

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

大成建設株式会社 正会員 ○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

1. はじめに

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。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）の施工方法について述べる。

2. プロジェクトの概要

図 1 に示すように、トルコ共和国最大の都市であるイスタンブール市をヨーロッパ側とアジア側に二分するボスポラス海峡の直下に横断鉄道トンネルを構築した。海峡部に敷設する沈埋トンネル（1,387m）、陸上部のシールドトンネル上下線（総延長 18,720m）、そして地上駅 1 駅舎、地下駅 3 駅舎を建設した。地下のシルケジ駅と上下クロスオーバー（渡り線）および上下線連絡路は NATM で施工した。



図 1 プロジェクト全体図

キーワード 大断面トンネル、都市 NATM、ウォータータイト構造、計測

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設株式会社 トンネル地下設計室 TEL 03-5381-5296

3. 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り、アジア側とヨーロッパ側に1箇所ずつ設けられた。単線トンネル2つが横に並ぶ大空間が必要であり、掘削断面積は約230m²の大断面となる。これは、新東名の三車線トンネル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。

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ユニカピ側にいったところに位置する。クロスオーバーの構造は図2に示すように、COL(Cross Over Large：大断面)、COM(Cross Over Medium：中断面)、COS(Cross Over Small：小断面)の3つの断面よりなる。COLとCOMは、TBMトンネルをNATMにて切り広げた。TBMトンネルとほぼ同じ断面のCOSをNATMで掘削し、上下線トンネルを接続した。図3にクロスオーバーの平面図、断面図を示す。上下線をつなぐ避難連絡路（クロスパッセージ）が2本クロスオーバー内にあり、COMと交差する。

