

都市部山岳トンネル工法による大規模地下駅の設計・施工 ＜ボスポラス海峡横断鉄道工事＞（その2）

大成建設（株） 正会員 ○小原 伸高
大成建設（株） 正会員 柴山 周平
大成建設（株） 正会員 岩野 政浩
大成建設（株） 正会員 大塚 勇

1. はじめに

ボスポラス海峡はトルコ北西に位置し、延長 30km の海峡である。トルコ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。当該工事は、「マルマライ・プロジェクト」と呼ばれ、既存鉄道近代化し、ボスポ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プロジェクトのうち、ボスラス海峡横断部を含む 13.6km 区間に沈埋トンネル、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。このうち、シルケジ駅は旧市街地直下に、山岳工法により構築する大規模地下駅である。昨年度の報告¹⁾では、西立坑（WVS）周辺の設計・施工について報告した。本稿では、遺跡調査による工程遅延のために対応が必要となった東立坑（EVS）周辺の施工手順変更や斜坑（ISL）の工程促進対策、北エントランストンネル（NE）における施工中の追加地質調査により判明した当初想定と異なる地層分布に対する対応について報告する。

2. 大規模地下駅（シルケジ駅）概要

図-3 にシルケジ駅鳥瞰図を示す。駅の主構造は、2本のプラットフォームトンネル（図-3 中 PF）と並行する中央通路トンネル（図-3 中 CN）、それに直行する 4本の接続通路トンネルである（図-3 中 CN）。また東西の換気立坑、その立坑に接続し地上へのアクセス路となる斜坑およびエントランストンネル等（図-3 中 SE, NE, ISL 及び ISS）も建設される。トンネル交差点が多く存在し、全てのトンネルが近接施工となることや勾配 30 度の斜坑があることなど、日本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-1 路線平面図

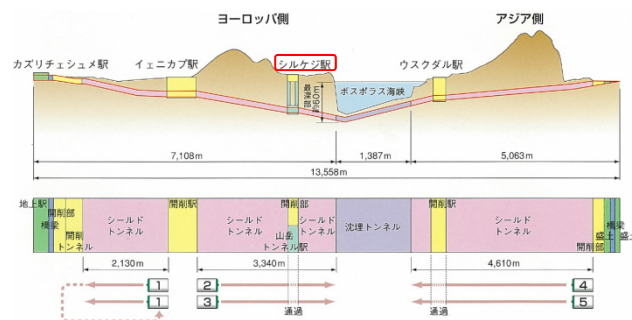


図-2 路線縦断面図

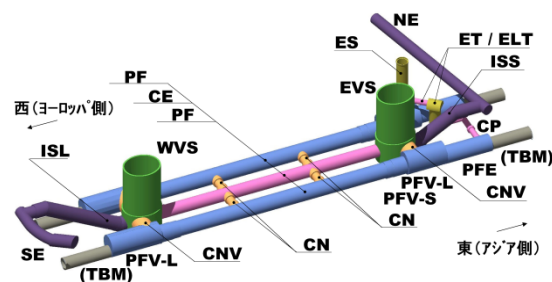


図-3 シルケジ駅鳥瞰図

表-1 トンネル名称と断面規模

記号	名称	掘削断面積(m ²)	覆工厚(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	プラットフォームトンネル	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
PFE	プラットフォームトンネル(端部)	111.7	45
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
CP	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
SE	南エントランストンネル	46.3	45

キーワード 都市 NATM, 地下駅, 3次元解析, SRC 構造, 工期短縮

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部土木設計部 TEL03-5381-5296

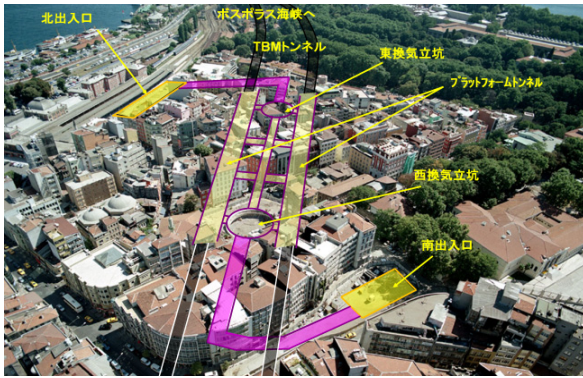


写真-1 シルケジ駅地表状況

表-1 に各トンネル名称と掘削規模、覆工厚を示す。また、写真-1 にシルケジ駅の地表状況を示す。

3. 地形・地質概要

シルケジ駅付近の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。当初、岩盤ラインは図中破線と推定されていたが施工開始後のボーリング調査により、深い分布形状に修正された。これにより、岩盤中に計画されていたNEは、砂層に建設されることとなった。掘削に伴い地下水位を下げると地表面沈下を助長することになる懸念から、NEでは山岳工法からTBM工法への見直しを行った。

