

ボスポラス海峡横断鉄道プロジェクトにおける 大断面クロスオーバー（渡り線）トンネル掘削

大塚 勇¹・小原 伸高¹・小林 伸次²・岩野 政浩²

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: ohtsuka@ce.aisei.co.jp

²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）

本プロジェクトは、イスタンブールの交通渋滞を緩和するために、ボスポラス海峡で隔てられたアジア側とヨーロッパ側をつなぐ鉄道トンネルを建設するものである。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初めて鉄道で繋がった。本報告では、山岳トンネル工法によって掘削した大断面トンネル（ヨーロッパ側クロスオーバー：渡り線）の施工方法および情報化施工について述べる。

Key Words : large scale tunnel, urban NATM, observational construction management, measurement

1. はじめに

図-1にプロジェクトの全体図を示す。海峡部には延長1.387 kmの沈埋トンネルを施工した。陸上部ではシールドマシンにより総延長18.72 kmのトンネルを上下線で掘

削した。地下駅舎の一つであるシルケジ駅とアジア側とヨーロッパ側に1箇所ずつあるクロスオーバーおよび上下線を繋ぐ避難連絡路をNATMで施工した。

トルコ国民の長年の夢であったボスポラス海峡を横断する鉄道トンネルは、トルコ建国90周年である2013年10



図-1 プロジェクト全体図

月29日に開通した。

本稿では、NATMで掘削した大断面のヨーロッパ側クロスオーバーにて実施した情報化施工について報告する。

2. ヨーロッパ側クロスオーバーの概要

クロスオーバーは、列車が上下線を行き来するためのトンネルである。ヨーロッパ側のクロスオーバー（以降、クロスオーバー）は、図-1に示すようにシルケジ駅から約180mユニカビ側にいったところに位置する。

図-2にクロスオーバーの平面図、断面図を示す。3つの異なる断面のトンネルから成っている。大断面のCOL(Cross Over Large)は、列車が2台入る断面となるため、掘削断面積は約230m²となる。これは、新東名の三車線トンネル断面よりも大きな断面である。また、妻壁は長軸17.5m、短軸15.5mの非常に大きい楕円形状で、上下線2本のトンネルが通るために2つの大きな開口がある。COM(Cross Over Medium)は、TBMとCOL断面の間にあり中間的な大きさである。COS(Cross Over Small)はTBM断面とほぼ同じ大きさである。

COLとCOMは、TBM掘削完了後にNATMにて切り抜けた。COSはNATMで掘削し上下線トンネルを接続した。

その他、上下線をつなぐ避難連絡路（クロスパッセージ）が2本あり、COM断面と交差する。

3. 地形、地質概要

図-3に地質縦断面図を示す。地質は泥岩が主体であり、地形的には丘陵部であり、土被りは70m程度と路線内では比較的大きな土被りであり、地表部の表土の層厚は薄い。

TBM掘削時に得られた機械データ（カッター圧とカッタートルク）を分析し、クロスオーバー区間の地質を想定した。その結果、Track1側では、COMとCOLの境界付近の地山が非常に悪いという結果となり、断層による弱部

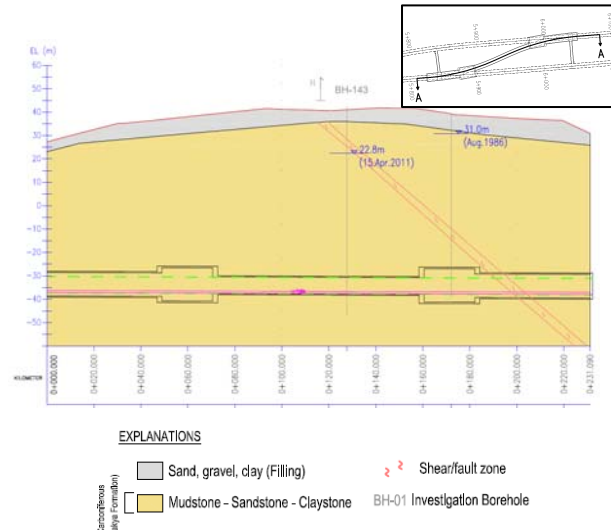


図-3 クロスオーバーの地質縦断面図(A-A断面)

