

世界最大水深・急潮流下の沈埋トンネル技術 ボスポラス海峡を横断する海底鉄道トンネルの建設

小山 文男¹・花田 幸生²・山口 高弘²・中塚 健司³・木村 政俊⁴

¹正会員 大成建設株式会社 横浜支店 土木部（〒220-0012 横浜市西区みなとみらい3-6-3）

²正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）

³大成建設株式会社 国際支店ボスポラス海峡横断鉄道トンネル工事（トルコ共和国）

⁴大成建設株式会社 土木本部 機械部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）

本トンネル事業は、東京と同等の人口を抱えながらも既存の鉄道網や二本の海峡横断道路橋ではまかないきれないイスタンブールの慢性的交通渋滞緩和と大気汚染の抑制を目的としている。

総延長13.6kmのうち海峡部1.4kmには沈埋トンネルが、陸上部はシールドトンネルが採用された。沈埋トンネルの施工として世界最大水深（－60m）となる本海峡は多数の船舶が行き交う海域で、表層流速が最大3m/sに達し、また表層と下層で異なる方向に流れるという非常に厳しい施工条件であった。このような施工条件下において、安全かつ高精度な施工を行うために以下に示す項目の他、さまざまな課題を解決し沈埋トンネル工事を無事完了させた。

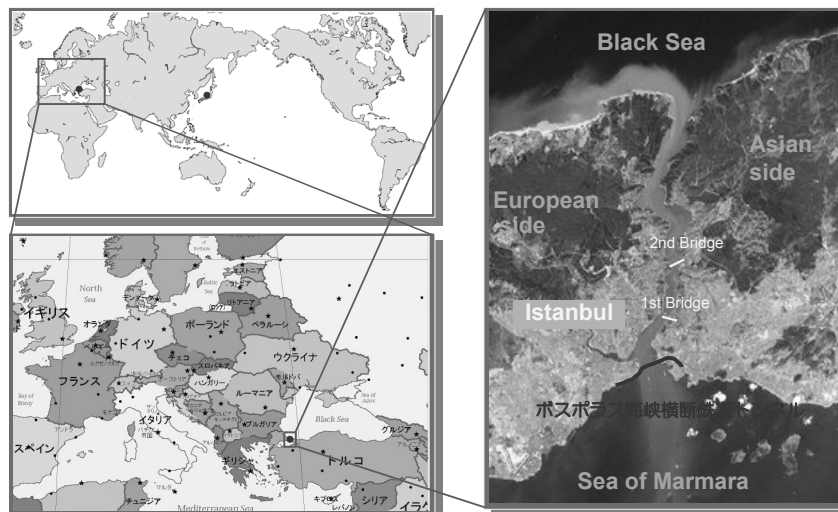
キーワード：ボスポラス海峡，流況予測システム，大水深沈埋，捨石均しシステム，大水深・急潮流下での沈設システム入力

1. はじめに

現在、トルコ共和国イスタンブールのボスポラス海峡（図－1）では、アジアとヨーロッパを結ぶ海峡横断鉄道トンネルの建設が進められている。本トンネル事業は、東京と同等の人口を抱えながらも既存の鉄道網や二本の海峡横断道路橋ではまかないきれないイスタンブールの慢性的交通渋滞緩和と大気汚

