

# ボスポラス海峡横断鉄道工事における 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 -

坂井 一雄<sup>1\*</sup>・小池 真史<sup>2</sup>・青木 智幸<sup>1</sup>・大塚 勇<sup>3</sup>・金子 哲也<sup>3</sup>・岩野 政浩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

<sup>2</sup>大成建設株式会社 原子力本部（〒163-6008 東京都新宿区西新宿6-8-1 新宿オークタワー）

<sup>3</sup>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業務所 (Taisei Corp. Marmaray Project Office, Barbaros Mah. Seyit Ahmet Deresi Sok. Bahar Sitesi Yani 34662 Altunizade, Istanbul, TURKEY)

\*E-mail: skikzo01@pub.taisei.co.jp

ボスポラス海峡横断鉄道工事では、大深度地下駅であるシルケジ駅を山岳トンネル工法により施工中である。本地下駅は非常に複雑な構造を有するとともに、直上には多くの建造物が密集することから、事前に地表面沈下やトンネル周辺地山の安定性を評価し、必要に応じてトンネルの補強対策などを実施することが不可欠である。そこで、トンネルの安全性検討を目的として、施工法を忠実に再現した三次元逐次掘削解析を実施し、塑性化領域や支保応力を算出した。本解析結果に基づき、全施工期間にわたってトンネルの安全性を確保するために、仮巻きコンクリートを用いた補強対策を施すこととした。また、施工時には地山および支保の挙動を評価・検証するために、綿密な情報化施工を計画・実施し、万全を期している。

**Key Words** : deep underground station, ground behavior, tunnel stability, support stress, 3-D analysis

## 1. はじめに

### (1) ボスポラス海峡横断鉄道整備事業の概要

現在、トルコ共和国イスタンブール市では、ボスポラス海峡に架かる2本の長大道路橋の慢性的な交通渋滞を解消し、イスタンブール大都市圏鉄道システムを発展させることを目的に、ボスポラス海峡横断鉄道整備事業（「Marmaray Project」と呼ばれる）が実施されている。大成・Gama・Nurol 共同企業体は、このうち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の延長 13.6km の区間を施工中である。図-1に路線平面図を示す<sup>1)</sup>。本論文では、4つの駅舎部のうち唯一山岳トンネル工法により施工されるシルケジ地下駅の掘削時安定性検討について記す。

### (2) シルケジ地下駅の構造と施工手順

シルケジ駅は地下約50mに建設される大深度地下駅である。図-2に示すように、シルケジ地下駅の主な水平坑は、2本のプラットフォームトンネルと1本の中央通路トンネル、およびそれらに直交する接続通路トンネルである。また、東西の駅端部付近には断面積500m<sup>2</sup>を越す換気立



図-1 路線平面図

坑があり、断面積約140m<sup>2</sup>の換気兼接続通路トンネルにより、立坑と水平坑が接続される。さらに、避難立坑や勾配30°程度のエントランス斜坑も施工する必要がある。このように、非常に複雑な構造を山岳トンネル工法により施工するため、施工手順や工程管理は他に類を見ないほど複雑なものとなっている。以下では、各立坑およびトンネルの名称は図-2に赤字で記す略称で記述する。

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190m<sup>2</sup>）からPFと掘削する手順で

