

# トルコボスポラス海峡横断鉄道トンネルの施工

## シールド工事 沈埋トンネルへの到達

日比谷 穰・稲積 教彦

トルコボスポラス海峡横断鉄道トンネル工事（通称マルマライプロジェクト）は、ボスポラス海峡によって隔てられたイスタンブール市のアジア側とヨーロッパ側を海底トンネルによって結ぶ工事である。

工事は延長 13.6 km のうち、海峡下にトンネルを建設する沈埋トンネル部、4 箇所の駅舎部、各駅舎および沈埋トンネルをつなぐシールドトンネル部と鉄道上下線渡り線部に分けられる。

本報は、シールドトンネル部の建設工事のうち海底下での沈埋トンネルとの接続について報告する。

キーワード：鉄道トンネル、海底トンネル、沈埋トンネル、シールドトンネル、海底下接続、接続部止水装置

### 1. はじめに

ボスポラス海峡はトルコ共和国のイスタンブール市をアジアとヨーロッパに隔て黒海からマルマラ海に至る延長約 30 km の海峡である（写真—1）。

イスタンブール市は、鉄道網が不足しており旅客、物流は自動車に頼らざるを得ない。現在ボスポラス海峡には 2 本の道路橋が架けられているが、東京都とほぼ同じ人口を抱えている現状では、人、物資の輸送に対応しきれず、慢性的な交通渋滞とこれに起因する大気汚染を引き起こしている。

ボスポラス海峡横断鉄道トンネルは、鉄道による交通渋滞の緩和ひいては公害の緩和を目的として建設されるものである。

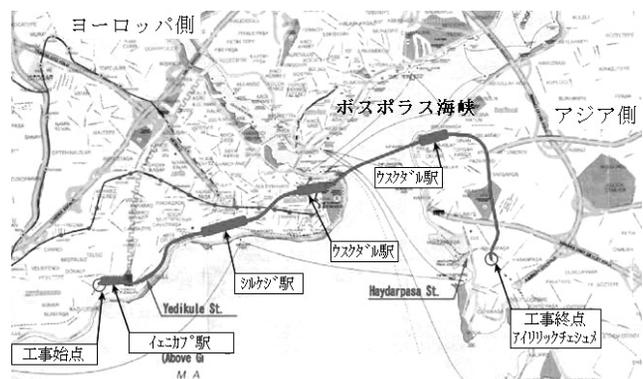


写真—1 ポスポラス海峡

### 2. プロジェクトの概要

プロジェクト全体は「マルマライ・プロジェクト」（トルコ語でマルマラ海+鉄道を表す造語）と呼ばれ、マルマラ海に面する既存鉄道を近代化し、海峡下を海底トンネルで結ぶ全線 76 km に及ぶ鉄道整備プロジェクトである。プロジェクトの発注は大きく 3 つに分かれているが、このうち大成・Gama・Nurol 共同企業体はカズリチェシュメから海峡部を含みアイリリックチェシュメまでの延長 13.6 km（図—1、表—1）の設計・施工を行っている。契約は EPC（Engineering, Procurement, Construction）契約で、設計手法、施工方法及び調達手段の原則は「施主の要求事項」に盛り込まれている。

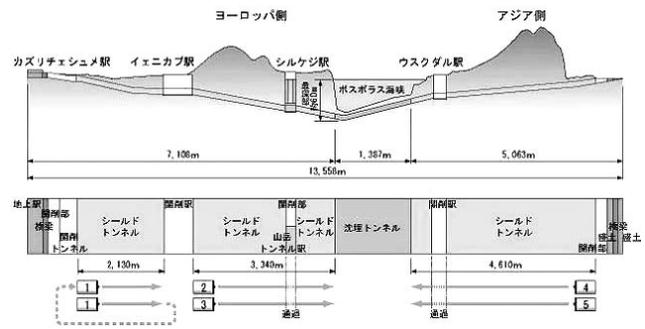
施工区間のうち 11 km 区間にシールド、沈埋、山岳トンネルの各工法でトンネルが建設される。このう



