

「イズミット湾横断橋」(オスマン・ガーズィー橋)の施工

Construction for “Izmit Bay Bridge” (Osman Gazi Bridge)

島 宜 範	株式会社 IHI インフラシステム	海外プロジェクト室エンジニアリング部
川 上 剛 司	株式会社 IHI インフラシステム	代表取締役社長
柳 原 正 浩	株式会社 IHI インフラシステム	海外プロジェクト室 取締役, 室長
工 藤 光 弘	株式会社 IHI インフラシステム	海外プロジェクト室エンジニアリング部 次長
村 田 眞 司	株式会社 IHI インフラシステム	海外プロジェクト室エンジニアリング部 主幹

株式会社 IHI インフラシステムは、世界第 4 位となる中央径間 1 550 m を有する「イズミット湾横断橋」の設計から建設までを一括で請け負った。施工に際しては、BOT (Build-Operate-Transfer) 事業の一部であることから、短工期の確実な達成を最重要課題とされるなか、上下部工一括 EPC (Engineering, Procurement and Construction) 契約の特長を活かし、さまざまな工種を並行して実施・管理することで、キャットウォーク事故の復旧期間を含めて 42 か月という短期間での交通開放を達成した。本稿では、上下部工それぞれにおける、工期短縮を達成するための工夫について紹介する。

IHI Infrastructure Systems Co., Ltd. (IIS) has been contracted to construct the Izmit Bay crossing suspension bridge in Turkey, with 1 550 meters of the fourth longest main span in the world. Since the bridge is a core part of the BOT (Build-Operate-Transfer) project of a 420 kilometer motorway, the client was most interested in it being completed in a certain short period. IIS has successfully managed the works on site as the EPC (Engineering, Procurement and Construction) Contractor for both the substructure and the superstructure, and completed construction in only 42 months. This paper introduces the construction process of the bridge as well as the ingenuity for shortening the construction period.

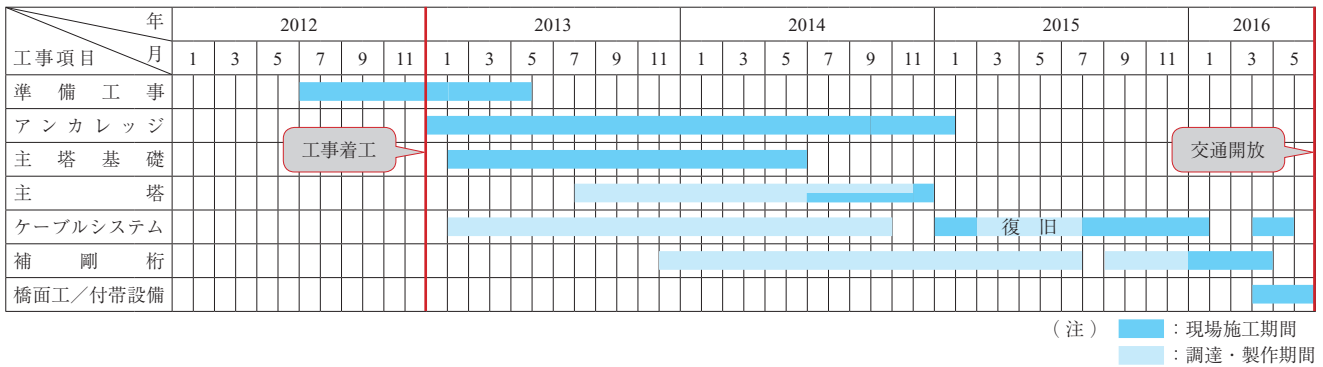
1. 緒 言

株式会社 IHI インフラシステム (以下、IIS) では、トルコ共和国 (以下、トルコ) の北西部に位置するイズミット湾をまたぐ全長 2 907 m、中央径間 1 550 m (主塔と主塔の間が世界第 4 位の長さ) を誇る吊橋となる「イズミット湾横断橋」の建設工事 (第 1 図) を手掛け、

2016 年 7 月 1 日に交通開放させた。工事期間は 42 か月であり、同規模の長大橋梁と比較して最も速い施工速度であった。第 2 図に「イズミット湾横断橋」工事工程を示す。第 3 図に「イズミット湾横断橋」の一般図を示す。本橋は海底 40 m の深さに据えられた主塔基礎、その上に立つ主塔、ケーブルを定着する両端のアンカレッジ、そして道路面を構成する補剛桁と、それを吊るケーブルシステ



第 1 図 「イズミット湾横断橋」補剛桁ブロックの各スパン同時架設状況
Fig. 1 Fast construction for deck of “Izmit Bay Bridge”



第2図 「イズミット湾横断橋」工事工程
Fig.2 Construction schedule for "Izmit Bay Bridge"

ムから構成される。

本稿では、プロジェクト概要および設計に関する前報告⁽¹⁾に続いて、下部工（コンクリート部）施工、上部工（鋼構造部）施工について報告する。

本橋は 420 km の高速道路 BOT (Build-Operate-Transfer) 事業の中核であったため、EPC (Engineering, Procurement and Construction) 契約者として、短工期を確実に達成することが要求されていた。本稿ではこれらを達成するために採用した架設工法、各種工夫・方策についても紹介する。なお、本稿でも前報告に倣い「イズミット湾横断橋」という名称を使用する。

