

ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事と情報化施工

ボスポラス海峡の潮流予報システム

伊藤 一教・織田 幸伸

現在、トルコ共和国のイスタンブールでは、ボスポラス海峡横断鉄道トンネルの建設が進められており、海峡横断部には沈埋トンネルが建設された。沈埋トンネルの最大設置水深は60 mと深いこと、ボスポラス海峡の潮流が二層流を形成し、さらに気象変化に伴い急潮流が発生することは、沈埋トンネルの施工にとって厳しい条件であった。沈埋函の沈設には所要時間内の潮流速が設定流速以下でなければならないため、潮流予報システムを開発し施工可否判断に活用した。この潮流予報システムはICTを利用したものであり、本稿ではその内容を報告する。

キーワード：ボスポラス海峡、沈埋トンネル、大水深、急潮流、潮流予報システム

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側とヨーロッパ側に隔て、北の黒海から南のマルマラ海に至る延長30 kmの海峡である(図-1)。

現在のイスタンブールは、東京と同等の人口を抱えながら鉄道網が不足しており、旅客・物流は自ずと自動車に頼らざるを得ない。ボスポラス海峡には2本の道路橋が架けられているが、人・物資の移動が増えている現状に対応しきれず、慢性的な交通渋滞を引き起こしている。ボスポラス海峡横断トンネルは、地球環境にも寄与すべく、排気ガスを伴わない鉄道による交通緩和を目的として建設されるものである。以下、海峡横断区間に建設する沈埋トンネルを中心にその概要を述べ、ICTを利用した情報化技術として実際に用いた「ボスポラス海峡の潮流予報システム」を紹介する。

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、大成・Gama・Nurol共同企業体は海峡横断部を含む延長13.6 kmの鉄道トンネル(図-2,3)を施工している。海峡部に建設される海底トンネルは沈埋トンネルが採用され、アジア側およびヨーロッパ側の陸域ではシールドトンネルが採用された。海峡横断部での沈埋トンネルの採用は、施主の基本計画において決定された工法であり、設置水深は最大60 mに達し、米国のBART(40.5 m)に代わり世界最大水深の沈埋トンネルとなる。ちなみに、我が国における最深の沈埋トンネルは首都高湾岸線の多摩川沈埋トンネルで水深30 mである。



図-1 ボスポラス海峡の位置図



図-2 海峡横断鉄道トンネルの経路図

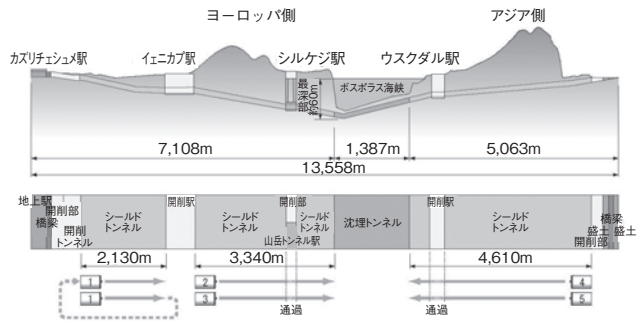


図-3 海峡横断鉄道トンネルの概略断面図

3. 沈埋トンネルの概要

(1) トンネル構造

トンネルは最大長さ 135 m の函体 11 函から成っている (図-4)。断面形状は 2 連の矩形 RC 構造で、幅 15.3 m、高さ 8.6 m である。トンネル基礎は、浚渫床付け面上に基礎碎石を巻き出し、基礎碎石と函体底面の隙間にグラウト注入を行う方式 (函底基礎工) で施工された (図-5)。