染の抑制を目的としている（写真－1）。総延長13.6kmのうち海峡部1.4kmには沈埋トンネルが、陸上部はシールドトンネルが採用された（図－2）。

なお、沈埋工法は建設地点にあらかじめトレンチ浚渫を行った後、別の場所で製作した函体を曳航して沈設・水圧接合して海底トンネルを構築する工法である（図－3）。



図－1 ボスポラス海峡と建設位置図

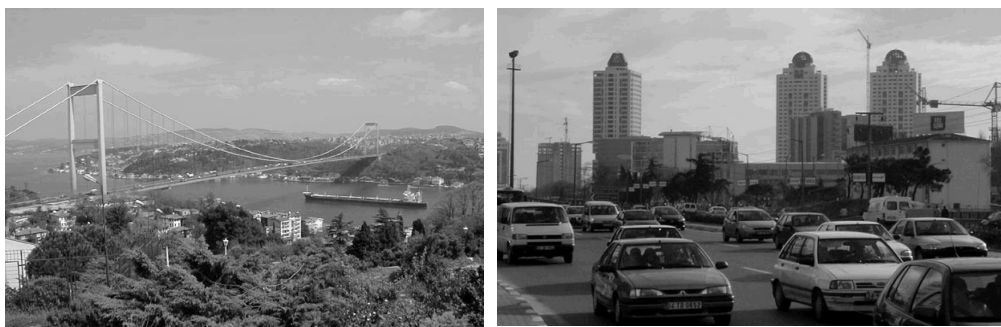


写真-1 イスタンブールの状況左側：海峡にかかる吊橋、右側：慢性的な交通渋滞

2. 工事概要

発注者：トルコ共和国 運輸通信省・鉄道・港湾・
空港建設総局（DLH）

施工者：大成建設・GAMA・NUROL JV

契約工期：56 ヶ月（遺跡調査期間除く）

契約金額：約 1,023 億円（最終金額未定）

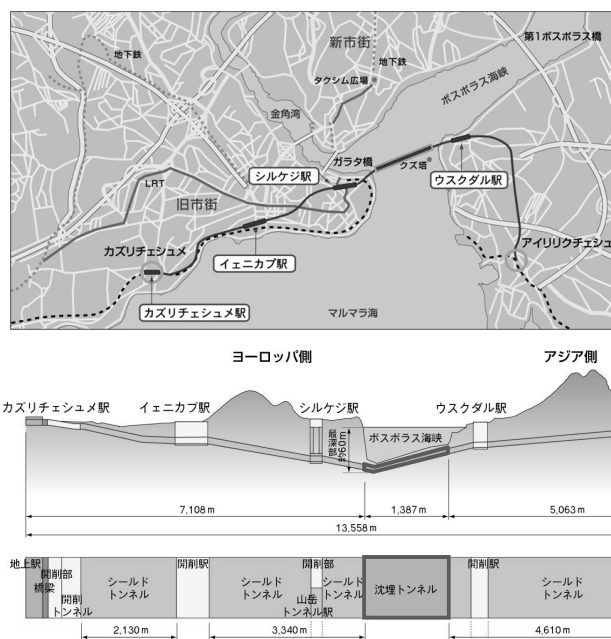


図-2 海峡トンネルの断面図

3. 特有の厳しい条件

ボスポラス海峡横断鉄道トンネルの沈埋トンネルの施工においては、以下に示すような特有の非常に厳しい施工条件があった。

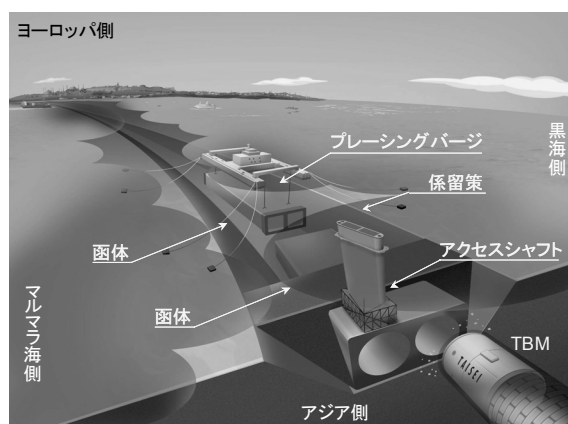


図-3 沈埋トンネルの施工概要図

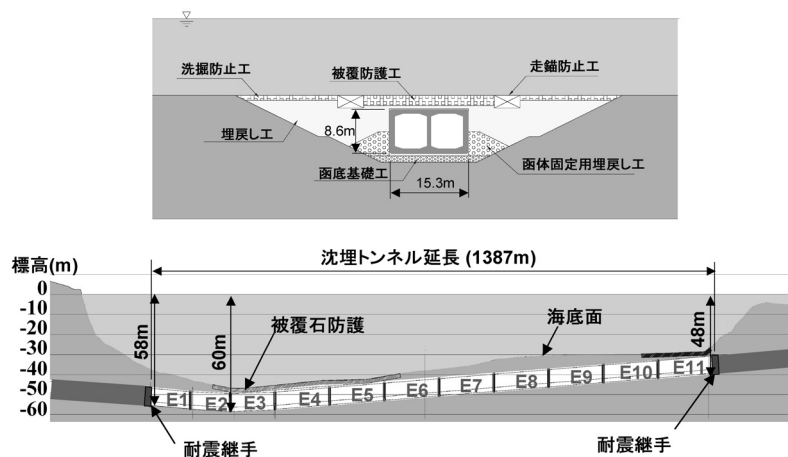
- 沈埋トンネルでは例のない大水深（最大施工水深-60m）（図-4、5）
- 複雑に変化する速い潮流（表層最大 3m/s、下層最大-1m/s）（図-6）
- 海上作業エリア周辺の交通事情（急潮流下での船舶過密航行）
- 発進・到達立坑の構築に適さない地形と地質
- 限られた沈埋函製作ヤード・製作期間