2. 下部工の施工⁽²⁾

主要構造物の設計寿命は 100 年であり、特にコンクリートについては海洋・海岸地帯に位置することから、塩害耐久性を有する配合設計を行った⁽³⁾。

2.1 主塔基礎

主塔基礎は、鋼管杭^{ぐい}打設、碎石層敷設、プレハブのコンクリートケーソン（以下、ケーソン）の沈設、その後の基礎土台およびタイビームの建設が主要工事となる。第4図に主塔基礎を示す。これは吊橋初の免震構造となっており⁽¹⁾、本構造の採用によってケーソンの寸法を小さくすることができ、コンクリート打設期間を短縮、またケーソン製作を行うドライドックの寸法も小さくすることにつながり、工期短縮に大きく貢献した。

2.1.1 海底面での作業

主塔の架設位置では約 3 m 厚さの海底土砂の^{しんせつ}浚渫を行い、計画水深 -43 m に対して、-0 ~ +700 mm の許容値に収めた。その後、各主塔当たり 195 本の鋼管杭打設を行った。第5図に鋼管杭の打設状況を示す。杭の大きさは径 2 m、長さ 34.5 m である。GPS (Global Positioning

System) を用いて管理を行い、水平誤差 ±300 mm 以内に収めた。ケーソン下の碎石層敷設に際しては所定の摩擦係数を確保するため、新規開発したレベリングマシンを用いて -150 ~ +0 mm および 2 × 2 m の範囲内での高低差 -50 ~ +0 mm を達成した。第6図にレベリングマシンの概念図を示す。

2.1.2 ドライドック

ケーソンの製作は、ドライドック、ウェットドック、場所打ちの3段階で実施し、南側アンカレッジエリアに設営したドライドックでは外壁と内壁の一部を製作した。第7図にドライドックでのケーソンの製作状況を示す。

ドライドックでの製作後、ドック内に海水を注入し、ケーソンをウェットドックに^{えい}曳航した（第8図）。

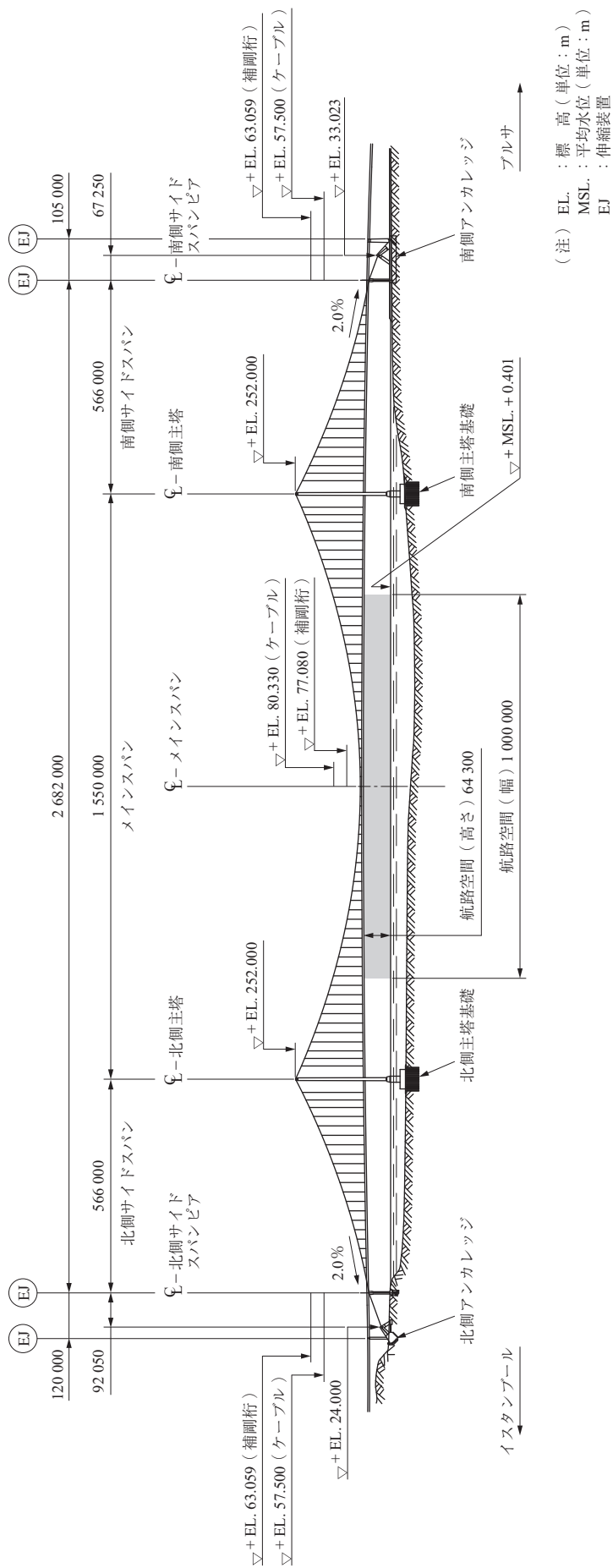
2.1.3 ウェットドック

ウェットドックでは残りの内壁・頂板コンクリート打設および鋼シャフトの搭載作業を行った。第9図にウェットドックでの作業状況を示す。鋼シャフトは現場付近の造船所で製作した後、フローティングクレーン（以下、FC）で吊り曳航し、所定位置に据え付けた。