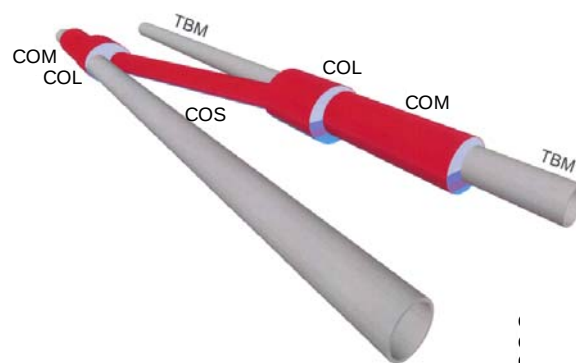


図2 クロスオーバー鳥瞰図

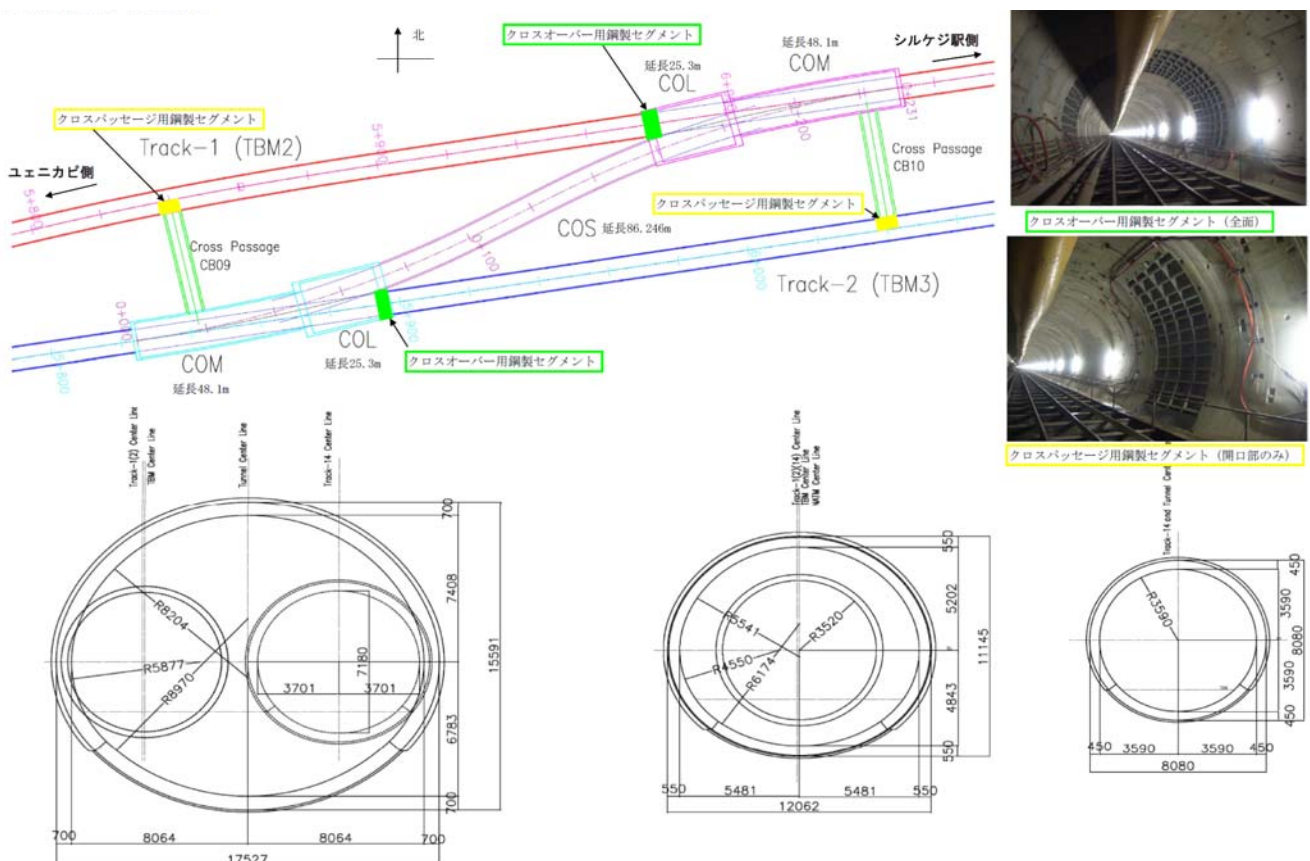


図3 クロスオーバー平面図および断面図

4. 地形、地質概要

図4に地質縦断面図を示す。ヨーロッパ側クロスオーバートンネル部の地質は、泥岩が主体である。地形的には丘の下となり、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。一部、断層による弱部が懸念された。地下水位は、ほぼ地表面近傍である。地表部はブルーモスク・グランドバザール直近の商業地であり、商用ビルが密集している。図5にクロスオーバー直上の建物分布図を示す。レンガ造りの建物もあり、築30年以上の古い建物が多くを占めており、掘削前には建物の健全性を判断するために、構造物調査を実施した。

