

山岳トンネル工法によるイスタンブール・シルケジ駅的设计・施工

大成建設（株）	正会員	○柴山	周平
大成建設（株）	正会員	小原	伸高
大成建設（株）	正会員	岩野	政浩
大成建設（株）	正会員	大塚	勇

1. はじめに

ボスポラス海峡はトルコ北西に位置し、黒海からマルマラ海にいたる延長 30km の海峡である。地理的にも経済的にも重要な場所である人口 1400 万人のトルコ最大の都市イスタンブールは、この海峡によりアジア側とヨーロッパ側に隔てられている。海上交通は発達しているものの、東京などに比べると圧倒的に鉄道網が不足しており、交通手段は車に頼らざるを得ない状況にある。アジア側とヨーロッパ側を結ぶ手段として、すでに 2 本の長大道路橋が架けられているが、経済の発展にともなう交通需要の増加に対応しきれておらず、慢性的な交通渋滞を引き起こしているのが現状である。本「マルマライ・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。



図-1 路線平面図

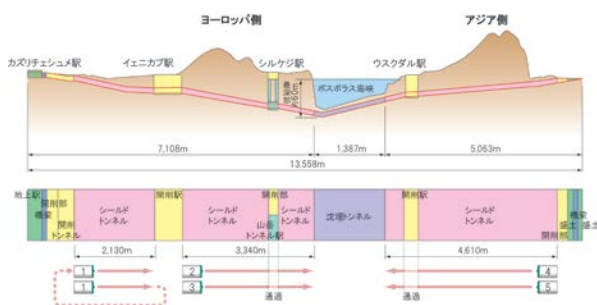


図-2 路線縦断面図

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建設するものである。図-1に路線平面図、図-2に路線縦断面図を示す。本稿では、イスタンブール市中心部の歴史観光・商業地区の直下に、山岳工法により構築する大規模地下駅（シルケジ駅）の設計・施工について報告する。

2. 大規模地下駅（シルケジ駅）概要

シルケジ駅は写真-1に示すような建物密集地の地下約50mに構築される。東西2つの換気立坑を利用して水平トンネルの掘削を行う計画であったが、遺跡調査の遅延のため東立坑の掘削に着手できず、西立坑のみをアクセス路として掘削を進めることになった。

駅の構造は、2本のプラットホームトンネルと並行する中央通路トンネル、それに直行する4本の接続通路トンネルである。また東西の換気立坑、その立坑に接続する換気兼接続通路トンネル、避難トンネルおよび避難立坑等も建設される。トンネル交点部が20ヶ所以上もあり、各トンネルが近接施工、また、大幅な断面変化点や勾配30度の斜坑など、あまり例のない複雑な構造を都市部山岳工法にて施工する難工事である。図-3にシルケジ駅鳥瞰図、表-1に各トンネル名称と掘削規模、覆工コンクリート厚さを示す。

