

トルコボスポラス海峡横断鉄道トンネルにおける シールド施工

岩盤泥水シールドの掘進と沈埋トンネルとの海底下直接接合

今 石 尚・長 光 憲一郎

トルコ共和国最大の都市であるイスタンブールは、東京都を上回る約1,400万人の人口を抱える大都市でありながら、マルマラ海と黒海を結ぶボスポラス海峡により東西に分断されており、その移動はフェリーによる海上輸送および2本の長大道路橋に限られていた。よって近年の経済発展に伴う慢性的な交通渋滞とそれに起因する大気汚染が深刻化しており、この海峡により分断されているトルコ国鉄をつなぐ海峡横断鉄道トンネルを建設することにより、これらの問題を解決し、またアジア～ヨーロッパ間の物流を活性化し、さらなる経済発展が期待された。

ボスポラス海峡横断鉄道プロジェクトは、沈埋工法、シールド工法、NATM工法の3つのトンネル工法を効率的に組み合わせて計画・実施された。本稿ではそのうちのシールドトンネルの施工について報告する。

キーワード：海外工事、トルコ、海峡横断、鉄道トンネル、岩盤泥水シールド、海底下直接接合、F-PAS工法、大深度高水圧

1. はじめに

ボスポラス海峡で隔てられたアジアとヨーロッパをトンネルでつなぐ海峡横断鉄道の構想は、オスマントルコ帝国時代の1860年頃にまで遡る。当時描かれた設計図は海峡に隣接するウスルクダル市に今でも保管されており、以来150年にわたり何度も実現の期待が高まっては技術的・経済的な理由などにより消えてきた。しかるにトルコ国民にとっては長年の悲願である夢のプロジェクトである（図—1、写真—1、2）。

1998年のトルコ政府による円借款要請により本プロジェクトは始動、2004年5月に契約締結、同年8月に工事着工され、当初工程では2009年4月完成予



写真—1 ボスポラス海峡横断部

定であった。しかし駅部の埋蔵文化財調査（写真—3）の長期化による影響で工程が延長され、2013年10月のトルコ建国90周年の記念日にあわせて営業を開始した。開業記念式典にはトルコ側からギュル大統領、エルドアン首相他、日本側からも安倍首相が出席するなど、本プロジェクトはトルコと日本の友好の新たな象徴といえるだろう。

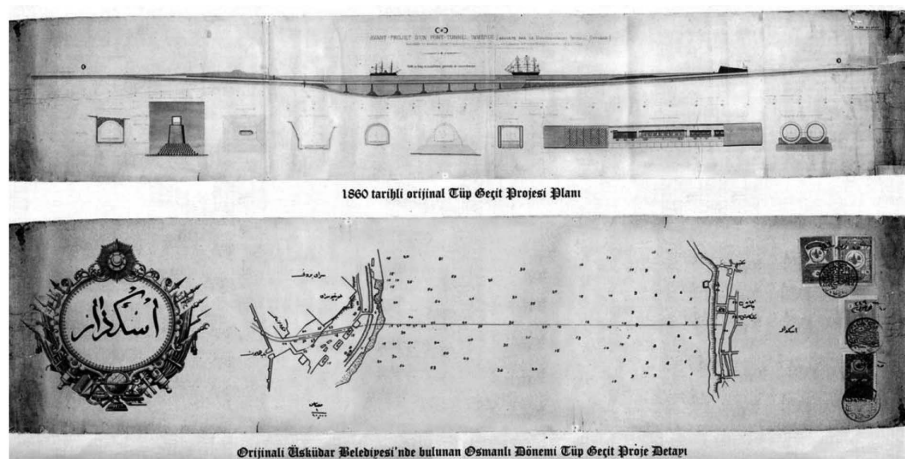
2. 工事概要

(1) プロジェクトの概要

ボスポラス海峡横断鉄道プロジェクトは、アジアサイドと呼ばれる海峡東側の都市アイリリクチェシュメからヨーロッパサイドと呼ばれる海峡西側の都市カズ



図—1 ボスポラス海峡の位置



写真—2 オスマントルコ帝国時代に描かれた設計図

リチェシュメを結ぶ延長 13.6 km の上下線鉄道新設と 4 つの新駅建設からなり、海峡部の約 1.4 km を沈埋トンネルで、駅間のトンネル部約 10.1 km をシールドトンネルで、地下駅部と渡り線部を NATM 工法と開削工法で構築した（図—2, 3）。