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。

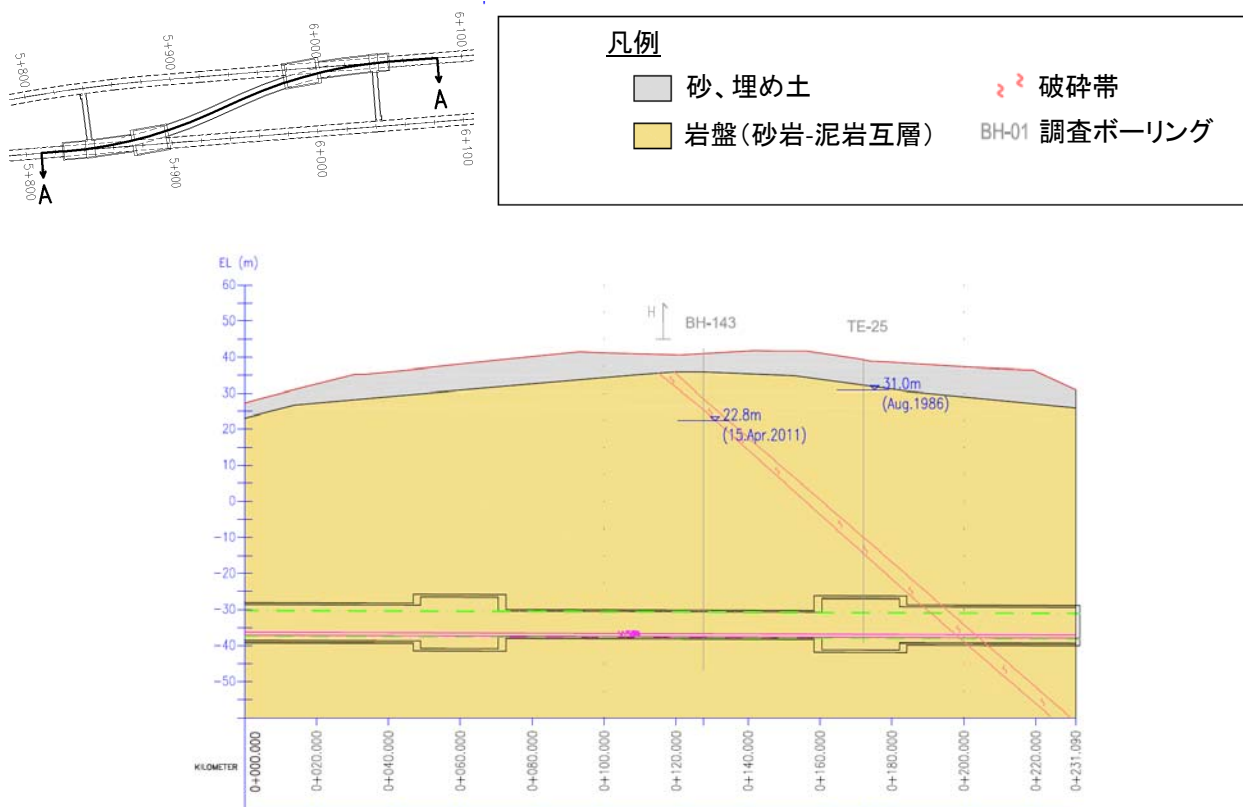


図4 クロスオーバーの地質縦断面図 (A-A 断面)



図5 クロスオーバー直上の建物分布図

5. クロスオーバーの掘削方法

図6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。また、表1に各トンネルの一次支保の仕様を示す。支保パターンは、旧日本道路公団の地山分類に基づく標準設計を適用して設定した。