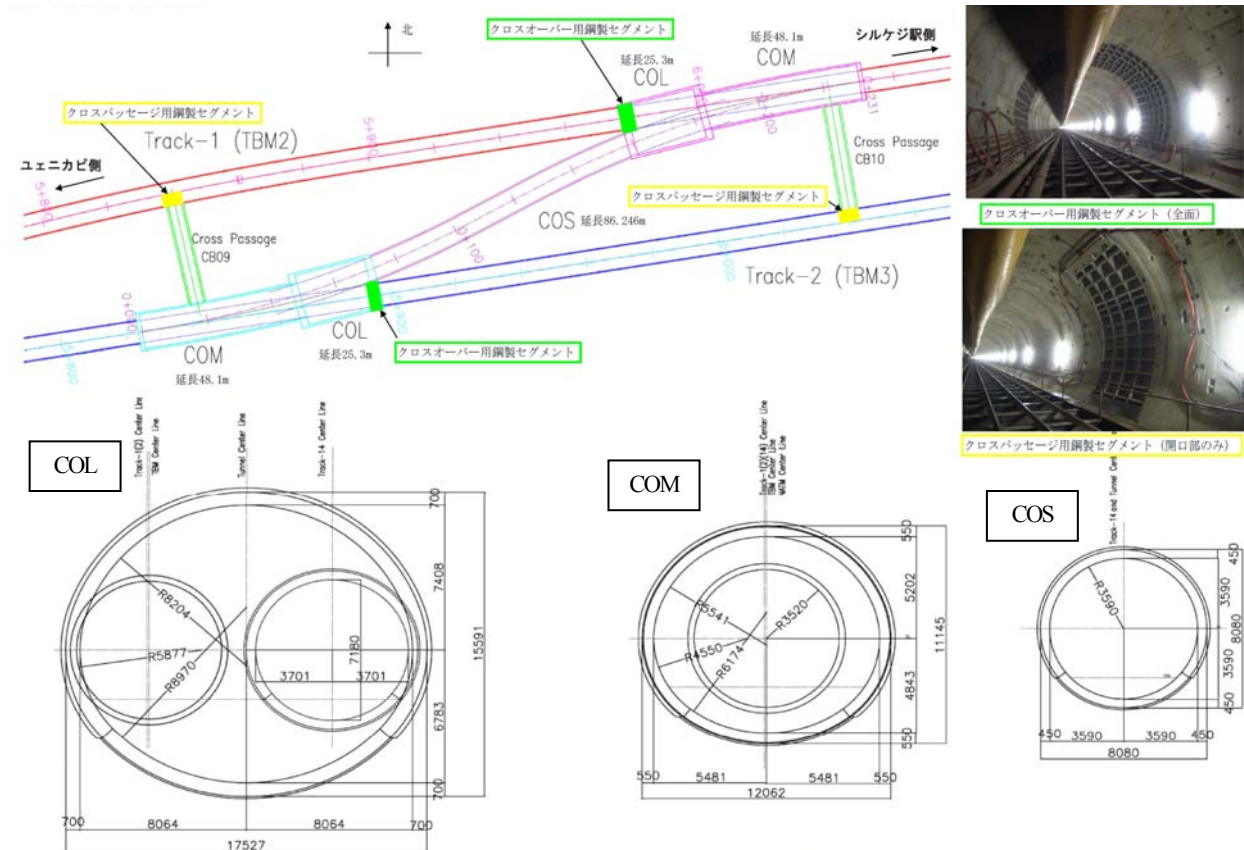


図-2 クロスオーバー平面図および断面図

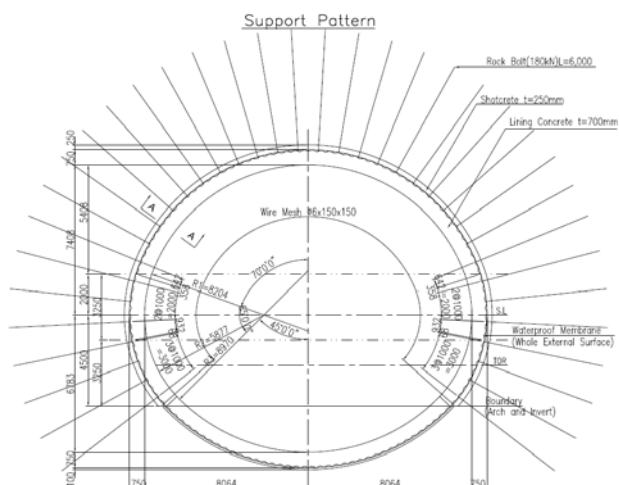


図-4 COLの標準支保パターン図 (DIIパターン)

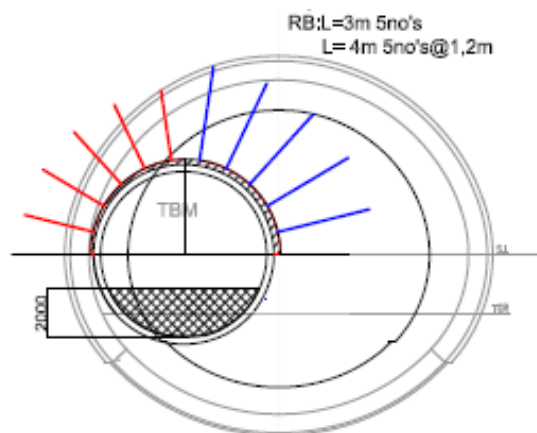


図-5 プレロックボルトの打設

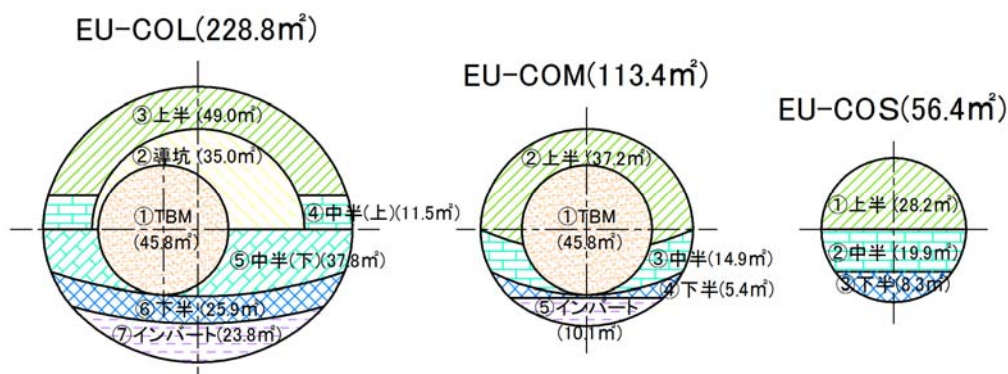


図-6 クロスオーバー加背割り図

が懸念された。Track2側では全面不良地山であると考えられた。地下水位は、ほぼ地表面近傍である。地表部はエジブシャンバザール直近の商業地であり、商用ビルが密集している。

岩盤の弾性係数は、約150MPaで軟岩に相当する。地山分類は旧日本道路公団の分類に従い、全ての区間がDII級に分類された。

4. クロスオーバーの掘削方法

クロスオーバー掘削前には、図-4 に示すように、TBMセグメント内よりロックボルトを打設した。このプレロックボルトの目的は、事前補強だけでなく、のみ下がり・クリ粉の性状・湧水の状況などから地質把握も兼ねている。セグメント1リングの延長が1.5mであったので、トンネル周方向に1.5mピッチ、周方向には1.0mピッチで打設した。ロックボルトの長さは、拡張する方には4mで長いボルトを打設し、それ以外は3mとした。