(2) 工事基本情報

本プロジェクトの基本情報を以下に示す。

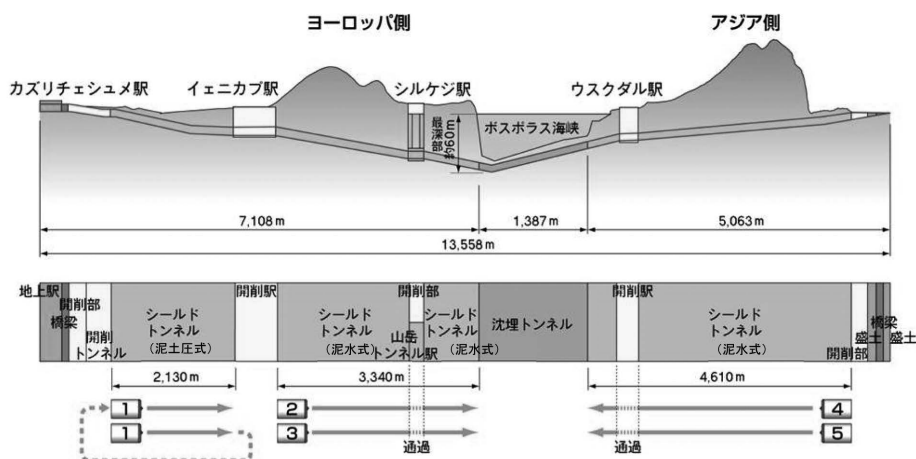
- ①施主：トルコ共和国運輸通信省 鉄道・港湾・空港建設総局（DLH）
- ②施主代理人：AVRASYA Consultant JV
- ③設計・施工者：大成建設・Gama・Nurol JV（Gama, Nurol はトルコ企業）
- ④契約工期：2004 年 8 月～2009 年 4 月（当初）～2013 年 10 月（変更）
- ⑤契約金額：約 1,023 億円（当初）
約 1,500 億円（変更予定）
- ⑥応札形式：Two-envelope 方式（技術札，価格札）
- ⑦契約約款：FIDIC Silver book, EPC Contract（Engineering, Procurement, Construction）



写真—3 イェニカプ駅部での埋蔵文化財調査



図—2 路線平面図

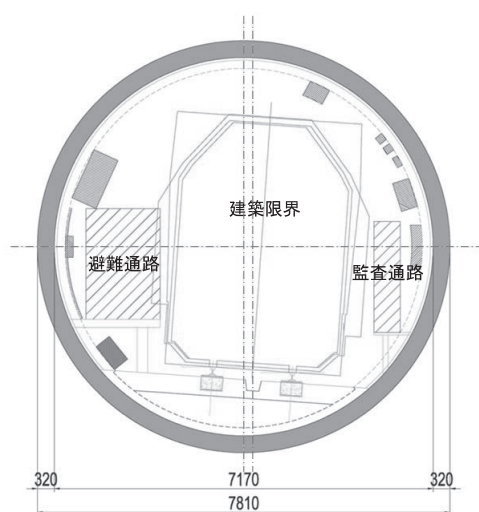


図—3 路線縦断面図

(3) シールド工事の概要

本プロジェクトの総延長 13.6 km の上下線鉄道の新設工事のうち、シールド工法を採用した延長が 10.1 km（上下線）あり、そのうち低土被りで掘削対象が土砂となる部分を泥土圧式、大深度（一部海峡横断部を含む）で掘削対象が岩盤となる部分を泥水式に分けて施工した（図－3）。

そのうち本稿では泥水式シールド工法で施工したヨーロッパ側の約 3.3 km × 2 本（TBM2, TBM3）、およびアジア側の約 4.6 km × 2 本（TBM4, TBM5）のトンネルについて報告する。シールドトンネルの標準断面と施工中のトンネル内観は以下の通りである（図－4、写真－4）。



