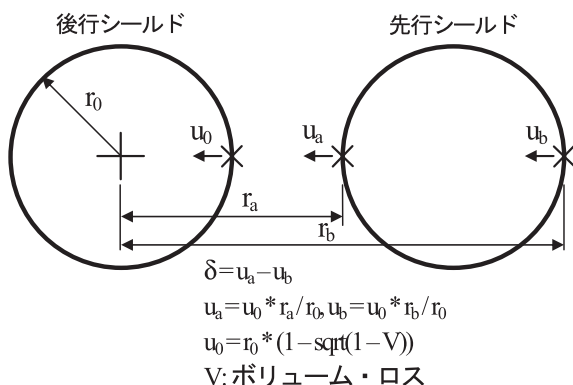


図-22 先行シールドへの影響⁹⁾

7-4 先行トンネルの実挙動

発進立坑から5リング毎に20リングまで、先行トンネルであるシールド2号機のセグメント内面にてプリズム計測を行った。計測位置は、頂部および両スプリングラインとした（図-23 参照）。計測時期は、シールド3号機および4号機の初期掘進中とした。

5リング地点におけるX軸方向の挙動について、シールド3号機による影響を図-24に、シールド4号機による影響を図-25にそれぞれ示す。

グラフX軸について、プリズム計測位置とシールド面板の位置関係を示している。「-」は面板が計測位置の手前、「+」は面板が計測位置を通過したことを意味する。Y軸について、3号機掘進用グラフ上では「-」

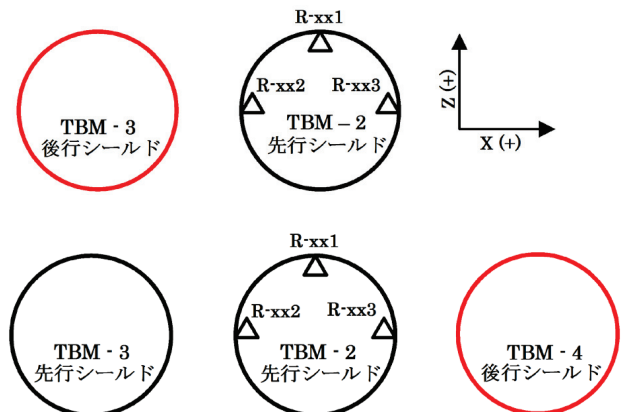


図-23 プリズム計測断面

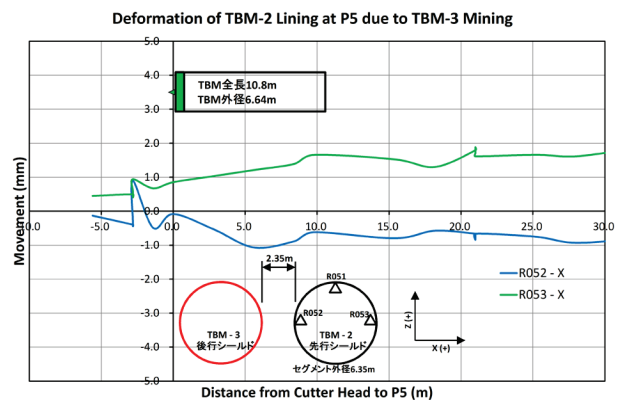


図-24 5リング目の水平挙動（シールド3号機掘進）

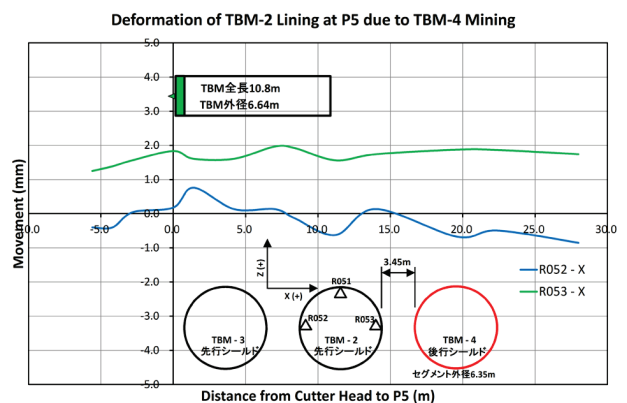


図-25 5リング目の水平挙動（シールド4号機掘進）

は後行シールドに近付く方向となり、4号機掘進用グラフ上で「-」は後行シールドから離れる方向となる。

シールド掘進による先行トンネルへの影響について、各掘進に近接するプリズムの挙動に注目すると、次のことが分かる。

①カッターの切削により地山が緩んだため、先行トンネルが一旦、シールド掘進側へ引き込まれる。②切羽圧により地山が先行トンネル側へ押される。③地山とシールド胴体間に生じた空隙により再度シールド掘進側へ引き込まれ、④裏込め注入圧により地山が先行トンネル側へ押される。