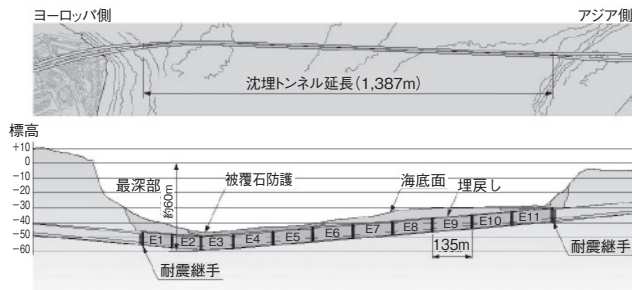


図-4 沈埋トンネルの概略縦断面図

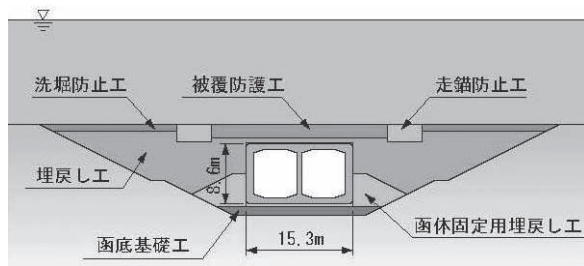


図-5 沈埋トンネルの概略断面図

(2) 沈埋トンネルの施工

函体は、海峡部から南に 40 km 離れた地点に建設したドライドックにて製作した。函体製作と並行して、ボスポラス海峡の函体設置地点では地盤改良・浚渫・基礎碎石敷均しなどの準備作業を行った。水深が深く、潮流も速いことから、潜水士による重作業は危険かつ非効率である。また、時間の制約と均し精度の両立の面でも、潜水士ないし重錘などによる均しはリ

スクが大きいと考えられた。このため、基礎碎石の敷均しは、専用水中均し機 (写真-1) を製作して実施した¹⁾。各函の沈設を終えるごとに函体内部では函底基礎充填、仮設撤去、本設構築を順次実施した。シールドトンネルの接合・貫通までの期間は、E11 函体 (最もアジア側の函体) のアジア側端部上面から水面上に突出させて設置した仮設鋼製シャフト (アクセスシャフト, 図-6) より資機材の搬入出、換気、人員の出入りを行った。函底基礎工においてはトンネルの貫通を待たずに基礎充填できるよう、新規に 2 液混合タイプの充填材を開発した。2 種類の液状材料をアクセスシャフト経由で函内へ配管輸送し、注入位置にて混合・打設した。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た。

沈埋函の沈設作業は、函体を製作ヤードから曳き出し、双胴式の沈設作業船に抱き込み、曳航・沈設を順次行う。曳航開始から沈設終了までは足掛け 2 日間を要し、かつ沈設は潮流速度 1.5 m/s 以下の条件で行う。このため、沈設に先立つ曳航開始時点で沈設時の流速を精度良く予測する必要があった。