4. 難問を克服した技術

前述のような過酷な条件を克服し、安全かつ高精度な施工を行うために以下に示す技術開発を行い、さまざまな課題を解決し、沈埋トンネル工事を無事完了させた。

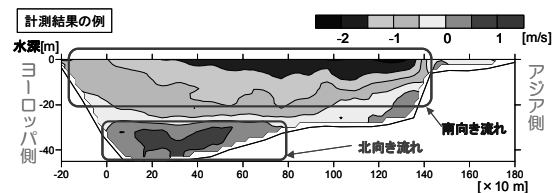
(1) ボスポラス海峡の複雑な潮流を予測する潮流予測システム

函体の沈設作業には 36 時間を要し、その間は潮流速が 1.5m/s 以下（施工上定めた沈設限界流速）で



図－4 沈埋トンネルの断面・縦断図

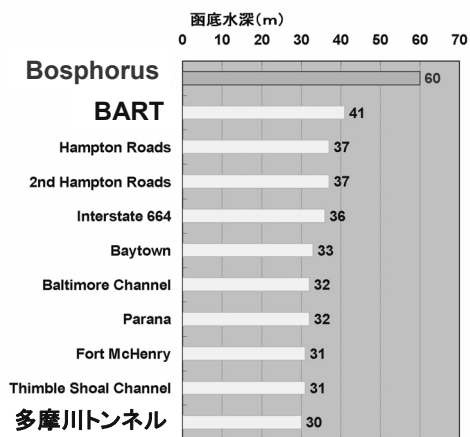
ある必要があった（図－7）．ボスポラス海峡では潮汐による規則的な「潮止まり」は無く、表層流が常に黒海側から流速 1～2m/s(最大流速 3m/s)で流れ、かつ底層には表層と逆向きの流れ（1m/s）が存在する複雑な潮流あった．さらに、風や気圧の変化により、表層流は数時間で 2m/s 以上も急変した．沈埋函曳航から着床・接合の沈設作業では途中で中止することは出来ないため、沈設作業の可否を判断するには、潮流を正確に予測することが不可欠であった．そこで本工事で『情報通信技術（ICT）を活用した流況予測システム』を新たに開発した．本システムは常時観測している現地データ（水位・流速・風向風速・気圧）と気象予報を基に今後の流況変化を数分で予測するシステムで、データ配信にインターネットを利用し、日本で解析・予測した情報を現地および日本の技術者がリアルタイムで共有することができるシステムである（図－8）．本システムの予測精度は86%以上であり、沈設作業可否の判断を迅速かつ的確に行うことが可能となり、大水深・急潮流下の沈設作業の安全確保に大きく寄与した．



