

# ベトナム国で初めての泥土圧シールドトンネルの設計施工について

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE FIRST TUNNEL BY EARTH PRESSURE BALANCE TUNNEL BORING MACHINE IN VIETNAM

栗木 実\*・伊東 希典\*  
Minoru KURIKI and Maresuke ITO

This paper presents details on the design and construction of the first bored tunnels in Vietnam. These tunnels are part of the Ho Chi Minh City Metro Line 1 Project and consist of two bored tunnels each having a single track. The tunnels were constructed using Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine and were successfully completed in October 2018. The Two-Ring Beam Spring Structural Model was used to design the segmental lining. During construction the member forces developing in the elected segmental lining were monitored and have been used for back analysis to verify the design model. Additionally, several instruments were deployed to monitor ground surface settlement due to TBM driving. The data from these instruments was used to reconfigure the TBM driving and form part of the discussions in this paper.

**Keywords** : earth pressure balance tunnel boring machine, bored tunnel, segmental lining, Two-Ring Beam Spring Structural Model, monitoring

### 1. はじめに

ベトナム国最大の都市であるホーチミン市の人口は、2000年の530万人から2019年には900万人まで増加し、今後も人口が増え続けると予想されている。この人口増加に伴うバイクおよび自動車の増加から、市内の道路交通量は増え続け、慢性的な交通渋滞、交通事故、大気汚染等の問題が発生し、効率的な経済社会活動が阻害されている。

ホーチミン市ではこれらの問題解決のため、都市鉄道6路線の建設計画を盛り込んだ運輸交通マスタープラン<sup>1)</sup>を作成し、そのプランは2007年1月に首相承認された。2013年4月には、都市鉄道8路線(総延長は約159km、そのうち67kmが地下構造、それ以外は高架・地上構造)を含むホーチミン市交通開発計画ビジョン<sup>2)</sup>が首相承認された。

都市鉄道1号線は、日本のODAにより建設が進められ、日本国の官民が共同で策定した都市鉄道の標準仕様(STANDARD urban RAILWAY SYStem for Asia: STRASYA)が採用されているだけでなく、国土交通省の鉄道技術基準が適用された海外初の鉄道事業である。また、本邦技術活用条件(STEP)が適用され、随所にベトナム国で初めてとなる日本の技術が採用されている。

トンネル区間は、日本独自の開発により日本が技術的優位性を持つ泥土圧シールド工法が採用され、ベトナム国で初めてのシールドトンネル工事として歴史に刻まれた。

著者らは、ゼネラルコンサルタント(発注者の代理人)の立場で、本工事の設計・施工監理に携わった。

本稿は、同シールド工事について、セグメントの設計および製造から組立て、シールド掘進時の地盤変状対策までの一連の対応を報告するものである。

### 2. 工事概要

都市鉄道1号線は、ホーチミン市中心部のベンタイン市場前のベンタイン駅(Ben Thanh Sta.)を起点に北東へ19.7km離れたスイテンターミナル駅(Suoi Tien Terminal Sta.)

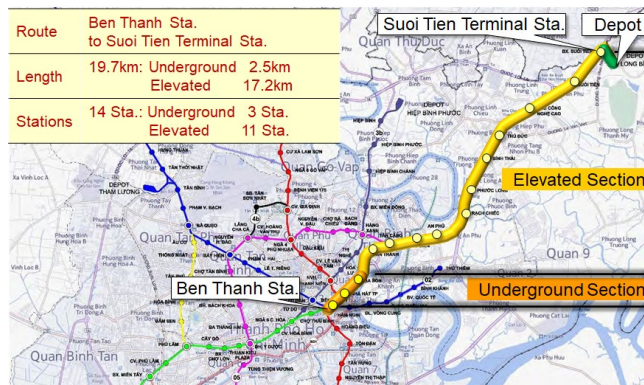
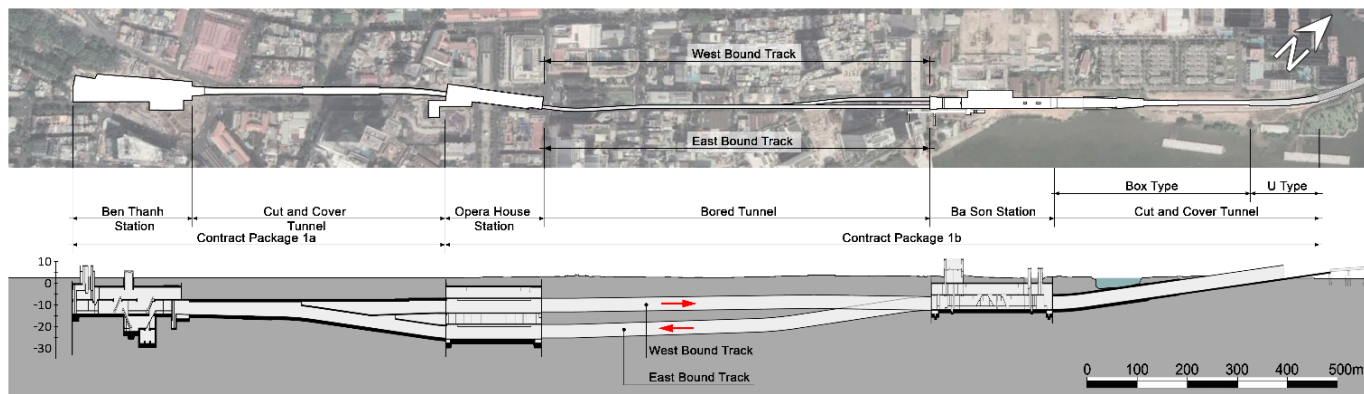


