# ボスポラス海峡横断鉄道工事における 都市部山岳工法によるシルケジ駅の設計と施工

小原 伸高1・岩野 政浩2・大塚 勇3・小林 伸次3

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>正会員 大成建設株式会社 土木本部次世代プロジェクト部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1) <sup>3</sup>正会員 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 (Istanbul, TURKEY)

当該工事は、ボスポ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設計、施工するものである.本稿では、イスタンブール 旧市街地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 画のうち、遺跡調査による工程遅延による設計の見直しや工程促進対策等について報告する.

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

### 1. はじめに

本プロジェクトは、トルコのイスタンブールにおいて、 アジアとヨーロッパを隔てるボスポラス海峡下をトンネ ルで結び、イスタンブール大都市圏鉄道システムの向上 を図るMarmaray projectの一環として、ボスポラス海峡横 断部を含む13.6km区間に沈埋工法、シールド工法、山岳 工法の各施工法にてトンネルや駅舎を建設するものであ る. さらに設備及び電気工事、軌道工事、橋梁、換気建 屋工事も含んだ設計施工一括発注方式の契約である.図 -1に路線平面図、図-2に路線縦断図を示す.

世界遺産都市にもなっているイスタンブールの旧市街 には1 500年以上もの間,大都市の首都として栄えてき た歴史的遺産が残されており,どこを掘っても遺跡に当 たるといっても過言ではない.当初の契約工期は2004年 8月~2009年4月までの56か月であったが,駅舎エリアの 遺跡調査の長期化による影響で工程が遅延し,旧市街地 中心部に位置するシルケジ駅では,すべての遺跡調査が 完了したのは2012年8月であった.

既報<sup>4</sup>では、シルケジ駅の設計施工のうち主に西立坑 (WVS) およびプラットフォームトンネル (PF) につ いて報告した.本稿では、遺跡調査による工程遅延によ り必要となった東立坑 (EVS) 周辺の施工手順変更への 対応や工程促進対策、エントランストンネルにおける追 加地質調査による地質条件の見直しへの対応について報 告する.





#### 2. シルケジ駅の概要

#### (1) 概要

イスタンブール旧市街地中心部に位置するシルケジ駅 は、プラットホームトンネルや中央通路トンネル、接続 通路トンネル、断面積500m<sup>2</sup>を超す大断面換気立坑、断 面積140m<sup>2</sup>の換気兼接続通路トンネル、避難立坑、エン トランストンネルや勾配30度の斜坑などから成る地下駅 である.トンネル交点部が多く存在すること、全てのト ンネルが近接施工となること、小土被りのエントランス トンネルや上部避難トンネルでは帯水砂層内でのトンネ ル構築となることなど、国内外に類を見ない複雑な構造 を山岳工法で施工する難工事となっている.トンネル総 延長2 130m,掘削土量は約24万m<sup>3</sup>,駅舎構造物コンクリ ート量は38 500m<sup>3</sup>である.図-3にシルケジ駅の鳥瞰概要 図を、図-4に地質縦断図、図-5に全体平面図を示す.

#### (2) 工程遅延と施工手順変更

シルケジ駅をはじめとする駅舎エリアでは,掘削に伴 い各時代の遺跡が出土したが,これらの調査の影響でプ



ロジェクト全体の工程は大幅に遅延した.特にシルケジ 駅では、遺跡調査が完了して全個所で掘削が進められる ようになるのが2012年8月にまでずれ込むという大幅な 制約を強いられた.このような理由から契約工期は延長 されているが、一方で、2013年10月には限定的な供用を 求められ、これに応えるため様々な設計の見直しや工程 促進策を検討し実施してきた.

当初計画では、西立坑(WVS)および東立坑(EVS) を掘削し、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(掘削断面積約 190m<sup>2</sup>)からPFへと掘削を進める手順であった.しかし、 EVS上部の土砂部の掘削中に出現した古代都市の遺跡調 査に多大な時間を費やしたため掘削を進めることができ ず(写真-1)、シルケジ駅はWVSのみを地上と地下と のアクセスルートとして全てのトンネル掘削を進めてい くこととなった.



