

都市部山岳工法による大断面トンネル、 立坑の近接施工の設計および情報化施工 ～ボスポラス海峡横断鉄道工事～

大塚勇^{1*}・小原伸高¹・坂井一雄²・清水良純³・小林伸次⁴・岩野政浩⁴

¹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)

²大成建設株式会社 関西支店 川西トンネル作業所 (〒666-0117 兵庫県川西市東畦野字中山谷西尾1-1)

³大成建設株式会社 関西支店 竜王山トンネル作業所 (〒568-0085 大阪府茨木市忍頂寺4-1)

⁴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)

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

本プロジェクトは、既存鉄道を近代化し、ボスポラス海峡下をトンネルで結ぶ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り、2013年10月に開業し、アジアとヨーロッパが鉄道で繋がった。本報告では、山岳トンネル工法によって掘削した大断面地下駅（シルケジ駅）で実施した近接施工の設計および情報化施工について述べる。

近接するトンネル、立坑掘削時の対策工は、事前に三次元解析によって設計を行い、地山およびトンネル支保部材が安定し、対策工が有効的に作用するかを検討した。三次元解析から得られた予測値を管理基準値として計測を行いながら施工を進めた結果、安全に掘削を完了することができた。

Key Words : large underground station, neighboring construction, monitoring, 3D analysis

1. はじめに

本プロジェクトは、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ものである。施工区間のうち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、開削トンネルなどの各工法でトンネルや駅舎が建設され、2013年10月に開業し、アジアとヨーロッパが鉄道で繋がった。

写真-1に示すように、シルケジ駅は建物密集地区の下に構築された。図-1にシルケジ駅鳥瞰図を示す。シルケ

ジ駅はNATMによって掘削された。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、それぞれ2本の換気兼接続通路トンネル（CNV）を開口し、プラットフォームトンネル（PF）の断面拡幅部である換気兼プラットフォームトンネル（PFV-L）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、WVSのみを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 シルケジ駅地表状況

