

ボスポラス海峡横断鉄道工事 -都市部山岳工法による大規模地下駅の設計と施工-

岩野 政浩¹・土屋 正彦¹・金子 哲也¹・田口 洋輔²・松村 謙治^{2*}

¹大成建設株式会社 国際支店 ボスポラス海峡横断鉄道工事作業所 (Taisei Corp. Marmaray Project Office, Barbaros Mah. Seyit Ahmet Deresi Sok. Bahar Sitesi Yani 34662 Altunizade, Istanbul, TURKEY)

²大成建設株式会社 国際支店 土木部 (〒163-6006 東京都新宿区西新宿6-8-1 新宿オークタワー)

*E-mail: iwano@ce.taisei.co.jp

本工事は、イスタンブール市において、海峡によって隔てられたアジア側とヨーロッパ側の市街部をトンネルで結ぶ全長13.6 kmのプロジェクトである。ここでは4駅が建設されるが、その一部であるヨーロッパ側シルケジ駅は、旧市街の歴史景観保護地区の建物密集地域に作られる大規模地下駅である。そのため、地上への影響を極力抑えることが求められ、一方、軌道レベルが海水面下40mと深く、十分な土被りが確保できるため、NATMが採用された。構造的には、2つのプラットホームトンネルの間にコンコーストンネルを有し、東西2つの換気立坑や避難用立坑等が連結された複雑な構造をしている。また、覆工にはウオータータイト仕様が要求されている。本報告では、大規模地下駅の設計概要と施工の現状を示す。

Key Words : *underground station, tunnel, shaft, intersection, watertight, urban mountain tunneling method*

1. はじめに

(1) プロジェクト概要

ボスポラス海峡は、トルコ共和国イスタンブール市をヨーロッパとアジアに隔て、黒海からマルマラ海に至る延長30kmの海峡である。海峡には既に2本の長大道路橋がかけられているが、増加する交通需要に対応仕切れておらず慢性的な交通渋滞が生じている。ボスポラス海峡横断鉄道整備事業は、この交通渋滞の緩和ひいては公害緩和を目的として事業計画されたものである。

プロジェクト全体は『マルマライ・プロジェクト』と呼ばれ、既存鉄道を近代化し、海峡下をトンネルで結ぶ全長76kmのイスタンブール大都市圏鉄道システムの向上を図るものである。大成・Gama・Nurol共同企業体は、このうちの海峡横断部を含むカズリチェシュメからアイリクチェシュメまで延長13.6kmの区間を2004年5月にターンキーベースを基調として契約し、同年8月に着工した。施工区間のうち11km区間に沈埋トンネル、シールドトンネル、山岳トンネル、開削トンネル等の各工法でトンネルや駅舎が建設される。図-1に路線平面図、図-2に路線縦断面図を示す。



図-1 路線平面図

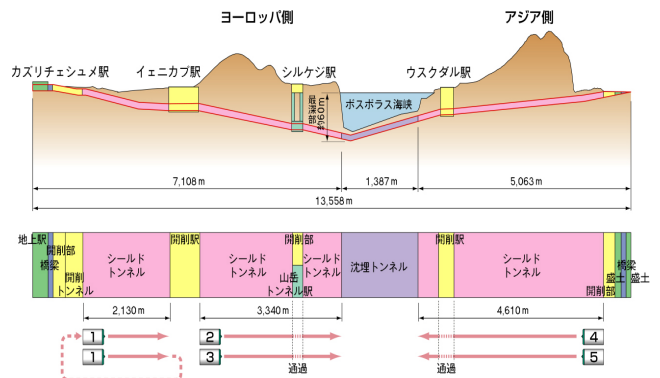


図-2 路線縦断面図

(2) NATMにより構築される構造物

NATMにより掘削後、構築される構造物は、大規模地下駅である『シルケジ駅』，列車が上下線を行き来する場所であり大断面の『クロスオーバー（渡り線）』，200m毎に合計43ヶ所に配置される上下線を結ぶ『乗客避難用連絡坑』，トンネル内の水を集水しトンネル外に排水する計3ヶ所の『ポンプピット』がある。最大掘削断面積はクロスオーバートンネルで236m²あり，換気立坑では500m²を超える。立坑とトンネルの総延長2130m，掘削土量は約24万m³の工事である。本報告では，シルケジ駅についての設計および施工の現状について示す。

