

ボスボラス海峡横断鉄道工事における 都市部山岳工法による大規模地下駅の設計・施工

小原 伸高¹・松村 謙治¹・岩野 政浩²・大塚 勇³・櫻井 春輔⁴

¹正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:ohara@ce.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³正会員 大成建設株式会社 国際支店ボスボラス海峡横断鉄道工事業所 (Istanbul, TURKEY))

⁴正会員 財団法人建設工学研究 (〒657-0011 兵庫県神戸市灘区鶴甲1-3-10)

本プロジェクトは「マルマライ・プロジェクト」と呼ばれ、既存鉄道を近代化し、ボスボラス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。当該工事ではボスボラス海峡横断部を含む13.6km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を建設する。

本稿では、イスタンブール市中心部の歴史観光・商業地区の直下に、山岳工法により大規模地下駅（シルケジ駅）を構築する計画の設計・施工について報告する。

Key Words : underground railway station, urban NATM, 3D excavation analysis, monitoring

1. はじめに

ボスボラス海峡はトルコ北西に位置し、黒海からマルマラ海にいたる延長30kmの海峡である。地理的にも経済的にも重要な場所である人口1400万人のトルコ最大の都市イスタンブールは、この海峡によりアジア側とヨーロッパ側に隔てられている。海上交通は発達しているものの、東京などに比べると圧倒的に鉄道網が不足しており、交通手段は車に頼らざるを得ない状況にある。アジア側とヨーロッパ側を結ぶ手段として、すでに2本の長大道路橋が架けられているが、経済の発展にともなう交通需要の増加に対応しきれず、慢性的な交通渋滞を引き起こしているのが現状である。本プロジェクトは、「マルマライ・プロジェクト」と呼ばれ、既存鉄道を近代化し、ボスボラス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。

当該工事は、ボスボラス海峡横断部を含む13.6km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を建設するものである。図-1に路線平面図、図-2に路線縦断面図を示す。本稿では、イスタンブール市中心部の歴史観光・商業地区の直下に、山岳工法により構築する大規模地下駅（シルケジ駅）の設計・施工について報告する。

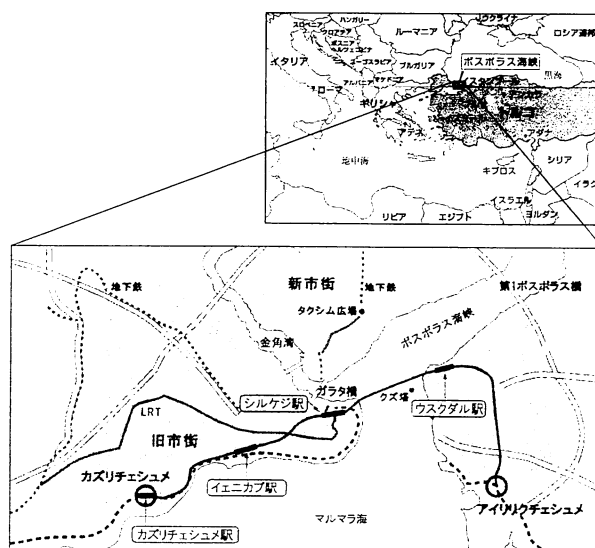


図-1 路線平面図

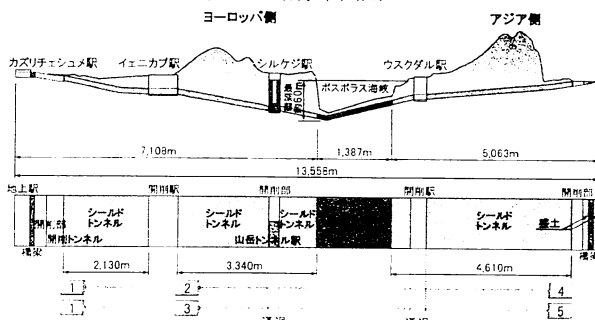


図-2 路線縦断面図

2. 大規模地下駅（シルケジ駅）概要

シルケジ駅は写真-1に示すような建物密集地区の地下約50mに構築される。地表からのアクセス路は限られており、東西2つの換気立坑を利用して水平トンネルの掘削を行う計画であったが、遺跡調査の遅延のため東立坑の掘削に着手できず、西立坑のみをアクセス路として掘削を進めることになった。

駅の主構造は、2本のプラットホームトンネルと並行する中央通路トンネル、それに直行する4本の接続通路トンネルである。また東西の換気立坑、その立坑に接続する換気兼接続通路トンネル、避難トンネルおよび避難立坑等も建設される。トンネルどうしの交点部を20ヶ所以上も施工しなければならず、また、全てのトンネルが近接施工となること、大幅な断面変化点や勾配30度の斜坑があることなど、日本国内ではあまり例のない構造を都市部山岳工法にて施工する難工事である。