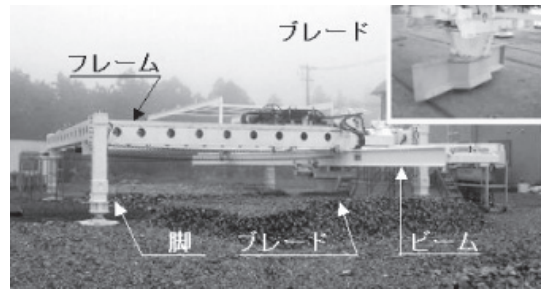


写真-1 水中均し機

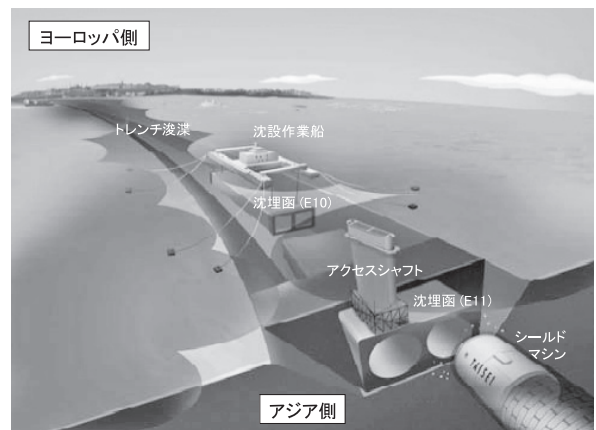


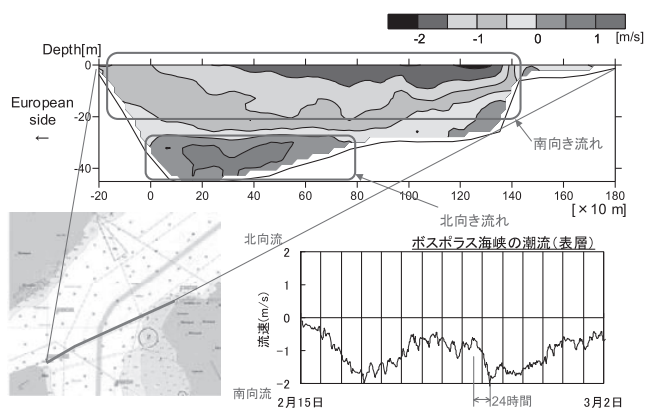
図-6 沈埋トンネルの説明図

4. ボスポラス海峡の海象条件

ボスポラス海峡の流れは、黒海からマルマラ海へ向かう表層流 (南向きの流れ) とマルマラ海から黒海へ

向かう底層流（北向きの流れ）で構成され、上下二層流となっている（図一七）。黒海の海水は周囲の陸域から流れ込む淡水が支配的であり、マルマラ海の海水に比べて密度が低い。通常、黒海の水位はマルマラ海より高いため、黒海の海水はマルマラ海へ向って流れているが、密度が高いマルマラ海の海水は塩水くさびのように海底へ潜り込むように黒海へ向って流れるため、黒海からの海水は表層を流れ、表層と底層で流向が異なる二層流が発生している。

また、潮流観測の結果、ボスポラス海峡の潮汐は小さく、潮流は風や気圧などの気象変化に支配されていた。気象の変化に潮流の速度が応答するため、その変化は速く24時間で1 m/s以上も流速が増大する場合もあった（図一七）。例えば、黒海に北風が吹くと、吹き寄せにより黒海側の海峡の水位が上昇し、マルマラ海に向う表層流が早くなる。さらに、北風が継続するとマルマラ海へ向う流れは、マルマラ海の海水で形成される塩水くさびを押し戻し、二層流は消滅し表層から底層まで2 m/sを越える流れに変化することもあった。



図一七 ボスポラス海峡の断面流況の実測値

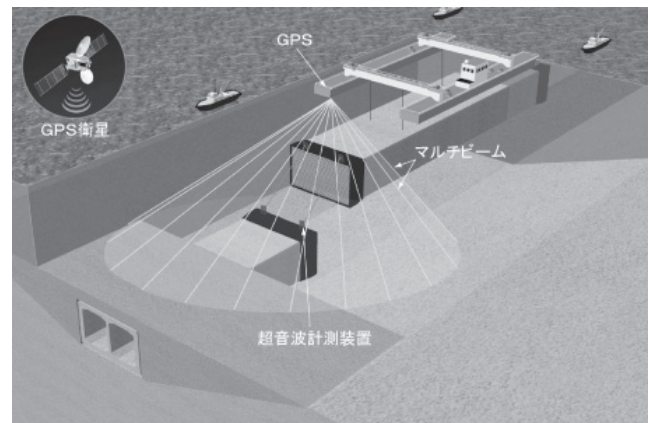
5. 潮流予測システムの概要

(1) 潮流予測の必要性

一般に、急潮流海域における水中構造物設置工は、明石海峡大橋のケーソン設置に代表されるように「潮止まり」に合わせて実施される。これは水中において高い施工精度が求められるだけでなく、流れによる構造物の損傷リスクを回避するためでもある。

図一八のように、既に埋め戻された函体に新しい函体を接合する沈設の場合、施工精度の確保だけでなく衝突などの損傷リスクを回避するためにも、作業の所要時間内の潮流速が常に設定値以下であることは施工の絶対条件であった。しかし、ボスポラス海峡では潮

汐が小さく規則的な潮止まりがなく、海底トンネル建設地点は二層流の影響を最も受けるマルマラ海側（南側）に位置した。さらに、海峡の潮流は短時間に変化する特徴をもっていた。ゆえに、作業開始直前の施工可否判断時において、所要時間内の潮流速を予測し、関係者に配信できる予報システムが必要であった。



図一八 沈設状況説明図

(2) 潮流予測システムの開発

施工に先立ち潮流観測を開始し、潮流・潮汐・風・気圧などのデータを蓄積した。観測結果と3次元流体解析を実施し、ボスポラス海峡の流れのメカニズムとして以下の①、②を解明し、それらの結果から③のモデルを構築した²⁾。