掘削は、まずTrack2側（南側）をシルケジ駅側から行った。ずり出しや資機材の出し入れはシルケジ駅の立坑を使用した。

表-1 各トンネルの一次支保パターン

	鋼製支保工		吹付けコンクリート		ロックボルト		
	サイズ	建込間隔 (m)	厚さ (cm)	強度 (N/mm²)	長さ (m)	周方向ピッチ (m)	延長方向ピッチ (m)
COL	H-200	1.0	25	18	6.0	1.0	1.0
COM	H-150	1.0	20	18	4.0	1.2	1.0
COS	H-150	1.0	20	18	4.0	1.2	1.0

図-5に最も断面の大きいCOLの標準支保パターン図 (DIIパターン) を示す。各トンネルの一次支保パターンを表-1に示す。

図-6に各トンネルの加背割り図を示す。先に掘削したTBMの断面はクロスオーバーのセンターには位置せず、断面毎に移動していく。

COLの断面積は、TBM断面に比較して極端に大きいため、図-7に示すように、TBMトンネル掘削後、COLではTBMのセグメントを一間ずつ外しCOM断面で導坑掘削した。その後、COLの断面に切詰め掘削を行った。中半（上）掘削は上半の切羽後方2～4mで行い、仮インバート吹付を行い早期閉合した。中半（下）掘削も仮インバートにて閉合し、坑内変位、地表面沈下の抑制を行った。下半掘削の切羽後方2～4mでインバート掘削を実施し、仮インバートによりトンネルを完全に閉合した。COLは、2段階で切り詰め、5つに加背を割って掘削した。

COMは、上半、中半、下半、インバートの4つに加背を割り、上半、中半はそれぞれ先進させ、仮インバートを行った。下半とインバートは、切羽離れ2～4mで掘削し、仮インバートにて閉合した。

工期短縮のために、シルケジ駅からTrack1とTrack2の間に掘削したアクセルトンネルを利用して、COSの掘削を行った。図-8にアクセルトンネルからCOSトンネルへのすり付け方法を示す。アクセルトンネルの延長は約300mで、幅5m、高さ3.3mで掘削断面積は約25m²である。アクセルトンネルはS字カーブでCOSの線形に合わせ、掘削断面を大きくしていった(図中①)。その後、Track2側のクロスオーバーに向けて掘削し、10m手前で掘削を止め(図中②)、COL側から貫通させた(図中③)。最後に、アクセルトンネルを埋戻し、交点部の縫い返しを行って、反対側のTrack1側のCOLと接続した(図中④)。施工状況を、写真-1～写真-4に示す。