図-3にシルケジ駅鳥瞰図、表-1に各トンネル名称と掘削規模、覆工コンクリート厚さを示す。

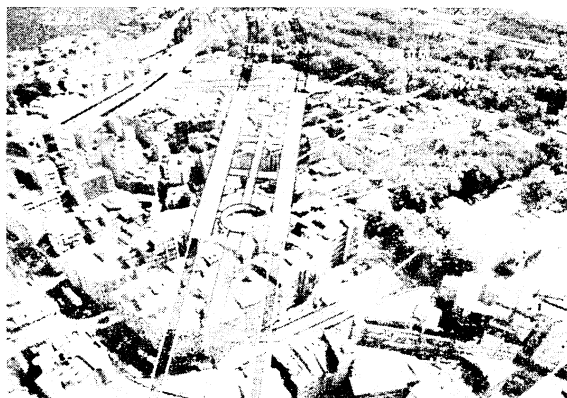


写真-1 シルケジ駅地表状況

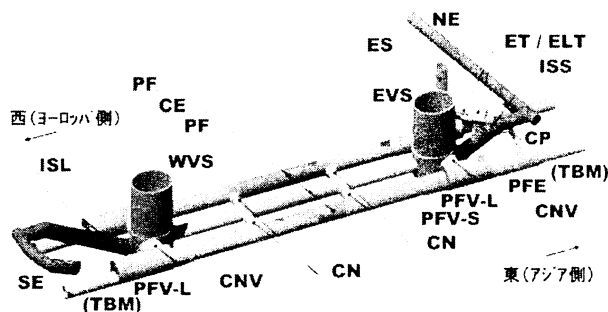


図-3 シルケジ駅鳥瞰図

表-1 トンネル名称と断面規模

記号	名称	掘削断面積(m ²)	掘工厚(cm)
WVS	西換気立坑	510.7	100-120
EVS	東換気立坑	510.7	100-120
CNV	換気兼接続通路トンネル	143.3	100
PF	プラットフォーム(スモール)	89.0	45
PFV-S	換気兼プラットフォーム(スモール)	110.4	45
PFV-L	換気兼プラットフォーム(ラージ)	192.4	100
CE	中央通路トンネル	60.2	45-75
CN	接続通路トンネル	36.6	45
ISS	斜坑(スモール)	73.1	45-75
ISL	斜坑(ラージ)	78.1	45-75
OP	避難連絡通路	16.1	40
ET	避難トンネル	11.6	35
ELT	避難トンネル(ラージ)	36.4	45-75
ES	避難立坑	50.3	45
NE	北エントランストンネル	46.3	45
SF	南エントランストンネル	46.3	45

3. 地形・地質概要

(1) 地質概要

当該施工箇所地質は地表面近くの土砂部と深部の岩盤部に大別される。図-4に地質縦断図を示す。

岩盤部は泥岩優勢の砂岩・泥岩互層で、褶曲・断層作用を受けて、全体的に細かい節理をなす破碎構造を呈している。岩盤部の多くは地山等級DⅡ相当の軟岩である。

岩盤の上には層厚約10mの砂層が分布し、礫、砂、シルト、貝殻等が含まれている。原位置透水試験によれば透水係数は $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 程度である。

砂層の上は埋土層で覆われており、層厚は10～25m程度で、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おり、透水係数は砂層よりも1オーダー大きい $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度である。古代都市の遺跡が出現する層であり、掘削前の遺跡調査が義務付けられている。

東側にいくほど、表層が厚くなり岩盤と砂層の境界線は深くなる傾向である。地下水位は砂層と埋土層の境界付近に存在し、トンネル天端で約30mの水圧が作用している。

(2) 設計用地山評價

地形・地質構造を分析し、技術的な判断を加えて地山等級を設定した。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（以下JH）の地山分類に基づくこととし、地山分類の結果を施工区間毎に地山等級区分として整理した。なお、図-5に示すような日本と海外の岩盤分類の相関関係も参考にした¹⁾。

地山の変形・強度特性に関する物性値は、JHの技術資料²⁾における各地山等級の代表値を採用した。これは、岩盤の状態を総合的に判断して設定した地山等級の方が、ボーリングコアを用いた力学試験の結果より地山の状況を適切に評価できると考えたためである。

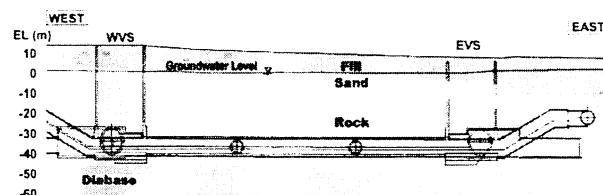


図-4 シルケジ駅地質縦断図

日本道路 公団	電力中央研究所 (菊池・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		NN	75~59	良好 80~61	悪い2.0~10
C I	CM	IN	58~44	普通 60~41	かなり悪い 0.1~2.0
C II		IN	43~29	悪い 40~21	非常に悪い 0.04~0.1
D I	CL	IN	28以下	非常に悪い 20以下	非常に悪い 0.04以下
D II		IL, IS			
E	D	特S, 特L			

図-5 主要な岩盤分類の評価値の比較¹⁾

4. 覆工コンクリートの設計

(1) 概要

本トンネルは防水構造が求められることから、覆工コンクリート打設後の地下水位回復に伴う水圧を主たる設計荷重とした限界状態設計法により設計を行った。構造解析は、トンネル一般部では2次元骨組構造解析を適用したが、妻部や交差部は3次元的に複雑な構造となるため、3次元シェル解析を採用した。いずれも覆工コンクリートと地山の相互作用を構造要素の外周に付加した地盤バネによりモデル化している。

トンネル形状は、今回のように大きな水圧が作用する場合には、インバートの曲線半径を大きくした馬蹄形では隅角部やインバートに大きな曲げモーメントが発生し過密な配筋となる。従って、外荷重に対して構造的に有利な円形に近い形状とした。

(2) 3次元解析を用いた設計

換気立坑（WVS, EVS）下部は4つの開口部があること、連結する水平トンネルは断面変化や交差部を有するなどとくに複雑な構造であることから、図-6に示すような3次元解析モデルを用いて構造解析を実施した。