図－4 シールドトンネル標準断面図



写真－4 施工中のシールドトンネル内部

3. 計画

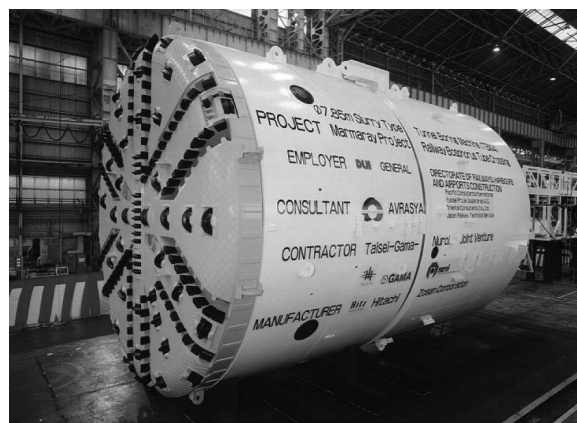
(1) 工法選定

掘削対象が変化の激しい岩盤であり、かつヨーロッパ側で最大 0.6 MPa、アジア側で最大 0.8 MPa の地下水压という条件のもとでの掘削となるため、地盤劣化

区間における切羽崩壊および高水压下での出水リスクが想定された。これらのリスクを回避するとともに、最終的にボスポラス海峡下での沈埋トンネルとの接続を安全に行うために、地山の変化に対しリアルタイムな管理が可能で、止水に対し最も信頼のある泥水式を採用した。しかしトルコにおいてはこれまで泥水式シールド工事の施工実績がなかったため、施工用資機材の調達だけでなく、施工管理技術者や熟練作業員がいないことで非常に苦勞することとなった（トルコは外国からの労働者の入国を厳しく制限している）。

(2) シールド機

岩盤掘削対応として、カッターフェイスをセミドーム型とし、17 インチのディスクカッター 55 個を装備した。また長距離掘削の摩耗対策として、カッターフェイス前面には硬化肉盛溶接と外周部には耐摩耗鋼板による補強を施した（写真－5）。



写真－5 岩盤対応泥水式シールド機

シールド機の製作数については、最終到達部が海峡下でシールド機の回収が不可能であるため、シールド機の残置を基本とせざるを得なかったこと、および全体工程の最適化から、沈埋トンネルを挟んでヨーロッパ側 2 機（TBM2, TBM3）、アジア側 2 機（TBM4, TBM5）の計 4 機を製作した（図－3）。製作は日本で行い、仮組立・工場検査の後、再度分解してトルコまで海上輸送した。

シールド機の主要諸元を表－1 に示す。

表－1 シールド材の主要諸元

項 目	仕 様	備 考
掘削外径	7,930 mm	
前胴外径	7,870 mm	
行動外径	7,850 mm	
機 長	10,550 mm	ヨーロッパ側、テールシール 3 段
	11,000 mm	アジア側、テールシール 4 段
総 推 力	75,000 kN	3,000 kN ジャッキ × 25 本
カッタートルク	10,582～4,767 kN・m	$\alpha = 21.8 \sim 9.85$
カッター回転数	0.5～1.5～4.0 rpm	250 kW インバーターモーター × 8 台

(3) セグメント

セグメントはERQ（発注者要件）とAFTES（フランストンネル地下協会）に準じて設計された。海底下という特殊条件に加え地震国であるトルコにおいて100年の耐用年数を保証する強度、耐久性と止水性能



写真-6 セグメント製作工場

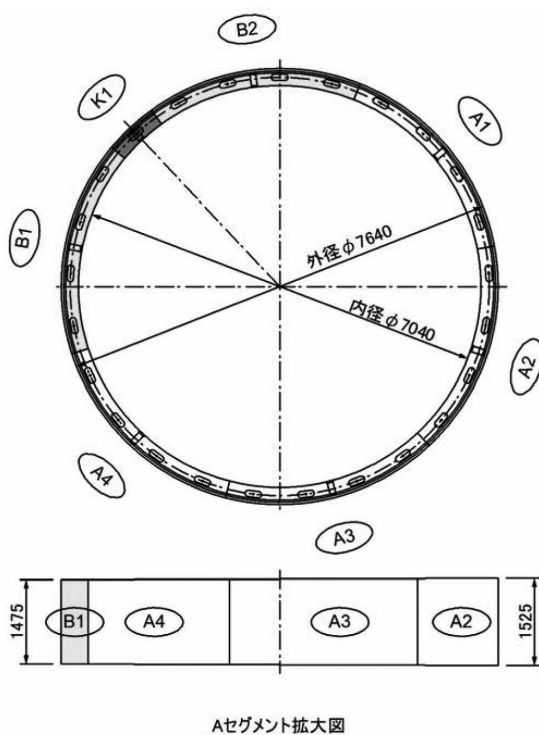


図-5 セグメント標準図

が要求された。そこでセグメントは経済性、長期耐久性、止水性、施工性に優れたRCセグメントを採用した。

現地周辺には本プロジェクトに対応できる大規模なプレキャスト工場がなかったため、施工場所から約40 km離れたゲブゼという町に土地を借り、直営で工場を建設しセグメントを製造した（写真-6）。