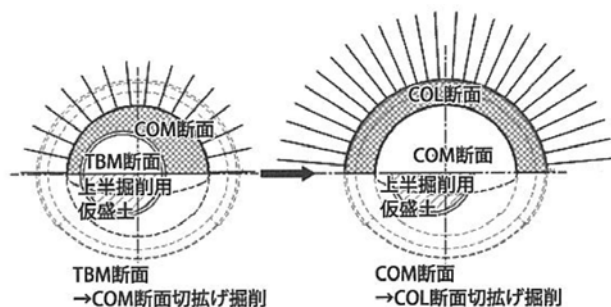


図-7 クロスオーバー拡張掘削

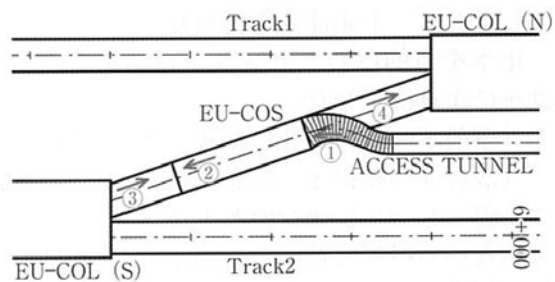


図-8 COS掘削手順

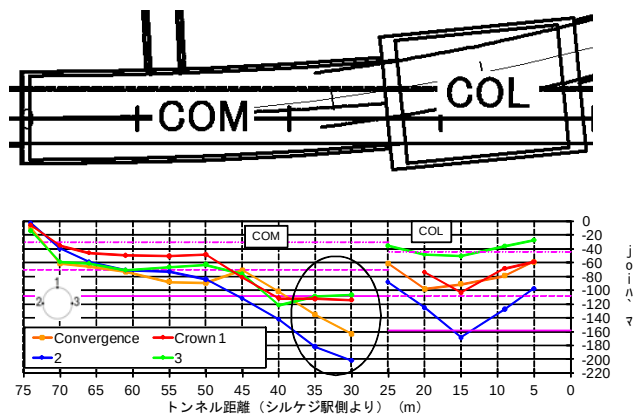


図-9 坑内変位 (Track2側)



写真-1 プレロックボルト



写真-2 TBM断面からCOMトンネルへの切掛け



写真-3 COMからCOLへの切掛け



写真-4 ベンチおよびインバート

5. 計測結果と対策工

図-9にTrack2側の坑内沈下、内空変位の計測結果を示す。COMのCOL側で変形が大きい結果となった。COLとの接続部では、COLの大断面掘削の影響が及ぶため、変形が大きくなったものと考えられる。変形の大きい区間では、以下の対策を施した。

- ・ 増し吹付けコンクリート (t=100mm)
- ・ 増しロックボルト (L=6m)
- ・ 仮インバート吹付けコンクリート (上半, 中半) (t=250mm, ワイヤメッシュ)
- ・ 仮インバート (インバート) (t=250mm, H=150)

また、切羽に向かって左側の脚部沈下 (測点2) が大きかった。図-10に示すように、Track2側のCOLとCOMの接続部では、TBMの断面が左側に寄っているため、上半脚部がTBMにより掘削した空洞に近いので脚部の支持力が十分でなく、左側で沈下が大きくなったものと考えられる。この区間には、長さ6mのAGF鋼管 (φ114.3mm) をフットパイルとして左側だけに1mピッチで打設した。

図-11にTrack1側の計測結果を示す。Track1側では、先に掘削を始めたTrack2側で得られた知見を活かして、事前に対策を実施することで、安全に掘削を完了することができた。

図-12に示すように観測井をCOSとTrack2側のTBMトンネルの間に設け、地下水位を観測した。図-13には地下水位の計測結果を示す。Track2側をTBMが通過した際、約6m

水位が低下した。Track1側をTBMが通過した際は、ほとんど影響を受けていない。計測点がTrack1側のトンネル線形から離れていたためと考えられる。アクセストンネルの掘削の影響でも約6mの水位低下が観測された。クロスオーバーの掘削中は、計測不能期間があったが、約10mの水位低下が計測された。その後、二次覆工の施工が進むにつれて水位が回復し始めた。2013年3月以降のデータが計測不能のため欠損しているが、二次覆工が完成したため、現在はほぼ元の水位まで回復していると思われる。