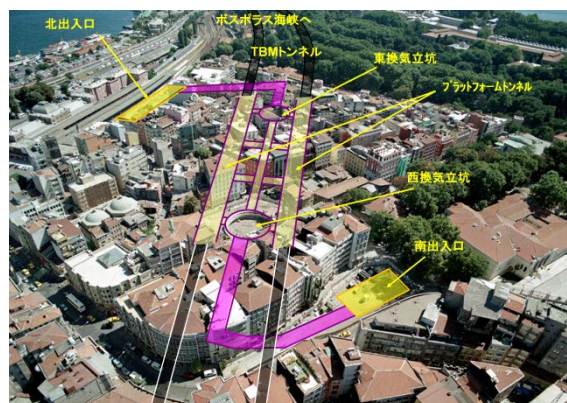


写真-1 シルケジ駅地表状況

キーワード 都市 NATM, 地下駅, 交差部, 3次元解析, 設計施工

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部土木設計部 TEL03-5381-5296

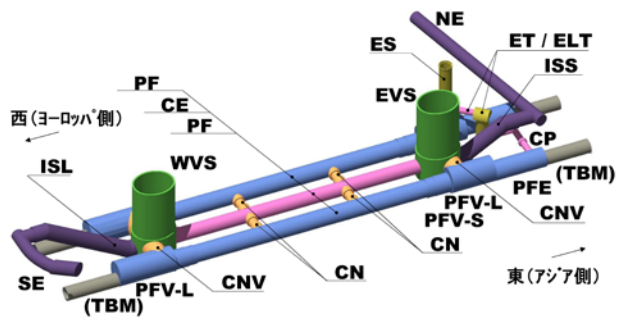


図-3 シルケジ駅鳥瞰図

表-1 トンネル名称と断面規模

記号	名称	掘削断面積(m ²)	覆工厚(cm)
WVS	西換気立坑	510.7	100-120
EVS	東換気立坑	510.7	100-120
CNV	換気兼接続通路トンネル	143.3	100
PF	プラットフォームトンネル	89.0	45
PFV-S	換気兼プラットフォーム(スモール)	110.4	45
PFV-L	換気兼プラットフォーム(ラージ)	192.4	100
CE	中央通路トンネル	60.2	45-75
CN	接続通路トンネル	36.6	45
ISS	斜坑(スモール)	73.1	45-75
ISL	斜坑(ラージ)	78.1	45-75
CP	避難連絡通路	16.1	40
ET	避難トンネル	11.6	35
ELT	避難トンネル(ラージ)	36.4	45-75
ES	避難立坑	50.3	45
NE	北エントランストンネル	46.3	45
SE	南エントランストンネル	46.3	45

3. 地形・地質概要

地質は地表近くの土砂部と深部の岩盤部に大別される。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。多くは地山等級 DII 相当の軟岩である。岩盤の上には層厚約 10m の砂層が分布し、礫、砂、シルト、貝殻等が含まれている。砂層の上は埋土層で、層厚は 10～25m、古代都市の遺跡が出現する層であり掘削前の遺跡調査が義務付けられている。東側にいくほど、表層が厚くなり岩盤と砂層の境界線は深くなる傾向である。地下水位は砂層と埋土層の境界付近に存在し、トンネル天端で約 30m の水圧が作用している。

4. 設計概要

(1) 覆工コンクリート

本トンネルは防水構造が求められることから、覆工コンクリート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限界状態設計法により設計を行った。構造解析は、トンネル一般部では 2 次元骨組構造解析を適用したが、妻部や交差部は 3 次元的に複雑な構造となるため、3 次元シェル解析を採用した (図-4)。いずれも覆工コンクリートと地山の相互作用を構造要素の外周に付加した地盤バネによりモデル化している。

(2) 3 次元解析を用いた換気立坑開口補強工の設計

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 と近接していることから、開口時の地山の不安定化や支

保工の応力集中が懸念された。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、開口補強の事前対策を検討した。ここでは西立坑 (WVS) 周辺を対象とした検討について示す。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。図-5 に 3 次元解析モデルを示す。

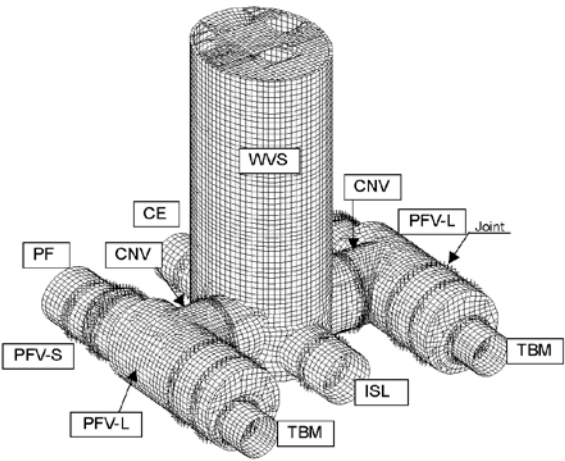


図-4 換気立坑付近の構造解析モデル図

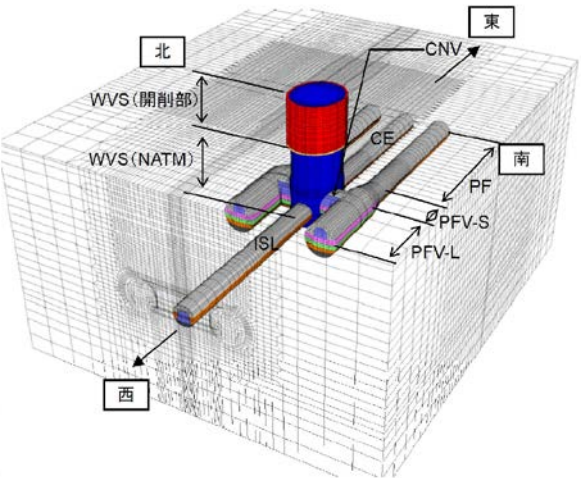


図-5 3 次元掘削解析モデル

5. 施工概要

(1) 西換気立坑 (WVS) の施工

シルケジ駅の施工は西立坑 WVS の掘削から開始した。立坑は、深さ 58m、直径約 25m、掘削断面積 500m² の大断面立坑である。施工概要を図-6 に示す。掘削時には、坑内内空変位測定、地中変位測定、支保工応力測定を実施し、地山挙動の把握に努めた。