写真-1 遺跡調査状況(東立坑)



図-5 シルケジ駅全体平面図

#### 3. 東立坑周辺の設計と施工

#### (1) 概要

前述のとおり、東立坑(EVS)は遺跡調査のために掘 削時期が大幅に遅延した.この施工手順変更により、二 段階の修正設計が実施されている(表-1).第一に、 WVSを起点として水平坑(PFなど)の掘削後にEVSを 掘削し、その後に二次覆工構築する施工手順の計画(修 正設計①).次に、さらに調査が遅延して、水平坑の二 次覆工構築後にEVSを掘削する施工手順に変更した計画 である(修正設計②).これらの変更により、水平坑 に対するEVS掘削の近接施工の影響を考慮する必要が生 じ、各々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.

#### (2) 仮巻コンクリート(修正設計①)

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に最も近接する水平坑(PFV-L)に対しては大断面 どうし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った.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 て検討するために複雑な構造と掘削ステップを忠実に再 現した3次元逐次掘削解析を実施した.図-6に3次元解析 モデルを示す.解析ステップは1000ステップ以上に及 ぶ大規模なものとなった.

検討の結果, 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(図-7).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-8にEVS最近接部側面図, 図-9に仮巻コンクリート施工範囲,図-10に仮巻コンク リートを追加したPFV-L断面図を示す.

また、仮巻コンクリートはCNVの掘削により開口されるが、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厚さを90cmと大きくし、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褄壁厚さをlm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、後述するように、施工時に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 表-1 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	1. 水平坑掘削	1. 水平坑掘削
	2. 水平坑掘削	2. EVS 掘削	2. 水平坑二次覆工
	3. 水平坑二次覆工	3. 水平坑二次覆工	3. EVS 掘削
対		補強工(仮巻コン	EVS 掘削影響考慮
応		クリート)の検討	した二次覆工検討



した.



図-10 仮巻コンクリート断面図 (PFV-L)

#### (3) 覆エコンクリートと開口補強(修正設計2)

トンネルは防水構造が求められることから,覆エコン クリートは,打設後の地下水位回復に伴う水圧を主たる 設計荷重とした構造解析による設計を行っていた.トン ネル形状は,大きな水圧が作用するため,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 エコンクリート厚は45cm~120cm,また換気立坑の底版 厚は370cmとしている.

覆エコンクリート打設後にEVSおよび斜坑(ISS)掘 削する施工手順変更,また,トンネルどうしが非常に接 近していることから,覆エコンクリートにEVSおよび ISS施工の影響を考慮した補強を行うこととし,掘削影 響解析に基づく修正設計を実施した.覆エコンクリート の先行施工範囲は図-9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掘削による影響を大きく 受けるため(図-11),工程計画も勘案して覆エコンク リート打設はEVS掘削完了後に行うこととした.

具体的には,表-3に示すように,各施工状況における 覆エコンクリートに発生する増分断面力を算出し(施工 時断面力),当初設計完成時断面力を加えて(施工手順 変更後の完成時断面力),施工段階および完成後の水圧 作用時において構造安定性が確保できるように覆エコン



図-11 EVS 掘削による水平坑への影響表-3 覆工修正設計

Step	施工段階	解析	結果	設計外力
1	EVS&CNV 掘削	掘削解析 (3次元,2次元)	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 (3次元シェル)	永久荷重 による断面力 (N3,M3)	N1+N2+N3 M1+M2+M3

クリートの配筋量を見直した.その結果,たとえばPFE の配筋は,内空側D16ctc250,地山側D16ctc250,から内 空側D32ctc125,地山側D25ctc250 + D20ctc250という配筋 肉変更が必要となった.

また、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を超過すると 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 坑掘削のための開口時の力を支持する構造である.鋼製 支保工として1重目はHE-100B、2重目はHE-180Bを採用 した.また、解析結果より開口近傍の吹付けコンクリー トに大きな圧縮応力が発生するため、高強度吹付けコン クリート(fck=40N/mm<sup>2</sup>)を適用した.

#### (4) 施工状況および計測結果

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-12に EVS付近施工手順,図-13に東立坑(EVS)の短軸および 長軸方向の内空変位の計測結果,図-14に,水平坑PFV-L 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.計測結果は解析結 果より若干大きい値を示したが,よく整合した挙動を示 しており,解析手法の妥当性が確認された.