図-1 都市鉄道1号線路線概要

\* コンサルティング事業統括本部 鉄道事業本部 鉄道事業部  
鉄道技術部



図－2 地下区間の平面図および縦断面図

まで結び、2.5km の地下区間と 17.2km の高架区間で構成される(図－1 参照)。また終点駅の先に車両基地・工場が位置する。

地下区間は CP1a と CP1b の 2 つの工区に分けられ、CP1a 工区は延長 0.8km で始発駅のベントイン駅(Ben Thanh Sta.)と CP1b 工区のオペラハウス駅(Opera House Sta.)とを繋ぐ複線開削トンネルで構成される。図－2 に地下区間全線の平面図および縦断面図を示す。

CP1b 工区は、延長 1.7km で 2 つの地下駅であるオペラハウス駅(Opera House Sta.)とバソン駅(Ba son Sta.)とを結ぶ単線並列シールドトンネル、高架区間(CP2 工区)接続部までの複線開削トンネルで構成される。地下区間の地下駅 3 駅(ベントイン駅、オペラハウス駅、バソン駅)は、それぞれの地域における地理的、歴史的背景ならびに駅の特性等を考慮したデザインと空間に特徴を持たせた設計がなされている。

#### (1) ベントイン駅

ベントイン駅(Ben Thanh Sta.)は、総床面積 41,300m<sup>2</sup>、延長 240m、深さ 32.0m の地下 4 層構造(図－3 参照)で、将来の乗入れが予定されている都市鉄道 2 号線、3a 号線、4 号線との乗換駅として計画されている。そのため、2 号線および 4 号線用の一部躯体が 1 号線工事で先行して建設されている。また同駅の地下 1 階には駅を取り巻くようにオペラハウス駅まで続く地下街が開発される予定で、地下歩行者ネットワークの形成により周辺市街地と繋がり、商業が連続化するなど、ホーチミン市の魅力と都市力の向上が期待されている。

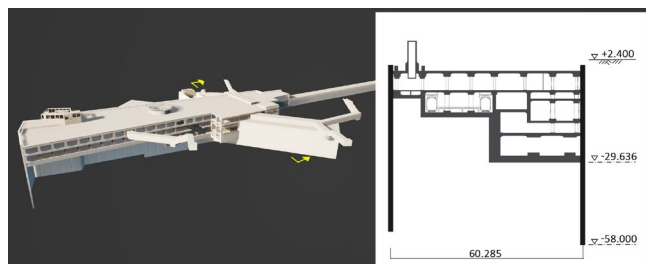
#### (2) オペラハウス駅

オペラハウス駅(Opera House Sta.)は、総床面積 27,900m<sup>2</sup>、延長 190m、深さ 30.5m の地下 4 層構造(図－4 参照)で、同駅とバソン駅を繋ぐシールドトンネルの到達立坑を兼ねている。また、周辺には歴史的建造物や重要建造物が隣接する路上交通の多い主要幹線道路下での大規模

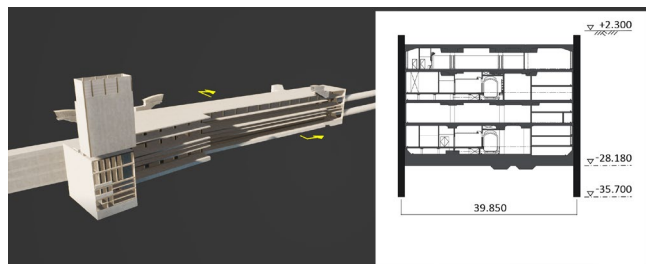
開削工事となり、RC 地中連続壁を本体利用した逆巻き施工による掘削・躯体構築が行われた。

#### (3) バソン駅

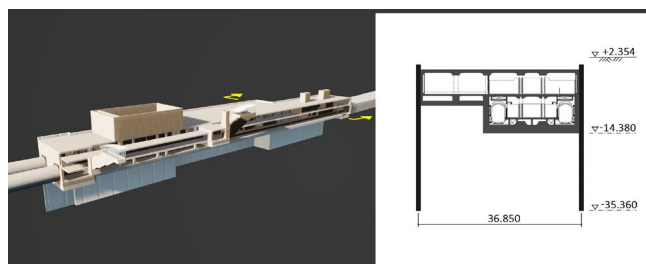
バソン駅(Ba Son Sta.)は、総床面積 26,230m<sup>2</sup>、延長 240m、深さ 16.7m の地下 2 層構造(図－5 参照)で、シールドトンネルの発進立坑を兼ねている。また、サイゴン川に面する造船所跡地に位置しており、一部を鋼管矢板で仮締め切りした後、本体利用の RC 地中連続壁を構築、そして順巻き施工による掘削・躯体構築が行われた。