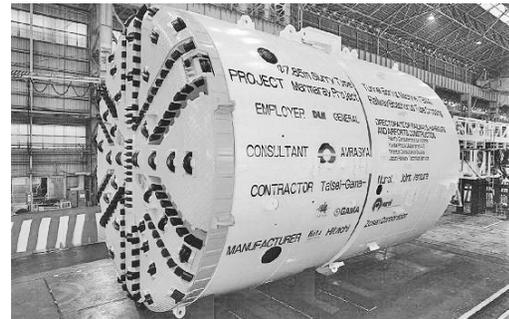
図—1 路線平面図

表一 1 プロジェクトの概要

施主	トルコ共和国／運輸通信省／鉄道・港湾・空港建設総局
施工者	大成・Gama・Nurol共同企業体 (GamaとNurolはトルコ企業)
施主代理人	AVRASYA CONSULTANT JV
資金調達	日本国際協力銀行 (JBIC) , 環境円借款
契約工期	110ヶ月
契約内容	・沈埋トンネル : 1,387m (海峡部)
	・シールドトンネル : 9,360mの複線
	・山岳トンネル : 上下渡り線, 上下線連絡路
	・地下駅舎 : イェニカプ駅, シルケジ駅, ウスクダル駅
	・地上駅舎 : カズリチェシュメ駅
設計条件	・軌道, 橋梁, 換気建屋, 機電設備
	・地震 : モーメントマグニチュード7.5 液状化への対応
	・列車火災 : 熱源エネルギー100 Mw (燃料積載貨車)
・その他 : 水深, 潮流などの現地環境条件を 考慮すること	



図一 2 路線縦断面



写真一 2 泥水式シールドマシン

ち海峡部の沈理工法は施主の基本計画で決定された契約条件であり、設置水深 60 m の世界最大水深の沈埋トンネルとなる。

トンネルのほかに 4 箇所が駅に契約に含まれており、そのうちの 3 駅 (イェニカプ, シルケジ, ウスクダル) は地下駅である。イェニカプ駅, ウスクダル駅は開削工法で、シルケジ駅は開削工法と山岳工法の併用で施工される。イェニカプ駅は沈埋トンネルに向かうシールドトンネルの発進立坑として用いられる。

イスタンブール市は非常に歴史の古い都市であり、イェニカプ駅やシルケジ駅のある歴史地区は世界遺産にも指定されている。このため工事に先立ち埋蔵遺跡調査を行い、文化観光省遺跡調査委員会の結論が出るまで工事の本格着手を待たなければならない。当プロジェクトにおいてもすべての開削範囲において遺跡調査を行っており、本工事開始までに多大な時間を費やしている。

### 3. シールドトンネルの施工

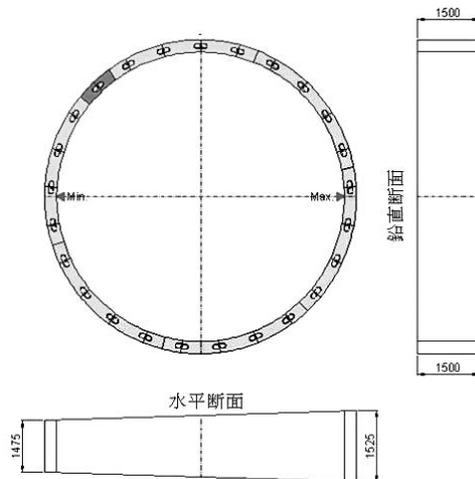
シールドトンネルは、5 台のマシンで総延長 18,720 m (図一 2) の掘削を行う。

イェディクレからイェニカプ駅間においては対象地盤が、砂質土, 粘性土が主体となるため泥土圧式シールドを採用し、1 台のマシン (1 号機) で上下線の掘削を行う。

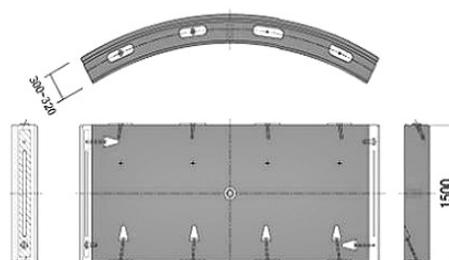
イェニカプ駅から沈埋トンネル間およびアイリクチェシュメから沈埋トンネル間については大半が岩盤であり、高水圧下の施工となるため岩盤対応の泥水式シールド (写真一 2) を採用し、イェニカプ駅から沈埋トンネル間を 2 台 (北側 : 2 号機, 南側 : 3 号機),

アイリクチェシュメから沈埋トンネル間を 2 台 (北側 : 4 号機, 南側 : 5 号機) で掘削を行う。

使用するセグメントは、外径 7,640 ~ 7,680 mm, 内径 7,040 mm, 幅 1,500 mm, 7 分割, K セグメント軸挿入式, 継手形式はホゾ・ミゾ継手とした (図一 3, 4)。