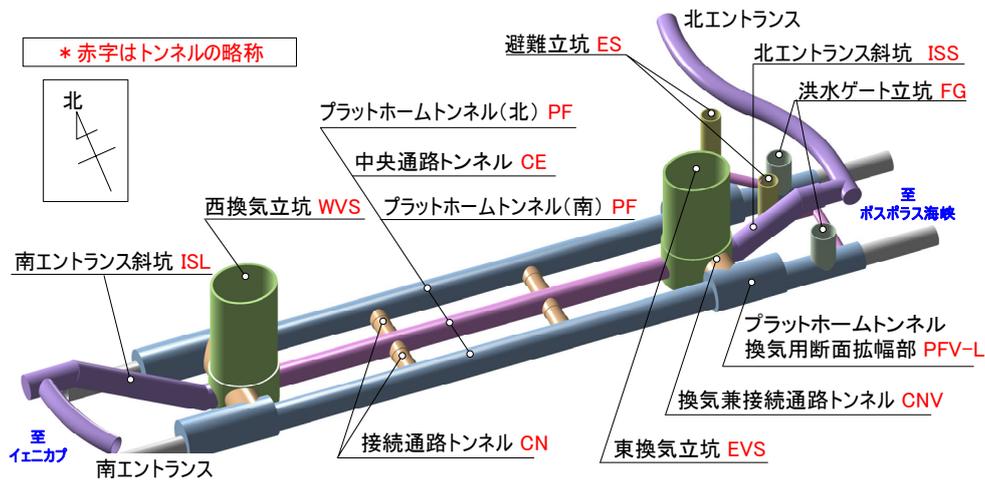


図-2 シルケジ地下駅鳥瞰図

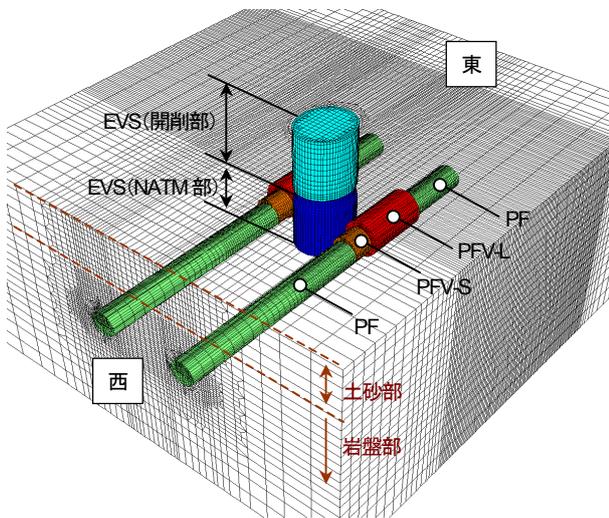


図-3 三次元解析モデル

あった。しかし、EVS上部の開削部を施工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ているため、シルケジ地下駅の施工開始から3年近く経過した現時点（2010年9月）でもEVSの切羽は岩盤部へ達していない。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し、EVSを底盤まで掘り下がった後、CNVを掘削する施工手順に変更することとした。

### (3) 本論文の目的と構成

前節で示した施工手順に変更した場合、断面の大きなEVSの掘削により、先に施工した水平坑の一次支保が大きく変形し、水平坑の安全性が損なわれることが懸念された。また、EVSの掘削はPFV-Lと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事前に検討する必要があった。

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

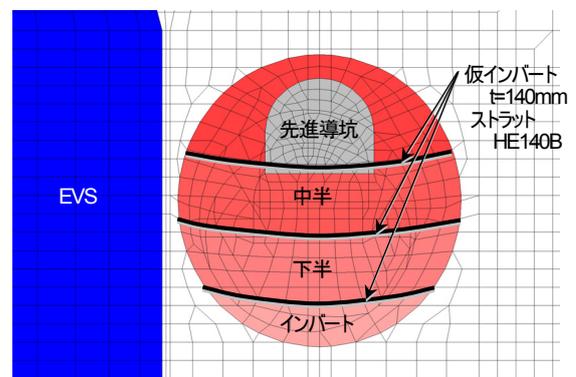


図-4 南側 PFV-L の解析モデル

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。

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。そこで、水平坑に補強対策を実施した場合の解析を実施し、安全性を確保できる仕様とした。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。