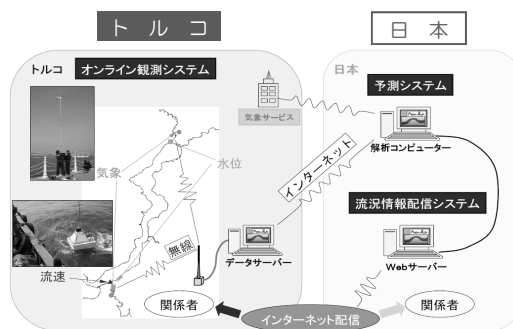
図－6 ボスポラス海峡の断面流速分布



図－7 沈設所要時間



図－5 沈埋トンネルの施工水深実績



図－8 潮流予測システム概念図

(2) 大水深における基礎マウンドを対象とした水中均しロボット

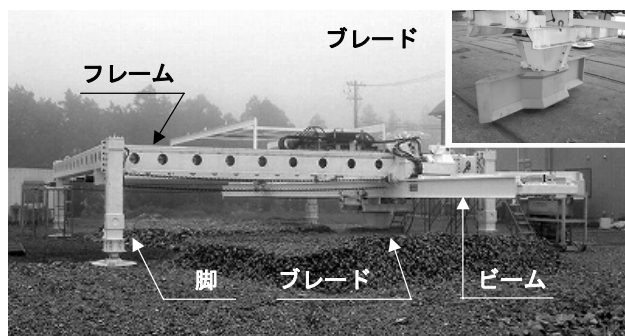


写真-2 水中ロボット

函体の沈設位置は大水深（-60m）、急潮流であるが、このような作業環境下でも高い基礎マウンド造成精度（±30cm）が必要であった。しかし、現地の条件下では従来の潜水士による基礎碎石均し作業は危険かつ非効率であり、また重錘の使用も時間の制約と精度の両立の面からリスクが大きい。そこで本工事で高精度捨石投入管理システムと水中均しロボットからなる『捨石均しシステム』を開発した。捨石投入管理システムを用いて海底地形データと仕上高さから各位置毎の捨石投入量を自動計算し現地投入した後、4本の伸縮脚とブレード（均し刃）走行装置を持つ水中均しロボットを吊り下ろし、船上からの遠隔操作により基礎碎石表面の均し作業を行った。このシステムにより、基礎マウンドの施工は安全かつ高精度（±20cmの精度）で完了した。

(3) 立坑代替施設としてのアクセスシャフト工法

一般的な沈埋トンネルの施工では、発進立坑と到達立坑を構築した後に、順次函体を沈設・接合してトンネルを構築する。しかし、ボスポラス海峡の岸边は岩盤で、浅海域が広がっていることから、発進立坑の構築に膨大な月日と費用が予想された。このため、アジア側で約 350m、ヨーロッパ側で約 200m 岸边から離れた沖合の区間のみを沈埋トンネルで構築し、沈埋トンネルの両端部はシールドトンネルにより水中で接続する工法を採用した（図-9）。このため最初の函体（E11）沈設後、函体の直上に仮アクセスシャフトを設置して沈埋トンネル函体内へのアクセスルートとした。この発進・到達立坑のない施工方法により、従来の施工法と比較して1年の工期短縮と10%の工事費削減に寄与した。

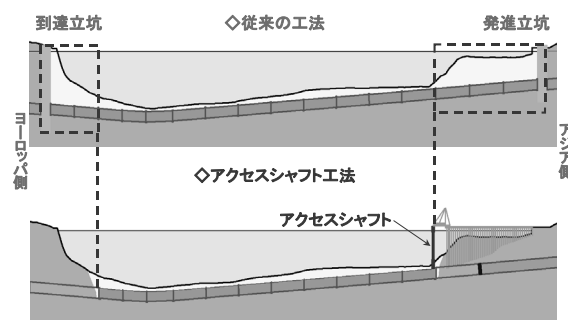


図-9 従来工法とアクセスシャフト工法の比較

一方、アクセスシャフトの設計においては、海峡を航行する船舶の衝突リスクを考慮する必要があった。そこで、アクセスシャフトの中段にはウィークフランジ継手を設けた。ウィークフランジ継手は、電気製品のヒューズや自動車の衝撃吸収ボディーに相当する函体の安全装置であり、主要外力である地震荷重に対してはシャフト全体の健全性を保持し、大型船舶の衝突に対してはシャフトが倒壊することで函体に過度のダメージを与えない構造となっている（図-10）。また、アクセスシャフト倒壊時に、浸水から人命を守るための緊急ハッチシステム装備し、函内に閉じ込められた人を48時間以内に救い出すためのレスキューシャフト（写真-3）を準備した（図-11）。