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おり、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、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。

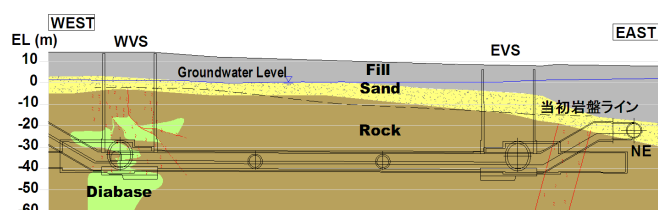


図-4 シルケジ駅地質縦断図

4. 施工手順変更

当初の契約工期は、2004年8月～2009年4月であったが、シルケジ駅の施工範囲がイスタンブールの旧市街地下であり、掘削に伴い旧ローマ帝国時代等の遺跡が出土し、その遺跡調査によって工事が大幅に遅延した。シルケジ駅では、すべての遺跡調査が完了したのは2012年8月である。施主も工事長期化の状況は了解し、工期延長処置が取られ、現在は2013年10月末の暫定供用が予定されている。

シルケジ駅の施工手順は、当初の計画ではWVSおよびEVSを掘削した後、両立坑を起点に南北に向かってCNVを開口し、PFの断面拡幅部であるPFV-L(約190m²)からPFへと掘削する手順であった。しかし、EVS上部遺跡調査に多大な時間を費やしたため、シルケジ地下駅の施工開始から3年近く経過した時点(2010年9月)でもEVSの切羽は岩盤部へ達していなかった。このため、シルケジ地下駅およびプロジェクト全体の工程を確保するために、掘削が完了したWVSから全ての水平坑を掘削するような施工手順に変更し、EVSおよびCNVの掘削は全体の最後に行う施工手順に変更することとした。

2013年6月現在、土木工事進捗率は99%で、沈埋トンネルは、全函沈設完了、シールドトンネル部完了、シルケジ駅以外の開削工法による3駅は構築完了である。当該シルケジ駅においては、掘削はすべて完了し、軌道とトンネル覆工および地下駅舎の設備等附帯構造物構築中である。

以降に、東立坑周辺の施工手順変更や斜坑の工程促進対策、施工中の追加地質調査により判明した当初想定と異なる地層分布に対する対応について報告する。



写真-2 遺跡調査状況(東立坑)

5. 東立坑(EVS)周辺の設計・施工

5.1 概要

前述のとおり、東立坑（EVS）は遺跡調査による遅延のために、施工手順を変更した。この施工手順変更および遺跡調査の遅延により、二段階の修正設計が実施されている（表-2 参照）。第一に、WVS を起点として水平坑の掘削後、EVS 掘削、二次覆工構築の施工手順の計画（修正設計①）。その後、さらに調査が遅延し（2012年8月まで）、最終的に水平坑の覆工構築後、EVS の掘削が実施される計画に変更となった（修正設計②）。これらの施工計画変更により、水平坑の二次覆工（および仮巻コンクリート）に EVS 掘削の近接施工の影響を考慮する修正設計を実施した。本節では、東立坑周辺の修正設計と施工について述べる。

表-2 施工手順変更と修正設計内容

	当初設計	修正設計①	修正設計②
施工手順	1. EVS 掘削 2. 水平坑掘削 3. 二次覆工構築	1. 水平坑掘削 2. EVS 掘削 3. 二次覆工構築	1. 水平坑掘削 2. 二次覆工構築 3. EVS 掘削
対応	-	補強工の検討	EVS 掘削の影響考慮