以下では、一連の三次元逐次掘削解析による水平坑の安全性および補強対策の検討と、現状の計測結果と解析結果の比較について記す。

## 2. 水平坑の安全性に関する検討

### (1) 解析条件

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。

#### a) 解析モデル

図-3に三次元解析モデルを示す。本解析モデルの特徴は以下のとおりである。

- ・ EVS周辺におけるPFV-S、PFV-LというPFの断面拡幅

表-1 地山物性値

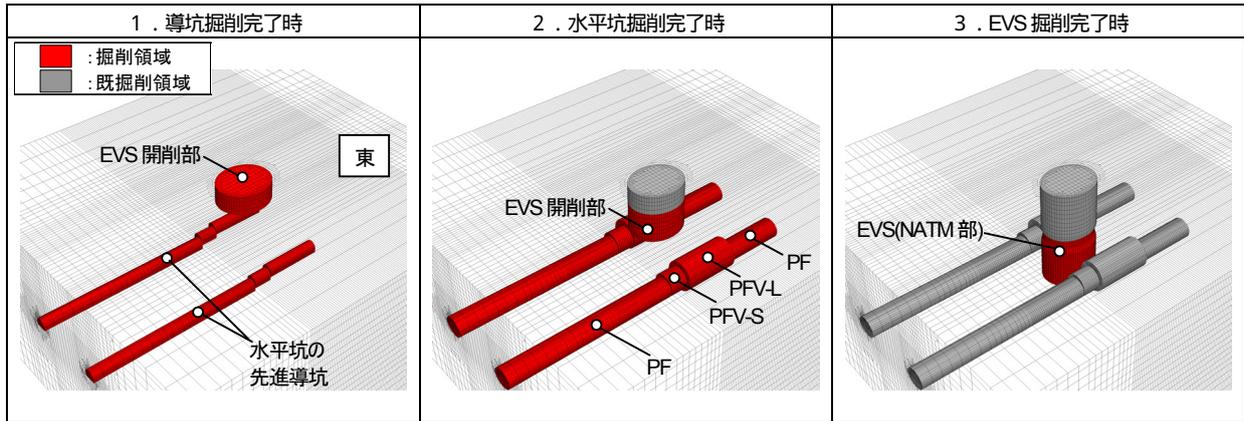
	土砂部	岩盤部
応力-ひずみ関係	弾完全塑性モデル	
破壊規準	Mohr-Coulombの破壊規準	
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	18	21
ヤング係数(MPa)	42	150
ポアソン比	0.3	0.35
粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	0	200
内部摩擦角(°)	32	30

表-2 水平坑の支保パターン

		吹付け	鋼製支保工
PF	上半・下半	250mm	HE140B
	インバート	100mm	-
PFV-L	全周	300mm	HE180B
	仮インバート	140mm	HE140B

\*鋼製支保工の降伏強度は275N/mm<sup>2</sup>

表-3 解析上の掘削手順



部を詳細に考慮した。

- ・ 実際の施工手順を反映する目的で、水平坑およびEVS共に掘進方向に1mピッチの解析モデルとした。
- ・ 水平坑の多段ベンチカット工法を再現できるようにした。図-4にPFV-L断面の解析モデルを示す。

b) 地山条件

地山はモール・クーロンの破壊規準に従う弾完全塑性体でモデル化した。地層構成は、土砂部と岩盤部に分けてモデル化し、地層境界は水平とした。地山物性値は、原設計時に採用した旧日本道路公団の地山分類に基づく地山等級を参考にして、表-1のように設定した<sup>2)</sup>。

c) 一次支保

表-2に水平坑の支保パターンを示す。解析上は、吹付けコンクリートと鋼製支保工を合成して等価な弾性係数を持つ弾性シェル要素としてモデル化した。また、PFV-Lの仮インバートは上半、中半および下半掘削時に1m毎に実施した(図-4を参照)。

d) 掘削手順

計画した施工手順をできるだけ忠実に反映した。具体的には、西側より水平坑の先進導坑を掘削した後、上半より拡幅掘削を実施し、PF、PFV-SおよびPFV-Lの掘削を完了した。水平坑と併行してEVS上部の開削部を掘削した。なお、開削部は地中連続壁を施工した後、リングコンクリートを打設しながら掘り下がる手順とした。その後EVSのNATM部を掘削した。表-3に掘削手順を示す。

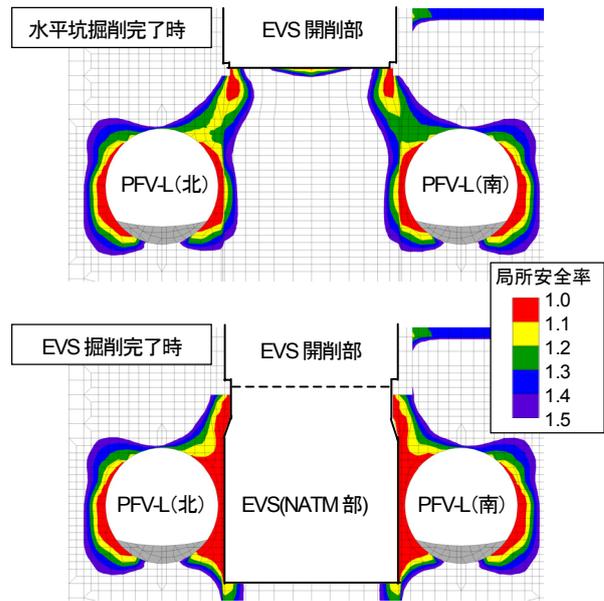


図-5 局所安全率分布図 (EVS 中心から東見る)

