

トルコボスポラス海峡横断鉄道トンネルの施工 沈埋トンネル部基礎地盤水中均しロボット

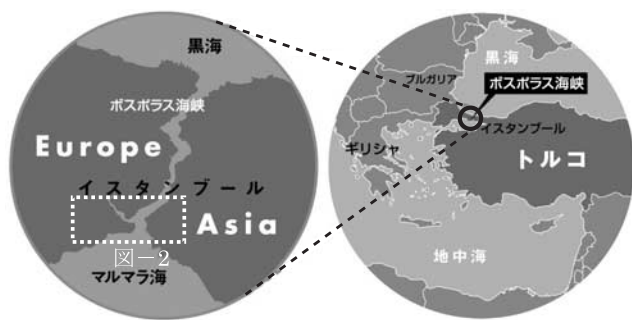
小山文男・橋本敦史・村上道隆

トルコボスポラス海峡トンネル横断鉄道トンネル工事（通称マルマライプロジェクト）は、イスタンブール市をヨーロッパ側とアジア側に隔てるボスポラス海峡下を海底トンネルで接続する工事である。工事は延長 13.6 km の区間のうち、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、駅舎間および沈埋トンネルを接続するシールドトンネル部と鉄道上下渡り線部に分けられる。本報では沈埋トンネル部の建設工事のうち、ドライドックで建設された函体（延長 135 m）を海底に精度よく設置するための基礎地盤（厚み 80 cm）を、平坦に敷き均すために本工事で新たに製作した遠隔操作による水中均しロボットの構造や実施精度について報告する。

キーワード：鉄道トンネル、海底トンネル、沈埋トンネル、沈埋函、基礎砕石マウンド、水中均しロボット、均し機械

1. はじめに

ボスポラス海峡は、トルコ共和国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（図—1）。イスタンブール市では鉄道網の不足から、旅客・物流は自動車に頼らざるを得ず、慢性的交通渋滞と大気汚染を引き起こしている。ボスポラス海峡横断トンネルは、鉄道による交通渋滞緩和ひいては公害緩和を目的として建設されるものである。



図—1 ボスポラス海峡位置図

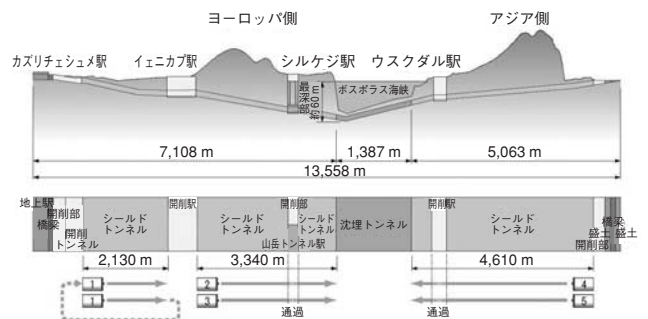
2. プロジェクトの概要

プロジェクト全体は「マルマライ」（「マルマラ海＋鉄道」を表す）と呼ばれ、マルマラ海沿いの鉄道を近代化し、海峡下をトンネルで結ぶ全長 76 km の鉄道

整備計画である。大成・Gama・Nurol 共同企業体は、このうちカズリチェシュメから海峡部を含みアイリリクチェシュメまで延長 13.6 km（図—2、3、表—1）の設計・施工を行っている。契約は EPC（Engineering, Procurement, Construction）契約で、設計手法や施



図—2 路線平面図（図—1 点線部）



図—3 路線縦断模式図

表一 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 CONSULT JV
契約金額	1.023 億円 (円建て)
資金調達	日本国際協力銀行 (JBIC), 環境円借款
契約工期	56 ヶ月 (埋蔵遺跡調査長期化のため, 工期延伸の予定)
契約内容	・沈埋トンネル : 1,387 m (海峡部)
	・シールドトンネル: 9,360 m 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 : カズリチェシメメ駅
	・軌道, 橋梁, 換気建屋, 機電設備
設計条件	・埋蔵遺跡調査 (これに起因する工事遅延は施主による補償の対象)
	・地震 : モーメントマグニチュード 7.5, 液状化への対処
	・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のこと。