主たる設計荷重（自重および水圧）の他に地表構造物荷重や列車の脱線荷重等の様々な従荷重を考慮する必要があり、使用限界状態と終局限界状態とをあわせて14ケースの荷重条件を満足するように設計した。その結果、覆工コンクリート厚は表-1（前出）に示すように45cm～120cm、また換気立坑の底版厚は370cmとなった。

解析結果の一例として、WVS周方向の断面力コンター図を図-7に示す。軸力は深度が深くなるほど圧縮軸力が大きくなる傾向があり、とくに開口部上下端には圧縮軸力が集中している。また、曲げモーメントも開口部近傍に集中している。このように2次元解析ではとらえきれない3次元的な応力分布を反映し、必要な箇所に適切に配筋する合理的な設計を行った。

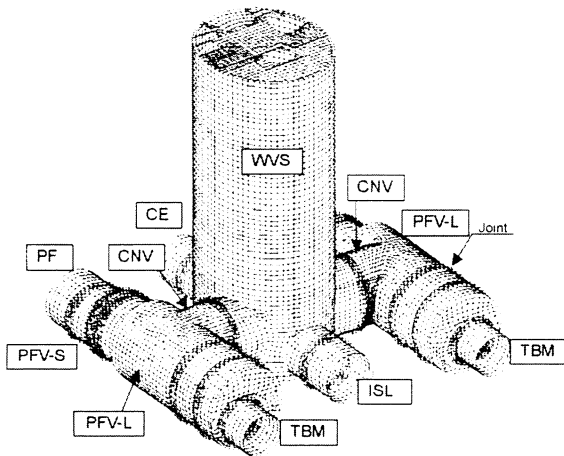


図-6 換気立坑付近の構造解析モデル図

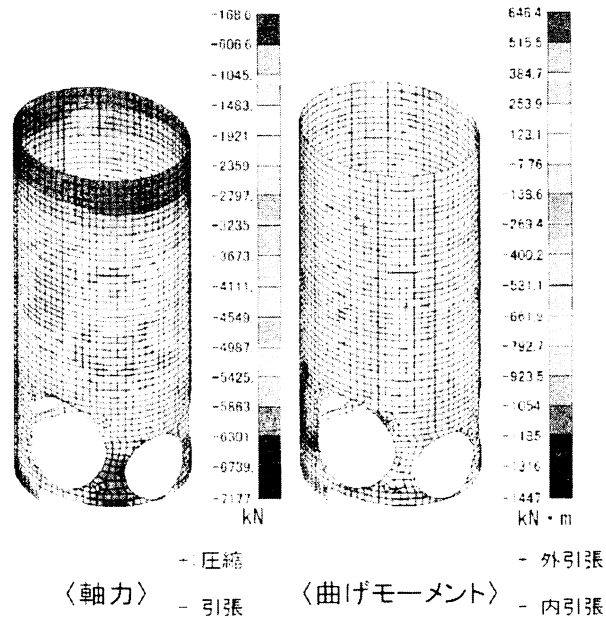


図-7 WVS周方向断面力コンター図

5. 支保工の設計

(1) 水平トンネル

支保工の設計は、岩盤部と土砂部とで設計手法を分け、岩盤部には経験的設計手法を適用し、土砂部には地山特性曲線法による解析的設計手法を適用することを基本とした。岩盤部は施工区間毎に地山等級に応じた標準支保パターンを適用したが、採用した支保はCIIパターンからDIIパターンである。

(2) 大断面換気立坑

換気立坑は、断面積約500m²の大断面掘削となる。上部21mの土砂部は柱列式連壁による土留め壁およびRCリングビームによる支保構造、岩盤部となる地表面下21m以深はNATMによる支保構造とした。NATM上部12m区間の支保工は通常の1重支保構造だが、下部24m区間の支保工は2重支保構造とした。また、施工状況に応じて適宜補助工法の検討を行うこととした。

(3) 3次元解析を用いた開口補強の設計

換気立坑下部は、最大140m²の大断面開口部が東西南北4方向にあり、立坑と水平坑の離隔が最小約1mと近接している特殊な状況となることから、開口掘削時（CNV掘削時）の地山の不安定化や支保工の応力集中が懸念された。あまり前例のない施工となるため、事前に施工中の挙動や安定性を把握するため、構造と施工手順をできるだけ忠実にモデル化した3次元逐次掘削解析を行い、開口補強工等の事前対策を検討した。

ここでは西立坑（WVS）周辺を対象とした検討につ

いて示す。地盤はソリッド要素、吹付コンクリートはシェル要素、鋼製支保工はビーム要素でモデル化した。図-8に3次元解析モデル、表-2に地山物性値を示す。PFV-LやCNVのような大断面トンネルは、切羽安定を考慮し導坑を含めた多段ベンチとして加背を小さくしている。解析ステップは1000ステップ以上に及んだ。

WVS下部の開口部付近は、CNV掘削時にWVSの支保工を切断・開口するため、開口部の支保工が負担していた断面力が周辺に再配分される。その結果、開口部周辺の支保工に発生する応力が増加し耐力を超過すると予想された。