(2) 解析結果

図-5に水平坑掘削完了時とEVS掘削完了時における地山の局所安全率分布図を示す。

本解析では、地山の応力-ひずみ関係を弾完全塑性体によりモデル化しているため、局所安全率は1を下回らないが、安全側を見て局所安全率が1.1を下回る領域を塑性化領域と考え、地山の安定性を評価した。水平坑掘削完了時においては、PFV-Lの側壁から約1mに塑性化領域が発生する程度である。しかし、EVSのNATM部を掘

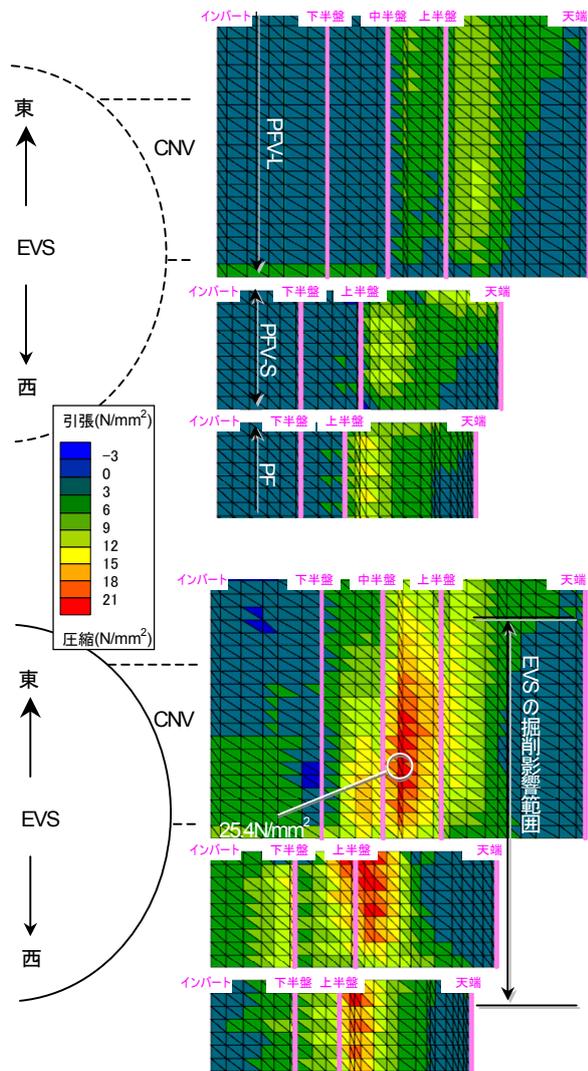


図-6吹付けコンクリート応力（内空側）  
（上：水平坑掘削完了時，下：EVS掘削完了時）

削することにより、塑性化領域が拡大し、EVS掘削完了時には、PFV-LのEVS側肩部上方から下方にかけて、EVSに挟まれる領域に広く分布することがわかった。このため、実際の施工では、EVS掘削時にEVSとPFV-Lに挟まれる領域の地山が緩むことで、PFV-Lの変形が大きくなり、場合によっては支保に設計基準強度または降伏強度以上の応力が発生する可能性があると考えられた。

そこで、水平坑掘削完了時とEVS掘削完了時における水平坑の吹付け応力を算出した。図-6は天端を起点として水平坑を展開し、EVS側半分のトンネル内空側吹付け応力分布である。図-6よりEVS掘削時にEVSに最も近接する位置の吹付けコンクリートに設計基準強度（ $18\text{N/mm}^2$ ）を超える最大 $25\text{N/mm}^2$ の応力が発生することがわかった。また、EVSを掘削することによる影響を顕著に受ける水平坑の範囲はEVSの長軸長さ程度であることがわかった。以下ではこの領域をEVSの掘削影響範囲と称す。