工方法およ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。このうち, 海峡部の沈埋工法採用は, 施主の基本計画で決定された契約条件である。設置水深は 60 m に達し, 世界最大水深の沈埋トンネルとなる。

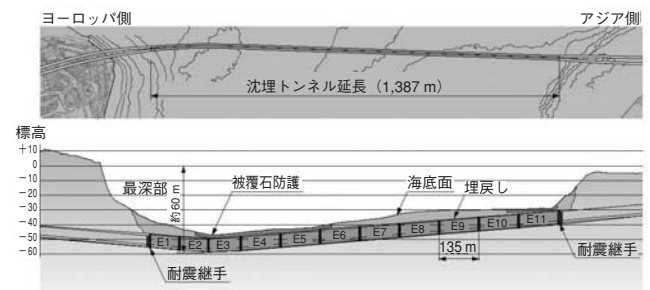
世界遺産に指定されたイスタンブール市では埋蔵遺跡調査は規則であり, 文化観光省歴史保全委員会の結論が出るまで工事の本格着手を待たなければならない。このため, すべての開削範囲について遺跡調査を行っており, 本工事開始までに多大な時間を費やしている。

トンネルのほか, 4 箇所の駅が契約に含まれており, そのうち 3 駅 (イェニカプ, シルケジ, ウスクダル) が地下駅である。イェニカプ駅, ウスクダル駅は開削工法にて, 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 2 本の発進立坑として用いられる。

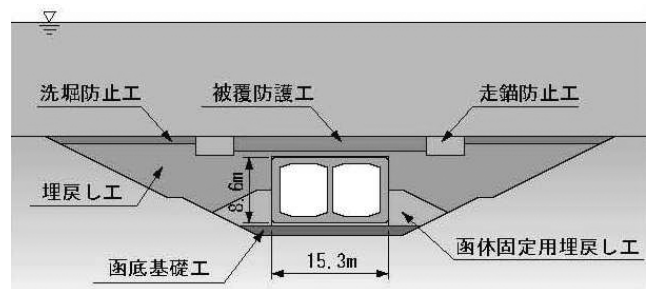
3. 沈埋トンネルの施工

沈埋トンネルは図一 4 に示すように最大長さ 135 m の RC 構造函体 11 函から成り, 断面は 2 連の矩形で

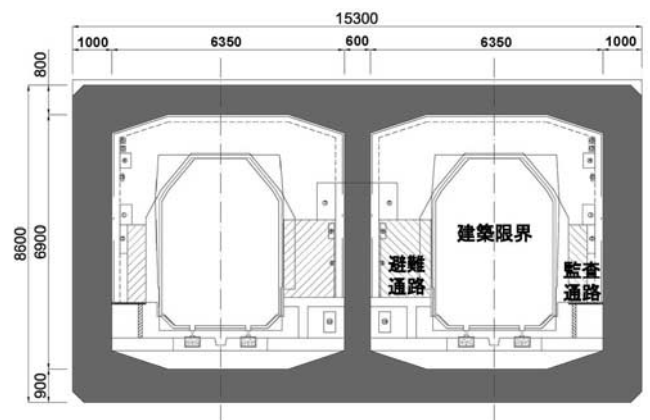
ある (図一 5)。内空は, 鉄道建築限界・監査通路・避難通路および耐火被覆を包含し, さらに函体の設置誤差として 10 ~ 15 cm を含んでいる (図一 6)。