(3) シルケジ駅

シルケジ駅はヨーロッパ側のオスマン帝国時代の居城であったトプカプ宮殿近くの歴史観光・商業地区に位置している。図-3に示すように地表には建物が密集しており，地表面の土地利用が制限されるため限られた用地に立坑を構築し，立坑より水平部のトンネル掘削を進める施工手順を採用した。上部の既存建物はRC造が全体の約6割であるが，そのうちの70%は築30年以上の古い建物である。RC造以外の建物はレンガ造りのビルでその大半は築50年以上であり，その内には歴史保存登録のものもある。

シルケジ駅には，地下約50mに2本のプラットホームと並行する中央通路トンネル，それに直行する4本の横断通路トンネルが建設される。また東西に換気立坑，その立坑に接続する横断通路トンネル，避難立坑，特殊な洪水ゲート立坑等も建設される。図-4にシルケジ駅の鳥瞰図を示す。このような種々の設備を兼ね備える必要性から30ヶ所以上の交差点部を施工しなければならず，さらに大幅な断面変化点や30度程度のエントランス斜坑も施工する必要があり，日本においても類を見ない複雑な構造をNATMにて施工する難工事となっている。

2. 地質概要

岩盤部と地表面近くの土砂部について地質概要を示す。

(1) 岩盤部

イスタンブールは，Trakya Formationと呼ばれる石炭紀の岩盤で覆われており，その厚さは少なくとも2kmに達する。主として砂岩と泥岩から構成され，上部では泥岩が優勢となるが，局所的には層状から塊状に石灰岩が分布し，層状に石灰質の頁岩も介在する。ヘルシニアン造山活動とアルプス造山活動による褶曲・断層作用を受けて全体的に細かい節理を成す破碎構造を呈しており，上部では表層水によって容易に風化され，種々の厚さの風化ゾーンを形成している。また，輝緑岩の貫入を受け破

碎，変成を受け，かなりの深度まで脆弱化している。

(2) 陸上土砂部

海峡部の土砂と区別するため，陸上土砂部とする。旧市街地や海峡沿岸の表層は埋土層で覆われており，当該計画路線においては海峡部をのぞく全線に渡って分布する。層厚は概ね2～10m程度で，礫，砂，シルトに加え，貝殻，木片，レンガやモルタル片など人工的な廃棄物も多く含んでいる。古代都市の遺跡が出現する層であり，工事に際しては事前の埋蔵遺跡調査が義務付けられているため，本格着手までに多大な時間を費やしている。

3. 設計概要

(1) 一次支保

一次支保の設計は，岩盤部と土砂部とで別々の手法を適用した。岩盤部に関しては，経験的設計手法を適用し，まず地形・地質条件を把握し，これに基づいて技術的な判断を加えて地山分類を実施する。地山分類の方法は国内外に種々提案されているが旧日本道路公団の地山分類に従うこととした。ここで，地山分類の結果は，NATM施工区間における地山等級の割付けとして整理する。