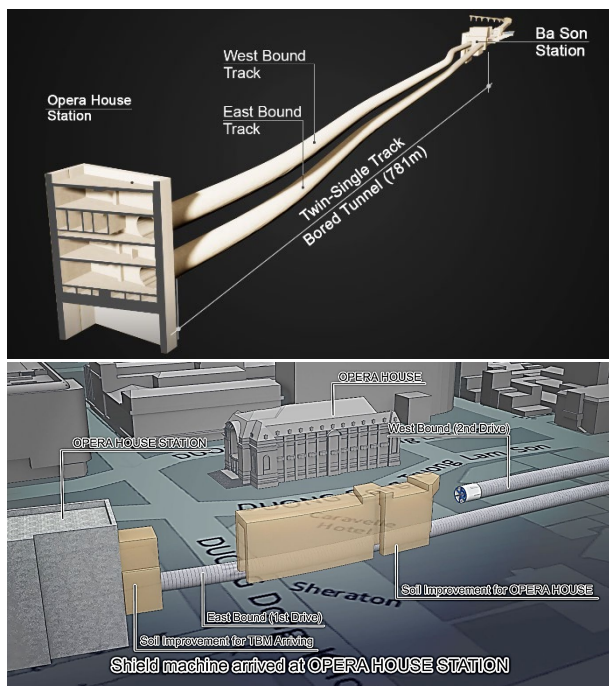
図－3 ベントイン駅(Ben Thanh Sta.)



図－4 オペラハウス駅(Opera House Sta.)



図－5 バソン駅(Ba Son Sta.)



(下図: Shimizu Maeda Joint Operation より提供)

図-6 シールドトンネル区間

#### (4) シールドトンネル区間

シールドトンネルは、セグメント外径 6.65m、延長 781m × 2 本の単線並列トンネルで(図-6 上図参照)、ベトナム国で初めてのシールドトンネル工事である。シールドトンネル区間の施工は、1 台のシールド機で、バソン駅の地下 2 階からオペラハウス駅の地下 4 階に到達する下り線 (East Bound Tunnel) をシールド掘進した後、バソン駅の地下 2 階でシールド機を再組立てした後、オペラハウス駅の地下 2 階に到達する上り線 (West Bound Tunnel) をシールド掘進した。

シールドトンネル区間には歴史的建造物のオペラハウスが隣接しており、それと近接する区間は高圧噴射攪拌工法で門型に地盤改良された地盤をシールド掘進した(図-6 下図参照)。

### 3. 地盤条件

地下区間の地層構成は、表層から盛土層 Fill、沖積の粘性土層 Ac2、砂質土層 As1 と As2 が約 30～40m の厚さで堆積し、その下位に洪積の粘性土層 Dc と砂質土層 Ds が広く分布している。また平均地下水位は地表面から 1.97～3.83m の深さに位置する。シールドトンネルは、上り線が平均 N 値 5 の緩い砂質土層 (As1)、下り線が平均 N 値 15 の中位に締まった砂質土層 (As2) を掘進した。各層の土質定数を表-1 に示す。

### 4. シールド機

図-7 にシールド機を示す。外径 6.79m、機長 8.5m の泥土圧シールド機である。泥土圧シールドは、1974 年(昭和 49

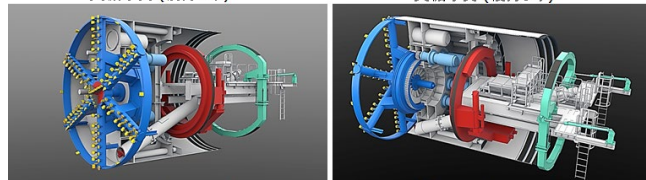
表-1 土質定数<sup>3)</sup>

|      | SPT-N Value<br>Average is shown in parentheses. | Bulk Density<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Undrained Shear Strength<br>Cu (kN/m <sup>2</sup> ) | Effective Cohesion<br>C' (kN/m <sup>2</sup> ) | Effective Angle of Internal Friction<br>$\phi'$ (degree) |
|------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Fill | 2 to 6 (4)                                      | 19.0                                          | -                                                   | 10                                            | 25                                                       |
| Ac2  | 0 to 14 (2)                                     | 16.5                                          | 10                                                  | -                                             | 24                                                       |
| As1  | 1 to 11 (5)                                     | 20.5                                          | -                                                   | 0                                             | 30                                                       |
| As2  | 6 to 41 (15)                                    | 20.5                                          | -                                                   | 0                                             | 33                                                       |
| Dc   | 18 to >50 (34)                                  | 21.0                                          | 170                                                 | -                                             | -                                                        |
| Ds   | 15 to >50 (36)                                  | 20.5                                          | -                                                   | 0                                             | 35                                                       |



実機写真 (前方より)

実機写真 (後方より)



3Dパース (前方より)

3Dパース (後方より)