(a) RCセグメント

避難連絡路や沈埋トンネルとの接続部などの特殊な部分を除き、全線に渡って部分ほぞ付セグメント（組立時仮ボルト、ガイダンスロッドを併用）とした。これはピース間継手に突合せ継手、リング間継手に部分ほぞ継手を採用し、継手金物を排除した施工性、経済性に富むものである（図-5、写真-7）。また形状はオールテーパーとしている。

セグメントの仕様を表-2に示す。

(b) セグメントシール

シールドトンネルは地下水位以下に構築され、最大0.8 MPa程度の高水圧が作用することが予想された。また施工誤差に加え地震や液状化による変形を許容したうえで100年の止水耐久性を確保するため、セグメントの設計と並行してシール材の検討を行った。

海外で多用され採用実績と長期耐久性に優れた、シール材の弾性反発力に止水効果を期待するガスケットタイプ（材料はEPDM：エチレン・プロピレン・ジェ

表-2 セグメントの仕様

項 目	仕 様	備 考
セグメント形式	RC 平板型	
継手形式	部分ほぞ付き継手	
外 径	7,640 mm	
内 径	7,040 mm	
幅	1,500 mm	
厚 さ	300 mm	
分割数	6分割+K	部分ほぞ継手25か所
Kセグメント形状	軸方向挿入式	



写真-7 セグメント外観

ン・モノマー)を主体に、国内で主流の水膨張による膨張圧に止水効果を期待する水膨張性タイプを併せた複合ガasketを採用した(図-6)。シール材は工場で行われる額縁加工をしたものを現場に搬入し、セグメントに接着した。

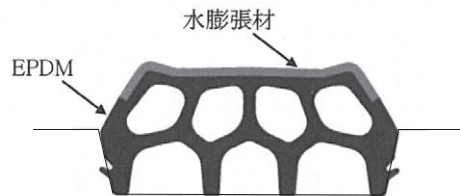


図-6 複合ガasket

4. 施工

(1) 実施工程

各トンネルの実施工程は下記の通りである。なお掘進完了日とは沈埋トンネルに到達した時点であり、途中駅部等に到達しシールド機を移動させた後に再発進した期日は記載していない。また期間には他工種との調整で待機した時期も含んでいる。

① TBM2 (ヨーロッパ側)

掘進延長 3,068 m

掘進開始日 2009年12月31日

掘進完了日 2011年8月8日(19か月)

② TBM3 (ヨーロッパ側)

掘進延長 3,081 m

掘進開始日 2009年12月1日

掘進完了日 2011年1月26日(14か月)

③ TBM4 (アジア側)

掘進延長 4,216 m

掘進開始日 2007年3月26日

掘進完了日 2010年2月17日(35か月)

④ TBM5 (アジア側)

掘進延長 4,187 m

掘進開始日 2007年1月24日

掘進完了日 2010年10月5日(44か月)

これらからわかるように、ヨーロッパ側の掘進開始時期は、発進基地であるイエニカプ駅の埋蔵文化財調査の長期化により予定通り着工できなかったため、アジア側の発進から約3年後となった。そのためにシールド工事の工程は大幅に伸びたが、先行したアジア側の施工実績を分析し、それら後行のヨーロッパ側の施工へ反映する時間を得ることができたため、ヨーロッパ側の施工効率を大幅に向上させることができた(本章(4)節に後述する)。

(2) 掘削対象土質

掘削対象土質はアジア側とヨーロッパ側で大きくは異ならず、今から約2億5千万年前の泥岩・砂岩・頁岩を主体とする堆積層で、岩強度(一軸圧縮強度)は平均で $q_u=80$ MPaかつ亀裂の多い中硬岩クラスであった。