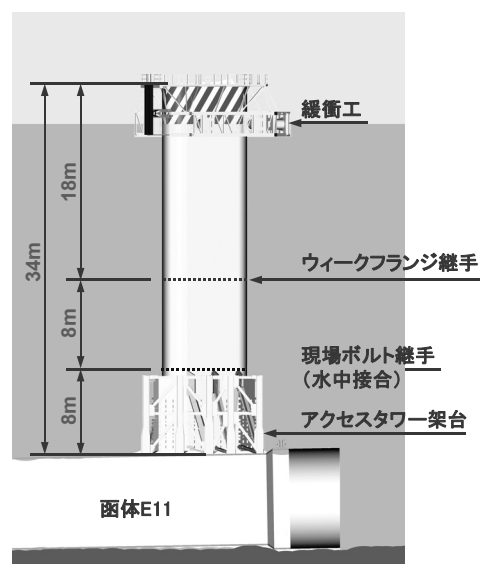
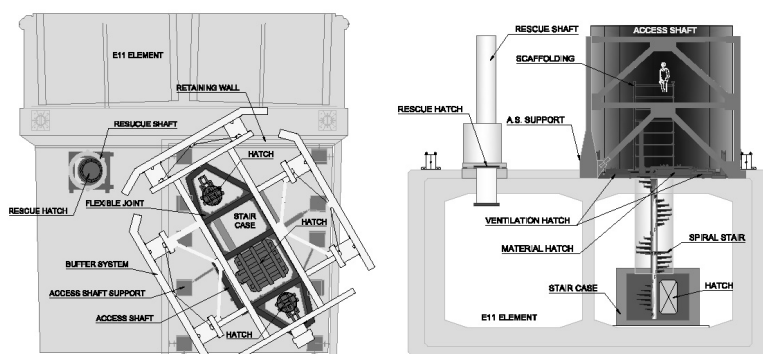


図-10 アクセスシャフト概要図



平面図

断面図

図-11 緊急時レスキューシステム



写真-3 レスキューシャフト

(4) 上下逆向流を克服する沈設技術

函体沈埋時の位置確認は、函体に設置した測量塔を GPS や陸上から視準する方法が一般的であるが、大水深・急潮流かつ過密航行のある現場海域では、計測精度や函体の安定性、測量塔の撤去時の安全性等に問題があった。そこで本工事では、GPS・旋回式（従来の直線動の測深装置に、測量機の回転による立体測量を取り入れた）のマルチビーム音響測深機、ジャイロコンパス、傾斜計を組合わせた測位により函体を海底に誘導し、さらに最終段階の函体接合では高精度の超音波計測装置で計測・制御する『沈設システム』を開発した（図-12）。このシステムにより、全ての函体の沈設作業を計画時間内に、かつ函体設置精度の制限範囲内（8cm 以内）で完了した。また、事前に水槽で模型による沈設実験を行い潮流に対する函体の挙動やアンカーワイヤーの係留力を確認し、その結果を沈設作業船の設計や施工計画に反映した（写真-4）。特に、上下逆向流による潮流力と函体の振動の課題については、流れの速い表層から-15mまでは作業船・沈埋函の長手方向を流れの方向に向けて潮流力を最小化し降下させ、流れが逆転する水深約 15m では流れがほぼゼロに近くなることから、沈設方向を合わせるためにこの水深で作業船・沈埋函を回頭した。なお、15m以深は流速が小さくトレンチ内に沈埋函が入るため、大きな潮流力は作用せず、安定した作業が可能になる（図-13）。