図-7 泥土圧シールド機<sup>3)</sup>

表-2 泥土圧シールド機の仕様<sup>3)</sup>

| Shape and Dimension              |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Shape                            | Single Circular                |
| Outer Diameter of Shield         | 6,790 mm                       |
| Outer Diameter of Excavation     | 6,820 mm                       |
| Length of Shield                 | 8,500 mm                       |
| Trust Device                     |                                |
| Jack                             | 2,000 kN×20, St = 1,950 mm     |
| Total Thrust                     | 40,000 kN                      |
| Cutter Device                    |                                |
| Type of Mounting                 | Intermediate Support           |
| Aperture Ratio                   | Approximately 70 %             |
| Electric Motor                   | 75 kW×9                        |
| Cutter Rotation Speed            | 0.92 to 1.47 min <sup>-1</sup> |
| Torque                           | 4,052 to 6,458 kNm             |
| Outbreak Device                  | Copy Cutter 1 set              |
| Earth Pressure Gauge             | 4 Positions                    |
| Additive Injection Hole          | 6 Positions                    |
| Tail Seal                        |                                |
| Type                             | Wire Brush                     |
| Number of Layer                  | 3 layers                       |
| Backfill Grouting Devise         |                                |
| Type                             | Simultaneous Backfilling       |
| Devise                           | 2 Set                          |
| Primary Soil Discharge Equipment |                                |
| Type                             | Screw Conveyor with Shaft      |
| Soil Discharge Capacity          | Maximum 211 m <sup>3</sup> /h  |
| Second Soil Discharge Equipment  |                                |
| Type                             | Pressure Pump                  |
| Soil Discharge Capacity          | Maximum 120 m <sup>3</sup> /h  |

年)に日本国で開発された純国産土木技術である。

シールド機の主な仕様を表-2 に示す。カッターヘッドは、



面板を持たない 6 本のカッタースポークで構成され、中間支持方式が採用された。シールドジャッキ推力は、40,000kN (2,000kN×20 本) が装備された。テールシールは、金属繊維のブラシ状シール(ワイヤブラシ)を 3 段配置して、このワイヤブラシ間に充填材を常に補給することにより、シールド掘進と共にテールボイドに注入加圧される裏込め注入材と地山の地下水がシールド坑内に漏出することを防止した。

裏込め注入方式は、その役割から理想的なテールボイドの発生と同時に注入を行う同時裏込め注入方式である。同時裏込め注入方式は、注入装置を内蔵する裏込め注入部と、その内部の注入装置等により構成されている。同時裏込め注入装置は、シールド外殻のアーチ斜め上方に予備を含めて 2 カ所、シールド外殻から突出するような形で取り付けられた。この同時裏込め注入装置の断面は、カッタースポークに取り付けられたカッタービットでは切削されないため、同時裏込め注入装置の前方にビットを設け、地山をこのビットで緩め、その後方にある同時裏込め注入装置の貫入抵抗を軽減させるようにしている。

掘削土排出方式は、スクリーコンベヤーに土砂圧送ポンプを直結して地上の発進基地までポンプ圧送する方式が採用された。シールド機外径に対するシールド重量および機長は、これまでの施工実績の範囲内にある(図-8 参照)。

5. セグメント

(1) 形状・寸法

図-9 にシールドトンネル区間のトンネル断面図を示す。セグメントリングは、外径 6.65m、厚さ 0.3m、幅 1.2m、分割数 6(5+K)、K セグメントは軸方向挿入方式である。セグメント間継手およびリング間継手は、曲がりボルトで締結される。