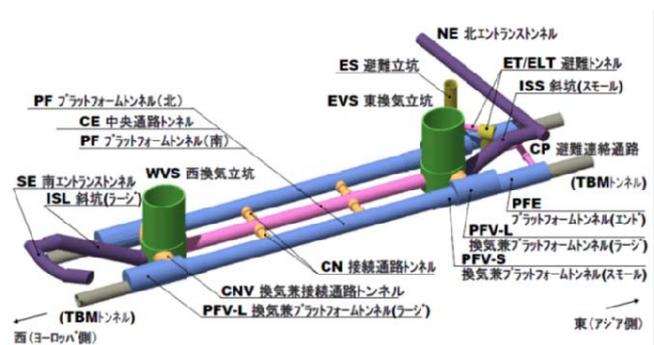


図-1 シルケジ駅鳥瞰図

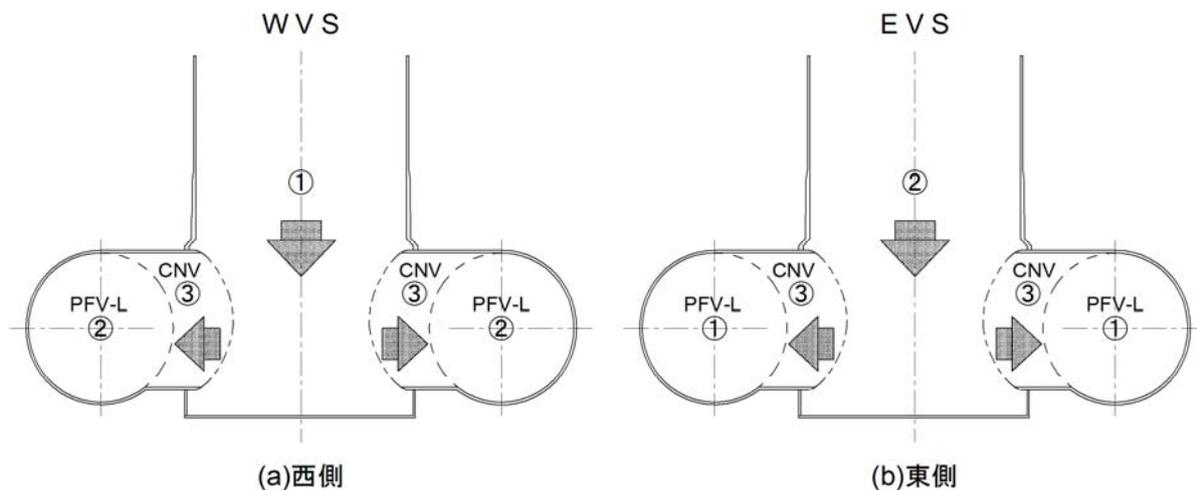


図-2 掘削手順

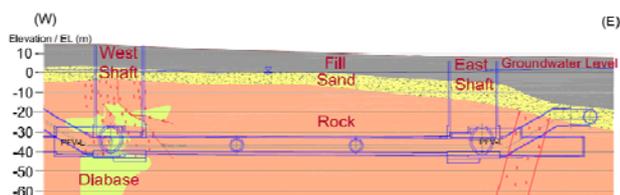


図-3 シルケジ駅地質縦断面図

WVSおよびEVS周辺の掘削手順を図-2に示す。西側では初めに立坑を掘削し、次にPFV-Lを掘削して、最後にCNVを掘削した。一方、東側では前述したように遺跡調査による立坑掘削の遅れのため、初めにPFV-Lを掘削してから立坑を掘削して、CNVを掘った。

このような施工手順の違いにより、それぞれの立坑周辺で異なる補強対策を実施した。西側は初めに掘削した西立坑を補強対象とし、東側はPFV-Lを補強した。補強の仕様を決定するために、三次元解析を実施し、解析結果を予測値として計測管理を行った。

2. 地形、地質概要

当該施工箇所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-3にシルケジ駅の地質縦断面図を示す。

土砂部は主に2つの層からなっている。地表から約10mの表層部はFilling層であり、幾度となくあった戦闘において、壊された建物や土木構造物が埋まっている埋土層となっている。そのため、非常にルーズな状態で瓦礫が積み重なっている。

また、この埋土層と岩盤層の間に、粘土混じりの砂層が存在する。層厚は約10mで、地下水位がこの層の中にあり、礫、砂、シルト、貝殻等が含まれている。

表-1 地山物性値

	弾性係数 (MPa)	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kN/m ²)	摩擦角 (°)	ポアソン比
埋土層	33.6	18	0	30	0.3
砂層	50.4	19	0	40	0.3
岩盤(DI)	500	22	400	35	0.35
岩盤(DII)	150	21	200	30	0.35

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。岩盤部の多くは軟岩である。

孔内載荷試験より岩盤の弾性係数は、西立坑周辺では170 MPa、東立坑周辺では130MPaとなり、設計値の150 MPaとほぼ同程度であった。設計に用いた地山の物性値を表-1に示す。

3. 立坑および周辺トンネルの施工方法

(1) 立坑の施工

立坑は直径約25m、掘削断面積500m²の大断面立坑であり、深さは西立坑が58m、東立坑が50mである。図-4に、西立坑の断面図を示す。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、リングビームを構築しながら掘り下がる。この区間は遺跡の堆積層であり、遺跡調査を行いながら慎重に施工を実施した。

一方、下部は山岳工法により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。

西立坑は、後で掘削するPFV-LトンネルおよびCNVトンネルの掘削荷重を受けるため、補強対策を検討した。東立坑も同様な施工手順であるが、西立坑で実施した補強対策は実施していない。

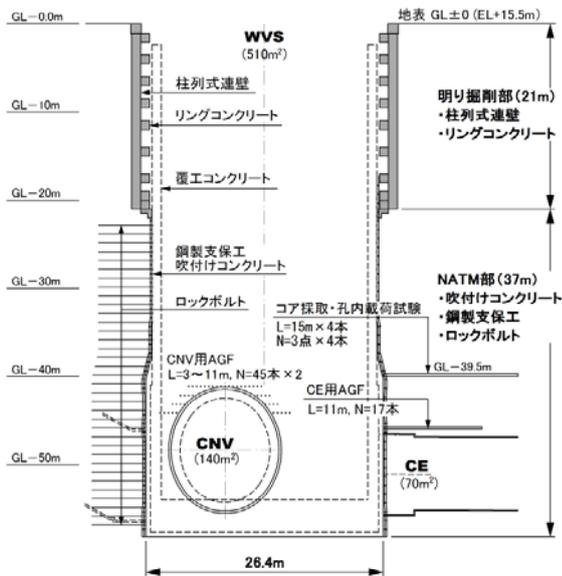


図-4 西立坑施工概要図

(2) PFV-Lの施工

PFV-Lトンネルは、東西換気立坑の両側に近接して構築される大断面トンネル（掘削断面積約190m²）である。トンネル延長は、西側が35.1m、東側が27mである。掘削手順は、図-5に示すように、まずPFVトンネルの上半部にパイロットトンネルを掘削し、上半切上げ掘削、中上半掘削、中下半掘削、下半掘削、インバート掘削の順に行う多段ベンチカット工法を採用した。