図一 3 セグメント標準断面図



図一 4 セグメント詳細

また曲線施工、蛇行修正の精度を上げるため、すべてテーパセグメントとした。

#### 4. 沈埋トンネルとの接続 (FPAS 工法)

今回の工事では、海底下で沈埋トンネル端部に直接到達させ、高水圧 (アジア側 0.4 MPa, ヨーロッパ側 0.6 MPa) の下でシールドトンネルと沈埋トンネルの接続を行う。このため到達の工法として、高水圧下でも安全かつ確実な止水性を保てる FPAS (The Freezing Packing for Seal) 工法を採用した。

FPAS 工法は、一般的には到達立坑側の坑口部に鋼芯入りのゴムパッキン、加圧チューブ及び凍結、解凍用の配管を収納した止水装置 (図-5) を事前に組み込み、坑口部を装置ごと充填材にて充填したのち、到達直前に止水装置周辺の充填材を凍結、到達後に解凍することによって装置周辺の充填材が流動化をおこさせ、パッキン背面の加圧チューブを膨らませることによってパッキンがシールドマシン方向に開き、スキンプレートに接することで止水を行うものである。

充填材には凍結と解凍を行うことによって、流動化する性質のある水ガラス系の注入材料を使用する。

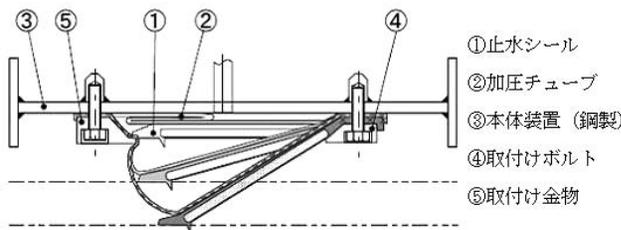


図-5 FPAS 装置

今回の施工に当っては、シールドマシン到達用に端部の沈埋函に設けられたスリーブ管内に FPAS 装置を組み込み、LW にて充填した後に沈設を行った (写真-3, 図-6)。

以下に既に到達した 4 号機で実際に行った FPAS 工法の施工手順を報告する。

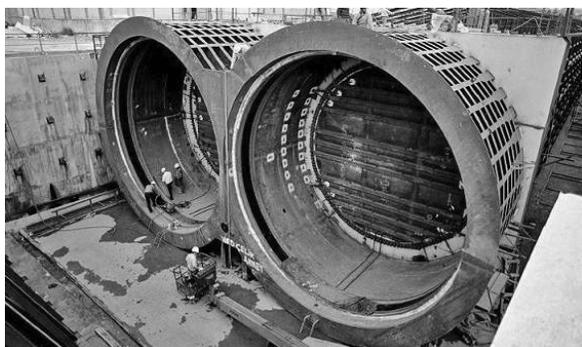


写真-3 スリーブ管

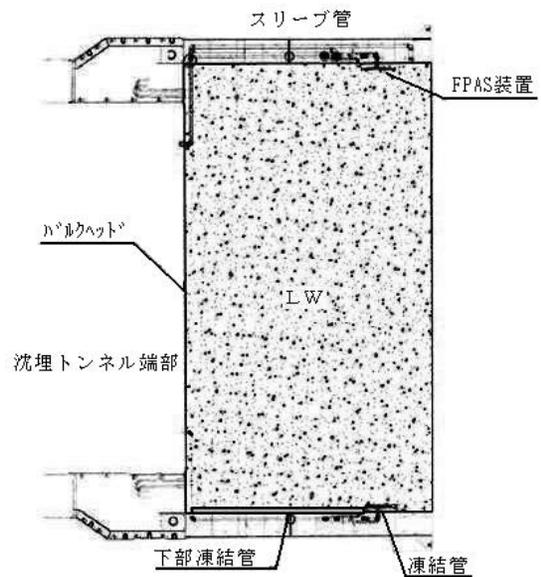


図-6 スリーブ管断面図 (LW 充填後)

##### (1) 凍結

凍結用の機器を沈埋トンネルに設けられているアクセスシャフトから沈埋トンネル内に投入し、既に取り付けられている凍結配管及び測温素子に接続する。

到達にあわせて事前に FPAS 装置内に組み込まれた凍結管に約  $-25^{\circ}\text{C}$  に冷やした不凍液 (ブライン: 塩化カルシウム溶液) を循環させ装置周辺部及びスリーブ管下端部を凍結させる。スリーブ管下端部は、解凍し流動化した LW を効率よく切羽側に取り除くためのラインを確保するために行う (図-7)。