また、土被りが比較的大きいことから、セグメントリングの継手部の止水性を高めるために、シール溝は 2 条とした(図-10 参照)。

(2) 設計

セグメント設計は、日本基準の鉄道標準<sup>4)</sup>に準拠して、はりばねモデルを採用した。はりばねモデル<sup>5)</sup>は、図-11 に

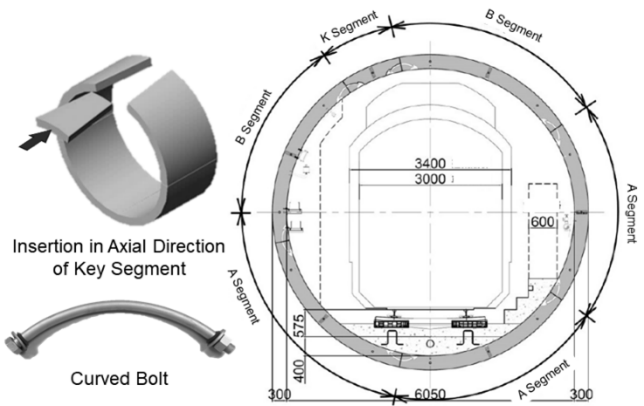


図-9 セグメントリング<sup>3)</sup>

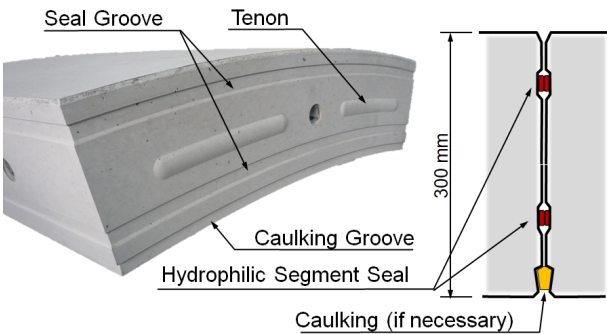


図-10 セグメント側面の止水構造<sup>6)</sup>

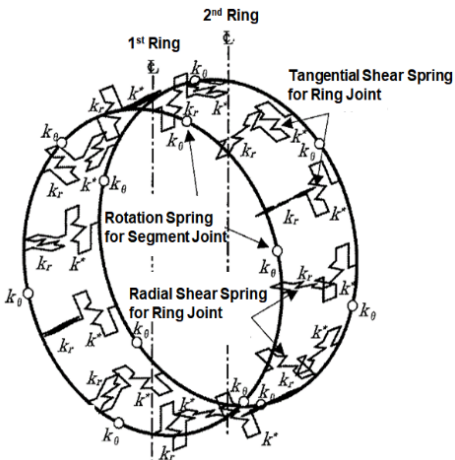


図-11 はりばねモデル<sup>7)</sup>

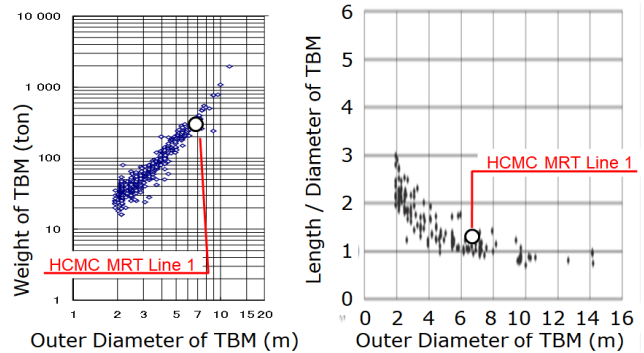


図-8 シールド機外径と重量および機長<sup>3)</sup>

表-3 セグメント設計の解析ケース一覧<sup>3)</sup>

|     | Tunnel | Groundwater Level |                           |                           |
|-----|--------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
|     |        | A-A Section       | B-B Section               | C-C Section               |
|     |        | G.L ±0.0          | Building Load<br>G.L ±0.0 | Building Load<br>G.L ±0.0 |
|     |        | WBT<br>EBT        | WBT<br>EBT                | WBT<br>EBT                |
| WBT | Low    | CASE 1            | CASE 2                    | CASE 3                    |
|     | High   | -                 | -                         | -                         |
|     | Flood  | -                 | -                         | -                         |
| EBT | Low    | -                 | CASE 4                    | -                         |
|     | High   | -                 | CASE 5                    | -                         |
|     | Flood  | -                 | CASE 6                    | -                         |

示すように、セグメント主断面を“はり”に、セグメント継手を“回転ばね”に、リング継手を“せん断ばね”にそれぞれモデル化するものである。また地盤とセグメントリングの相互作用は、セグメントリングに対して半径方向と接線方向それぞれに地盤ばねを配してモデル化する。

セグメント設計の解析ケースは、併設トンネルの相対位置の違い、建物荷重の違いによる 3 断面を対象に、表-3 に示す設計上クリティカルとなる 6 ケースを選定した。