次に、15リング地点におけるX軸方向の挙動について、シールド3号機による影響を図-26に、シールド4号機による影響を図-27にそれぞれ示す。

15リング地点におけるシールド掘進による先行トンネルへの影響について、各掘進に近接するプリズムの挙動は5リング地点における挙動と同じである。また、本計測結果から次のことが言える。

①後行トンネルによる影響は1.5D～2.0D手前から発生する。②後行トンネル側（図-26の場合はR152、図-27の場合はR153）の挙動は反対側（図-26の場合はR153、図-27の場合はR152）より大きい。

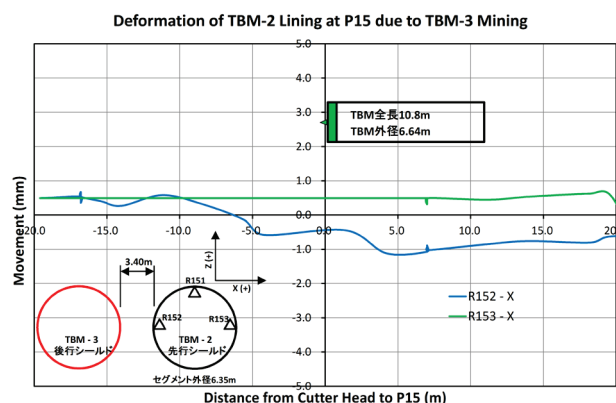


図-26 15リングの水平挙動（シールド3号機掘進）

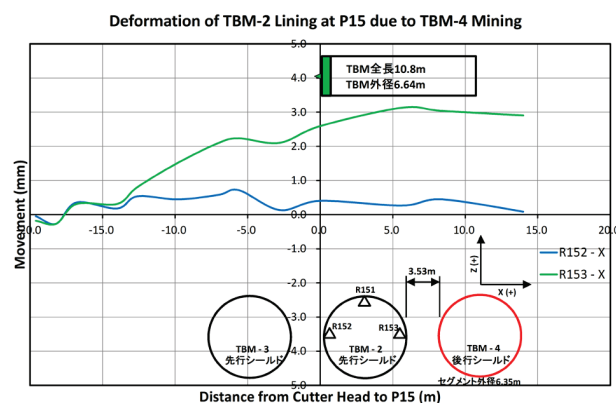


図-27 15リングの水平挙動（シールド4号機掘進）

§8. おわりに

今回のシールド掘削で主体となったオールド・アルビウム層（OA層）は、地山の自立性は非常に高いが、土性の幅が広く、チャンバー内土砂をいかに上手く塑性流動化させるかが鍵であった。途中、水の噴発、面板閉塞等のトラブルがあったが、本社から専門家を派遣して頂き、切り抜けることが出来た。

設計的観点からは、施工のみ案件ということで、設計と施工の比較、即ち、理論と実際の比較について詳細な検討を行うことが出来なかったのは残念であるが、カッタービットの摩耗および高速道路直下の掘進について、シールド1号機の実績をまとめ、シールド2～4号機の掘進に活かせたと考える。

最後に、当社シールド委員会のご指導のお蔭をもちまして、シールド4台が無事に到達することが出来ました。この場を借りて、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉田, 折田, 草野: シンガポール地下鉄プロジェクトに関する報告, 地盤工学会誌 9月号, 2012
- 2) K. S. Wong 他: Old Alluvium: Engineering Properties and Braced Excavation Performance, Proceedings of UNDERGROUND SINGAPORE 2001, pp223-233, 2001
- 3) K. S. Wong, T. S. Tan 他: The Old Alluvium, Proceedings of UNDETGROUND SINGAPORE 2003, pp408-427, 2003
- 4) LTA: Geotechnical Interpretative Baseline Report For Civil Contract C929A, pp26-27, 2010
- 5) B. Nilsen 他: New Test Methodology For Estimating The Abrasiveness Of Soils For TBM Tunneling, RAPID EXCAVATION and TUNNELING CONFERENCE 2007 Proceedings, pp104-116, 2007
- 6) LTA Engineering Group: Civil Design Criteria For Road And Rail Transit Systems, pp-DC/20/1-DC/20/2, 2010
- 7) D. Wen 他: Design Considerations for Bored Tunnels at Close Proximity, 2004