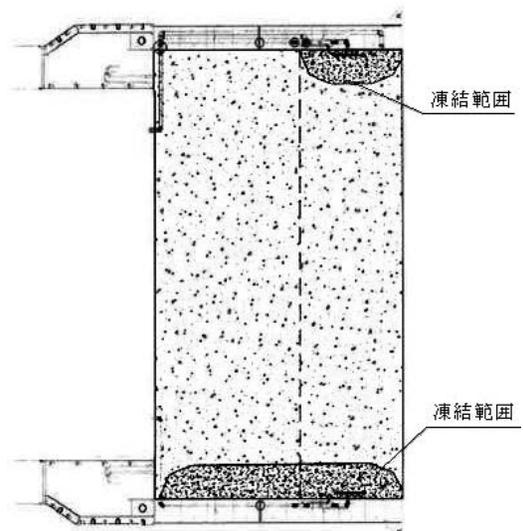


図-7 凍結範囲

温度をモニタリングしながら、測温素子の位置で  $-2^{\circ}\text{C}$  になるまでブラインの循環を行い、温度が  $-2^{\circ}\text{C}$  に達した後は、到達まで凍結維持運転を続ける (図-8)。

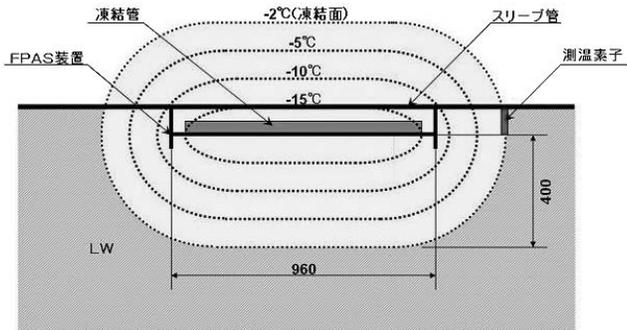


図-8 温度分布図

(2) 解凍, パッキン作動

所定の位置まで掘進を行った後, FPAS 装置周辺の LW を流動化させるために凍結管に約 60℃ の温水を循環させ解凍を行う。

解凍後に加圧チューブに水を送り込み膨らませることで流動化した LW が押しつけられ, 収納されたパッキンがシールドマシンスキンプレートに向かい開いていく (写真-4, 5)。チューブが膨らんで LW を押しつけるため切羽水圧が上昇するが, マシン側よりチャンパー内の泥水を抜くことで, 切羽水圧を自然水圧より 0.01 ~ 0.02 MPa 程度低い状態に保ちながら, 所定量まで注水を継続する。



写真-4 パッキン作動前

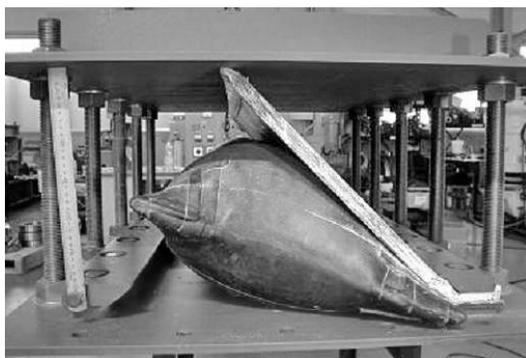


写真-5 パッキン作動後

加圧チューブ内に所定の量を注水するとパッキンがシールドマシンに押し付けられるので, 止水状況の確認のために, 切羽水圧を徐々に下げていく。切羽水圧が下がるとパッキンの内外に圧力差が生じ, よりパッ

キンをマシンに押し付けて止水性が向上していく。

切羽水圧を下げた後, 切羽水圧が復旧しなければ止水完了となるが, 今回はさらに止水を確実にするために, シールドマシン機内より裏込め注入を行いスリーブ管とシールドマシン間のボイドを充填した (図-9)。