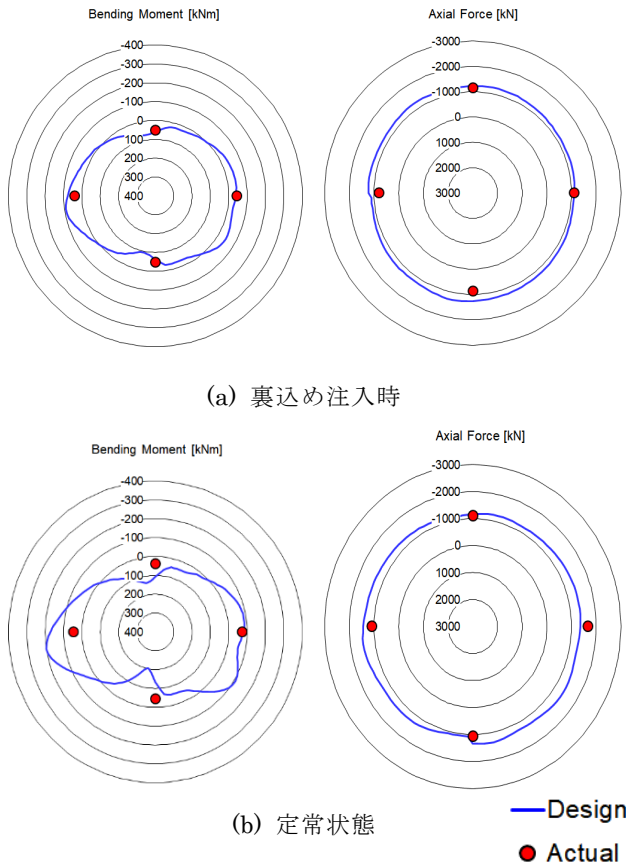


図-12 セグメントリングの発生断面力(EBT 下り線)<sup>3)</sup>

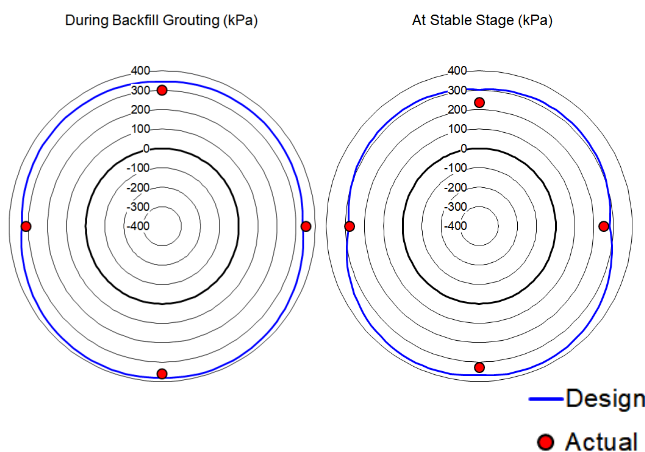


図-13 セグメントリングの作用荷重(EBT 下り線)<sup>3)</sup>

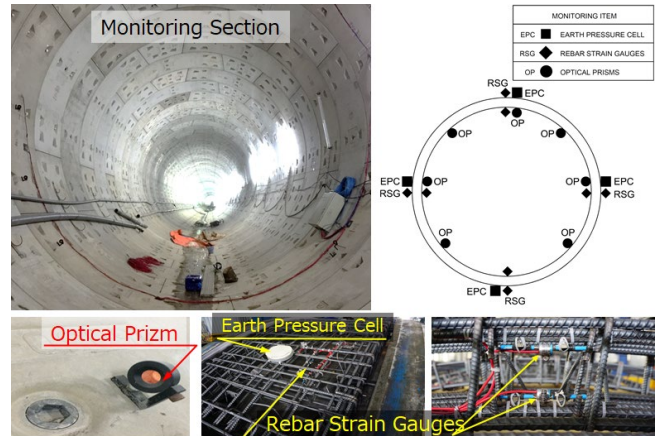


図-14 セグメントリングに設置した計測器(EBT 下り線)<sup>6)</sup>

土被りの浅い上り線(West Bound Tunnel)は、セグメントリングに作用する土水圧が小さく、セグメントリングに発生する軸圧縮力が小さくなることから、構造は曲げモーメントの大きさに影響を受ける。また、建物荷重の作用形態による影響も大きい。そのため、地下水位の条件は低水位とし、建物荷重の有無と左右不均衡による違いを考慮した CASE1、CASE2、CASE3 の 3 ケースを上り線の解析ケースとした。

一方、土被りの深い下り線(East Bound Tunnel)は、高水圧の地下水圧の作用によって軸圧縮力の発生が顕著となる。一方で建物荷重の作用形態の違いは、トンネル深度が十分に深いこともあって不均衡な作用は解消され、セグメント設計では無視できる。こうしたことから、下り線の解析ケースは、地下水位の違いを考慮した CASE4、CASE5、CASE6 の 3 ケースとした。

解析断面 B-B 断面の下り線(East Bound Tunnel)に該当するセグメントリングの発生断面力および作用荷重の設計値と実測値の対比を図-12 と図-13 に示す。ベトナム国で初めてのシールド工事に際して、工事の安全とセグメント設計の妥当性確認を目的に、図-14 に示す計測器をセグメントリングに設置した。

設計値と実測値とは良く整合しており、曲げモーメントの正負交番の分布、また高水圧下における軸圧縮力と作用荷重の分布が、設計値と実測値の両者に確認され、設計の妥当性を検証できた。

### (3) 製造

セグメント製造は、振動台や蒸気養生設備が整っていた杭や橋桁等のプレキャストコンクリート製品を扱う工場を改造することで対応した。図-15 にセグメントの製造工程を示す。ベトナム国で初めてのセグメント製造であったことから、製造開始当初はセグメント出荷前のセグメント表面に乾燥収縮によるひび割れ発生の不具合が確認された。この問題の解決に、以下の対応を講じた。

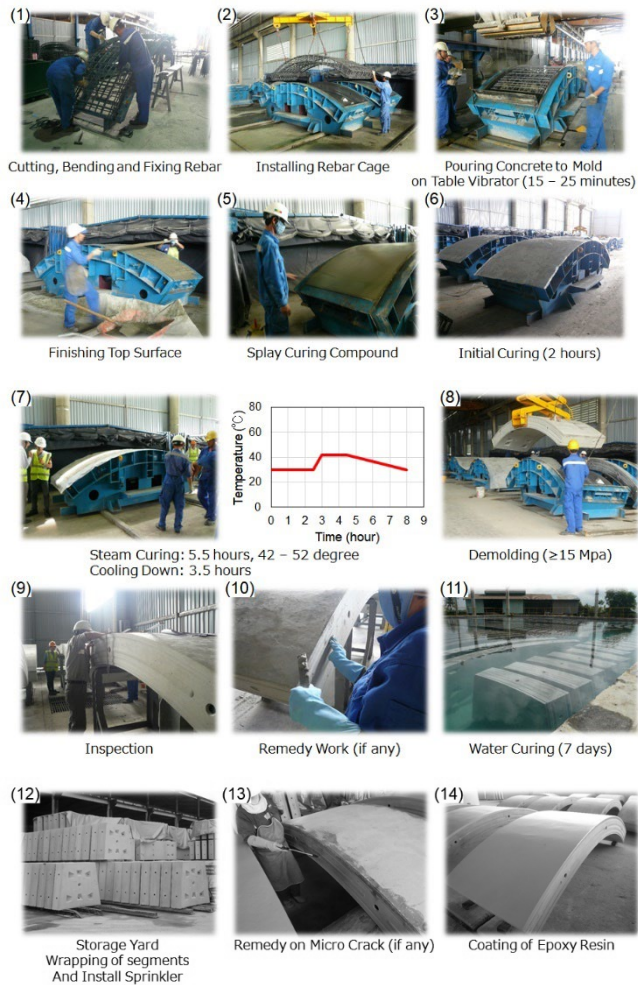


図-15 セグメントの製造工程<sup>3)</sup>

- ・ コンクリート打設後にコンクリート表面仕上げした後、すみやかにコンクリート養生剤をセグメント表面に塗布する。
- ・ コンクリート表面仕上げ後から蒸気養生までの間の初期養生を 3.5 時間から 2.5 時間に短縮する。
- ・ 蒸気養生中の養生室内の均一な室内温度の確保と時間当たりの温度上昇を 20℃/時間以下とする。
- ・ 蒸気養生終了過程の養生室内の急激な温度低下を回避 (徐冷時間を 2.5 時間から 3.5 時間に増加)。蒸気養生後の型枠脱型は、養生室内外の温度差が小さくなってからとする。
- ・ セグメント出荷前の工場内の仮置きヤードにスプリンクラーを設置して、セグメントの湿潤養生を図る。