そこで、覆工コンクリートの設計を見直し部材厚の薄肉化を図り、掘削時の支保工の内空側に厚さ50cmの開口補強材を追加設置することとした。補強構造は、4方向にトンネル開口が設けられることを考慮し、開口上下端の周方向に鉄骨コンクリートの開口補強リング（Top RingおよびBottom Ring）を設置、鉛直方向にも鉄骨コンクリートの開口補強柱（Pillar）を設置することとした。また、Top RingとBottom Ringの間は吹付コンクリートにて50cm増し吹きすることとし、開口範囲が大きいCNVとISS側には高強度の鋼繊維補強コンクリート

($f_{ck}=30\text{N/mm}^2$)、それ以外のCE側には普通コンクリート($f_{ck}=18\text{N/mm}^2$)を適用した。図-9に開口補強構造の概要を示す。

WVSとCNVの接続部地山側の隅角部は、解析結果により損傷を受けることが予想されるため、CNV掘削開始前にシリカレジンの注入にて地山補強を実施した。また、南北PFVトンネルについては、WVSと反対側側壁に長尺補強ロックボルト工による地山補強を、アーチ部に高強度繊維補強吹付コンクリートによる増し吹き補強を実施した。

表-2 地盤物性値

	Manmade Fill がれき堆積層	Silty, Clayey Sand 粘土混じり砂	Rock 泥岩 (砂岩互層)	Hard-West 輝緑岩を含む 貫入岩
応力-ひずみ関係	弾完全塑性モデル			
破壊基準	Mohr-Coulombの破壊基準			
単位体積重量(kN/m^3)	19	19	21	22
ヤング係数(MPa)	33.6	50.4	150	500
ポアソン比	0.3	0.3	0.35	0.35
粘着力(kN/m^2)	0	0	200	400
内部摩擦角($^{\circ}$)	30	34	30	35
側圧係数	0.8			

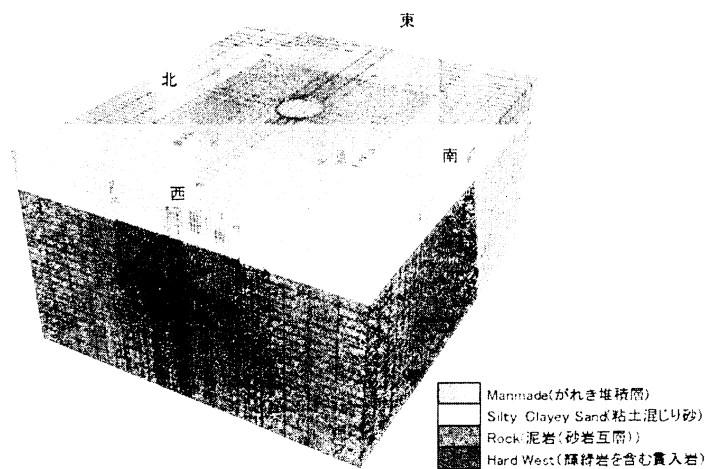


図-8 3次元掘削解析モデル

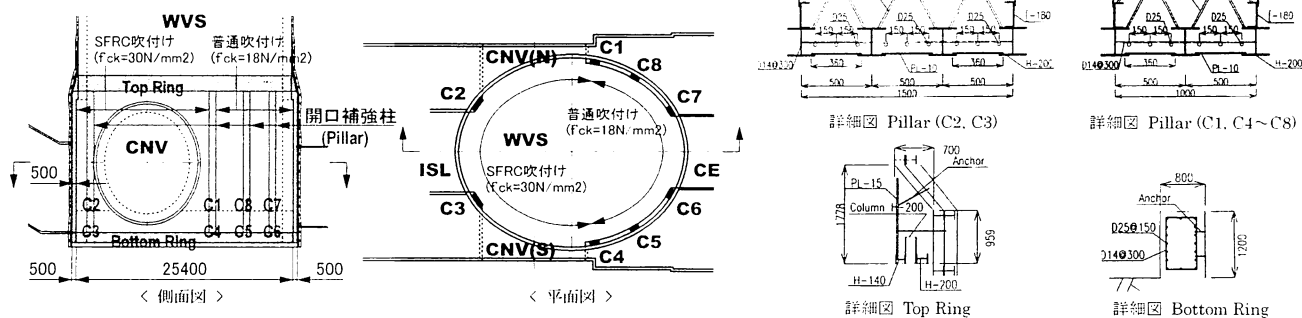
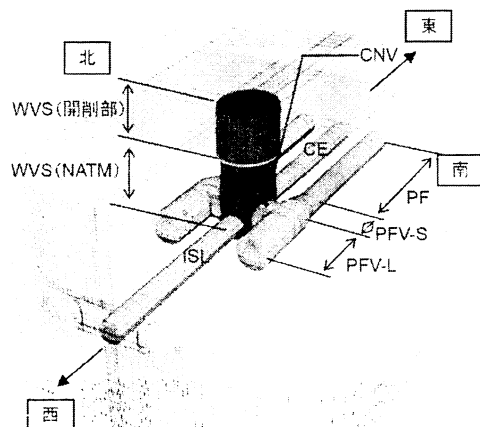


図-9 西立坑WVS下部開口補強概要図

6. 施工概要

(1) 西換気立坑 (WVS) の施工

シルケジ駅の施工は西立坑WVSの掘削から開始した。立坑は、深さ58m、直径約25m、掘削断面積500m²の大断面立坑である。施工概要を図-10に示す。掘削時には、坑内計測A、B（内空変位測定、地中変位測定、吹付コンクリートおよび鋼製支保工応力測定）を実施し、地山挙動の把握に努めた。