また、トルコは地震国であるため、堆積岩中に火成岩(輝緑岩)が貫入しており、その周辺がマグマによる熱変成・圧力変成を受け粘土や玉石になっている。シールド機はそれらの土層をほぼ水平に掘削していくため、堆積岩層から粘土層または玉石層を通過して火成岩層へ突入、再び粘土層または玉石層を経て堆積岩層に戻るといった流れを何度も繰り返すこととなった。この土層変化は、短い周期では5~10 m、長い周期でも100~200 mで出現し、そのたびごとに切羽の安定はもとより、掘削・破碎された岩ズリを排泥ラインにおいて沈降・閉塞させることなく流体輸送させるため、きめ細やかな泥水管理が要求された。これ以外にも転石や破碎帯にも遭遇し、その対策に多くの時間と労力を費やすこととなった。

(3) 異種トンネルの海底下直接接合

(a) 技術の概要

発進基地から沈埋トンネルの間で、アジア側では渡り線トンネルとウスクダル駅、ヨーロッパ側ではシルケジ駅がシールドトンネルの掘進に先行して施工されたため、4機合計で延べ20回の発進・到達を行った(写真-8, 9)。

そのうち沈埋トンネルとの接続についてはF-PAS工法を採用し、世界で初めて接続立坑無しで異種トンネルの海底下直接接合を実現した。これにより接続立



写真-8 アジア側発進状況(アイリリクチェシュメ)



写真—9 ヨーロッパ側到達状況（シルゲジ駅）

坑築造の省略と沈埋トンネル延長の短縮およびそれに伴う海底掘削土量の削減により、大幅な工期と工事費の縮減を実現した。

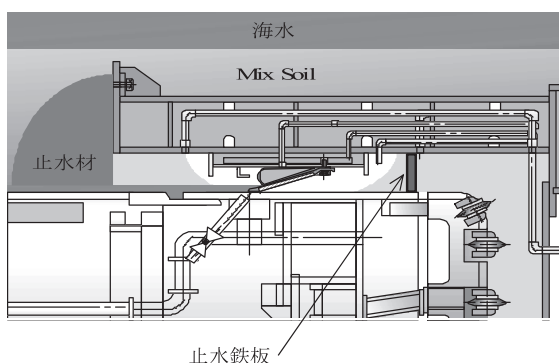
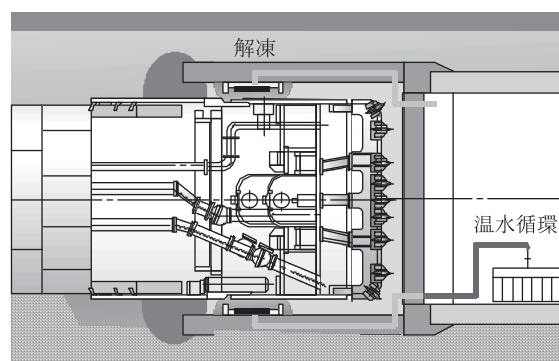
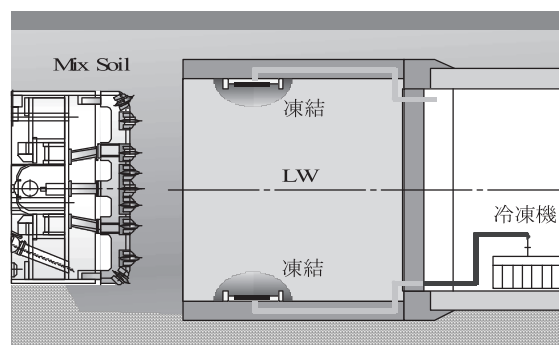
(b) 接合手順

接続立坑を省略するために沈埋トンネル端部に眼鏡状の鋼殻スリーブ管を設置し（写真—10）、シールド機をその中に貫入させることにより接合作業スペースを確保した。異種トンネル接合作業の環境は、スリーブ管内とはいえ海底の人工埋戻し地盤内を通して最大0.6 MPaの水圧がかかるため、十分な止水構造を確保する必要がある。そこでスリーブ管内に止水シール装置としてF-PAS（The Freezing Packing for Seal）機構を設置した。接続立坑が無いために海底下で必要となる作業やリスクを考慮し、シールド機並びにスリーブ管製作・取付時に事前対策を講じることで、海底下での作業を最小化した。