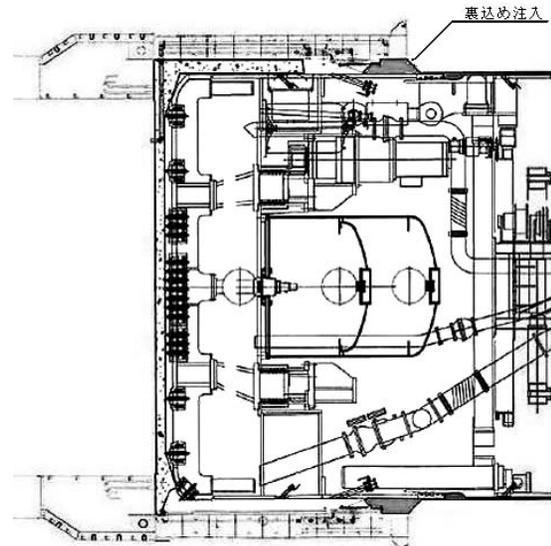


図-9 裏込め注入 (パッキン背面)

(3) 止水プレート取付け

ボイドへの裏込め注入後, 切羽水圧をモニターしながら 1 日養生を行い, 切羽水圧の上昇が無いことを確認した上でマンロックを開けチャンパー内の残りの泥水を排水し, 止水鉄板の取付けを行う (図-10, 11)。

FPAS 工法はあくまでも仮止水であるため, FPAS による止水完了後, シールドマシンスキンプレートと

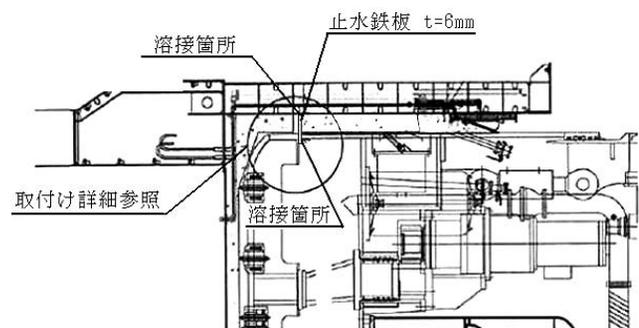


図-10 止水鉄板取付け位置

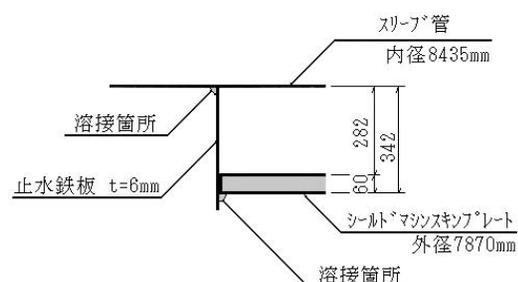


図-11 止水鉄板取付け詳細

スリーブ管を鉄板にて接続し、全周溶接で本止水を行う。

止水鉄板は、50分割した厚さ6mmの鉄板をシールドマシン前胴とカッターヘッドの間隙よりスリーブ管まで差込み順次溶接していく。

止水鉄板の溶接完了後、鉄板背面からパッキンの間隙間にセメントミルクを充填し、硬化後に加圧チューブ内の水を裏込め注入材にて置換して全ての作業が終了となる。

この後、シールドマシンの解体、沈埋トンネルのバルクヘッド解体を行い、トンネルの貫通となる。

今回の4号機の接続工事においては、上記の手順通り作業を実施し、到達から止水鉄板取付け完了までの約20日間、海底下40mでの接続作業を出水もなく安全に終わらせることができた。

その後、完全に止水された状態で、シールドマシン及び沈埋トンネルのバルクヘッドの解体を行い、アジア側のシールドトンネルと沈埋トンネルは貫通した(写真—6)。



写真—6 トンネル接続部(覆工終了後)

## 5. おわりに

本稿作成時点(2010年10月)での各工事の進捗は、以下の通りである。沈埋トンネルは11函すべて沈設、埋め戻し完了、シールドトンネルはヨーロッパ側の1号機は700m、同2号機は2,080m、同3号機は2,200m掘進中、アジア側の5号機は現在沈埋トンネルへの接続手前で到達掘進を行っているところである。

現在も遺跡調査で遅れている箇所があるが、来年の春には3号機も沈埋トンネルに到達し、アジアとヨーロッパがトンネルで結ばれる予定である。

今後もヨーロッパ側でさらに深い位置での沈埋トンネルとの接続が残っているが、今回の実績を基に無事トンネルの貫通を目指す所存である。

最後に本プロジェクトの設計ならびに施工に関して多大なるご指導を頂いている方々に誌面をかりてお礼を申し上げます。

JCMA

### [筆者紹介]

日比谷 穰(ひびや ゆたか)

大成建設㈱

トルコボスボラス海峡横断鉄道建設工事作業所  
作業所長(シールドトンネル担当)



稲積 教彦(いなづみ のりひこ)

大成建設㈱

工事課長