GL-39.5mの地点では、地山状況確認のため東西南北4方向水平にコア採取と孔内載荷試験を実施した。変形係数100~500MN/m²のものが大半であったが、全体的にばらつきが多く、100MN/m²に満たないものや、孔くずれしてコアが採取できないほど脆弱な部分も存在した。

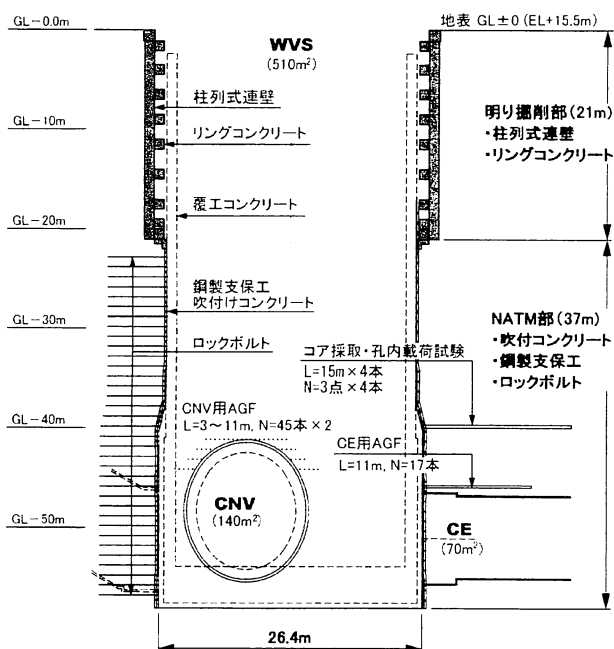


图-10 西立坑WVS施工概要图

(2) 水平トンネル (PFV) の施工

換気兼プラットホームトンネル（PFV）は図-4（前出）に示すように換気立坑（WVS, EVS）の両側に近接して構築される大断面トンネルで、掘削断面積は 192.4m^2 である。

施工方法は、まずPFVトンネルの上半部に導坑を掘削し、上半掘削、中半掘削、下半掘削、インバート掘削の順に掘削する。図-11に加背割りと施工手順を示す。

補助工法は、まず導坑内からトンネル軸方向に50cmピッチで左右両側に、上半脚部を対象にシリカレジンで地山改良を実施し、上半掘削時の沈下抑制対策を行った。次に、地表面沈下の抑制および天端補強を目的にAGFを打設し、上半仮インバートを実施し沈下を極力抑えるように施工した。上半掘削後、沈下抑制対策と中半側壁の地山改良を目的に上半盤から1mピッチで左右両側にフ

ットパイルを実施し、シリカレジンを注入した。中半掘削でも沈下抑制のために仮インバートを行いながら掘削を進めた。中半盤からも上半で行ったようにフットパイルを施工し、沈下抑制と下半側壁の地山改良を行った。

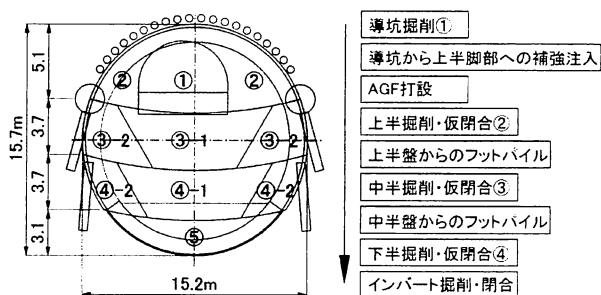


図-11 PFV-L トンネル施工手順

(3) 換気兼接続通路トンネル (CNV) の施工

西立坑WVSと水平トンネルPFVとを接続する換気兼接続トンネルCNVの掘削は、WVSやPFVに断面積 140m^2 余りの大断面開口を設けることになる。WVSとPFVとの隔離は最小隔離 1m と近接していること、WVS下部には4つの大断面開口部を設けることなどから、CNV掘削に伴う支保工や地山の安定を確保するため、前章で述べたように3次元逐次掘削解析に基づき開口部補強を行った。また、CNVは加背を小さくして慎重に施工を進めることとした。図-12にCNVの加背割りを示す。

CNVを掘削するに当たっては、WVS底盤からCNV導坑まで約15mの高さがあるため、施工機械が届く高さまでWVSを埋戻し、作業盤を確保する必要があった。しかし、WVSが地上と地下トンネル群とをつなぐ唯一のアクセスルートとなるため、WVSをすべて埋め戻してしまうとWVS以外の作業が止まってしまう。そこでWVS内に土留壁を設置し、仮設のアクセス路を確保しながら導坑高さまで埋戻しを行い、WVS以外のエリアでの作業とCNV掘削を同時に行えるような施工方法を計画した。また、PFV-L内にもCNV導坑高さまで作業構台を設置した。CNV掘削にあわせてWVS内の埋戻しを撤去し、インバート掘削まで無事に完了させた。施工手順を図-13に、施工状況を写真-2、写真-3に示す。