図-16 にひび割れの発生が確認されたセグメント個数の履歴を示すが、上記対策を講じた後はゼロとなり、これらのひび割れ対策に顕著な効果が認められた。

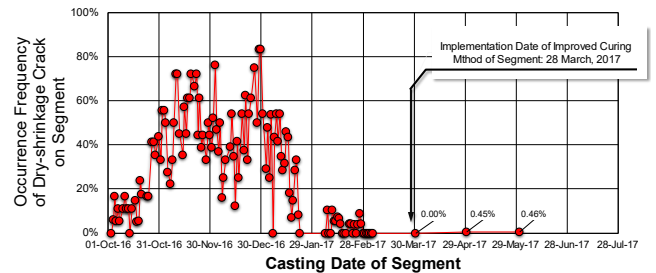


図-16 仮置きヤードでのひび割れを有するセグメントの数<sup>3)</sup>

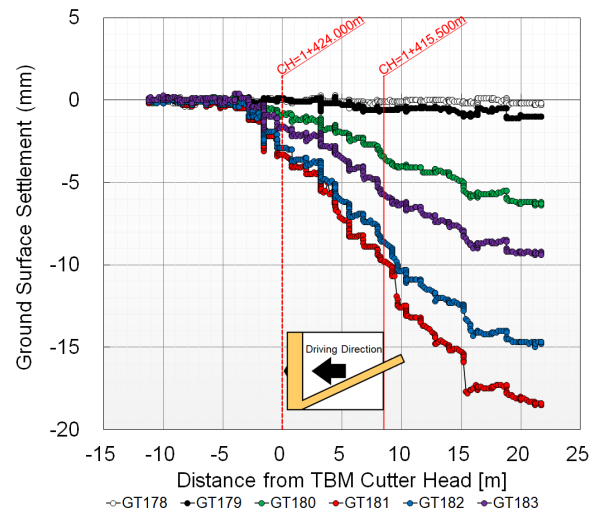


図-17 シールド掘進に伴う地盤沈下のトンネル縦断方向分布 (WBT 上り線)<sup>3)</sup>

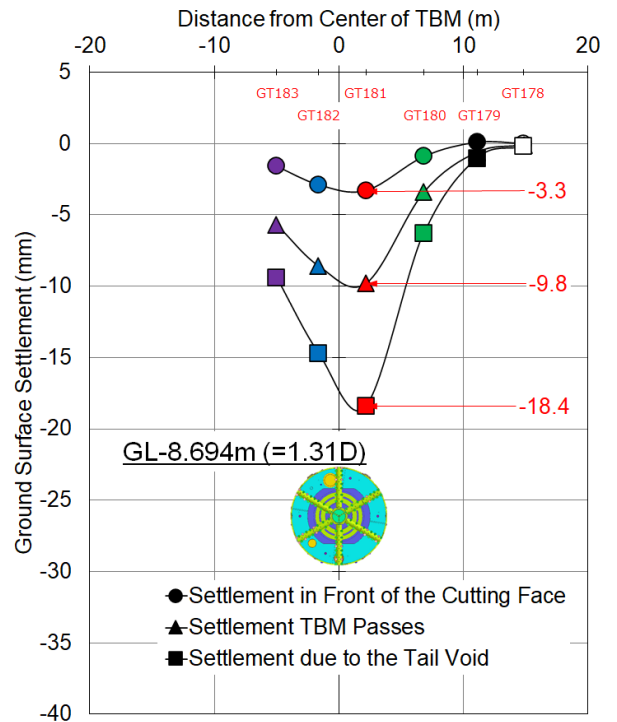


図-18 シールド掘進に伴う地盤沈下のトンネル横断方向分布 (WBT 上り線)<sup>3)</sup>



## 6. シールド掘進による地盤変状

### (1) 現場計測結果

当該現場は沖積の N 値の小さい軟弱な砂質土層でのシールド掘進であったことから、シールド掘進に伴う重要構造物に与える影響が懸念され、周辺地盤および近隣家屋の沈下や傾斜等の現場計測を行った。ここでは、土被りの浅い上り線 (West Bound Tunnel) のシールド掘進時に見られた特徴的な挙動について考察する。

図-17 は、横軸をシールド機と計測断面との位置関係とするトンネル縦断方向の地盤沈下計測結果である。また、図-18 は、地盤沈下計測結果のトンネル横断方向の分布を示したものである。これらの図から、シールド機が通過するときに発生する“シールド通過時沈下”が顕著に見られることが特徴的な挙動であると言える。こうした特徴的な挙動が見られたのは、シールド掘進停止中の切羽圧の低下による地盤の乱れが、シールド通過時沈下を助長した、と考えられる。

### (2) シールド掘進停止中にみられた切羽圧の低下

図-19 は、シールド掘進中 (●で表示) および停止中 (●で表示) の切羽圧の時刻歴の計測結果である。シールド掘進中の切羽圧は、設定管理値の上下限の範囲内で概ね推移しているのがわかる。一方、シールド停止時の切羽圧の挙動をみると、約丸 1 日シールド掘進が停止していた間があり、その間に地下水の静水圧と変わらぬ 0.1Mpa まで切羽圧が低下していた事実が記録されている。こうした切羽圧の低下は、切羽前方の地盤の乱れを引き起こし、それが後のシールド通過時の地盤沈下を助長するトリガーとなったと考えられる。