5.2 仮巻コンクリート（修正設計①）

上記、施工手順変更より、EVS 掘削により先行施工の水平坑が大きく変形し、水平坑の安全性が懸念された。また、EVS の掘削は PFV-L と大断面の近接施工になるため、トンネル周辺地山の安定性についても検討する必要がある。そこで、EVS 掘削時において、水平坑の安全性、周辺地山の安定性について検討するために三次元逐次掘削解析を実施した。解析の結果、EVS 掘削時において周辺地山に塑性化領域が発生し、水平坑の一次支保の安全性が確保できない範囲が広く分布することが明らかとなった。水平坑の補強対策として、事前に影響範囲内の水平坑を拡幅掘削した上で、RC 構造の仮巻コンクリートを施工することで、EVS 掘削時にも安全性を確保できる構造とした。仮巻コンクリートの施工範囲は EVS の掘削影響範囲内とし、巻厚は45cmとした。図-5に仮巻コンクリート施工範囲、図-6に EVS 平面図、図-7に PFV-L 仮巻コンクリート断面図を示す。ただし、仮巻コンクリートは将来的に CNV の掘削により開口される。その際、開口部の仮巻コンクリートが負担していた荷重が再配分され、開口部周辺では大きな断面力が発生すると考えられる。そのため、開口部の東側では仮巻コンクリートの巻厚を90cmとし、CNV 掘削時の

荷重増分に耐えうる構造とした。開口部の西側は EVS と近接しており増厚する施工スペースの確保が困難であるため、PFV-S と PFV-L の断面変化点における仮巻コンクリートの棲壁厚さを1mとすることで、開口時の荷重増分に耐えうる構造とした。また、実際の施工では、トンネル周辺地山および水平坑の挙動を確認するために各種計測を実施し、綿密な情報化施工を実施する計画とした。（5.4 参照）

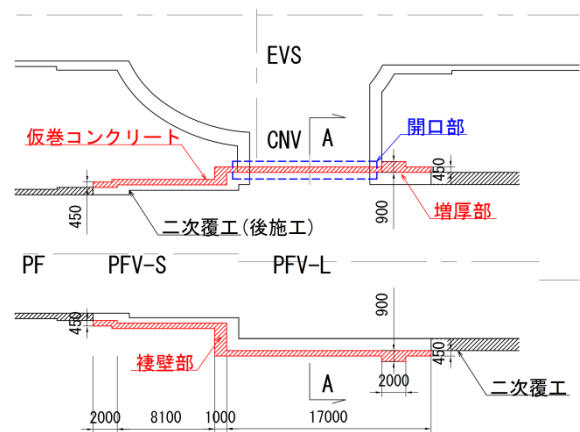


図-5 仮巻コンクリートの施工範囲

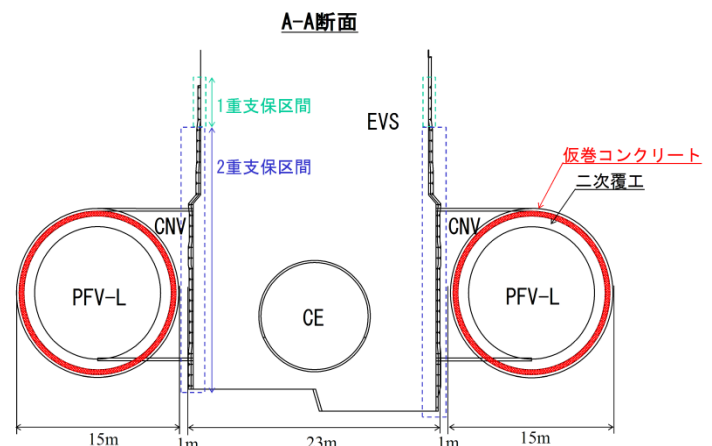


図-6 EVS 平面図

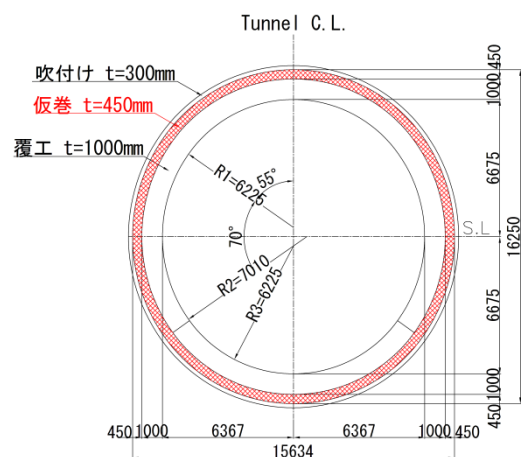


図-7 仮巻コンクリート断面図（PFV-L）

5.3 覆工および開口補強の設計（修正設計②）

当初，トンネルに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压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．トンネル形状は，大きな水压が作用するため，外荷重に対して構造的に有利な円形に近い形状とした．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．