図一 4 沈埋トンネル平面・縦断面



図一 5 沈埋トンネル横断面

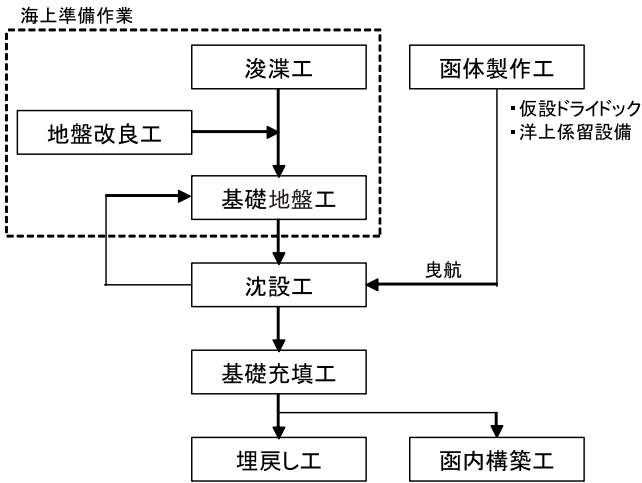


図一 6 トンネル内空標準図

函体は海峡部から約 40 km 離れた地点に新たに建設された仮設ドライドックおよび洋上係留設備で製作される。製作完了後は海峡部までタグボートで浮上曳航し沈設する。沈設後は函体底面と函底基礎工間の間隙を充填 (基礎充填工) した後に, 函体外周を所定の高さまで砕石材で埋め戻す。図一 7 に函体製作から沈設, 埋戻しまでのフローを示す。

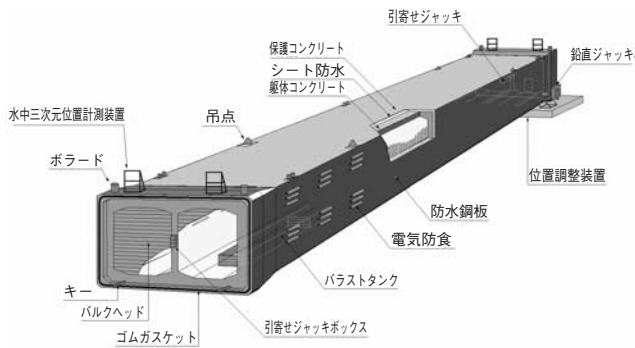
(1) 函体製作

函体の概観を図一 8 に示す。函体の側面・底面は鋼板で覆われ, 流電陽極式電気防食が施されている。



図一七 沈埋トンネル施工フロー

頂面はシート防水を行った後、コンクリートで被覆防護している。躯体コンクリート（設計基準強度 40 MPa）には、初期ひび割れ防止を目的に中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュを合わせて用い、耐久性向上のためシリカフェームを添加している。



図一八 函体鳥瞰図

函体の製作ヤードは仮設ドライドック（写真一）と浮上構築のための洋上係留設備（写真二）から成



写真一 仮設ドライドックでの函体構築



写真二 洋上係留設備での函体構築

る。仮設ドライドックは近接する 2 地点に新設築造し、それぞれのドライドックで函体を同時に 2 函、合計 4 函製作できる。函体製作は第一ステップとして、ドライドック内で端部鋼殻、防水鋼板および躯体底版と下部の壁半分を構築する。第二ステップの構築はこの状態でドライドックに海水を注水して函体を浮上させ、洋上係留設備に函体を移動した後に引き続き残りの壁上部半分と頂版の構築を行う。この 2 ステップの構築方法は、ドライドックの使用効率を上げ、製作工程の促進を目的として採用した手順である。

(2) 海上準備作業

函体の製作と並行して、ボスポラス海峡の函体沈設地点では浚渫・地盤改良・基礎砕石などの準備作業を行う。

トルコは地震国であり、1999 年のコジャエリ地震ではイスタンブールでも被害が発生した。沈埋トンネルは土砂堆積区間に設置されるため、地震時の液状化対策として液状化が懸念される E8～E11 函体にかけての基礎地盤に密度増大工法（Compaction Pile Grout）による地盤改良を施した。

また、函底基礎工の施工は水深が深く潮流も早いため、潜水夫による基礎砕石均し作業は危険かつ非効率である。このため水中ロボットにより施工する。これは水中ロボットを基礎地盤面に直置きし、海上からロボットを遠隔操作して基礎地盤表面を均す工法である（4. で詳述する）。

(3) 曳航・沈設

函体製作完了後、双胴船タイプの沈設作業船に函体を抱き込み、図一 9 に示す沈埋函最終艀装海域までタグボートで曳航し係留を行う。この艀装海域は沈設に必要な函内・函外仮設備作業を実施する期間中に静