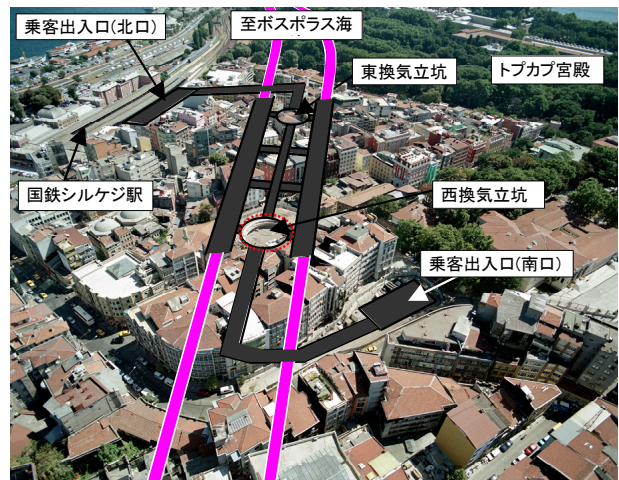


図-3 シルケジ駅地上状況

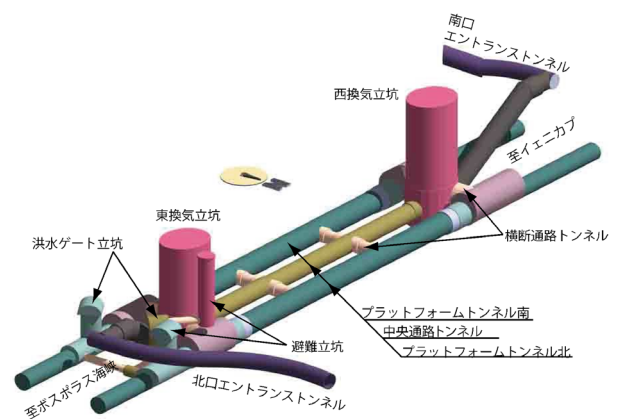


図-4 シルケジ駅鳥瞰図

なお、旧日本道路公団の地山分類に基づいて地山等級を設定するにあたり、日本と海外の岩盤分類には図-6に示すような相関関係も提案されており¹⁾、これらも地山等級設定の参考にした。次に、各地山等級区間ごとに、地山等級に応じた標準支保パターンの適用、ならびに掘削工法の選定を実施する。ただし、標準支保パターンの適用においては、現地の施工条件に応じて、適宜補助工法の採用をあわせて検討する。一方、土砂部では、標準支保パターンの適用が出来ないため、特性曲線法を用いて一次支保を決定する。なお、これら支保パターン、掘削工法等の決定においては、二次覆工の設計より定まる断面規模、断面形状を考慮に入れることとする。

(2) 二次覆工

本トンネルには耐水性を確保することが求められている。したがって、トンネル施工完了後の地下水位回復に伴う水圧に対抗するために、二次覆工には力学的機能を付加することが要求される。ここで、二次覆工に力学的機能を付加する場合には、その設計手法として経験的手法（標準設計）は適用が困難であることから、ここでは図-5に示す解析的手法により二次覆工を設計する。二次覆工の設計においては、トンネルの断面形状および覆工仕様を仮定したうえで、骨組構造解析を実施する。骨組構造解析においては、主たる荷重を水圧とし、その他施主の要求事項(ERQ)に示された荷重との組合せにおいて設計荷重を設定する。また、二次覆工と地山との相互作用については、二次覆工をモデル化した梁要素の外周に地盤バネを付加することにより評価する。ここで、地盤反力係数の算定には岩盤の変形係数とポアソン比が必

要となるが、これらの値は各地山等級ごとに設計用地盤物性値として表-1のように設定した。最終的に、断面形状ならびに覆工仕様を決定するにあたり、この骨組構造解析の結果を用いて、限界状態設計法による照査を実施する。ここで、照査結果が設計上の要求事項を満足しない場合には、断面形状ならびに覆工仕様を見直したうえで、上記過程を再度実施し、要求事項を満足するまでトライ・アンド・エラーを繰り返す、仕様を決定する。

換気立坑には最終的に4つの開口部が必要であり、また連結するトンネル部においても断面変化や交差部がいくつもあるため、設計的に適切な断面力算定に二次元の構造解析を適用することは困難である。そこで図-7に示すような三次元のシェルバネモデルを用いて構造解析を実施した。また、換気立坑の上部は土砂部に位置するので耐震設計が必要とされた。そのため地盤応答解析を実施した後、応答震度法を用いて地震時荷重による断面力を算出し、設計照査を実施した。