写真—10 鋼殻スリーブ管の設置

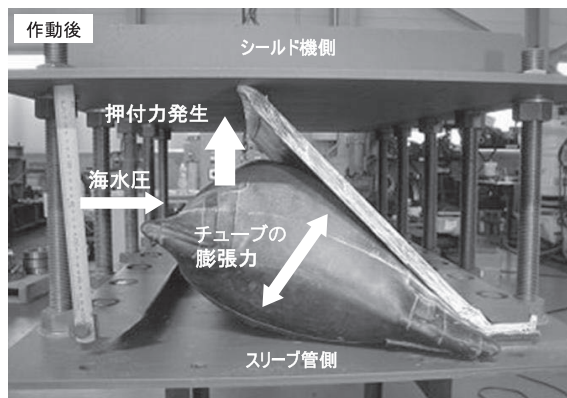
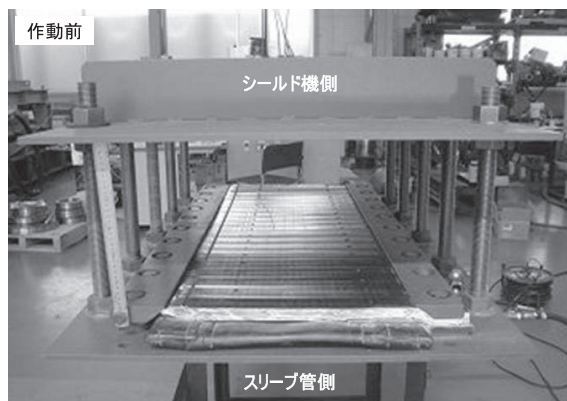
F-PAS工法の施工手順、止水構造を図—7、写真—11に示す。鋼殻スリーブ管内には、凍結・融解後に固体から液体へ変化する特性を有するLW材（セメント・ベントナイトと水ガラスから成る2液性地盤改



図—7 沈埋トンネル接続部での止水手順

良材）を充填しておく。シールド機到達前に止水シール装置周辺に配置された凍結管内を冷媒循環（マイナス25℃の塩化カルシウム水溶液）させることによりLW材をドーナツ状に凍結し、シールド機貫入時の装置の保護を行う。シールド機到達後、温水循環により凍結部を融解・液体化させた後、加圧チューブに注水加圧して止水パッキンを作動させ、シールド機鋼殻にパッキンを密着させる。この時固体から液体に変化したLW材の存在が、鋼殻とパッキン間への掘削岩ズリなどの異物の侵入を防ぐため、止水パッキンのシールド機鋼殻への密着度が高まる。ここまでの1次止水と呼ぶ。

1次止水における止水シールの形状から、水圧のかかる方向に押されれば押されるほど、止水シールがシールド機鋼殻に密着する方向となり、フェール・セーフ機構が確保されている。また止水パッキン稼働後その背面に裏込め注入材を止水注入することにより2次



写真—11 止水パッキン作動状況

止水とし、3次止水としてシールド機チャンバー内の泥水を撤去、大気圧にしたのち、シールド機鋼殻と鋼殻スリーブ管を鉄板にて止水溶接を施した。以上の三重の止水性を確保した後、沈埋トンネルのバルクヘッドと鋼殻を残してシールド機を撤去し、シールドトンネルのRCセグメントと沈埋トンネルのRC躯体を鉄筋コンクリートで接続して、本体止水構造を完成させた(写真—12)。