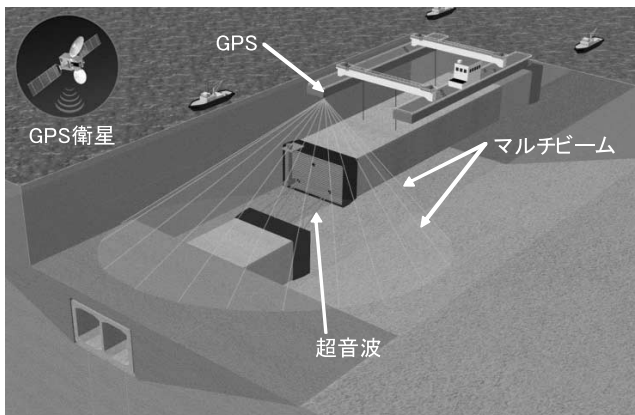
穏な状態を保つことができるように島の背後静穏海域を設定した。



図一〇 沈埋函の曳航ルート

積装完了後に函体は前方を2隻、後方を1隻のタグボートで沈埋函沈設海域まで約28 kmを曳航される。曳航開始から沈設・水圧接合完了までは2日間を要する。沈設の実施可能条件は、海面から水深15 mまでの平均潮流速度が3ノット以下と設定している。このため、曳航・沈設する2日間の潮流速度およびその変化を精度よく予測することが沈設の成否に重要なポイントとなる。これを実現するために2年間にわたるボスボラス海峡の潮流観測データと黒海からマルマラ海までの広範囲な気象データを収集、回帰分析を行った。これにシミュレーション解析技術を取り入れ、現時点の気象海象データから沈設に要する48時間の潮流変化を予測するシステムを構築し運用している^{1), 2)}。予報的中確率は90%程度である。

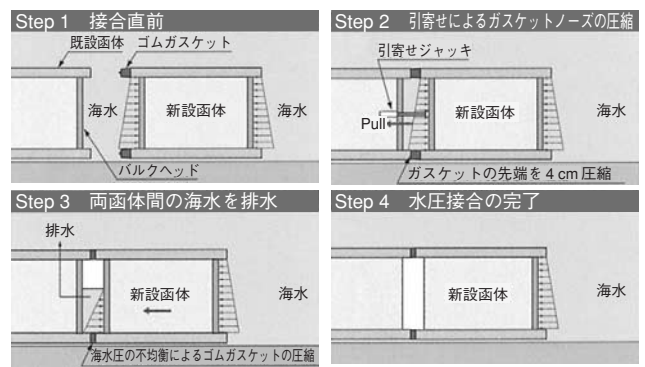
沈設は、沈設作業船に設置されたGPSにより作業船の正確な位置を把握し、マルチビームにより函体位



図一〇 沈設時モニタリング概念図

置および海底地形を監視しながら進める(図一〇)。最終的な函体間接合の段階では、両函体の相対する端面に設置された超音波式距離測定センサを用いて両函体の離隔距離、軸ずれ、方向ずれを計測し位置修正を行いながら着底させる。

函体を所定の位置に設置した後、図一〇に示す手順で接合を行う。まず既沈設函体側からジャッキのロットを沈設函体に挿入し、引寄せジャッキを用いて函体を引寄せさせる。その後、両端面バルクヘッド内の海水を排水し、海水圧の不均衡によるゴムガスケットの圧縮、止水作用により沈設函体を既沈設函体に接合させる。



図一一 函体接合手順

(4) 基礎充填工・函内構築工・埋戻し工

函体の沈設完了後は、1函毎に函体底面と函底基礎工の間隙(約45 cm)に函体内から二液混合のモルタル材を充填する。

函内構築は函体周囲の埋戻しが完了し、地盤の変位が収まったことを確認した後、函体間の継ぎ手の構築を実施し、その後順次その他設備の構築を進めていく。

埋戻しは、埋戻し材投入による函体への衝撃や移動を防ぐためトレミー管を用いて行われる。なお、シー



図一二 アジア側沈埋・シールドトンネル接続部付近模式図

ルドトンネルの接合・貫通までの期間は、E11 函体のアジア側端部に設置した仮設シャフトより資機材の搬入出、換気、人員の出入りを行う。図—12 にアジア側における沈埋トンネルとシールドトンネル接合部付近の模式図を示す。

4. 基礎地盤均しロボット (System of Underwater Grading: SUG)