補助工法は、図-6に示すように、まず導坑内からトンネル軸方向に1mピッチで左右両側に、上半脚部を対象にシリカレジンを地山改良を実施し、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(長さ12m、ラップ長3m、周方向60cmピッチ、20本1シフト)を打設し、上半仮インバートを実施しながら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(長さ6m、軸方向1mピッチ)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、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部の事前地山改良を行った。施工時の写真を写真-2に示す。

(3) CNVトンネルの施工

図-7にCNVトンネルの断面図を示す。掘削断面積は約140m²である。上半部はDD (Double Diaphragm) 工法で掘削を行い、4段ベンチで掘削した。図-8に立坑、PFV-L、CNVの平面図を示す。掘削延長は、1~6mで立坑側から掘削を行った。各ベンチにはインバートストラットを設置し、早期閉合を行い、トンネルの安定をはかった。写真-3に掘削完了状況を示す。

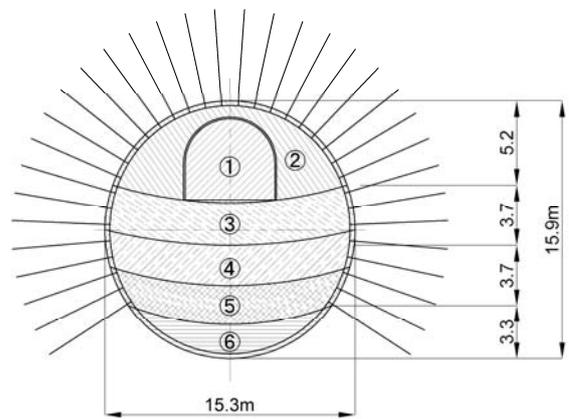


図-5 PFV-L断面加背割図

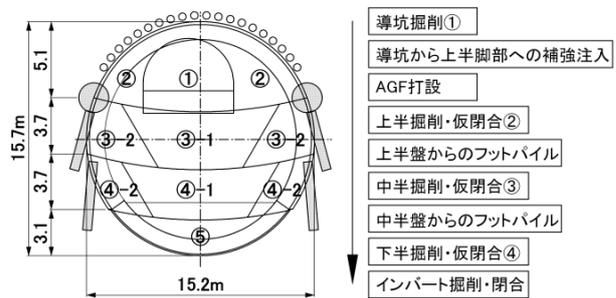


図-6 換気兼プラットフォームトンネル施工手順



写真-2 PFV-Lの掘削状況

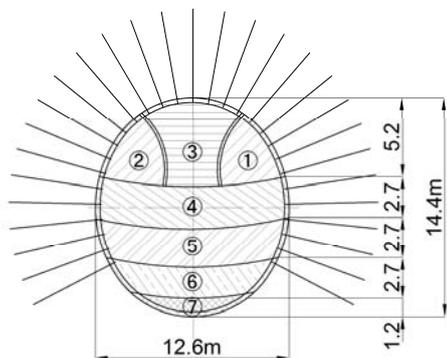


図-7 CNV断面加背割図

3. 立坑および周辺トンネルの事前検討および補強対策

(1) WVSの事前検討および補強対策

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。

WVS周辺を対象とした検討について以下に示す。図-9に3次元解析モデルを示す。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。地山はモール・クーロンの破壊規準に従う完全弾塑性体とした。解析は三次元有限差分法解析コードであるFLAC3D ver3.1を用いて実施した。

図-10に示すように、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の間は吹付けコンクリートにて50cm増し吹きすることとし、大きな開口が隣接しているCNVとISL側には高強度の鋼繊維補強コンクリート（ $f_{ck}=30N/mm^2$ ）、それ以外のCE側には普通コンクリート（ $f_{ck}=18N/mm^2$ ）を適用した。