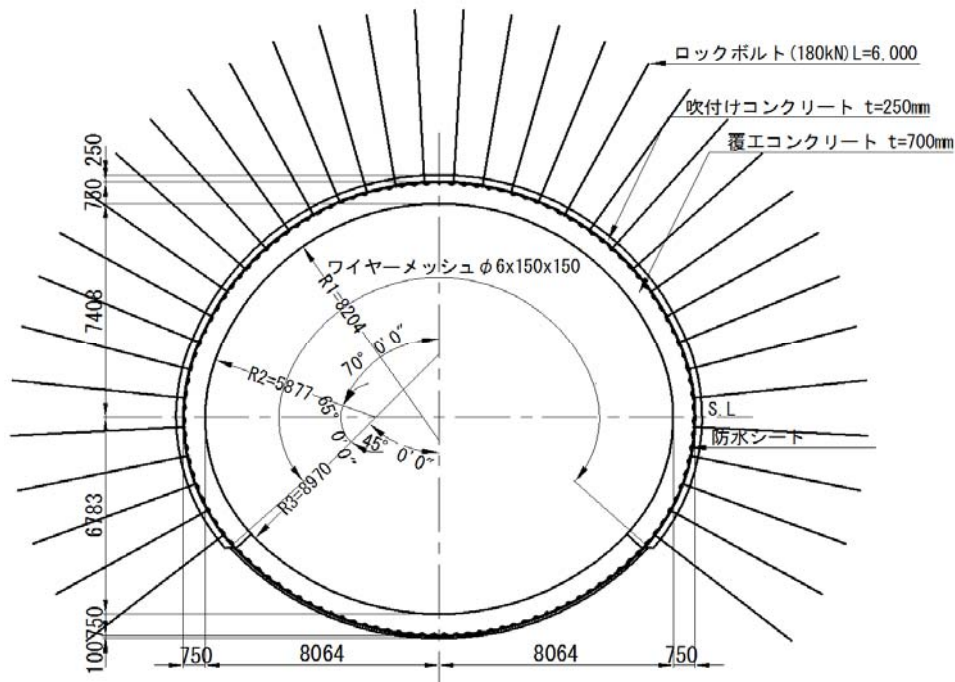


図6 COLの標準支保パターン図(DIIパターン)

表1 各トンネルの一次支保の仕様

	鋼製支保工		吹付けコンクリート		ロックボルト			掘削 断面積 (m^2)
	サイズ	建込間隔 (m)	厚さ (cm)	強度 (N/mm^2)	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	229
COM	H-150	1.0	20	18	4.0	1.2	1.0	113
COS	H-150	1.0	20	18	4.0	1.2	1.0	56

クロスオーバー掘削前には、図7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、トンネル進行方向に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、拡幅する側には6mで長いボルトを打設し、それ以外は4mとした。先にTrack2側(南側)をシルケジ駅側から掘削した。

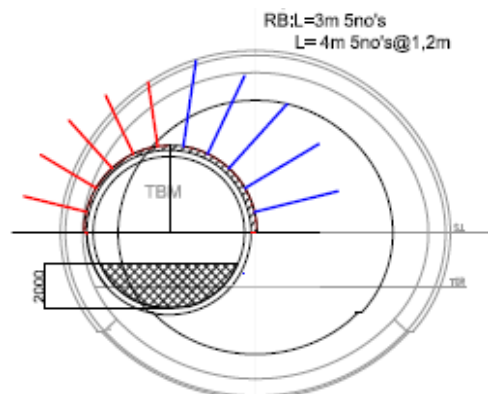


図7 プレロックボルトの打設

図 8 に各トンネルの加背割り図を示す。COL の断面積は、約 230m^2 であり、TBM 断面に比較して極端に大きい。そのため、COL は TBM トンネル掘削後、TBM のセグメントを一間ずつ外し COM 断面で導坑掘削を行った。その後、上半の断面に切詰め掘削を行った。その際、中半（上）掘削を上半の切羽後方 $2\sim 4\text{m}$ で行い、仮インバート吹付を行い早期閉合し、坑内変位、地表面沈下の抑制を行った。その後、中半（下）掘削を仮インバートにて閉合して、下半掘削後 $2\sim 4\text{m}$ 後方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。