GL-39.5m 地点では、地山状況確認のためコア採取と孔内載荷試験を実施した。変形係数は 100～500MN/m² であったが、ばらつきが多く、100MN/m² に未満のものや、コアが採取できないほど脆弱な部分も存在した。

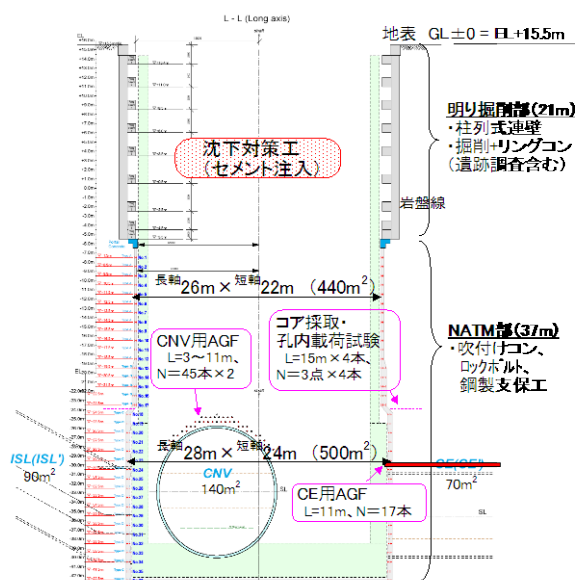


図-6 西立坑施工概要図

(2) 水平トンネル (PFV) の施工

換気兼プラットホームトンネル (PFV) は図-3に示すように換気立坑 (WVS, EVS) の両側に近接して構築される大断面トンネルで、掘削断面積は 192m^2 である。

施工方法は、まずPFVトンネルの上半部に導坑を掘削し、上半掘削、中半掘削、下半掘削、インバート掘削の順に掘削する。図-7に加背割りと施工手順を示す。

補助工法は、まず導坑内からトンネル軸方向に50cm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を打設し、上半仮インバートを実施し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た。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の地山改良を行った。

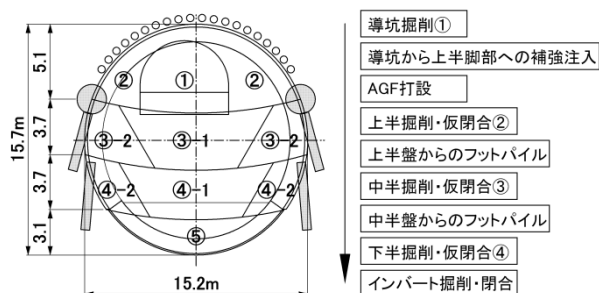


図-7 PFV-L トンネル施工手順

(3) 換気兼接続通路トンネル (CNV) の施工

西立坑WVSと水平トンネルPFVとを接続する換気兼接続トンネルCNVの掘削は、WVSやPFVに断面積 140m^2 余りの大断面開口を設けることになる。WVSとPFVとの離隔は最小離隔1mと近接しており、WVS下部には4つの大断面開口部を設けることなどから、CNV掘削に伴う支保工や地山の安定を確保するため、前章で述べたように3次元逐次掘削解析に基づき開口部補強を行った。また、CNVは加背を小さくして慎重に施工を進めることとした。図-8にCNVの加背割りを示す。

CNV掘削施工手順を図-8に、施工状況を写真-2、写真-3に示す。

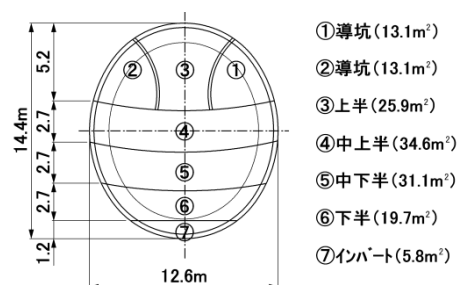


図-8 CNV 掘削加背割り図

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の安定性を確認しながら慎重に施工を進めた。施工時の計測結果の一部を次に示す。

北 CNV と北 PFV-L の交点部における CNV 掘削に伴う PFV-L の天端沈下および内空変位の予測値と計測値とを比較した結果を図-9 に示す。天端沈下は、予測値とほぼ一致した変形量で、北 CNV の上半掘削時から徐々に増加し、北 CNV 中上半掘削時に最終変形量と同等の変形となった。内空変位は、南 CNV 上半掘削時から徐々に増加し、北 CNV 上半掘削時に最終変形量と同等の変形となった。計測値は予測値より若干大きい、PFV-L の支保工の変状等は確認されなかった。

CNV掘削時の WVS 内空変位の予測値と計測値とを比較した結果を図-10 に示す。CNVの掘削の進捗に従って、予測値と同様に縮小方向の内空変位が計測された。これはCNV掘削によりWVSのリング形状が欠損し剛性が低下するためと考えられる。測点 11-12 では予測値より大きな、また、測点 7-8 では予測値より小さな