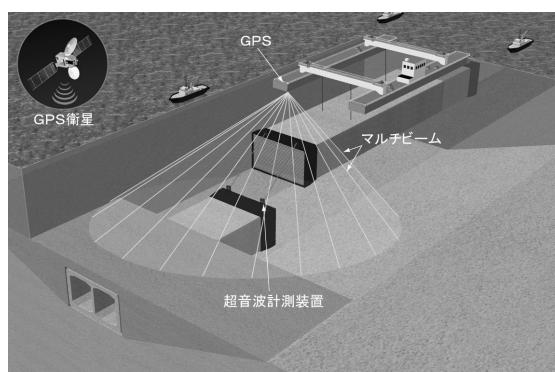


図-12 沈設システムの説明図



国内 : 30tウインチ
今回 : 70tウインチ



模型縮尺 : 1/120

写真-4 沈設作業船と沈設手順の確認実験

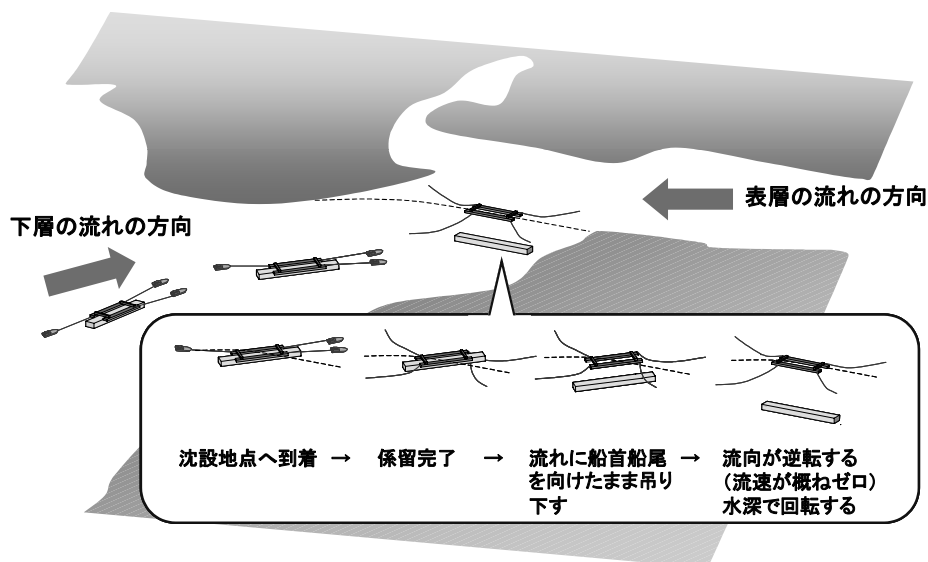


図-13 沈設手順の説明

(5) RC 函体の洋上打設工法

函体製作の制約条件として a) 限られた用地内に新たにドライドックを築造 b) ドックの前面は水深が浅く、函体曳出しのために浚渫が必要 c) 全体工期が短く、沈設間隔は約 40 日間、という 3 つの条件があった。これらの条件を満足するために、函体製作方法を以下のように決定した。ドライドックで函体の下半分のみのコンクリートを打設することで、函体の吃水を浅くし、ドックの前面浚渫量およびドック本体の掘削量を最小限とする。

ドライドックでの打設完了後、ドック内に注水し、浮上した函体を曳き出して、浮上構築ヤードに係留し、浮遊状態で函体の上半分をコンクリート打設する（RC 函体では世界初）。

なお、ドックは陸上部に 2 箇所構築し、各ドックで 2 函体、合計 4 函体を製作する一方、港内の浮上構築ヤードで 3 函体を製作することで、同



写真-5 函体製作ヤード鳥瞰図

時に 7 函体の製作を可能とした（写真-5、図-14）。

ドライドックでは函体の下半分を底版部と側壁・中壁部に分けて、端部から片押しでコンクリートを打設した。しかしながら、函体の上半分は、浮遊状態のため端部からの片押し打設は吃水等の関係から不可能であったため、6 分割してコンクリート打設を実施した（図-15）。分割数及び各ブロックの打設順序は、弾性床上の梁モ