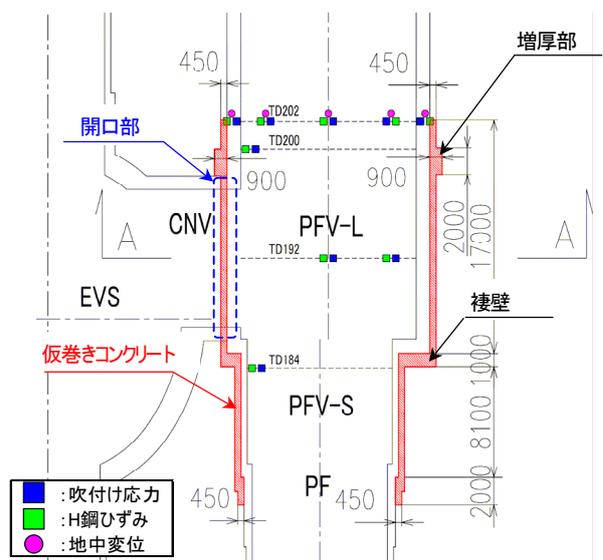


図-7仮巻きコンクリートの施工範囲（平面図）

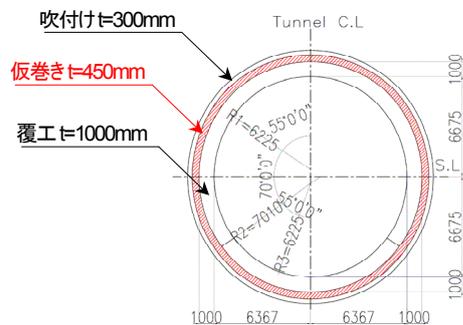


図-8仮巻きコンクリート断面図（PFV-L断面）

### 3. 水平坑の補強対策に関する検討

#### (1) 仮巻きコンクリートを用いた補強対策

原設計の支保の場合、EVSの掘削影響範囲内にある水平坑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水平坑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水平坑を補強し、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。

仮巻きコンクリートの施工範囲は、図-7に示すように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、基本的に二次覆工コンクリートの最小巻厚である45cmとした。図-8にPFV-Lにおける仮巻きコンクリート断面図を示す。ただし、仮巻きコンクリートは将来的にCNVの掘削により、図-7に示す範囲（以下では、開口部と称す）は開口される。その際、開口部の仮巻き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き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きコンクリートの襖壁厚さを1m

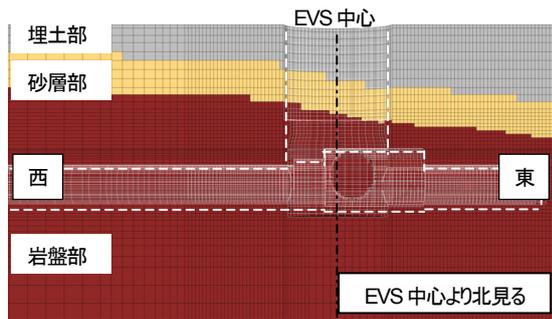
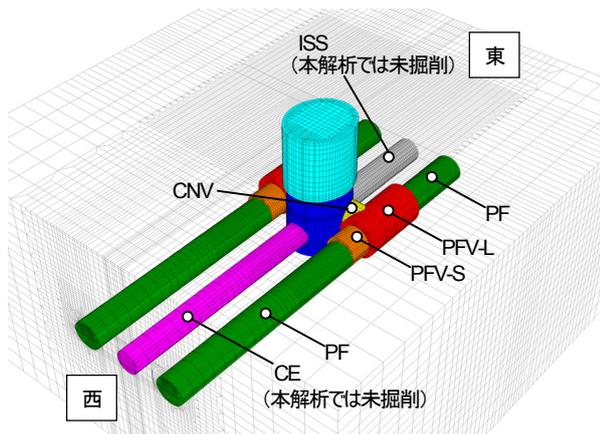


図-9 三次元解析モデル  
(上：トンネル構造，下：地層構成)