表-1 設計用地盤物性値

Ground class	Deformation modulus (kN/m ²)	Unitweight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Internal friction angle (°)	Poisson's ratio	
Soft Ground (1)	33,600	18	0	30	0.30	
Soft Ground (2)	50,400	19	0	40	0.30	
Rock	C II	1,000,000	23	1,000	40	0.30
	DI	500,000	22	400	35	0.35
	D II	150,000	21	200	30	0.35
	E	80,000	20	100	30	0.40

日本道路公団*	電力中央研究所(菊地・斉藤)**	鉄建公団	RSR*	RMR*	Q**
A	CH~B	VN	100~75	非常に良好 100~81	普通 10以上
B		IVN	75~59	良好 80~61	悪い 2.0~10
C I	CM	III N	58~44	普通 80~41	かなり悪い 0.1~2.0
C II		II N	43~29	悪い 40~21	非常に悪い 0.1~0.04
D I	CL	I N	28以下	非常に悪い 20以下	
D II		I L, I S			
E	D	特S, 特L			極端に悪い 0.004以下

図-6 主要な岩盤分類の評価値の比較¹⁾

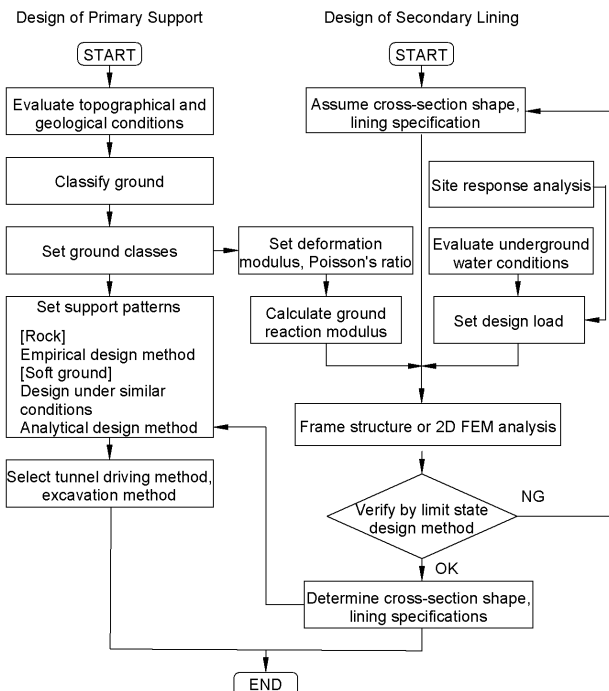


図-5 設計フローチャート

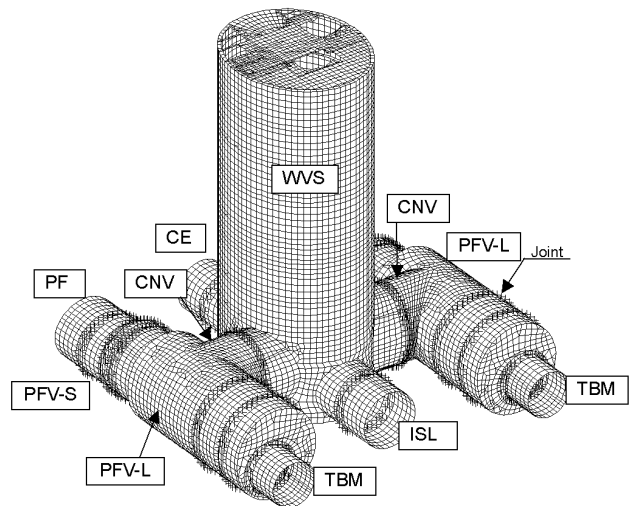


図-7 換気立坑解析モデル

(3) 地表構造物への影響評価

工事に伴う地表構造物への影響評価を実施するために、掘削に伴う地表面沈下と地下水位低下による地表面沈下を推定した。

a) 掘削に伴う地表面沈下の推定

山岳トンネルの掘削に伴う地表面沈下を算定する手法として、二次元有限要素法を用いた逐次掘削解析を採用した。

b) 地下水位低下による地表面沈下量

地下水位低下に伴う有効応力の増加によって生じる弾性変形量が支配的であると考え、式(1)を用いて算出する。