施工状況を、写真 1～写真 4 に示す。

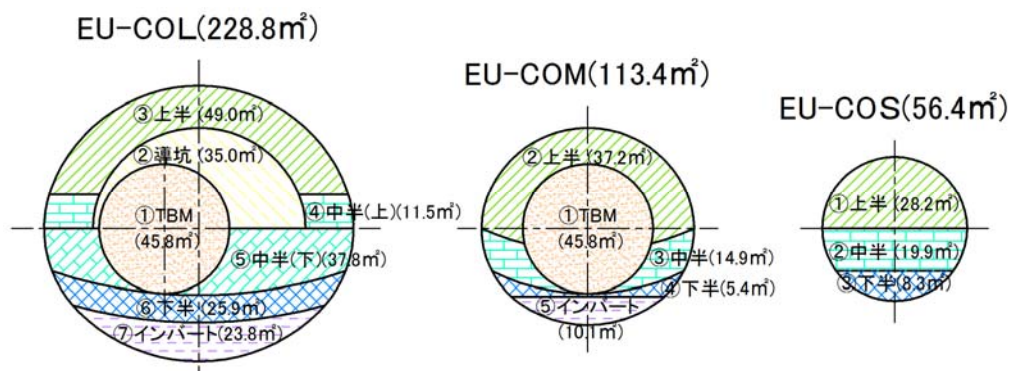


図 8 クロスオーバー加背割り図



写真 1 プレロックボルト



写真 2 TBM 断面から COM トンネルへの切詰め



写真 3 COM から COL への切詰め



写真 4 ベンチおよびインバート

6. 計測結果と対策工

図9にTrack2側の計測結果を示す。COLとCOMの接続部で変形が大きい結果となった。COLとCOMの接続部では、COLの大断面掘削の影響がCOM側へ及ぶため、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、増し吹付けコンクリート（ $t=100\text{mm}$ ）、増しロックボルト（ $L=6\text{m}$ ）、仮インバート吹付けコンクリート（ $t=2500\text{mm}$ 、ワイヤーメッシュ（上半、中半）、H-150（インバート））を実施した。

また、シルケジ側から見て左側の脚部沈下（測点2）が大きかった。図3より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。左側の上半脚部は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（ $\phi 114.3\text{mm}$ ）をフットパイルとして左側だけに1mピッチで打設した。