(1) 要求仕様

函体を設置する函底基礎工は、浚渫床付け面上に厚さ 80 cm の基礎碎石層 (粒径: 0 ~ 200 mm) が施工される。函体はこの基礎碎石上に直接設置されず、函体端面下部に取り付けられているレベル調整用の鉛直ジャッキとその反力架台を用いて、基礎碎石面と函体底面間には 45 cm の間隙が生じるように考慮されている。この間隙には、二液性モルタルが函体内部の充填用パイプを通して充填される。基礎地盤面の精度は、床付け浚渫の精度 ± 40 cm, モルタルの充填性および鉛直ジャッキのストローク ± 20 cm を考慮し、± 20 cm に決定した。

SUG は、新規に開発された碎石投入管理プログラムと連動しており、これにより事前に決定された碎石の投入間隔と投入量により、作業船のトレミー管から投入された碎石を規定の精度で効率的に仕上げることを目的として設計製作された水中地盤均しロボットである。機械の要求仕様を表—2 に示す。

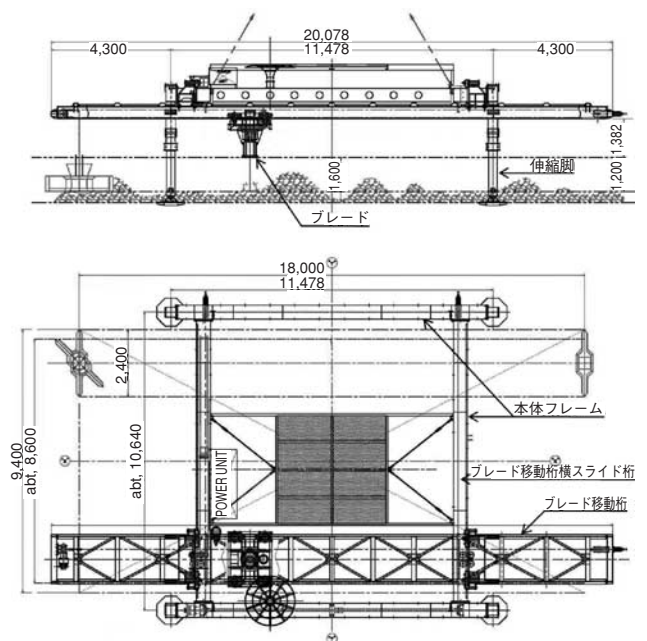
表—2 SUG 要求仕様

①設計水深	60 m
②設計潮流	4 ノット
③均し精度	± 20 cm
④均し面積	155 m ² (1 設置あたり)
⑤制限重量	30 t 以下 (使用起重機船能力)
⑥施工性	補助機械が不要な自己完結型

(2) SUG の構造

SUG の構造と仕様を図—13、表—3 に示す。SUG は本体フレーム (長さ約 11.5 m, 幅約 11 m) と 1.6 m 伸縮できる 4 本の脚で構成され、本体フレームは碎石を敷き均すブレード (均し版) が取り付けられた移動桁を持つ。上記要求仕様の中で最大の拘束条件は、機械重量を 30 t 以下にすることであった。重量 30 t 以下で最も効率的な均し版の構造を検討した結果、水平均し版方式を採用した。ブレードの移動は、路線がアジア側からヨーロッパ側に向けて約 1.7% の勾配で下がっていくため、路線直角方向と路線方向にブレード

を移動できるようにブレードを移動させる桁 (ブレード移動桁: 路線直角方向 18 m の移動用) とブレード移動桁を路線方向に移動させる桁 (ブレード移動桁横スライド桁: 路線方向 7 m の移動用) の 2 段桁方式を採用した。さらに、ブレード移動桁上をブレードが往復で均し作業ができるようにブレードには旋回機能 (± 135°) を持たせた。均し作業は、均しムラが生じないように隣り合う均し箇所ではブレード (均し幅 2.4 m) を 0.6 m ラップしながら移動する。また、路線勾配を考慮し、ブレードのレベルを階段状に下げながら施工する。ブレードの詳細仕様に関しては、上記施工方法の実証実験を行い決定した。この均し方式の