$$S = m_v \cdot H \cdot \Delta\sigma_z \quad (1)$$

ここで、**S** : 地表面沈下量
m_v : 体積圧縮係数
H : 層厚
Δσ_z : 有効応力増分

c) トンネル掘削による地表構造物の影響評価

ERQ に従うと、応力解放による沈下と地下水位低下による沈下の合計沈下量が 10mm 以下かつ地表面傾斜が 1/500 以下の場合には、設計ではさらなる地表構造物の評価を行わなくて良いことになっている。上記条件を満たさない場合、地表構造物にもたらす影響度を表-2 に示す Boscardin と Cording の提案する方法³⁾を用いて判定し、適切な対策を検討する。

(4) 設計結果

a) 地山区分と一次支保パターン

シルケジ駅平面図の地山区分と一次支保パターンを図-8 に示す。地山は我が国の道路トンネル規準の CII より DII 相当と評価され、西側より東側に向かって地山の状態は悪くなる。

b) 西側換気立坑の一次支保パターン

西側換気立坑の一次支保パターンを図-9 に示す。上部 21m の土砂部は柱列式連壁による山留め構造の中に RC 構造によるリングビームが構築され、地表面下 21m より NATM による支保構造となる。NATM 上部 12m の一次支保構造は、通常の 1 重支保構造であり、下部 24m の一次支保構造は、2 重支保構造となっている。1 重目の支保（地山側）で掘削により解放される力を支持し、2 重目の支保（内空側）で、横坑掘削のための開口時の力を支持する構造である。

4. 施工事例

当プロジェクトでは遺跡調査の為、本工事に着手出来ない箇所が多い。シルケジ駅も例外ではないが、ここでは掘削が 2008 年 7 月に完了した西側換気立坑 (WVS) の施工状況を報告する。

(1) 施工概要

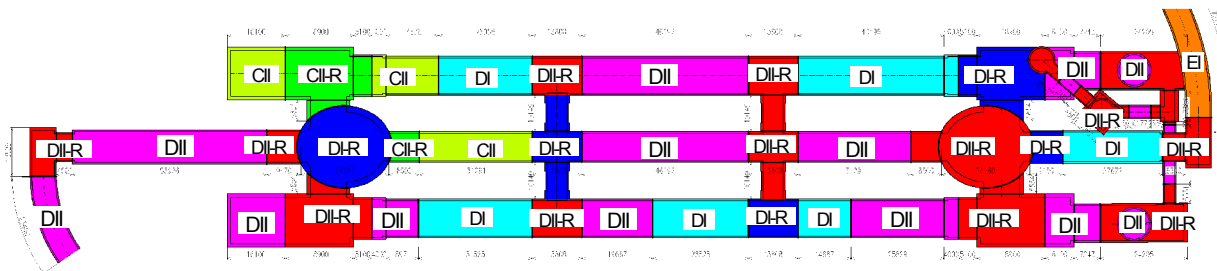
図-9 に示すように上部の未固結地山部は開削工法、下部の岩盤部は NATM により掘削を行う。上部は土留壁となる柱列式連壁を打設後、ヨーロッパで多く用いられるリングビームを構築しながら掘り下がる。この区間は遺跡が多い層であり、遺跡調査を行いながら慎重に施工を実施した。