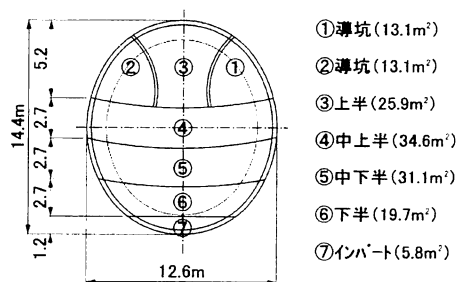


図-12 CNV掘削加背割り図

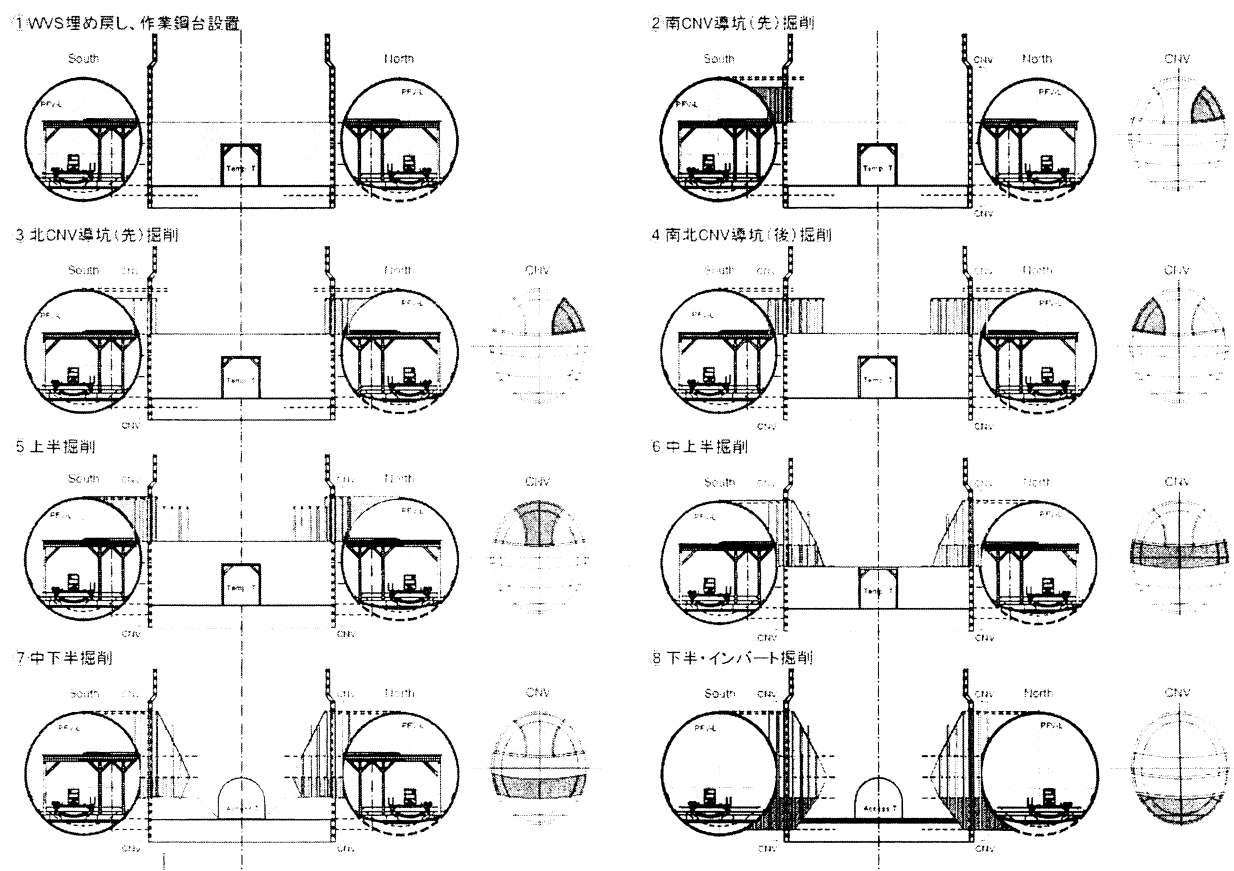


図-13 西CNV施工手順図

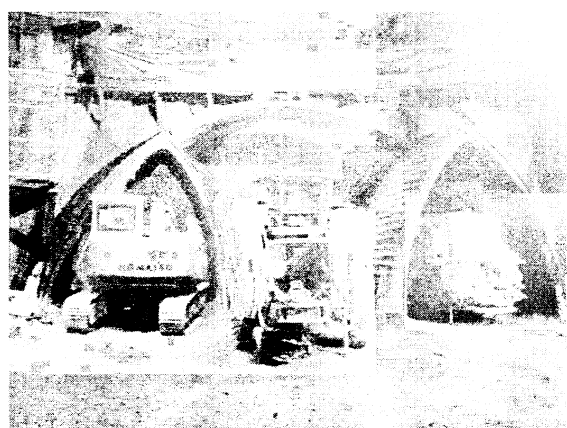


写真-2 西CNV上半掘削状況

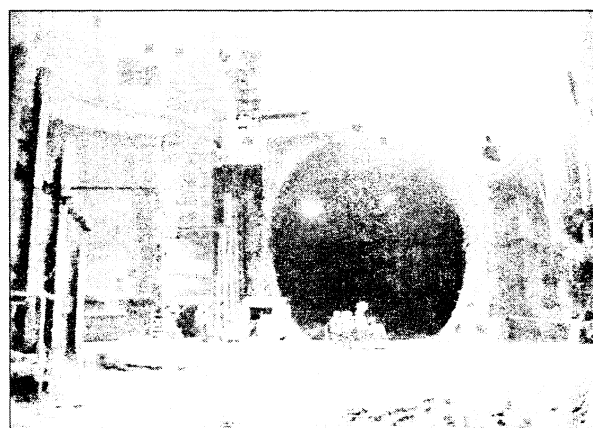


写真-3 西CNV掘削完了

CNV掘削時は地山が幾何学的に不安定な形状になるため、立坑内や水平トンネル内の天端沈下、内空変位、開口付近の支保工応力等の各種の動態観測を併用し、解析による施工段階ごとの予測値と比較して地山や支保工の安定性を確認しながら慎重に施工を進めた。施工時の計測結果の一部を次に示す。