覆工を建設後に EVS および斜坑（ISS）掘削する施工手順変更（表-2 修正設計②），また，トンネルどうしが非常に接近していることから，二次覆工に EVS および ISS 施工の影響を掘削解析により考慮し，設計を修正した．二次覆工の施工範囲は，図-6 に示す通りである．仮巻コンクリート施工範囲については，EVS 掘削時二次覆工は施工せず，掘削終了後構築した．

具体的な設計方法としては，表-3 に示すように，各施工段階における増分断面力を算出し，それらを足し合わせすべての Step において構造的に成立するよう設計を実施した．その結果，例えば PFE で，内空側 D16ctc250，地山側 D16ctc250，から内空側 D32ctc125，地山側 D25ctc250 + D20ctc250 の鉄筋の変更となった．

表-3 覆工修正設計

Step	施工状況	解析	結果	設計外力
1	EVS&CNV 掘削	掘削解析	EVS&CNV 掘削による断面力 (N1, M1)	N1 M1
2	ISS 掘削		ISS 掘削による断面力 (N2, M2)	N1+N2 M1+M2
3	施工完了時 (原設計)	構造解析	永久荷重による断面力 (N3, M3)	N1+N2+N3 M1+M2+M3

EVS は，断面積約 500m² の大断面掘削となる．また，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（図-6 参照）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．事前に施工中の挙動や安定性を把握するため，掘削ステップを忠実に再現した 3 次元逐次掘削解析により，開口補強工等の事前対策を検討した．図-8 に 3 次元解析モデルを示す．図-9 に最終的な施工ステップ（表-2，修正設計②）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．

EVS 下部の開口部付近は，CNV 掘削時に EVS 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が超過することが予想された．よって EVS の支保は，上部 12m 区間の支保工は通常の 1 重支保構造，下部 24m 区間の支保工は 2 重支保構造とした．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）で連絡坑開口時の力を支持する構造である．鋼製支保工は，1 重目の支保は HE-100B，2 重目は HE-180B を採用した．また，吹付けは，高強度コンクリート ($f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$) を適用した．

また，施工に際しては地山の不安定化や支保工の応力集中が懸念されたので，綿密な動態観測を実施した．

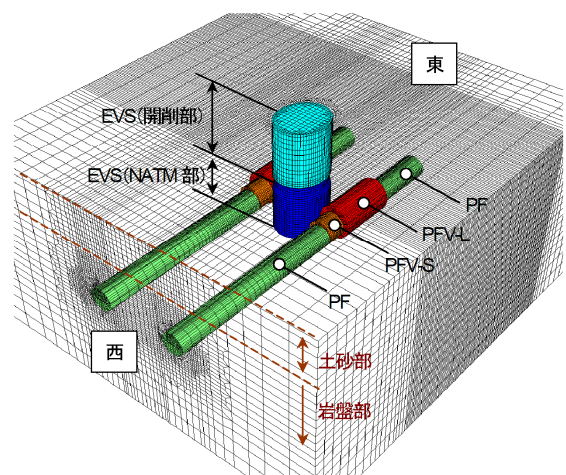


図-8 3次元掘削解析モデル

5.4 施工状況および計測結果

図-10 に立坑の短軸および長軸方向の内空変位の計測結果，図-11 に，水平坑の天端および内空変位・肩部の鉄筋およびコンクリートの応力の計測結果と解析結果を示す．計測結果と解析結果は，よく整合しており，ここでも解析手法の正当性が示された．このような密な動態観測をしながら，掘削を進め，2013 年 6 月に無事掘削完了している．