Track1側（北側）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。

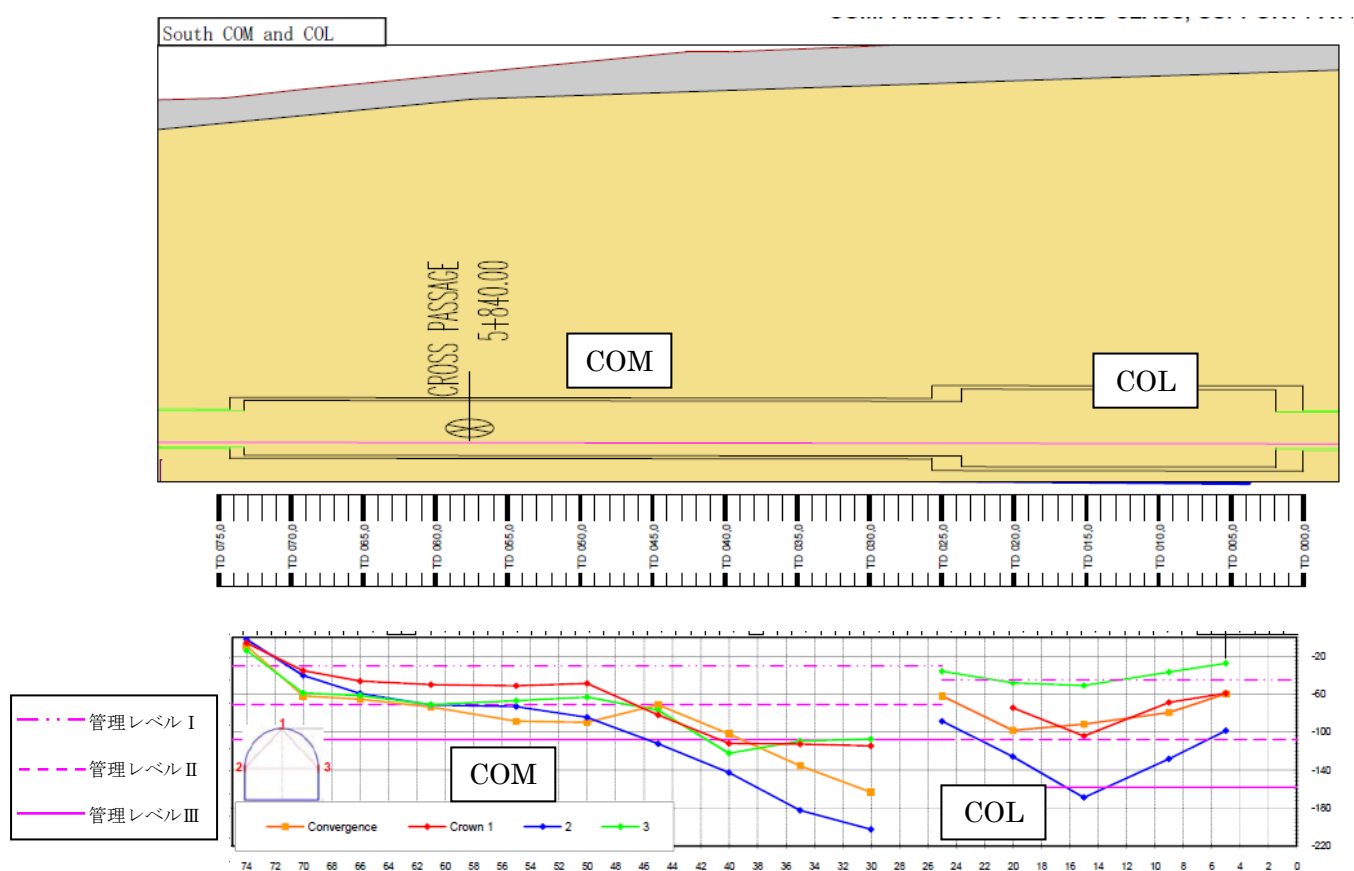


図9 坑内変位（Track2側）

COSは図10に示すように、COLとの接続部では、TBMトンネルと近接する。そこで、COLおよびCOSの掘削を行う前に、COLと接続するTBMトンネル内に図10に示すように補強リングを6リング設置した。幅300、高さ350のH形鋼であり、フランジ厚40mm、ウェブ厚21mmのビルト材である。

また、他の対策として、COSの掘削を行う前に、COLの妻壁からCOSの掘削断面の外周部に長さ9mのAGFを600mmピッチで16本打設した。COS掘削完了後は、COSとTBMとの間の地山に長さ6mの増しロックボルトをCOLの妻から打設した。さらにCOL妻壁に厚さ100mmの増し吹付けを実施した。COS側からはTBM断面に向けて長さ1.5～3mの増しロックボルトを打設した。

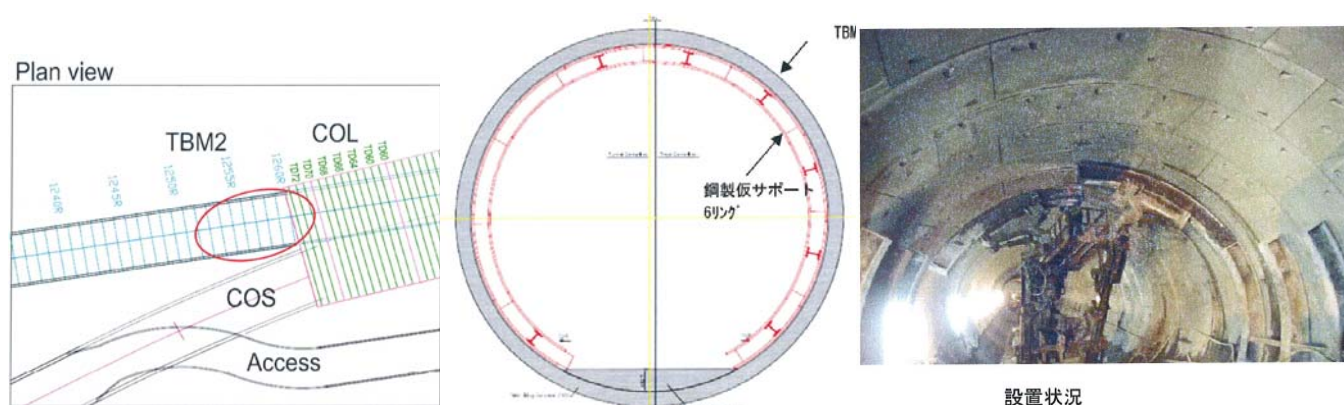


図 10 COS 掘削の対策工（鋼製仮サポート）

7. 覆工コンクリート

ウォータータイト構造のため、トンネル形状を円形に近い形としている。そのため、トラックレベルよりも下部にデッドスペースが多く、インバートコンクリートの上にバックフィルコンクリートで埋め戻す必要があった。構造部材のコンクリートはRC 構造で、設計基準強度は 40MPa である。バックフィルコンクリートは 20MPa である。ただし、工期短縮のため、型枠設置などの施工性を重視し、バックフィルコンクリートを構造部材コンクリートと一緒に打設した箇所もある。各トンネルの巻厚は、COL が 70 cm、COM が 55 cm、COS が 45 cm である（図 3）。1 打設長は基本的に 6m としている。