表-4 地山物性値

	埋土部	砂層部	岩盤部
応力-ひずみ関係	弾完全塑性モデル		
破壊規準	Mohr-Coulombの破壊規準		
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	18	18	21
ヤング係数(MPa)	33.6	50.4	150
ポアソン比	0.3	0.3	0.35
粘着力(kN/m <sup>2</sup> )	0	0	200
内部摩擦角(°)	30	34	30

とすることで、開口時の荷重増分に耐えうる構造とした。

(2) 三次元解析による補強対策工の妥当性の確認

仮巻きコンクリートを用いた補強対策工の妥当性を確認する目的で、前章と同様の三次元逐次掘削解析を実施した。

a) 解析条件

図-9に三次元解析モデルを示す。本解析モデルでは、仮巻きコンクリート開口時の影響を検討するために、CNVをモデル化した。また、地層構成は追加ボーリングなどの調査結果から明らかになった土砂部と岩盤部の境界を詳細にモデル化した。さらに、土砂部は上部の埋土部と下部の砂層部を分けてモデル化した。解析に用いた地山物性値を表-4に示す。

仮巻きコンクリートは弾性シェル要素によりモデル化し、水平坑掘削完了後(表-3の2.に相当)に打設した。解析上の仮巻きコンクリートの概念図を図-10に示す。

掘削手順は基本的に表-3と同様であるが、EVSの切羽

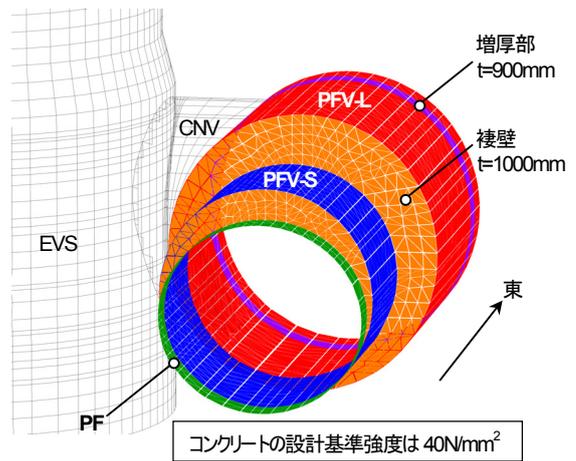


図-10 仮巻きコンクリートの概念図

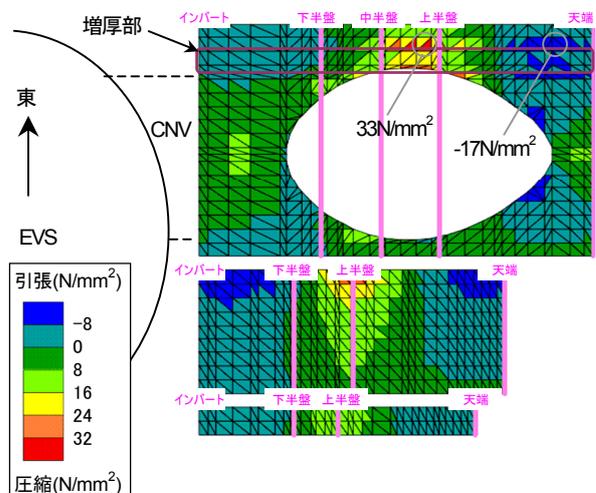


図-11 仮巻きコンクリートのトンネル周方向内空側応力分布

がCNVの上半盤、中半盤および下半盤に達した段階で、それぞれCNVの上半、中半および下半を掘削し、同時に仮巻きコンクリートを開口する手順とした。

b) 解析結果と耐力照査

図-11に EVS 掘削完了時における仮巻きコンクリートのトンネル周方向内空側の応力分布を示す。なお、図-11は上から PFV-L、PFV-S および PF の仮巻きコンクリートであり、天端を起点として水平坑を展開した時の EVS 側半分の応力分布である。増厚部の東側で、最大 33N/mm<sup>2</sup> の圧縮応力が発生し、天端から肩部にかけて最大 17N/mm<sup>2</sup> の引張応力が発生する。この原因は以下のように考察できる。EVS の掘削による応力解放に伴い、水平坑が EVS 側に引き寄せられるように挙動し、仮巻きコンクリートに大きな断面力が発生する。この断面力が CNV の掘削と仮巻きコンクリートの開口により、再配分されて、開口部周辺に断面力が集中したため、増厚部の東側で大きな応力が発生したと考えられる。