一方、下部は NATM であり、1m 掘削後、吹付けコンクリート、鋼製支保工およびロックボルトで支保し、順次掘り下がっていく。開口部以深は二次覆工の厚さが変わるので、それに伴い掘削断面積も大きくなる。

立坑と接続する横坑の CNV と CE には、それぞれの天端高さまで到達したところで掘削を停止し、横坑掘削時の天端防護用の AGF(12m, 45cm ピッチ)を事前に施工した。図-11 に工事進捗状況を示す。掘削は 2008 年 3 月より開始し、7 月末に完了した。掘削の進行に伴い地表面沈下が局所的に

表-2 構造物の損傷分類

Risk Category	Description of Degree of Damage	Description of Typical Damage and Likely Form of Repair for Typical Masonry Buildings	Approx Crack Width (mm)	Max Tensile Strain %
0	Negligible	Hairline cracks		< 0.05
1	Very slight	Fine cracks easily treated during normal redecoration. Perhaps isolated slight fracture in building. Cracks in exterior brickwork visible upon close inspection.	0.1 to 1	0.05 to 0.075
2	Slight	Cracks easily filled. Redecoration probably required. Several slight fractures inside building. Exterior cracks visible: some repointing may be required for weather-tightness. Doors and windows may stick slightly.	1 to 5	0.075 to 0.15
3	Moderate	Cracks may require cutting out and patching. Recurrent cracks can be masked by suitable linings. Tuck-pointing and possible replacement of a small amount of exterior brickwork may be required. Doors and windows sticking. Utility services may be interrupted. Weather-tightness often impaired.	5 to 15 or a number of cracks greater than 3	0.15 to 0.3
4	Severe	Extensive repair involving removal and replacement of sections of walls, especially over doors and windows required. Windows and door frames distorted. Floor slopes noticeably. Walls lean or bulge noticeably, some loss of bearing in beams. Utility services disrupted.	15 to 25 but depends also on number of cracks	> 0.3
5	Very severe	Major repair required involving partial or complete reconstruction. Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken by distortion. Danger of instability.	Usually greater than 25 but depends on number of cracks	



※-R は交差部の影響を考慮した補強区間であり、増し吹付や増しボルトを採用している区間である。

図-8 シルケジ駅一次支保パターン

想定以上に発生する箇所があったため、途中から掘削手順を変更し早期閉合による沈下の抑制に努めた。また対策として一部土砂部不良地山箇所立坑坑内よりセメント注入を実施した。

(2) 計測項目

西側換気立坑(WVS)の掘削時には、坑内計測 A, B (内空変位測定, 地中変位測定, 吹付けコンクリートおよび鋼製支保工応力測定) はもとより、地表面沈下及び建物の傾斜測定を実施した。地表面沈下については、現状で約 135ヶ所での計測を実施中であり、今後増強する予定である。

(3) 工事状況写真

GL-39.5mの地点では、地山状況確認のため、4方向にコア採取と孔内載荷試験を実施した。変形係数 100~500MPa のものが大半であったが全体的にばらつきが多く、1000MPaを超えるものや 100MPaに満たない場合もあった。さらに4本の内一つのボアホールでは孔くずれしてブルーが

挿入できず、コアが取れないほど脆弱な部分も存在した。図-10 にコアの写真および図-13 に孔内載荷試験によって得られた変形係数を示す。

図-12 に掘削時における立坑側部の岩盤の写真を示す。泥岩の間に硬い輝緑岩が貫入しており、境界部は破砕・変質してかなり脆弱化し、立坑に高角度に交差している。また泥岩基質部にも節理が発達し、設計にて想定した地山等級より 1 ランク以上悪い地山状況である。