クロスオーバーは異なる 3 つの断面からなっており、断面変化部には妻壁を設けた。妻壁は、図 11 に示すように COM と TBM（断面①）、COL と COM（断面②）、COL と COS・TBM（断面③）の三か所である。COL 断面の妻壁は COL の二次覆工と、COM 断面の妻壁は COM の二次覆工と一体となっている。図 12 に COL の妻壁（断面③）の解析モデルを示す。他の妻壁も三次元解析によって、仕様を決定した。また、COM には、クロスパッセージとの接続断面があり、接続部は COM の二次覆工と一体となっている。妻壁、接続部は、巻厚が厚く、鉄筋量が多くなっており、断面③の妻壁は巻厚が 1.9m で鉄筋量は約 160kg/m³ である。

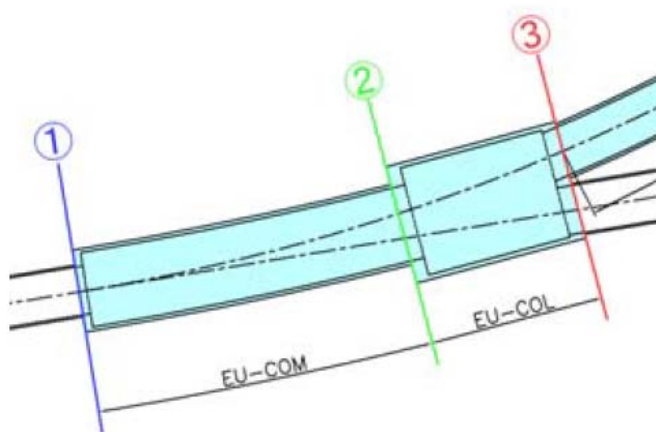


図 11 妻壁の位置図

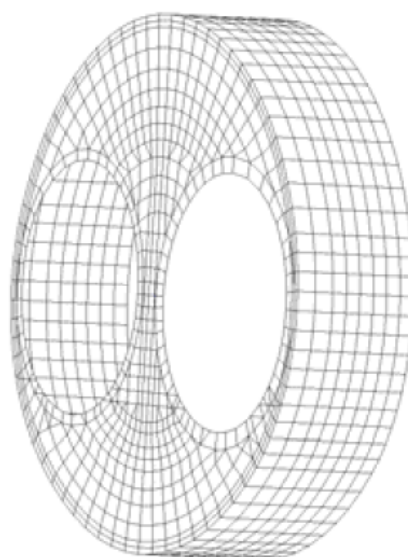


図 12 COL 妻壁（断面③）の解析モデル

写真 5 にインバートおよびアーチコンクリートの施工状況を示す。また、写真 6 にクロスオーバーの完成写真を示す。現在は乗客を載せた列車が毎日運行されている。



(a) COL インバートコンクリート施工状況



(b) COL アーチコンクリート施工状況

写真5 覆工コンクリート施工状況



(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6 クロスオーバーの完成写真

8. おわりに

クロスオーバーの掘削は、先に掘っていた TBM トンネルを拡幅して行った。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。掘削対象地山は、砂岩、泥岩の互層であったが、破碎されていたため、TBM による先進導坑があ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、5 ベンチに分けて掘削した。また、計測データを基に、有効な仮インバートや増しロックボルトなどの対策工を行って、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、大断面トンネルを安全に掘削することができた。また、三次元的に複雑な形状の覆工コンクリートの施工は、非常に困難であったが、工期内に完成することができた。

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。

最後に、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

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. 1

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ボ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. 4