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

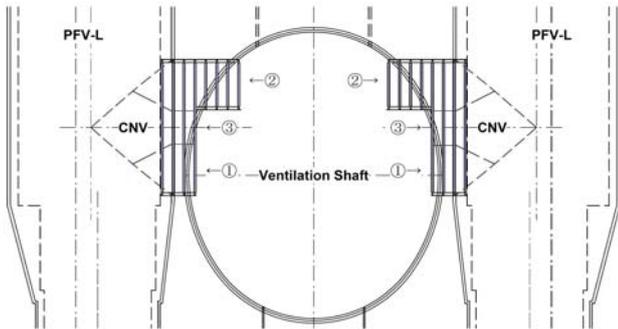


図-8 平面位置図



写真-3 CNVの掘削完了状況

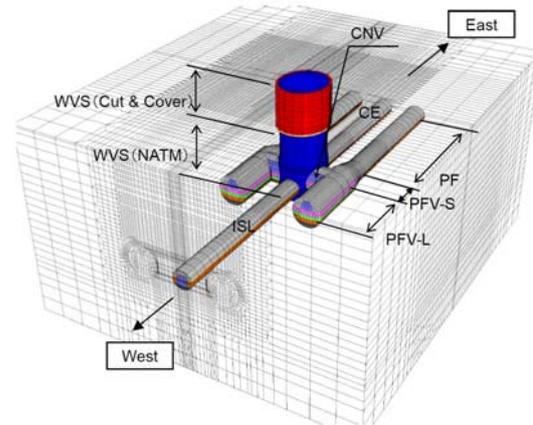


図-9 3次元掘削解析モデル

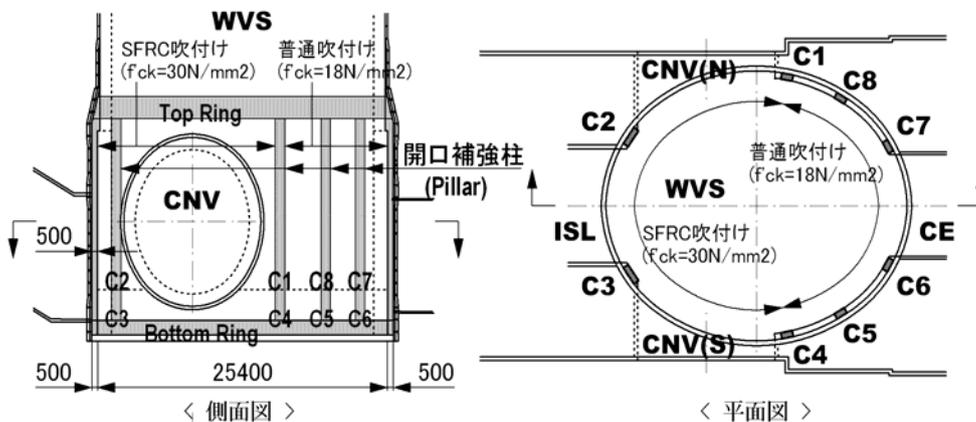


図-10 西立坑下部開口部補強概要図

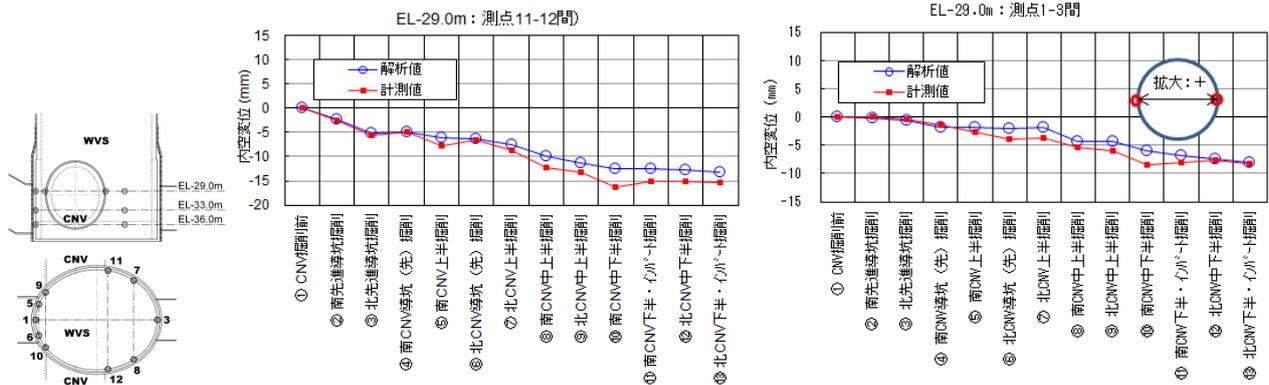


図-11 WVSの計測結果と解析結果の比較 (内空変位)