写真-2 西 CNV 上部導坑掘削状況



写真-3 西 CNV 掘削完了

計測値となり、予測解析より開口部近傍に変形が集中するような挙動が観測されたと考えられる。WVS の支保工に変状等は確認されなかった。

6. おわりに

シルケジ駅は都市部の建物密集地域の地下に位置し、狭隘な地上施工ヤード、断面変化や交差部が多数存在する複雑な構造を建設する難工事である。また、地質条件も褶曲と変性作用により脆弱化して不均質の度合いがき極めて高い。

西立坑下部は 4 方向に大断面開口部を設ける特殊な形状で、掘削時の地山や一次支保の不安定化が懸念されたが、施工手順を考慮した三次元逐次掘削解析による挙動予測や補強対策、施工段階ごとの計測管理の下で慎重に掘削を行い、複雑な西換気立坑周りの掘削を無事に完了させることができた。また、施工時挙動が事前解析結果と比較的よく一致したことから、検討手法の妥当性を確認することができた。

国内では、複雑な構造の地下駅等は開削工法またはシールド工法で構築されるのが一般的であるが、地上部の制約が大きい都市部では山岳工法の適用が有利となる場合もあり、このシルケジ駅の設計・施工実績は今後の類似計画に資するものと考えられる。

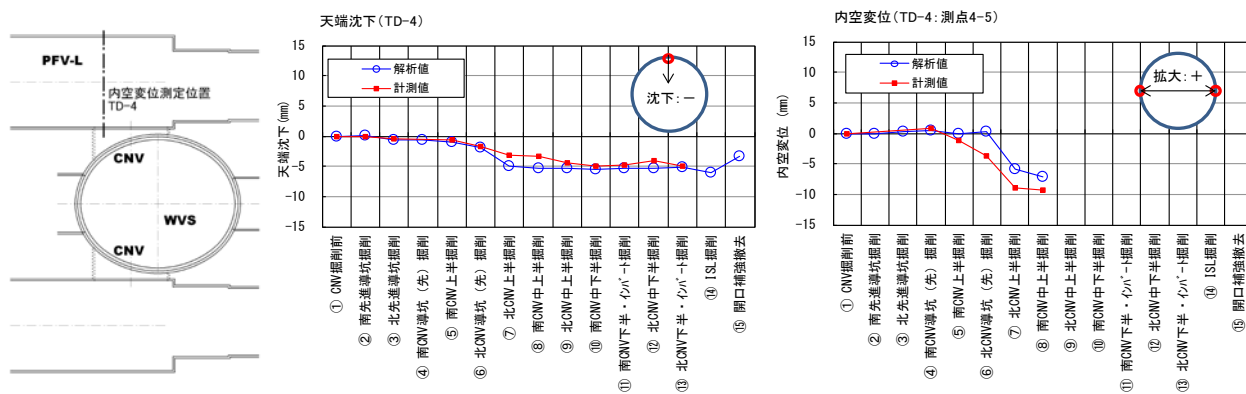


図-9 西 CNV 掘削時の PFV トンネルの変形（解析値と計測値の比較）

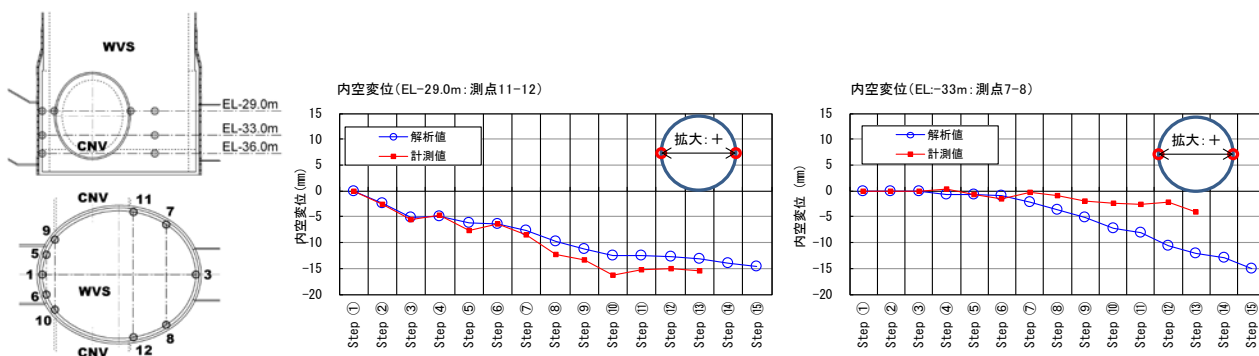


図-10 WVS 内空変位計測結果