クロスオーバー上の地表面沈下の計測点を図-14に示す。計測点は約180ポイントで、掘削中は最低毎日一回は計測を実施した。



図-12 地下水位計測箇所

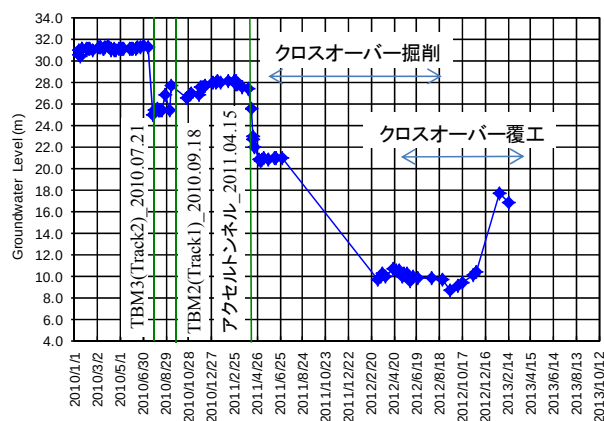


図-13 地下水位継時変化

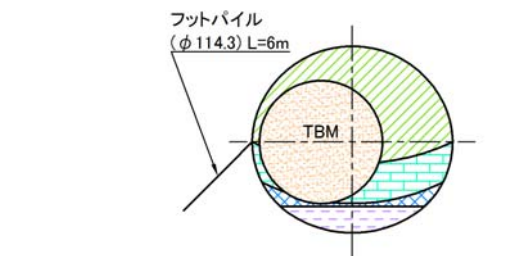


図-10 フットパイルによる沈下抑制対策

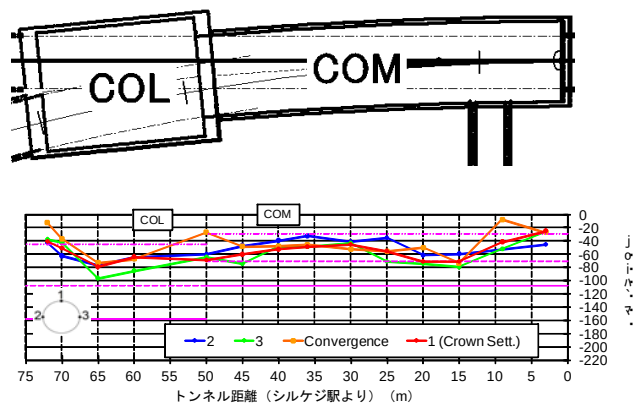


図-11 坑内変位 (Track1側)

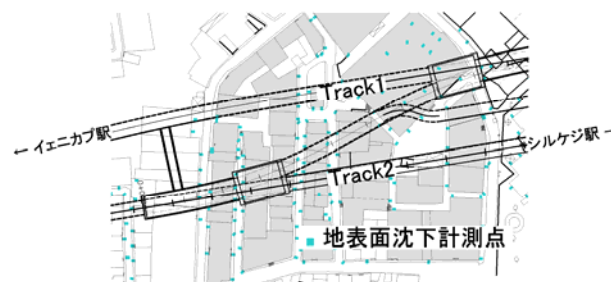


図-14 計測ポイント

対策の必要な建物は掘削前、掘削中に補強を行いながら対応した。

図-15および図-16に地表面沈下のコンター図を示す。図-15のコンター図は、モール・クーロンの破壊規準に従う完全弾塑性FEM解析より求めた最終沈下量の予測値である。弾塑性解析の結果である。図-16は最終沈下量の実測値である。両者にはクロスオーバー掘削前のTBM掘削による沈下も含まれている。

予測の最大沈下量は約40mmであったが、実測は約65mmとなっており、実測のほうが大きい。また、コンターの間隔が実測のほうが密となっているため、傾斜も実測のほうが大きい結果となった。シルケジ駅のNATM掘削でも、弾塑性解析による予測値と実測値が合わなかった。計測データを分析したところ、以下のことが分かった⁹⁾。