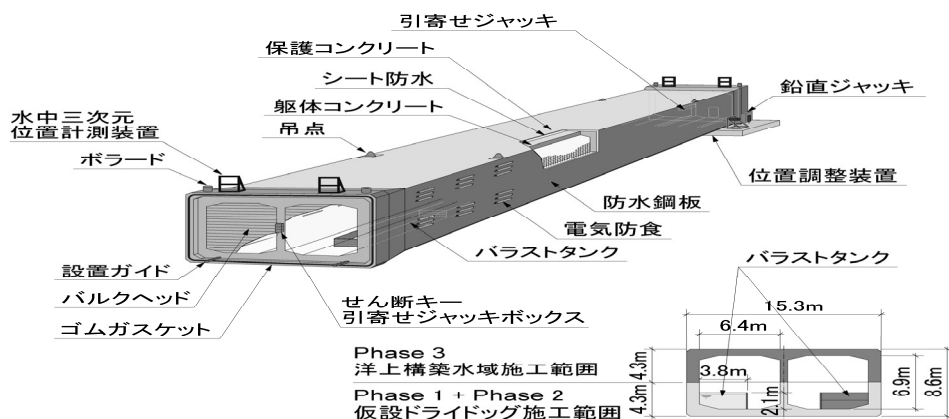


図-14 函体一般図

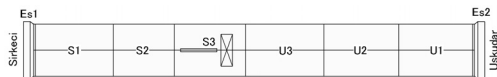


図-15 函体打設分割図（浮遊時）

デルを用いて解析し、最も函体の縦断方向の変形量が小さくなるコンクリート打設順序（S3→U2→S1→U3→U1→S2）を選定、併せて発生応力、残留応力についてもチェックを行い、問題がないことを確認した。図-16 に E07 の各施工段階における函体の吃水変化を示すが、縦断方向で函体が最大 100mm 程度変形した。函体に変形が生じると、水压接合時に既設函と沈設函の端面の開きが下端と上端で異なり、変形が 150mm 以上になるとゴムガスケットの止水性が問題となる（図-17）。そのため、函体の姿勢制御と変異制御が施工上最も重要なポイントであった（写真-6）。

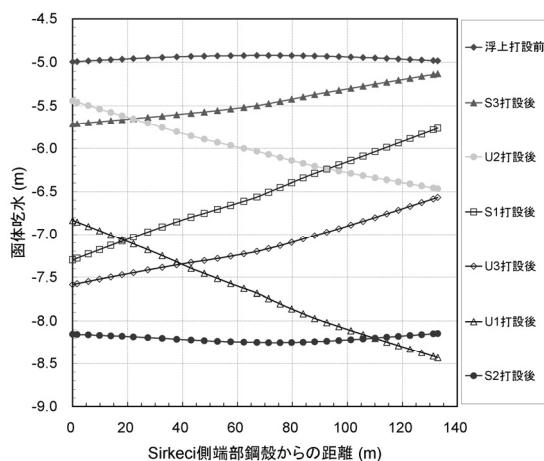


図-16 各施工段階における吃水変化(E07)

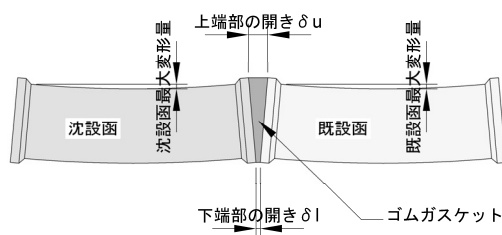


図-17 函体接合時イメージ



写真-6 浮上打設の状況

(6) アクセスシャフト等のリスクアセスメント

ボスポラス海峡は、海峡の潮流が速いことから「航行の難所」として知られる。また、年間 55,000 隻の大型船が航行する国際航路であり、アジアとヨーロッパ両岸の拠点を結ぶローカル船（フェリー）が年間 260,000 隻も行き交う海域でもある。さらに、この海域で沈埋トンネル工事を実施するために、本来 800m ある航路幅を 350～500m に狭め、海峡航路を時間帯で上りまたは下り方向の一方通行とする規制をした。このような海峡で工事を安全に行うために、ハーバーマスターを含む海事関係者との航行安全委員会を結成し、工事と航行安全の調整に努めた（写真-7）。