写真—12 沈埋トンネルとの接続完了

(4) シールド設備の改良

前述の通りヨーロッパ側のシールド機の発進はアジア側の発進から約3年後となった。そこでアジア側の

掘進での問題点を分析し、ヨーロッパ側の施工に反映した。その結果ヨーロッパ側の掘進はアジア側とくらべて約2倍の進捗を上げることができた。

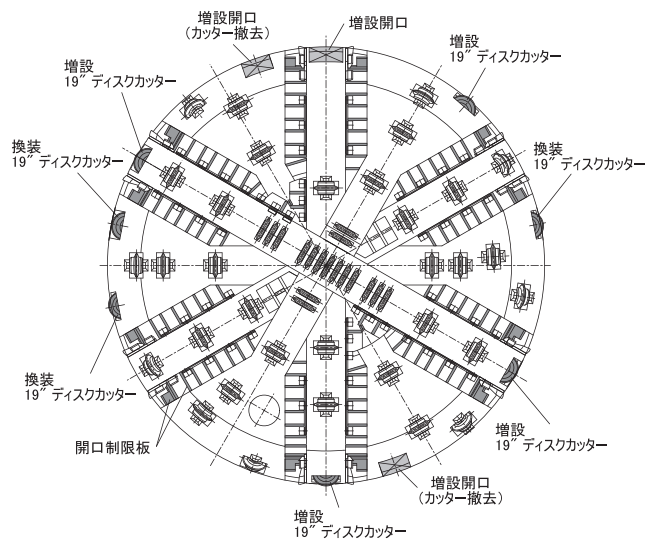
種々の改良項目のうち、ここではシールド設備の改良点について記述する。

(a) シールド機

先行して施工を開始したアジア側では、シールド機のディスクカッターの摩耗・損傷が激しく、その交換は当初予定していた600mに1回という頻度をはるかに上回り、180～200mに1回の頻度で実施した。事前に摩耗対策は施していたが、カッターホルダーを含むカッターフェイス自体の摩耗も激しかったため、途中駅等での到達後の補修・補強にも想定以上に時間を要しただけでなく、緊急を要した場合には、掘進途中のカッター交換と同時に、劣悪な作業環境の中補修・補強作業を実施したこともあった。

また亀裂の多い岩質のため、カッタースリットを通過する想定外の細長い岩ズリによりチャンバーからクラッシャーまでの排泥管閉塞が頻発したため、閉塞解除・復旧作業(フレキシブルホースの破裂と掘削泥水の漏えいなど)により多くの掘進時間を損失した。

そこで以下の対策を実施したことにより、後行のヨーロッパ側ではディスクカッターの交換頻度を300mに1回程度に減らすことができ、またシールド機内での配管閉塞をほぼなくすることができた(図—8)。



図—8 カッターフェイス改造概要図

- ①外周部ディスクカッターの増設とサイズ変更(17→19インチ)
- ②外周部取り込み開口の増設
- ③カッタースリットに開口制限板を取付
- ④バルブ等付属設備を含む排泥ライン内面の平滑化

と曲管の曲率緩和

(b) 流体輸送設備

クラッシャーによる破碎後の礫径をポンプの形状とマッチさせることができず、排泥ポンプのインペラでの閉塞が頻発した（写真—13）。これにより掘削能力の低下や完全閉塞の際の解除作業に多くの時間を費やした。



写真—13 中継ポンプ閉塞状況（インペラ吸込み部）

また掘進速度の向上を試みると、シールド機的能力に対して泥水輸送の能力が不足していることが判明した。これは掘削岩ズリの大きさや、流体輸送における良好な泥水の作成・調整が排泥水の性状と作泥材の品質から難しかったことに起因する。

そこで以下の対策を実施したことにより、後行のヨーロッパ側では排泥ポンプでの閉塞の頻度を1/4程度に、また排泥流量を12→15 m³/minへ増加させることとなり、結果掘進速度を20%程度向上させることができた。

ヨーロッパ側の掘進が始まると、先行するアジア側と合わせて同時に4機のシールド機が掘進することになり、海峡を挟んでアジア側とヨーロッパ側の間で、良質な泥水をバキューム車を使用してやり取りすることもあった。

①クラッシャーの増設（1台→2台直列，写真—14）

②排泥ポンプのインペラ形状の改造

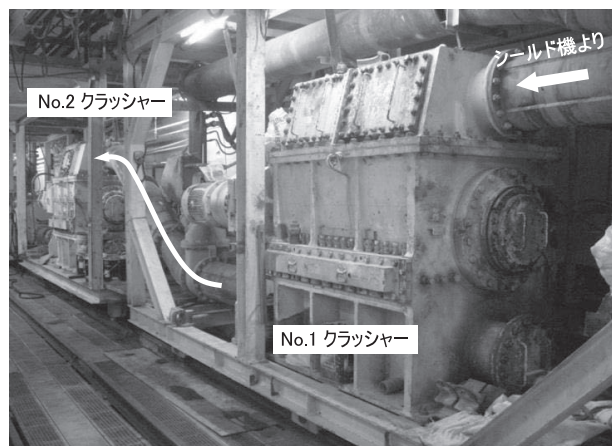
③排泥管の管径変更（10→12インチ）

④排泥中継ポンプの増設

⑤一部の定速ポンプを可変速ポンプへ変更，中間バイパス設備の増設など全体のグレードアップ

(c) 泥水処理設備

岩掘削で発生する鋭角をもつ岩ズリにより想定以上に各部が摩耗し，それらの交換作業のために多くの時



写真—14 クラッシャー2台直列配置

間を費やした。特にサイクロンとふるい網の摩耗対策が必要であった。

また掘削対象土中に粘土等の微粒子が少なく泥水が劣化しやすかったため，泥水の入れ替え頻度が高かったこともあり，フィルタプレスの能力が不足した。そのため泥水調整待ちで掘削が中断することがあった。