・CNVとの交点部付近のPFV-Lの変形挙動

北CNVと北PFV-Lの交点部におけるCNV掘削に伴うPFV-Lの天端沈下および内空変位の予測値と計測値とを比較した結果を図-14に示す。天端沈下は、予測値とほぼ一致した変形量で、北CNVの上半掘削時から徐々に

増加し、北CNV中上半掘削時に最終変形量と同等の変形となった。内空変位は、南CNV上半掘削時から徐々に増加し、北CNV上半掘削時に最終変形量と同等の変形となった。計測値は予測値より若干大きな変形量であったが、PFV-Lの支保工の変状等は確認されなかった。

・WVSの内空変位挙動

CNV掘削時のWVS内空変位の予測値と計測値とを比較した結果を図-15に示す。CNVの掘削の進捗に従って、予測値と同様に縮小方向の内空変位が計測された。これはCNV掘削によりWVSのリング形状が欠損し剛性が低下するためと考えられる。測点11-12では予測値より大

きな、また、測点7-8では予測値より小さな計測値となり、予測解析より開口部近傍に変形が集中するような挙動が観測されたと考えられる。WVSの支保工に変状等は確認されなかった。

・開口補強の発生応力

CNV掘削時の開口補強柱（SRC構造）や開口補強リングの応力計測について、予測値と計測値とを比較した結果を図-16に示す。

解析ではCNV中上半掘削時の応力再配分により開口補強柱の鉛直方向や開口補強リングの水平方向に大きな応力が発生する結果となった。とくに、開口補強柱中央部が内空側にはらみだすような変形とそれに伴う応力により開口補強部材の不安定化が懸念された。従って、施工時には開口補強部材に40箇所以上の計測点を設け、想定外の挙動を示さないかどうか、支保工や補強部材の安定を確認しながら慎重に施工を進めた。

開口補強柱C4の計測結果をみると、南CNV中上半掘削時に応力が増加し、南CNV中下半掘削時以降は応力が抜けていくなど、予測解析に類似した挙動を示したが、計測値は最大でも予測値の3分の1程度であり、全般に小さな傾向であった。

また、CNV天端の開口補強リングの応力計測は、掘削に伴い応力が増加していく予測解析結果と異なり、ほとんど増加応力が発生しない計測結果となった。

以上のように、CNV開口掘削時の開口補強部材に予測解析ほど大きな増加応力が発生しなかったのは、次のような理由ではないかと推測している。

- ・WVS掘削完了後に大断面のPFVトンネルを近接して掘削したため、WVSとPFVの緩み領域が連続して両方を含む大きな地山アーチが形成された。
- ・CNV掘削はその地山アーチ内での掘削であったため、緩み範囲の広がりにより荷重が増加するような挙動が生じなかった。

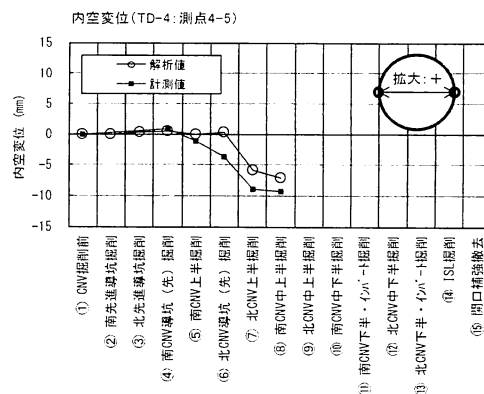
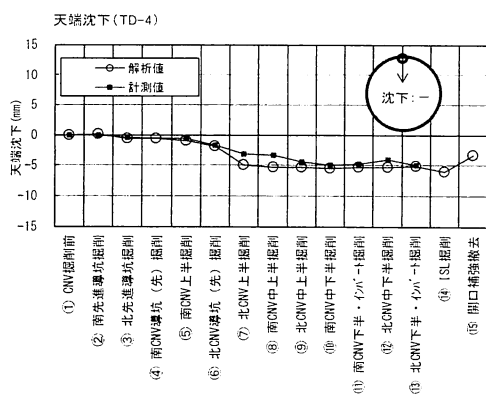
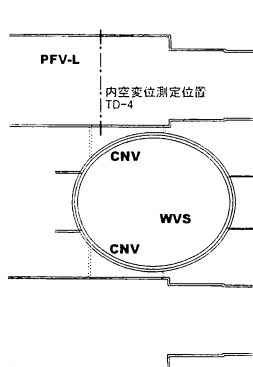