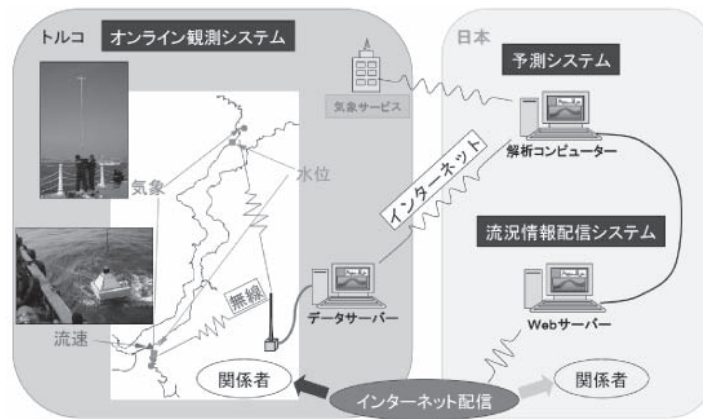
- ① 風や気圧の変化とボスポラス海峡の黒海側およびマルマラ海側の水位変化の関係
- ② ボスポラス海峡の黒海側およびマルマラ海側の水位差と建設地点における潮流の関係
- ③ 建設地点の潮流に及ぼす塩水くさびの挙動

そして、トルコ共和国の気象庁から提供される風や気圧の気象予測値と、現地にてリアルタイムで計測される観測データを入力値とし、ボスポラス海峡の黒海側およびマルマラ海側の水位変化を予測し、その水位差から塩水くさびの挙動を考慮した建設地点の潮流を予測し、配信する予報システムを開発した³⁾。

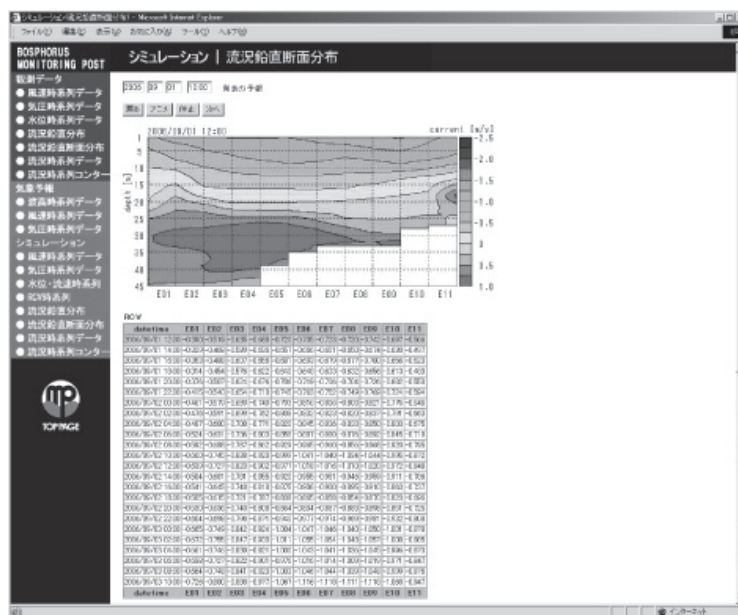
(3) 潮流予報システムの構成

潮流予報システムは、オンライン観測システム、予測システム、流況情報配信システムの3つのシステムからなる（図一九）。各システムの役割は以下の通りである。

オンライン観測システムは、必要な気象や流況データを取得するための各計測装置、それらのデータをリアルタイムに伝送する情報伝達装置及びそれらを記録するためのデータサーバーから構成される。本工事では、トンネル施工位置に流速を計測するための流速計



図一〇 潮流予測システムの構成図



図一〇 インターネット上に配信される情報例

(ADCP) を、黒海側とマルマラ海側の海峡両端部に水位及び気圧・風を計測するための水位計，気圧計，風向風速計をそれぞれ設置した。これらの計測装置による観測データは，無線により工事事務所に設置されたデータサーバーに伝送され記録される。データサーバーはインターネットに接続されており，必要に応じて観測データを随時取得可能となっている。