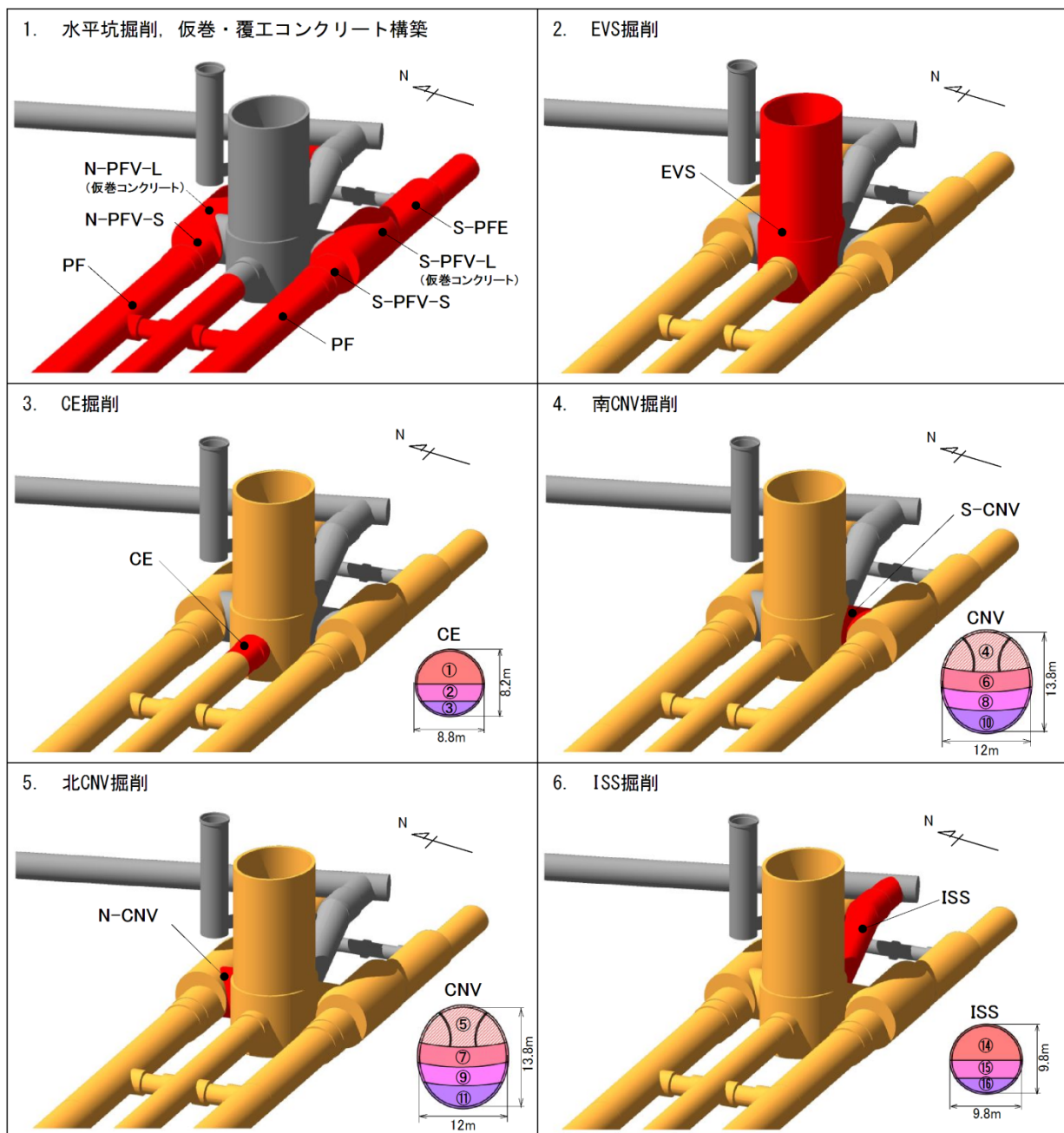


図-9 施工手順図

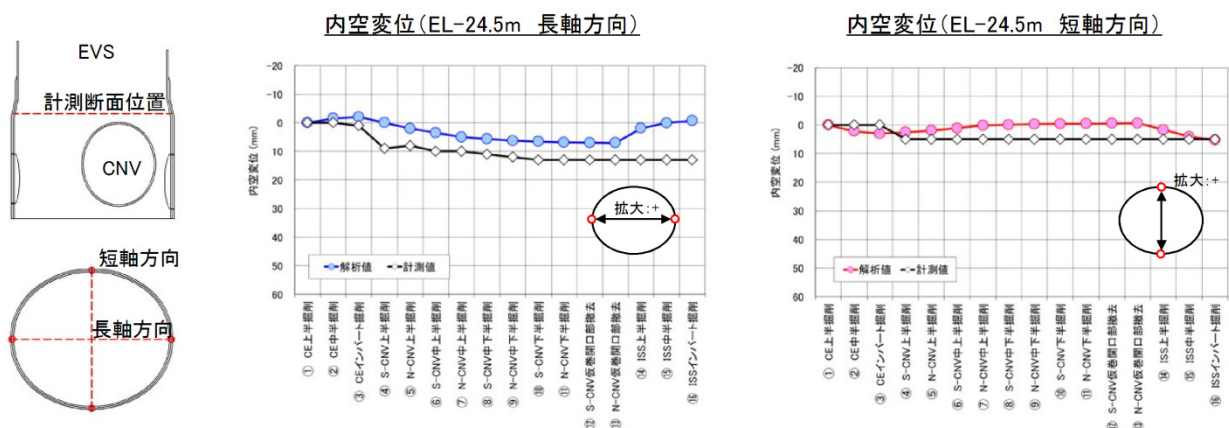