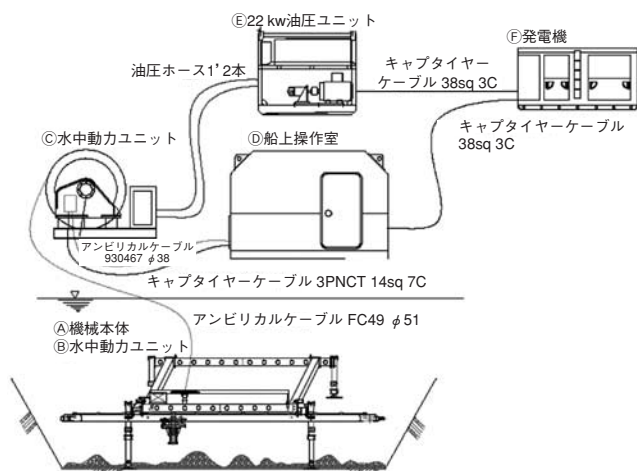
図—13 SUG の構造

表—3 SUG 仕様

外形寸法	20 m (長さ) × 12.2 m (幅) × 4.4 m (高さ)
重量	気中重量 30 t
機械設置圧	9.5 t/m ² (7.8 t/脚)
ブレード移動距離	18 m (路線直角方向: 移動桁上のブレード移動量)
ブレード移動桁移動距離	7 m (路線方向: ブレード移動桁の横スライド量)
ブレード伸縮長さ	1.2 m (上下伸縮量)
ブレード旋回角度	± 135 度
ブレードサイズ	2.4 m (均し幅) × 0.6 m (厚み) × 0.55 m (高さ)
SUG 本体脚伸縮長さ	1.6 m
ブレード走行速度	14 m/min
横スライド桁走行速度	14 m/min
使用環境条件	0 ~ 40 °C (気温), 10 ~ 35 °C (水温)
水中油圧ユニット	30 KW, 吐出量 77 ℓ/min, システム作動圧力 180 kg/cm ²
運転制御方式	PLC 制御による全遠隔操作方式

最大の利点はブレードが水平レベルに移動し均すため、均し精度が確保しやすいことである。

駆動源は、作業船からアンビリアルケーブルで440V電源を供給し、水中油圧ユニットを作動させて、油圧アクチュエータを比例制御バルブでスピード制御を行うシステムである。機械制御システムは、作業船に配置したコントロールバン（船上操作室）とSUGをアンビリアルケーブルで接続し、データリンク通信により各センサからのデータをテレビモニタ及びコンピュータグラフィック画面を見ながら船上操作室ジョイスティックを動かすことで、油圧アクチュエータのスピードを制御して行う（図—14、表—4）。また、水中TVシステムにより操作状況を船上操作室のTVモニターで監視する事ができる。



図—14 SUG 全体システム

表—4 SUG 構成機器

A 機械本体	B 水中動力ユニット
①本体フレーム	①水中油圧ユニット
②ブレード移動桁駆動装置	②油圧比例切替バルブ
③ブレード駆動装置	③油圧リザーブタンク
④上下可動脚	C アンビリアル設備
⑤反射板	①アンビリアルケーブル
⑥油圧アクチュエーター	②アンビリアルウインチ
⑦センサー	D 船上操作室
⑧油圧ホース、配管	①配電盤
⑨電気配線ケーブル	②制御コンソール盤
⑩テレメトリー装置	③モニターパネル
E 油圧ユニット	F 発電機
	④ジョイスティックスタンド