図-14 に掘削時の立坑内の施工状況写真を示す。直径約 25m 掘削断面積 500m²の大断面である。

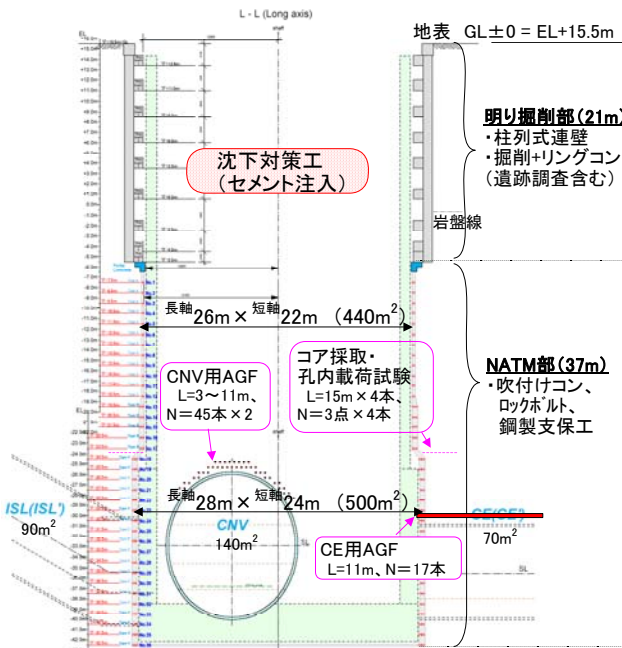


図-9 換気立坑施工概要図



図-10 コア状況写真

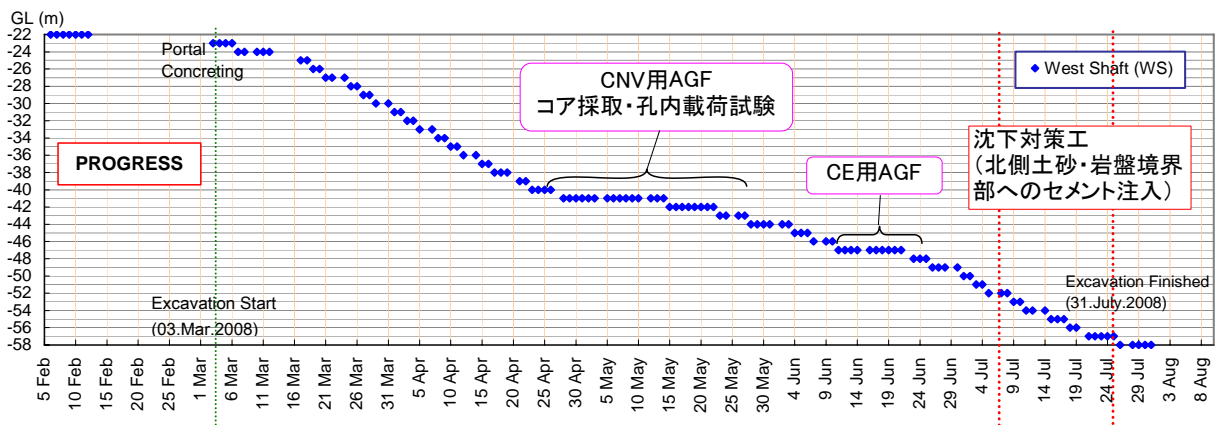


図-11 工事進捗表

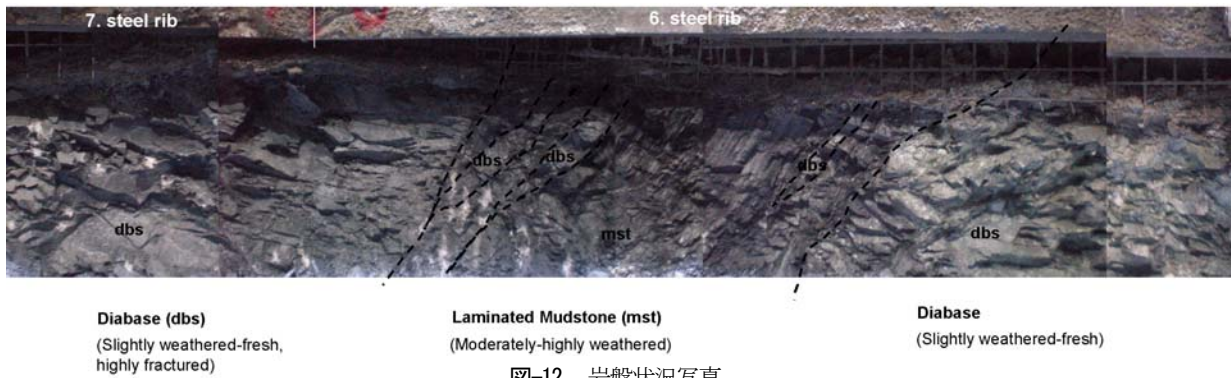


図-12 岩盤状況写真

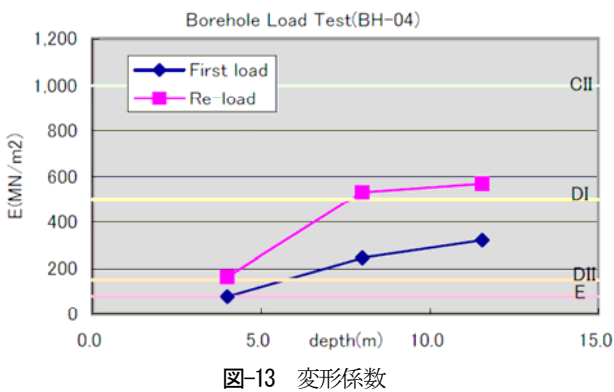


図-13 変形係数



図-14 換気立坑内施工状況写真

5. まとめ

以上のようにシルケジ駅は、建物密集地域の地下に位置し、断面変化、交差部が多数存在する複雑な構造をしており、トンネル工事は多くの規制もあり、我が国においても類を見ない難工事である。また、西側立坑の掘削を完了して明らかになったように、褶曲と変成作用により岩盤が脆弱化し、西側立坑付近に限っても不均質の度合いが高い。現状では、東側立坑における遺跡調査の進捗状況にもよるが、各種水平坑の掘削は西側立坑より順次開始し、工程管理を含めて高度のリスク管理・情報化施工管理が要求される。今後も周辺への影響評価を含めて、地質状況の確認、掘削工法の選定、適切な補助

工法の採用等、トンネル技術の粋を集めた施工を実施する予定である。また、本工事を進めるにあたり、岩盤工学及びトンネル工学に関して我が国の多くの関係各位より多大なるご指導をいただき、最後に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：TBMハンドブック，p.65，2002.2
- 2) Boscardin, M. and Cording, E.J., Building Response to Excavation-Induced Settlement, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Press, 115:1-21, January 1989.
- 3) 田口，小山，今石：ボスポラス海峡横断トンネルの施工，トンネルと地下，日本トンネル技術協会誌 Vol.39, No.1, pp7-17，2008年1月

RAILWAY BOSPHORUS TUBE CROSSING, TUNNELS AND STATIONS - DESIGN AND CONSTRUCTION OF LARGE SCALE UNDERGROUND ROCK STATION BY URBAN NATM -

Masahiro IWANO, Masahiko TSUCHIYA,
Tetsuya KANEKO, Yosuke TAGUCHI and Kenji MATSUMURA

This project will connect Asian side and European side of urban city divided by Bosphorus Strait in Istanbul with constructing 13.6km tunnel. Four stations are planned and one of them, Sirkeci Station, which is an underground station, will be designed to be constructed under the built-up area at historical landscape conserved zone in the old urban area of European side. Therefore the influence to ground surface and buildings should be restricted. On the other hand, since track level is 40m below sea level and adequate overburden can be secured, the urban NATM is applied. The station structure consists various kinds of tunnels and shafts. We report the design and construction aspects as well as progress status.