図-14 PFV-L (TD-4) 天端沈下および内空変位計測結果

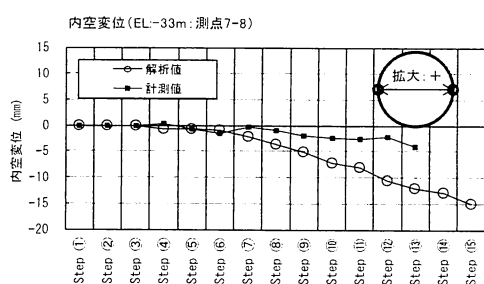
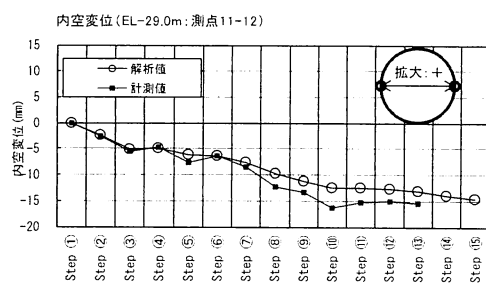
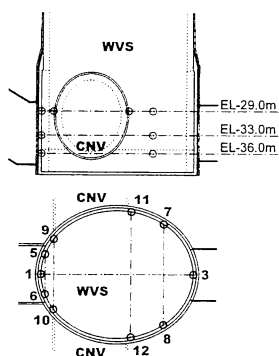


図-15 WVS内空変位計測結果

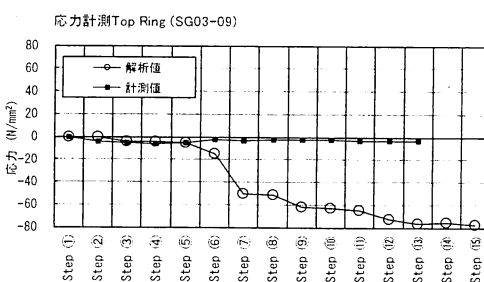
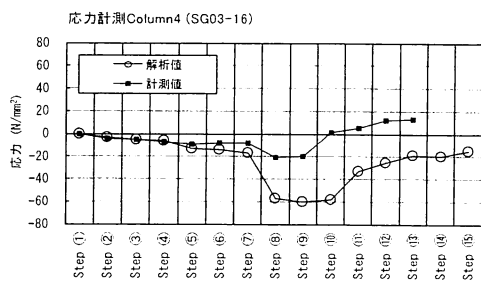
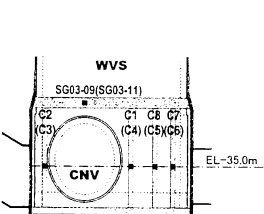


図-16 WVS開口補強応力計測結果

7. おわりに

本稿に示すように、シルケジ駅は歴史遺産都市イスタンブール中心部の建物密集地域の地下に位置し、狭隘な地上施工ヤード、断面変化や交差部が多数存在する複雑な構造を建設する、国内外にも類をみない難工事である。また、掘削を進める過程で明らかになってきたことであるが、褶曲と変性作用により脆弱化した部分を含む不均質の度合いが極めて高い地山条件での大規模地下鉄の掘削工事となった。

西立坑下部は4方向に大断面開口部を設ける特殊な形状で、掘削時の地山や一次支保の不安定化が懸念されたが、施工手順を考慮した三次元逐次掘削解析による挙動予測や補強対策、施工段階ごとの計測管理の下で慎重に掘削を行い、複雑な西換気立坑周りの掘削を無事に完了させることができた。また、施工時挙動が事前予測結果と比較的よく一致したことから、検討手法の有効性を確認することができた。

国内では、複雑な構造の地下駅等は開削工法またはシールド工法を主体に構築されるのが一般的であるが、地上部の制約が大きい都市部では山岳NATM工法の適用が必要となる場合もある。本報告に示すシルケジ駅の設計・施工実績が今後の類似プロジェクトの推進に参考になれば幸いである。

2012年9月現在、シルケジ駅工事では覆工コンクリートの打設を鋭意進めているとともに、遺跡調査の遅延のために着手が大幅に遅れていた東立坑を掘削中である。今後の掘削箇所となる東立坑下部の開口部や水平坑・斜坑との交差点部についても、西立坑での施工実績をフィードバックかつブラッシュアップして、慎重に施工を進めていく所存である。

最後に、シルケジ駅工事を進めるに当たり、我が国の関係各位より多大なるご指導と暖かい励ましをいただき、深潭なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：TBM ハンドブック，p.65，2002.1
- 2) 日本道路公団試験所：トンネルの標準設計に関する研究報告書—数値解析と施工実績の分析—，1986.2
- 3) 岩野，土屋，田口，金子，松村：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-，土木学会・第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，2009年1月
- 4) 坂井，小池，青木，大塚，金子，岩野：ボスポラス海峡横断鉄道建設工事における大規模・大深度地下駅掘削時の安定性検討-三次元逐次掘削解析による事前評価と情報化施工，土木学会・第40回岩盤力学に関するシンポジウム，2011年1月
- 5) Otsuka, Taki, Aoki, Shimo, Kaneko, Iwano, Sakurai: Observational construction management by field measurement of large scale underground railway station by urban NATM, 12th International Congress On Rock Mechanics, Beijing, Oct.2011

(2012.9.3 受付)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND RAILWAY STATION BY URBAN NATM IN BOSPHORUS RAIL TUBE CROSSING PROJECT

Nobutaka OHARA, Kenji MATSUMURA, Masahiro IWANO,
Isamu OTSUKA and Shunsuke SAKURAI

This project is named ‘Marmaray’ which is a coined word combining the sea of Marmara and railway. The Marmaray Project is the upgrading of approximately 76 kilometers of commuter rail to improve the railway system in Istanbul metropolitan area. Railway tracks will be connected between Asia and Europe through a tunnel under the Bosphorus Strait. Tunnels and stations have been and will be constructed by some methods such as immersed tunnel, shield tunnel, mountain tunnel, and cut and cover in 13.6km length of this project. In this report, design and construction adopted in a large scale underground railway station (Sirkeci station) by means of NATM is described.