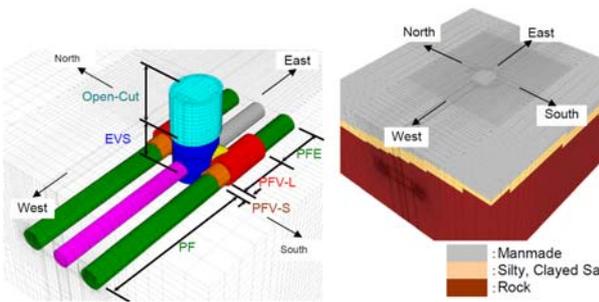


図-12 三次元解析モデル

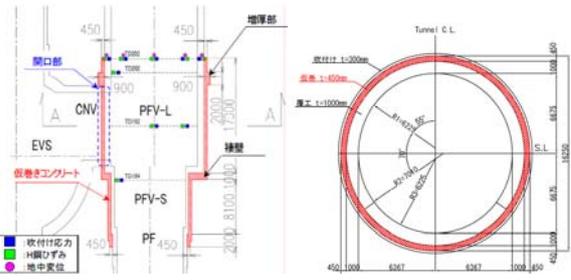


図-13 仮巻きコンクリートの施工範囲と断面図

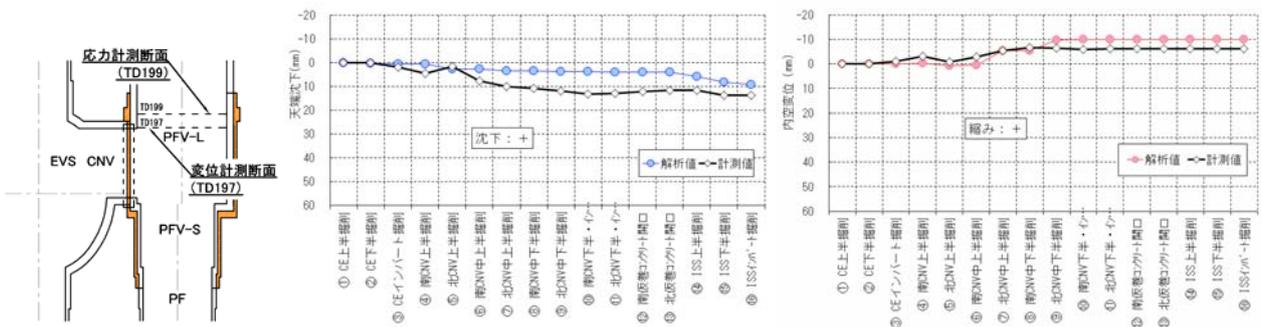


図-14 東PFV-Lの計測結果と解析結果の比較 (天端沈下, 内空変位)

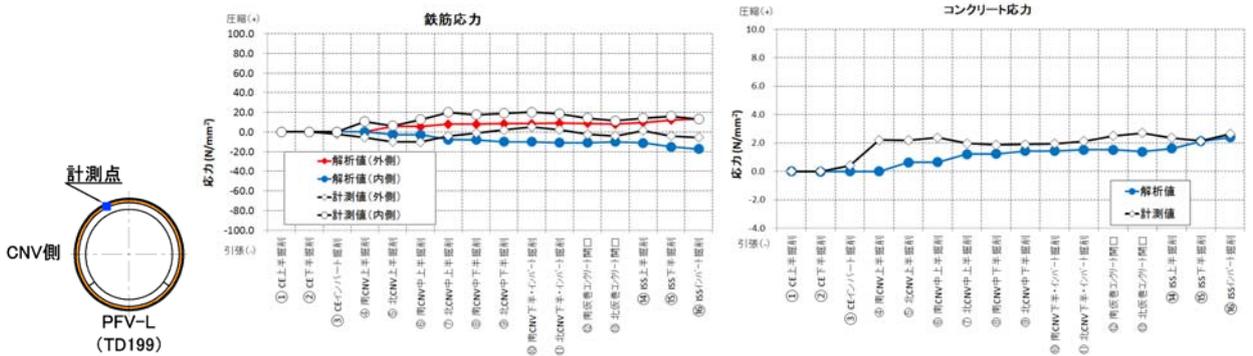


図-15 東PFV-Lの計測結果と解析結果の比較 (仮巻コンクリートの応力計)