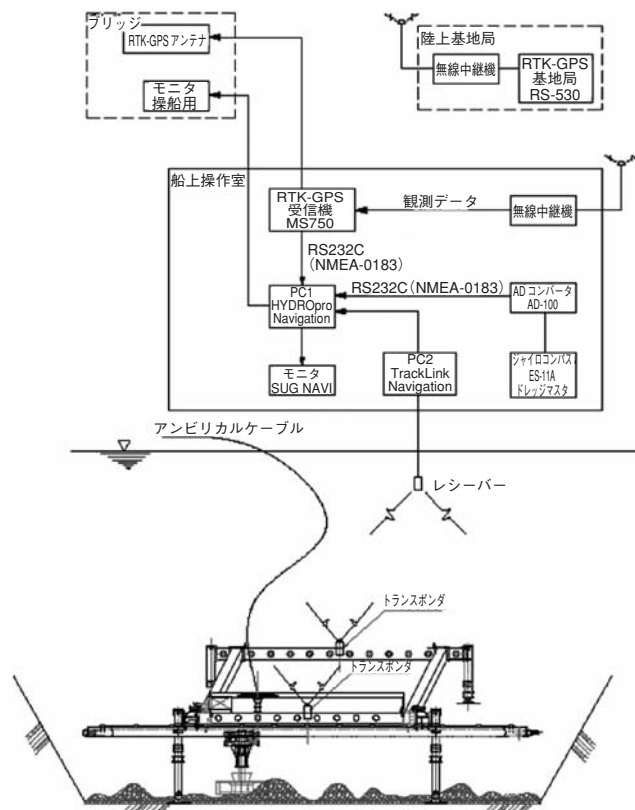
(3) SUG の水中位置計測システム

SUGは作業船のクレーンを用いて均しが完了していない砕石上に吊り降ろされ（写真—3）、伸縮脚により水平レベルの調整が行われる。SUGが設置された場所でSUG本体の位置移動をせずに均し作業がで

きる面積は約155m²である。したがって、1函体あたり約2,500m²の基礎地盤の均し範囲をSUGは作業船のクレーンを用いて約20回の設置作業が必要になる。このため、SUGの水中での位置計測システムの精度が重要である。SUGの水中位置計測システムは、作業船とSUGをUSBL（Ultra short base line）方式の水中位置測位装置でリアルタイムに計測し、作業船のRTK（Real time kinematic）GPSシステムと一体にしてCRT画面にSUG位置を表示させて設置管理を行うシステムを採用した（図—15）。



写真—3 SUG 設置状況



図—15 SUG 水中位置計測システム

(4) 実証実験

ブレードの詳細を決定するために実施工状況と同様の碎石投入山を陸上に作り、実証実験を行った。今回採用した水平力による均しは、ブレードが押し退ける碎石の厚みが施工能力に大きな影響を与える。したがって、実験は最も効率的な碎石の押し退け厚さ(H)とブレードの進行直角方向とブレード面の傾斜角度(θ)を決定することを目的とした。また、基礎を構成する碎石の粒径が施工に及ぼす影響を確認するために3種類の粒径の碎石(20~40 mm, 50~150 mm, 50~100 mm)を用いて実験を行った。写真—4に実験状況を示す。



写真—4 実証実験状況

実験の結果、碎石粒径50~150 mmでの最適な押し退け厚さHは10 cm、ブレード傾斜角度 θ は 30° であった。さらに上記の条件で、5.6 m × 6.7 mのエリアの均し作業を行い、均し精度と施工能率を測定した。この結果、均し精度は ± 55 mm、施工能率 $130 \text{ m}^2/\text{h}$ であった。

(5) ボスポラスでの実施状況と精度

2007年1月に最初の函体(E11)の均しを開始し、2008年4月末までに6函体の均しが終了した。施工能率は計画を上回る結果が得られている。また、均し精度は目標精度 ± 20 cmを上回る ± 10 cmの精度内で仕上げる事ができている。

5. おわりに

本稿作成時点(2008年4月)で、各工事の進捗状況は以下のとおりである。沈埋トンネルは6函(E6~E11)の沈設が完了し、7函目(E5)を2008年5月末に曳航・沈設予定である。シールドトンネルは、ヨーロッパ側1号機は100 m、アジア側4号機は1,600 m、同5号機は1,300 mを掘進中である。遺跡調査により着工に遅れが生じている区間はあるが、今後も技術的に納得できる成果をイスタンブールに残すべくプロジェクト完遂に専念する所存である。

最後に、本工事の設計ならびに施工に関し多大なるご指導をいただいている方々に、誌面を借りてお礼を申し上げます。

JCMA

《参考文献》

- 1) 織田幸伸・伊藤一教：二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発、沿岸域学会誌(論文), 19 [4], pp.13-24 (2007)
- 2) 織田幸伸・伊藤一教・上野成三・小山文男・栄枝秀樹：ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況予測モデルのシステム化と精度検証、海洋開発論文集, [23], pp.345-350 (2007)

【筆者紹介】



小山 文男 (こやま ふみお)
大成建設
トルコボスポラス海峡横断鉄道建設工事作業所
作業所長(沈埋トンネル担当)



橋本 敦史 (はしもと あつし)
大成建設
課長代理



村上 道隆 (むらかみ みちたか)
アジア海洋
専務取締役