		EVS付近施工手順	
		水平坑/仮巻/覆工	⑧S-CNV中下半掘削
N-CNV		EVS掘削	⑨N-CNV中下半掘削
	0.011	①CE上半掘削	⑩S-CNV下半掘削
		②CE下半掘削	①N-CNV下半掘削
	S-CNV	③CEインバート掘削	<sup>12</sup> S-CNV仮巻撤去
12m		④S-CNV上半掘削	<sup>13</sup> N-CNV仮巻撤去
CE	13.8m	⑤N-CNV上半掘削	④ISS上半掘削
		⑥S-CNV中上半掘削	⑮ISS下半掘削
	12m	⑦N-CNV中上半掘削	16ISSインバート掘削
0.0111	19 日本 4 活坊工 毛順		

図-12 EVS付近施工手順

<u>内空変位(EL-24.5m 短軸方向)</u>



図-13 EVS 内空変位計測結果

<u>天端沈下(TD 192m)</u>

<u>内空変位(EL-24.5m 長軸方向)</u>

<u>内空変位(TD 192m)</u>



図-14 PFV-L 内空変位・覆工応力計測結果

# 4. スリップフォームによる立坑構築

#### (1) 概要

東西2個所の換気立坑(内径約23.0m×19.4m, 深さ約 57m)では、工程促進策として側壁構築工にスリップフ オーム工法を採用した.スリップフォーム工法とは、鉄 筋コンクリートの塔状構造物を施工する場合に、側面型 枠を油圧ジャッキ等により連続上昇させながら、昼夜連 続で層状にコンクリートを打設していく急速施工法であ る.図-15に概要図を示す.また、主な施工概要は以下 のとおりである.

- ・コンクリート打設高さ:51.5m
- ・コンクリート打設数量:5800m<sup>3</sup>
- ・スリップフォーム型枠高さ:1.25m
- ・スリップフォーム上昇速度:2~3m/日

・コンクリート打設速度: 6.8m<sup>3</sup>~19.7m<sup>3</sup>/時間

#### (2)施工実績

コンクリートの供給は、断面寸法の変化点となる深さ 21mを境として下部はバケットにより、上部は移動式ポ ンプにより行った.ほぼ計画通り約4週間で側壁コンク リートの構築工を完了させ(図-16),工程を大きく短 縮させることができた.



図-15 換気立坑側壁構築工概要図



#### 5. 斜坑の掘削・覆工

#### (1) 斜坑掘削

南北エントランストンネルとプラットフォームとを結 ぶ斜坑(ISL, ISS)は、近接する水平坑や大断面立坑の 掘削後に、シルケジ駅の最後のトンネル掘削となるため、 周辺地山がすでに近接する掘削による緩みの影響による 地山の不安定化や、斜坑掘削時の周辺トンネルへの影響 を考慮する必要がある.

工程,施工性,安全性などを総合的に検討した結果, 掘削は基本的に下から上に向かって行う計画とした.補助工法は,切羽安定対策として鏡ボルトと長尺鋼管先受け工を採用した.概要図および断面図を図-17,図-18に示す.

#### (2) 鋼製セグメント覆工

斜坑の二次覆工は、当初は一般の場所打ち鉄筋コンク リート覆工として設計していた.しかし、遺跡調査によ る工程遅れを回復するための工程促進策が求められたた め、ISLの二次覆工をプレキャスト鋼製セグメントに変 更した.すなわち、通常のNATMによるトンネル掘削後 に、鋼製セグメントを組み立てるという計画である.当 初設計の覆工コンクリート厚さが450mmであったのに対 し、豆砂利およびセメントミルクによる裏込め工の充填 性や内装パネル設置余裕、施工誤差などを考慮して鋼製 セグメント厚さは250mmとした.



図-17 ISS斜坑施工概要図



図-18 ISL斜坑掘削加背割り図 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、ハンドリングマシン (ベースマシン:バックホウ)により1ピースずつ組み 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、施工の進捗に伴い順次移動す る.なお、水平坑と斜坑との接続部は場所打ちRC覆工 とし、防水工はセグメントの止水溶接を基本とした.

図-19に施工概要図,写真-2に鋼製セグメント建込状況,写真-3に鋼製セグメント覆工施工完了状況を示す. この施工法変更により約40日の工程短縮を図った.