写真-7 ボスポラス海峡の船舶航行状況

本工事では、海岸線から 350m 離れた海上に孤立したアクセスシャフトを構築するため、従来の立坑工法よりリスクが高いと予想された。そこで、リスクアセスメントとして、この海域特有および世界における船舶の機関故障事例、事故例等の調査を行い、の資料を用いて、モンテカルロシミュレーションによる解析を実施した。その結果、アクセスシャフトへの船舶衝突による函体内作業員の死亡確率は、要求上限値 0.075（100 万人時間当たり）に対して、0.0163 であった。しかし、更なる安全性向上のために、船舶衝突防止対策としてアクセスシャフト上流側にバリアシステムを設置し、函体内に取り残された作業員救出のためのレスキューシステムを採用することで、最終的には死亡確率は 0.0070 となり、施工中作業員の生命の安全を十分に確保できると判断した。また、結果として、沈埋トンネル工事を無事に完了できた（写真-8）。

また、アクセスシャフト内および函体内の火災について、船舶衝突と同様のリスクアセスメントを実施し、函体内禁煙、可燃物材料の使用制限、火気使用条件等の対策を行うことで、死亡確率は 0.00038（100 万人時間当たり）となり、要求上限値 0.075 を十分に満足するものであった。

5. おわりに

今までの沈埋トンネルの世界最深施工水深は米国の BART トンネルの 41.5m、国内では多摩川トンネルの 30m であり、「沈埋トンネル工法の適地は浅海域・静穏海域」という認識が一般的であった。しかし、本工事において急潮流で知られるボスポラス海峡の水深 60m 海底に沈埋トンネルを完成させたことは、沈埋トンネルの適用に関する従来の認識を覆しただけでなく、その適用範囲を大幅に拡張し大水深海底トンネルの経済的建設の選択肢を広げた点で、社会的な貢献度が非常に高いと考えられる。

また本工事で開発・駆使した技術は、我が国の建設技術の高さを海外へも広く知らしめることになり、今後の我が国の建設産業の方向性（国際化）にも良い影響を与えられと考える。

さらに、建設が極めて困難であると考えられていたボスポラス海峡にトンネルを構築し、今後のトルコ経済の発展に寄与するものと思われる。

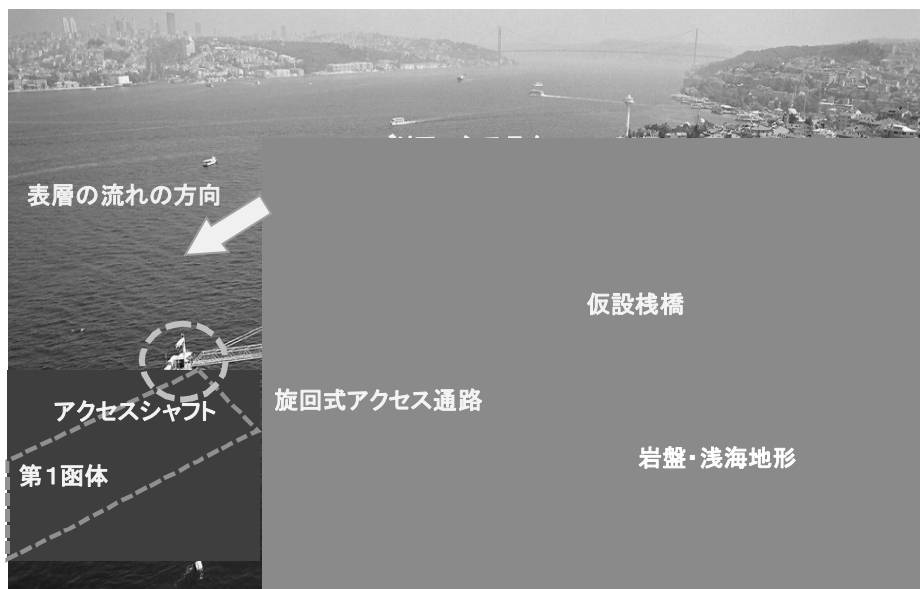


写真-8 リスクアセスメントを考慮した設備