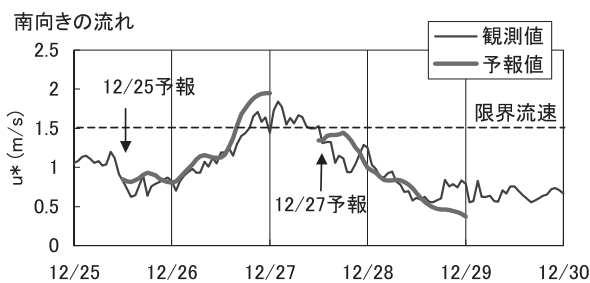
予測システムでは，各計測点で計測された過去の観測値と，将来の気象（風と気圧）の予測値を入力として用いる。トルコ共和国の気象庁から提供される予測値は Eメールにより配信される。予測システムは，インターネット接続された現地のデータサーバーからリアルタイムの観測値を取得し，配信された気象予測と合わせて流況の予測値を計算する。この時，潮流予測モデルには，ボスボラス海峡の流れのメカニズムを解明する際に用いた 3次元流体解析ではなく，長期の観測結果をもとに構築された動的統計解析モデルを適

用した。これは，気象 - 水位 - 流速の関係を 1 : 1 の従属関係として解析するのではなく，風の変化の周波数特性や，水位の上昇速度など入力値の動的な影響を考慮して潮流を算出するモデルである¹⁾。このモデルの利点は，予測値を数分で算出できる演算速度と，観測データの欠損やノイズなど不慮の事態に対しても対応が容易で安定に稼働できるロバスト性であり，1時間毎に最新データを用いた予測値の更新を可能にした。

予測システムにより算出された潮流予測結果は，オンライン接続された流況情報配信システムに転送され，必要な情報形態に適宜加工され，Webサーバーによりインターネットを通じて関係者に配信される（図一〇）。関係者は，インターネットを通じて世界中のどこからでも情報にアクセスでき，情報共有ができる。最新の予測値だけでなく，過去の予測値や観測データも参照可能であり，技術者はこれらのデータを参考に，総合的な施工計画，施工可否判断を行うことができる。

(4) 潮流予測の適用性

図—11に可否判断の実施例を示す。12/26に沈設を想定し、12/25に予測値を配信した。翌日の流速は施工限界流速1.5 m/sを超えることが予測された。そのため、翌日の沈設は延期の判断となる。その後12/27には、翌日の流速が小さくなり施工可能な流速となることが予測されたため、12/28に沈設可能の判断が下される。観測値と予測値を比較すると、これらの予測に基づく可否判断が正しかったことが分かる。予測システムの精度を検証するため、以上のような可否判断を8ヶ月間毎日試行した結果、90%以上の正答率を得た。そして、沈設完了までの25ヶ月間でも86%以上の正答率を得ることができた⁴⁾。



図—11 潮流の実測値と予測値の比較図

6. おわりに

ここで紹介したボスポラス海峡横断鉄道トンネルの沈埋トンネルは2008年9月に全11函の沈設を完了している。本稿では、大水深・急潮流下に建設されたボスポラス海峡の沈埋トンネルのために開発した潮流予測システムを紹介した。従来、沈埋トンネル工法の適用は浅海域・静穏海域という認識が一般的であると考えられる。しかし、潮流予測システムのようなICTを利用した支援技術を用いることで、沈埋トンネルの施工

にとって厳しい大水深・急潮流という条件へ対策を講じることができたことは、沈埋トンネルの適用範囲を拡大させることに寄与したと考える。もちろんボスポラス海峡の沈埋トンネルを完成させるためには、ここでは紹介していない数々の要素技術・支援技術が活用されていることを付記しなければならない。本稿で紹介した内容が、ICT技術の活用により様々な工事における施工の高度化・効率化に寄与することを示す一助になれば幸いである。

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た方々に、紙面を借りてお礼を申し上げます。

JCMA

《参考文献》

- 1) 小山文男, 橋本敦史, 村上道隆: 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, 建設の施工企画, 年6月号, 2008。
- 2) 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), Vol.19, No.4, pp.13-24, 2007。
- 3) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 小山文男, 柴枝秀樹: 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, 第23巻, pp.345-350, 2007。
- 4) 伊藤一教, 織田幸伸, 本田隆英, 小山文男: ボスポラス海峡沈埋トンネルの潮流予測システムの適用性, 土木学会第63回年次学術講演会, Vol.1, No.2, pp.377-378, 2008。

【筆者紹介】

伊藤 一教 (いとう かずのり)
大成建設(株) 技術センター
土木技術研究所 水域・環境研究室
主任研究員



織田 幸伸 (おだ ゆきのぶ)
大成建設(株) 技術センター
土木技術研究所 水域・環境研究室
主任研究員