図-19 ISL 鋼製セグメント施工概要図



写真-2 鋼製セグメント組立状況



写真-3 ISL斜坑施工完了状況

#### 6. 北エントランストンネル

#### (1) 概要

北エントランストンネル (NE トンネル) は土被り約 25m に位置する通路用トンネルで,注入工法を併用して 山岳工法で掘削する設計としていた.しかし,着工後の 追加地質調査によると,岩盤ラインが設計時の想定より 深く, NE-NEL 交点部が岩盤ではなく上部の砂層に位置 することが新たに判明した.この東立坑付近は掘削に伴 い地表面沈下が生じやすい地質であり,極力地表面沈下 を抑制する施工方法を採用すべきであること,交点部の 掘削時は不安定化する可能性があること等を勘案して, 全面的に設計を見直し,山岳工法から TBM 工法(密閉 型)に変更することとした.覆工は鋼製セグメントとし ている(外径 $\phi$ 7.00m,厚さ0.30m).

#### (2) NE-NEL交点部の設計

施工法変更に伴い,NE-NEL 交点部の構造が課題となった.当初の設計では山岳工法による掘削後,ウォータータイト構造の場所打ち RC 覆エコンクリートを構築する計画であった.しかし,TBM への施工法変更に伴い, 鋼製セグメントと山岳工法による RC 覆工の接続構造と する必要が生じた.

シールドトンネルにおける鋼製セグメント開口部は, 額縁状の開口補強梁および柱部材により補強する構造が 一般的であるが,この構造形式では開口幅(開口寸法高 さ 3.47m×幅 6.53m)が大きいため補強梁の桁高が大き くなってしまい,その施工のためにより大きな断面の NEL トンネル掘削が必要となってしまい,地表面沈下 抑制や地山安定確保の目的に合致しない.ここでは NEL トンネルの掘削形状をできるだけ小さくなるよう にリング形状の開口補強梁構造を採用することとした. これは,図-20 に示すように SRC リング構造の補強梁と RC 構造の接続部 (SRC 補強梁と鋼製セグメントを接続 する部分)で構成される.

#### (3) 施工状況

NE-NEL 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)を実施した.仮 設の補強リングを NE トンネル内に設置してから鋼製セ グメント開口部の切断撤去を行い、NEL 側の NATM に よるトンネル掘削、防水シート設置、鉄骨・鉄筋組立と いう手順で施工を進めた.写真-4 に NE トンネル内の仮 設補強リング設置状況、写真-5 に NEL 側の SRC 補強梁 施工状況を示す.



図-20 NE-NEL 接続部構造図



写真-4 NE-NEL 接続部施工状況(NEトンネル側)



写真-5 NE-NEL 接続部施工状況(NEL トンネル側)

## 7. おわりに

シルケジ駅はイスタンブール市街地直下に位置し, 脆弱な地山条件と複雑な構造であるうえ, 掘削に伴い出土 した遺跡調査による工程遅延対策, 追加地質調査による 当初想定と異なる地層分布の出現等により, 設計と施工 計画の見直しを繰り返しながら施工を進めてきた.

最後に残ったシルケジ駅部の掘削が2013年4月に完了 し、これで当該工事13.6km区間の全掘削が完了した.現 在は2013年10月の限定供用に向けて、構築工、設備およ び電気工、試験運転などを鋭意進めている.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.

最後に、本プロジェクトを進めるに当たり、関係各位 より多大なるご指導と暖かい励ましをいただいたことに 深潭なる謝意を表します.

#### 参考文献

- 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
- 2) 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
- 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
- 4) 小原,松村,岩野,大塚,櫻井:ボスポラス海峡横 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,土木学会第22回トンネル工学研 究発表会,2012年11月

(2013.9.2 受付)

# DESIGN AND CONSTRUCTION OF SIRKECI STATION BY URBAN NATM IN BOSPHORUS RAIL TUBE CROSSING PROJECT

# Nobutaka OHARA, Masahiro IWANO, Isamu OTSUKA and Shinji KOBAYASHI

Tunnels and stations are constructed by some methods such as immersed tunnel, shield tunnel, mountain tunnel, and cut and cover in 13.6km length. In this report, design and construction adopted in a large scale underground railway station (Sirkeci station), especially re-design and recovery countermeasure against delayed excavation due to archaeological survey, are described.