図-10 EVS 内空変位計測結果

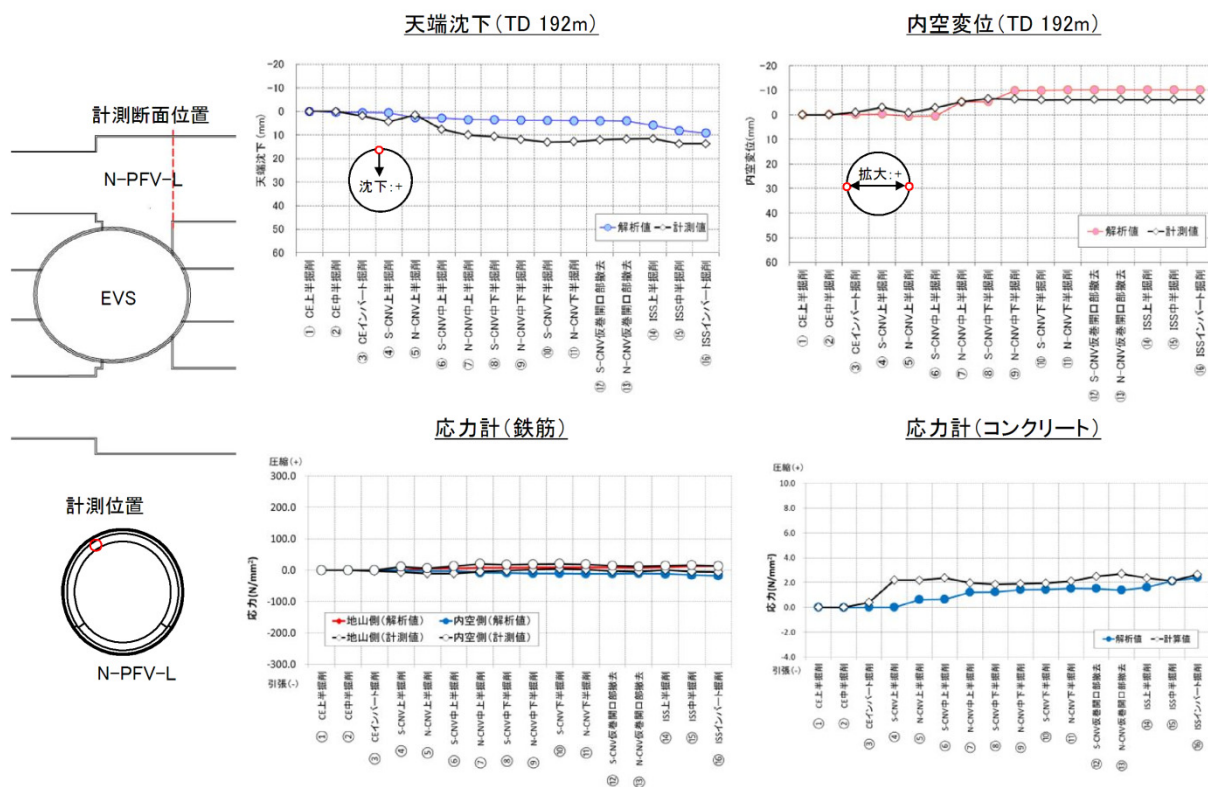


図-11 PFV-L 計測

6. 北エントランストンネル (NE)