の安定性を確認しながら施工を進めた。

図-11に立坑内のCNV掘削時の内空変位の解析結果と計測結果を示す。長軸方向、短軸方向ともに縮む解析結果に対して、実測値でも同様の傾向が得られた。

(2) 東側PFV-Lの事前検討および補強対策

東側PFV-Lトンネルでは、後で掘削される断面の大きなEVSおよびCNVの掘削により、一次支保が大きく変形し、トンネルの安全性が損なわれることが懸念された。

そこで、EVS掘削時において、原設計の支保を用いた場合の水平坑の安全性、およびトンネル周辺地山の安定性について検討することを目的に三次元逐次掘削解析を実施した。本解析では、EVS周辺の複雑な三次元構造および施工手順をできる限り忠実に反映することで高精度化を試みた。

図-12に三次元解析モデルを示す。解析モデル化、解析方法は、前節のWVSの検討と同様である。

原設計の支保の場合、EVSの掘削影響範囲内にあるトンネルは補強対策を講じなければ、EVS掘削時に安全性を確保できないことがわかった。そこで、事前に影響範囲内のトンネルを拡幅掘削した上で、RC構造の仮巻きコンクリートを施工することでトンネルを補強し、EVS掘削時にも安全性を確保できる構造にすることを計画した。

図-13に仮巻きコンクリートの施工範囲とPFV-Lにおける仮巻きコンクリート断面図を示す。施工範囲は、EVSの掘削影響範囲内とした。巻厚は、複鉄筋RC構造の施工性を考慮して45cmとした。最大D32 ctc 125mmの配筋とすることで、設計断面耐力以内となった。また、仮巻きコンクリートを打設することで、EVS掘削時に吹付けコンクリートに発生する応力は大きく低減できることがわかった。

以上により、EVS掘削時の水平坑の補強対策として、EVSの掘削影響範囲内にある水平坑の一次支保の内側に仮巻きコンクリートを施工することにより、水平坑の安全性を確保することとした。

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、立坑内は内空変位を計測し、水平坑内は内空変位と仮巻に設置した計器により、綿密な計測管理を実施した。図-14と図-15に計測結果と解析結果の比較を示す。両者は傾向の合う結果となった。

5. おわりに

日本でも類を見ない複雑な三次元構造を有する大規模地下駅を山岳トンネル工法で掘削した。その中で、大断面立坑と大断面トンネルは超近接しており、支保の健全性、地山の安定性を確保することが大きな課題であった。そこで、近接する大断面立坑および周辺トンネルは事前に補強対策を検討した。また、それらの挙動を予測し、施工時の管理値として情報化施工を行い、安全に掘削を終えることができた。実際の挙動と事前の予想はほぼ同様な傾向を示し、予測値以内におさまった。

謝辞：トルコ国民150年の夢であったボスポラス海峡横断鉄道は、2013年10月に開通を迎えることができた。長期に渡って当プロジェクトへのご指導、ご支援を頂いた神戸大学櫻井名誉教授ならびに暖かい励ましとご指導を頂いた関係各位に、この場を借りて深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩野政浩, 小原伸高, 金子哲也：都市部山岳工法トンネルの設計と施工, 基礎工, Vol.42, No.1, pp.58-68, 2014.
- 2) 岩野政浩, 小林伸次, 金子哲也：アジアとヨーロッパを結ぶ夢のトンネル完成ーボスポラス海峡横断鉄道トンネル(総集編)ー山岳トンネル編, トンネルと地下, Vol.45, No.4, pp.33-41, 2014.
- 3) 坂井一雄, 小池真史, 青木智幸, 大塚勇, 金子哲也, 岩野政浩：ボスポラス海峡横断鉄道工事の安定性検討, 岩盤力学に関するシンポジウム, pp.19-24, 2011.
- 4) I. Otsuka, N. Ohara, K. Sakai, Y. Shimizu, M. Iwano and S. Sakurai : Construction of Neighboring Large-scale Tunnels and Shafts by Urban NATM - Railway Bosphorus Tube Crossing, Tunnels and Stations -, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, 2014.

CONSTRUCTION OF NEIGHBORING LARGE-SCALE TUNNELS AND SHAFTS BY URBAN NATM

Isamu OTSUKA, Nobutaka OHARA, Kazuo SAKAI, Yoshizumi SHIMIZU, Shinji KOBAYASHI and Masahiro IWANO

This project is railway tunnels constructed under the Bosphorus Strait. Construction had started in 2004 and the tunnels and stations have become in service since October 29, 2013. In this paper, the construction of an underground railway station (Sirkeci Station) in an urban area consisting of neighboring large-scale tunnels and shafts by means of NATM is reported. During the excavation, the monitoring results were compared with the prediction. To ensure the stability of structures and ground around the shafts and tunnels, observational construction management is indispensable. The measured results that were within the allowable limits successfully proved the stability of the complex structures of the underground station.