さらに掘進速度向上のために排泥流量を増加させたことから，それに応じて泥水処理設備も増強した。

そこで以下の対策を実施したことにより，後行のヨーロッパ側では掘進速度向上のために排泥流量を増加させたにもかかわらず，サイクロンの交換をはじめとする設備の保守や泥水調整による掘進中断をほぼなくすことができた。

①サイクロンの増設（18→21台）

②サイクロンポンプの増設（6→7台）

③振動ふるいのふるい網の材質，形状および内部構造の変更

④フィルタプレス（16,000 L）の増設（2→3基）

⑤余剰泥水槽の増設（200→400 m³）

⑥希釈水槽の増設（200→400 m³）

5. トルコとの文化の相違

トルコはイスラム教国ではあるが世俗主義を標榜しており，特に大都市であるイスタンブールにおいて，日常生活上でイスラム的なしきたりに縛られることはほとんどなかった。しかし宗教的に重要な金曜日のお昼の礼拝には，多くの作業員がモスクへ行き（中には一日5回の礼拝を欠かさない者もいて，トンネル内でも作業を一時中断してメッカの方角にむけて礼拝する），また断食月には日の出から日没まで断食を行い（もちろん作業能率は落ちる），日没後の礼拝が終わるとともに一斉に食事をする（毎日パーティーのような

騒ぎである)という日課が続く。よって24時間作業が続くトンネル工事では、作業員の編成(宗教的行事に対する熱心さにばらつきがある)やシフト時間の調整などを工夫して対応するが、どうしても連続作業が途切れてロスが生じてしまうことになった。また断食月明けの砂糖祭や日本のお盆に相当する犠牲祭という宗教上重要な祭日の前後は作業員を確保することが非常に難しく、工程調整上特に留意する必要があった。

またトルコでは一般的に就労継続性が乏しいとされ、建設工事でもプロジェクトごとに雇用がなされるため、作業員および現地スタッフの会社やプロジェクトに対する忠誠心が欠如しており、賃金の良いプロジェクトがあればためらいなくやめていってしまう。時間をかけて指導して技術を伝達しても、熟練工ほど高収入の他のプロジェクトに流出してしまうため、シールド機、セグメント組立エレクター、流体輸送設備のオペレーターなどのキーパーソン(給与も高い)は常に複数人数用意する必要があった。

これらは文化の相違の一例であるが、地域に根付いてこそ実現可能な土木工事の宿命とはいえ、忍耐強く対処するしかなかった。

6. おわりに

私にとって初めての海外工事であり、かつ当地で初めての泥水式シールド工事を、数々の困難に遭遇しながらもなんとか完了させることができたことに、ホッとしたというのが正直な心境である。文化や国民性の違う人たちと同じ目標にむけて尽力するという、私の

人生において大変貴重な経験を積むことができ、一緒に苦勞していただいたトルコの、そして日本の関係者の皆様に心から感謝いたします。

トルコは世界でも有数の親日国と言われているが、日常生活においてもそれを実感することが多々あった。先達の人々が築いてきた日本とトルコの友好の醸成に、今回のプロジェクトを通じて少しでも貢献できたとすれば、それは至上の喜びである。そしていつの日か、苦楽を共にした仲間たちとこの海峡横断鉄道に乘れることを楽しみにしている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 今石尚, 稲積教彦, 湯上繁信, 安藤啓人: スラリー式 TBM トンネルの施工—シールドトンネル—, 基礎工 (総合土木研究所), Vol.42/No.1, 2014.01
- 2) 今石尚, 稲積教彦, 湯上繁信, 安藤啓人: 沈埋函と TBM の海底下直接接合, 基礎工 (総合土木研究所), Vol.42/No.1, 2014.01
- 3) 今石尚: 海底をわたる風—ボスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事—, コンクリートテクノ (セメント新聞社), Vol.34/No.2, 2015.02

【筆者紹介】

今石 尚 (いまいし たかし)
大成建設㈱
土木本部土木技術部
部長



長光 憲一郎 (ながみつ けんいちろう)
大成建設㈱
土木本部機械部機械技術室
課長