6.1 概要

当初、北エントランストンネル (NE) は、岩盤中に山岳工法で建設される計画であったが、のちの地盤調査により岩盤ラインが当初想定より低く砂層の中に建設されることとなった。大きな開口（高さ 3.47m×幅 6.53m）を有する NE と斜坑（ISS）の接合部が砂層に建設されること、また、山岳工法の掘削に伴い地下水位を低下させると地表面沈下を助長する懸念があり、山岳工法から TBM 工法への工法見直しを行い、修正設計および施工を実施した。（写真-3、掘削外径 ϕ 7.23m、仕上がり内径 ϕ 6.40m）



写真-3 北側エントランストンネル TBM

6.2 NE 接続部の設計

当初、NE 接続部は、山岳トンネル工法により建設後、場所打ちコンクリートによって建設される RC 構造として設計されていた。しかし、前述の TBM への施工法変更に伴い、NE 接続部は SRC 構造として修正設計を行った。図-12 に NE 接続部構造図を示す。NE 接続部の接続部は、補強梁（SRC リング構造）と交点部（補強梁と NE トンネルを接続する部分、RC 梁構造）で構成される。設計上は、補強梁を円形のフレームとして、交点部を片持ち梁としてモデル化し構造計算を行っている。設計に考慮した荷重は、土圧・水圧・NE 本線 TBM セグメントに作用する軸力を考慮し設計を実施した。当該構造は、上記地表面沈下抑制のため、掘削断面が小さくなること、補強梁 SRC 構造の鋼材量および部材の断面積が最小になることに着眼し、比較検討の後、円形断面の SRC 構造を採用した。

6.3 施工状況

NE 接続部の施工は、掘削前に地表面沈下、地下水位の低下対策のため、先行して掘削完了している NE 側から掘削範囲に止水注入（水ガラス）を行い、接続部の掘削を行った。

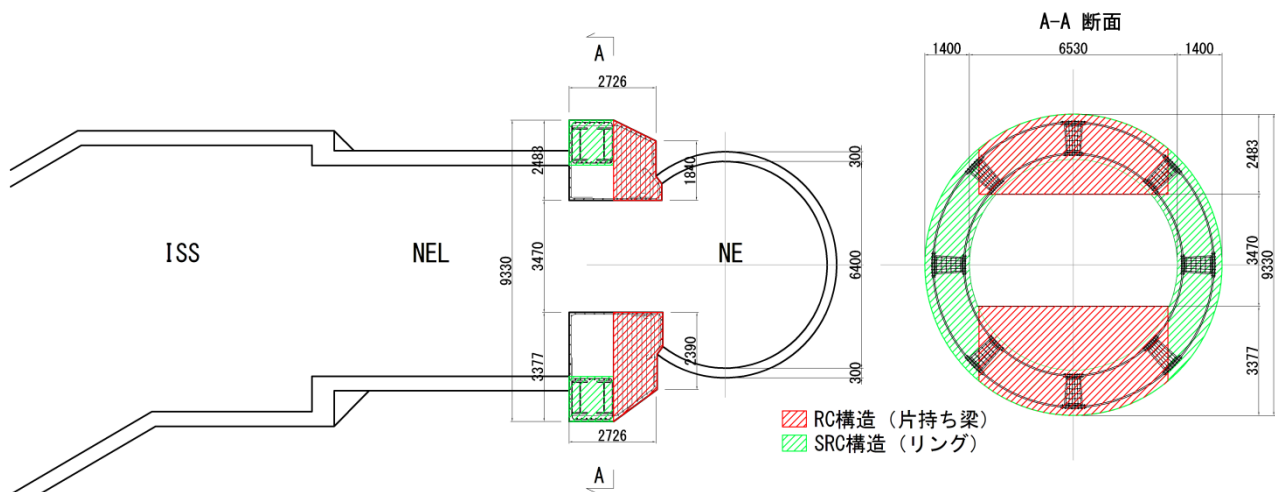


図-12 NE 接続部構造図

2013 年 6 月現在、NE および NE 接続部の掘削完了している。写真-4 に NE 接続部（SRC 構造）の施工状況を示す。



写真-4 NE および接続部 SRC 施工状況

7. 1 ISL 鋼製セグメント施工

ISL 鋼製セグメントの施工は、ISL 掘削完了後、鋼製セグメントを西立坑下側から供給し、順次ハンドリングマシン（ベースマシン：バックホウ）で組み立てる。ハンドリングマシンは、ウィンチにて牽引するレール式の台車に設置し、施工に伴い順次移動する。図-13 に ISL 施工図を示す。ISL のセグメント区間は、セグメント接合部の止水溶接により防水した。また、セグメントには防錆塗装を施した。