- 地山のせん断剛性の低下によるトンネルの共下がり現象
- 地下水圧の低下による岩盤、表層の圧縮挙動
- 表層の歴史的建造物のルーズな瓦礫層の締固めによる圧縮

クロスオーバーでも同様な現象が発生したために、実測値が大きくなったものと思われる。



図-15 地表面沈下コンター図（予測）

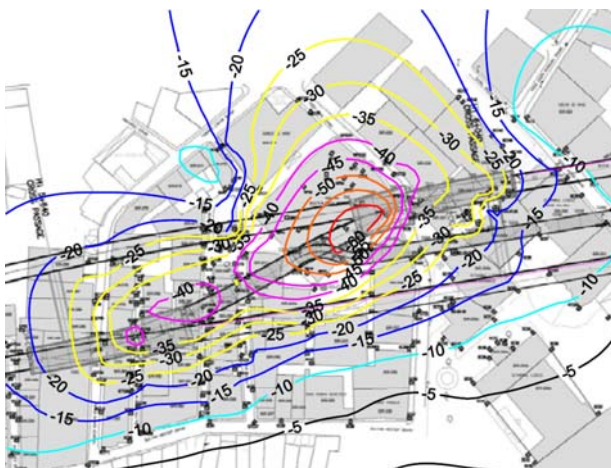


図-16 地表面沈下コンター図（実測）



(a) COL断面からCOSおよびTBM断面を望む



(b) COL断面からCOM断面を望む

写真-5 クロスオーバーの完成写真

写真-5にクロスオーバーの完成写真を示す。現在は乗客を乗せた列車が毎日運行されており、トルコ国民の重要な交通手段となっている。

6. おわりに

クロスオーバーは、先に掘削していたTBMトンネルを拡張して掘削した。TBMの掘削データから不良地山であることが分かったので、掘削の前にTBMトンネル内からロックボルトを打設し、事前補強を実施した。泥岩主体の地山で破碎されていたため、TBMによる先進導坑、事前補強を行ったにもかかわらず、切羽の自立性が悪かった。そこで、加背をなるべく小さくするために、大断面のCOLでは5ベンチに分けて掘削した。計測データを基に、仮インバートや増しロックボルトなどの有効な対策工を行って、トンネル周辺の地山を安定させ、トンネル坑内の変形、地表面沈下を抑制した。地表面の沈下は予測値よりも大きくなり、通常の弾塑性解析では表現できない挙動を観測した。この挙動は、シルケジ駅でも見られ、同様の原因で地表面沈下が増大したものと考えられる。

本報告が、今後の類似プロジェクトの参考になれば幸いである。

謝辞：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) 大塚勇, 小原伸高, 小林伸次, 小仲井一朗, 池田一貴, 浅野浩史, 岩野政浩: イスタンブール歴史地区直下での大断面クロスオーバー(渡り線)トンネル掘削: 土木建設技術発表会 2014, 投稿中
- 4) M. Iwano, S. Kobayashi, T. Kaneko, K. Ikeda, Y. Shimizu, S. Sakurai : Construction of deep underground railways station and cross over tunnels in historical area, Istanbul Turkey, *ITA, World Tunnel Congress 2013 Geneva*, pp.1-8, 2013.
- 5) I. Otsuka, N. Ohara, T. Aoki, M. Shimo, S. Kobayashi and M. Iwano : Observational construction management of a large scale underground railway station by urban NATM based on the mechanism for generation of surface settlement , *ISRM, 13th International Congress on Rock Mechanics Montreal*, 2015. (Submitted).

(2014. 9. 15 受付)

EXCAVATION OF A LARGE CROSS-SECTION CROSSOVER TUNNELS

Isamu OTSUKA, Nobutaka OHARA, Shinji KOBAYASHI and Masahiro IWANO

This project is a railway tunnel connecting Asian continent to European one which are separated by the Bosphorus Strait in order to alleviate a traffic congestion in Istanbul. The tunnels and stations are constructed in several methods such as immersed tunnel, shield tunnel, NATM and cut & cover in 13.6km length. The project was opened in October 2013 and Asia and Europe was connected by the railway for the first time. In this paper, observational construction method was applied for a large cross-section tunnel (crossover at European side) excavated by NATM.