### (3) 対策

シールド掘進による地盤変状を軽減する理想的な切羽圧は、静止土圧と静水圧の和と等しくすることである。そこで、2 液高粘性可塑状充填材 (図-20 参照) をシールド掘進停止中は切羽に、シールド掘進中はシールド機外周に充填する対策を講じた。充填システムは、図-21 に示すとおりである。

これらの対策により、その後のシールド掘進による地盤沈下は軽減 (観測点平均: 10.3mm) された。

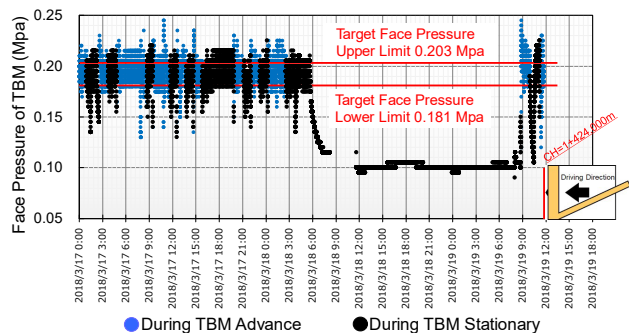


図-19 シールド掘進時および停止時の切羽圧の時刻歴<sup>3)</sup>



図-20 2 液高粘性可塑状充填材<sup>3)</sup>

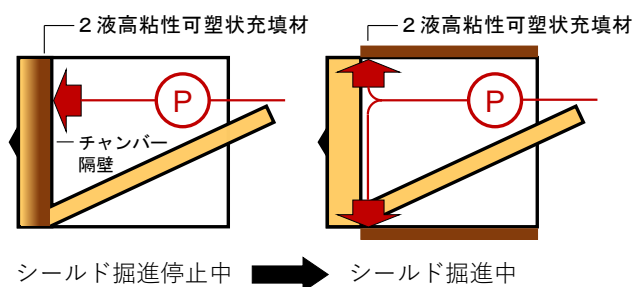


図-21 2 液高粘性可塑状充填材の充填システム

## 7. 結論

本稿は、ホーチミン地下鉄 1 号線工事でのベトナム国で初めてのシールド工事について、設計から施工までの一連について報告したものである。本工事で得られた知見は以下のとおりである。

- ・ ベトナム国で初めてのセグメント製造ではあったが、品質の良いセグメントを製造することができた。製造当初に見られたセグメント表面の乾燥収縮ひび割れは、セグメント製造過程の養生方法を改善したことで解消された。
- ・ はりばねモデルを用いたセグメント設計においては、設計値と実測値とは良く整合しており、設計の妥当性が認められた。
- ・ 土被りの浅い上り線 (West Bound Tunnel) のシールド掘進に伴う地盤変状が顕著であったが、2 液高粘性可塑状充填材を切羽とシールド機外周に充填する対策を講じたことで軽減した。

謝辞: 図-22 は、到達立坑を兼ねるオペラハウス駅の地下 4 階に到達した下り線 (East Bound Tunnel) のシールド機であり、ベトナムで初めてのシールド工事は 2017 年 10 月 20 日に無事に到達した (平均日進量: 9.5m)。また、上り線 (West Bound Tunnel) は 2018 年 6 月 14 日に到達を終えている (平均日進量: 8.4m)。こうして本シールド工事を終えるに際して、施主の Management Authority for Urban Railways、施工者の Shimizu-Maeda Joint Operation、ゼネラルコンサルタントの NJPT Association の方々に、この場を借りて深く御礼申し上げます。



図ー22 シールド機の到達状況(EBT 下り線)<sup>8)</sup>

#### 参考文献

- 1) Decision No. 101/2007/QĐ-TTg: Approving the planning of communication and transport in Ho Chi Minh City up to 2020 and an after 2020 vision, 2007
- 2) Decision No. 568/2013/QĐ-TTg: Approving the adjustment for the transportation development planning of Ho Chi Minh by 2020 with a vision after 2020, 2013
- 3) Kuriki, M: Design and Construction of First Bored Tunnel under Ho Chi Minh City Metro Line 1 in Vietnam , Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development - Geotec Hanoi 2019, pp.221-228, 2019
- 4) 運輸省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(シールドトンネル)、丸善、2002
- 5) 村上博智、小泉 淳: シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について、土木学会論文報告集、第 296 号、pp.73-86、1980
- 6) 栗木 実: 特別講演－国内外のトンネル建設プロジェクト－ホーチミン地下鉄の建設プロジェクト、第 28 回 トンネル工学研究発表会、土木学会、2018
- 7) 土木学会: トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[シールド工法編]・同解説、丸善、2016
- 8) Ghani, M. Ito, K. Kuriki, M. & Sugawara, S: Design and construction of Ho Chi Minh City Metro Line 1 Underground Section (Contract Package 1b), Geotechnical Engineering Journal, Association of Geotechnical Societies in Southeast Asia (SEAGS) and Southeast Asian Geotechnical Society (AGSSEA), Vol. 51, No.1, 2020