写真-5 に鋼製セグメント構築状況、写真-6 に ISL 鋼製セグメント施工状況を示す。ISL 斜坑における工程短縮案として、NATM 覆工を鋼製セグメントのプレキャスト化に変更することによって約 40 日の工程短縮を図ることができた。

7. 西立坑側斜坑 (ISL)

7. 1 概要

西立坑側斜坑 (ISL) は、当初東立坑側斜坑 (ISS) と同様山岳トンネル工法によって施工し、一次支保を設置した後、現場打ちコンクリートによる二次覆工を構築する計画であった。しかし、施工工程を短縮するために、プレキャスト鋼製セグメント（セグメント内径：8.67m、外径：9.17、桁高：0.25m）を二次覆工に適用した。

掘削自体は NATM により施工されるため、一次支保工の設計は、NATM の当初設計を適用する。二次覆工には、鋼製セグメントを採用し、自重・水圧および将来荷重を考慮し、断面力の算定および部材の照査を行った。

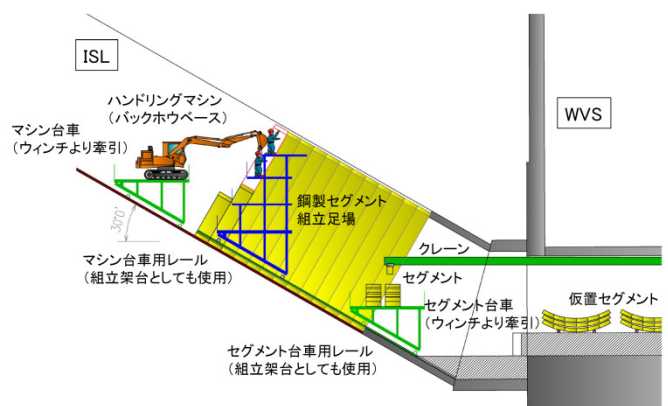


図-13 ISL 鋼製セグメント施工図



写真-5 鋼製セグメント構築状況



写真-6 ISL 斜坑二次覆工施工状況

8. おわりに

シルケジ駅はイスタンブール中心部の地下に位置し、断面変化や交差部が多数存在する、また、全てのトンネルが近接施工となることや勾配 30 度の斜坑があることなど、日本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工事である。本稿では、掘削に伴い出土した遺跡の調査による工程遅延のために対応が必要となった東立坑(EVS)周辺の施工手順変更や斜坑 (ISL) の工程促進対策、施工中の追加地質調査により判明した当初想定と異なる地層分布に対する対応 (NE) について報告した。

東立坑下部は、遺跡調査遅延のための施工手順変更により、水平坑仮巻コンクリート、二次覆工について EVS 等掘削の影響を考慮した修正設計を実施した。また、掘削時の地山や一次支保の不安定化が懸念されたが、複雑な施工手順を考慮した三次元逐次掘削解析による補強対策、綿密な動態観測の下で慎重に掘削を行い、複雑な立坑周りの掘削を無事に完了させることができた。

また、地質条件の変更によって修正設計を実施した NE トンネルおよび接続部、工程短縮のために構造を変更した ISL についても、複雑な構造を有しているが、無事施工完了している。

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。

2013 年 6 月現在、シルケジ駅工事では掘削はすべて完了しており、二次覆工の構築および坑内付帯設備の建設等を鋭意進めている。2013 年 10 月の暫定供用およびその後の全面開業に向けて、残工事を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) 小原, 松村, 岩野, 大塚: 都市部山岳工法による大規模地下駅の設計・施工<ボスボラス海峡横断鉄道工事>, 土木学会建設技術研究委員会・土木建設技術発表会 2012 講演集, 2012 年 11 月
- 2) 岩野, 土屋, 田口, 金子, 松村: ボスボ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
- 3) 坂井, 小池, 青木, 大塚, 金子, 岩野: ボスボ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
- 4) 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