次に、コンクリート標準示方書に基づき、仮巻きコンクリートの安全性に関する照査を実施した。なお、仮巻きコンクリートはEVS掘削およびCNV掘削に伴う荷重のみを負担する仮設構造物であるため、断面破壊の限界状

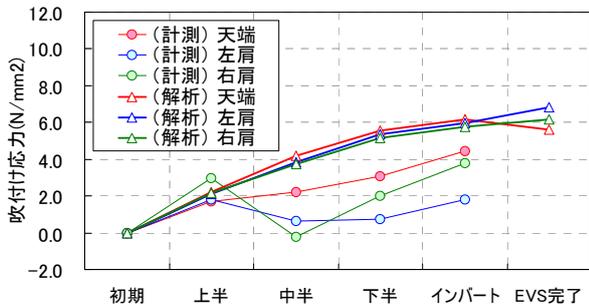


図-12 吹付け応力の比較

態に対する照査を実施した。その結果，前段で述べたような大きな断面力が発生する領域においても，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。

#### 4. 水平坑の施工と計測結果

2010年9月時点で，EVS南側の水平坑の掘削を終了し，インバート部の仮巻きコンクリートを打設した。本章では，南側PFV-Lの計測計画と現時点での計測結果と解析結果の比較について示す。

##### (1) 計測計画

PFV-L掘削時，EVS掘削時およびCNV掘削時の地山の挙動や一次支保への影響を詳細に把握することを目的に各種計測を実施している。計測位置は図-7を参照とする。

##### (2) 計測結果と解析結果の比較

TD202における吹付け応力の計測結果と三次元解析結果を比較した。その結果を図-12に示す。上半掘削時には計測結果と解析結果は良く一致しているが，中半掘削時に，解析では増加傾向を示すのに対し，計測では肩部の応力が低下した。これは，ベンチ掘削に伴い支保脚下の地山を掘削したことにより，吹付けコンクリートに発生していた応力の一部が抜けたことなどが原因であると推察される。脚部の応力低下の影響が小さい天端の計測結果は掘削の進捗に伴い増加傾向にあるが，三次元解析による予測結果よりも30%程度小さくなっている。しかし，他の計測位置も含めて，三次元解析ではEVS掘削時に吹付け応力は増加する傾向にあるため，実際の計測でも今後のEVS掘削時に注目する必要がある。

#### 5. まとめ

本論文では，三次元逐次掘削解析を用いたEVS周辺の水平坑の安全性に関する検討，および仮巻きコンクリートを用いた補強対策工に関する検討について述べた。また，実際の計測結果と解析結果を比較して，現時点では支保応力が事前の予測範囲内であることを示した。

今後のEVS掘削時にも同様の計測を継続する予定であり，想定外の変形や支保応力が生じた場合には，EVSおよび水平坑に適切な対応策を施す計画である。

#### 参考文献

- 1) 田口洋輔，小山文男，今石尚：ボスポラス海峡横断鉄道トンネルの施工，トンネルと地下，Vol.39，No.1，pp.7-17，2008。
- 2) 岩野政浩，土屋正彦，金子哲也，田口洋輔，松村謙治：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-，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.104-109，2009

## STUDY ON THE STABILITY OF DEEP UNDERGROUND STATION IN RAILWAY CONSTRUCTION PROJECT ACROSS THE BOSPHORUS STRAITS - PRE-CONSTRUCTION 3-D SEQUENTIAL ANALYSIS AND OBSERVATION-BASED CONSTRUCTION -

Kazuo SAKAI, Masashi KOIKE, Tomoyuki AOKI, Isamu OTSUKA,  
Tetsuya KANEKO and Masahiro IWANO

In a railway construction project across the Bosphorus straits, a deep underground station, named Sirkeci station, is under construction by means of NATM. An accurate prediction of the ground stability during excavation is necessary, since the station has a complex structure and the ground surface is densely populated with buildings. This paper shows the result of a preliminary 3-D analysis performed to examine ground stability and tunnel safety. It's expected that the ground and the support will be subjected to severe condition. Therefore, an application of "temporary concrete" is planned as a countermeasure. In addition, an observational method has been planned and is carried out to monitor the actual behaviors.