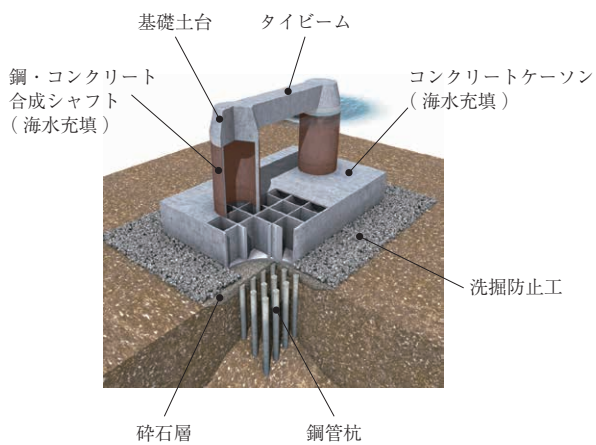
2.1.4 沈設および現場施工コンクリート

沈設作業は4隻のタグボートおよび1隻の制御船によって行った。第10図にケーソンの沈設作業の様子を示す。タグボートのウィンチによって水平位置制御を、ケーソン内部への海水注入によってケーソンの沈降、沈設を行い、平面誤差 ±200 mm に収まるよう調整を行った。

その後、鋼シャフト内の狭い部分にまんべんなくコンクリートを行き渡らせるため、流動性を向上させた自己充填型コンクリートを打設、最後に基礎土台およびタイビーム施工を行った。基礎土台の最終高さは、ケーソンの沈設直後に測定した地盤沈下量およびその後想定される沈下量を反映して決定した。



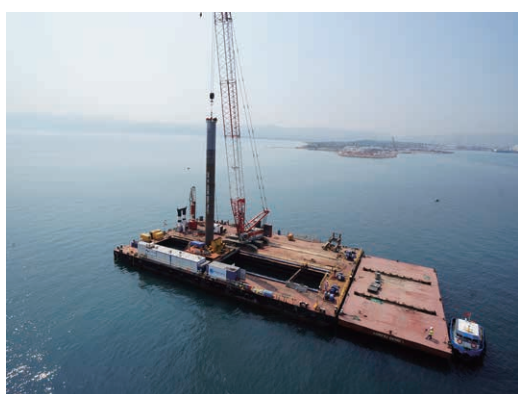
第3図 「イズミット湾横断橋」一般図 (単位: mm)⁽¹⁾
 Fig. 3 General view of "Izmit Bay Bridge" (unit: mm)⁽¹⁾



第4図 主塔基礎
Fig. 4 Tower foundation



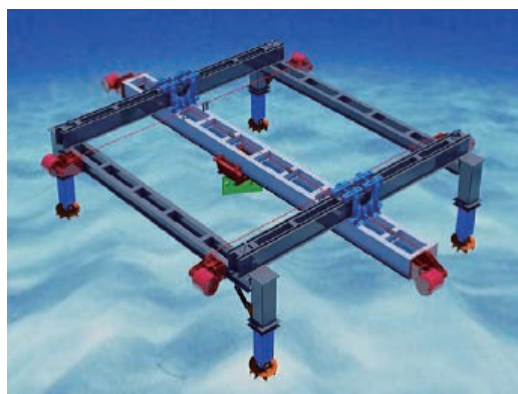
第7図 ドライドックでのケーソンの製作状況
Fig. 7 Caisson production at drydock



第5図 鋼管杭打設状況
Fig. 5 Inclusion piles driving



第8図 ケーソンの曳航
Fig. 8 Caisson towing to the wet dock



第6図 レベリングマシン概念図
Fig. 6 Leveling machine



第9図 ウェットドックでの作業状況
Fig. 9 Caisson construction at the wet dock

2.2 アンカレッジ

北側アンカレッジの構造概念図を第11図-(a)に示す。石灰岩に岩着させるマスコンクリート部分と反力を受けるフロントパッド、メインケーブルのスプレー部を支持する三角形レグから成る。完成後を第11図-(b)に示す。

南側アンカレッジの構造概念図を第12図-(a)に示す。南側アンカレッジも地上に見えている部分は北側アン

カレッジ(第11図-(a))と同様の構造であるが、地盤条件から、サイドスパンピアの基礎とアンカレッジとを一体化した大きなマスコンクリート構造となっている。完成後を第12図-(b)に示す。

2.2.1 北側アンカレッジの掘削

北側アンカレッジの掘削作業は、下部工施工において最

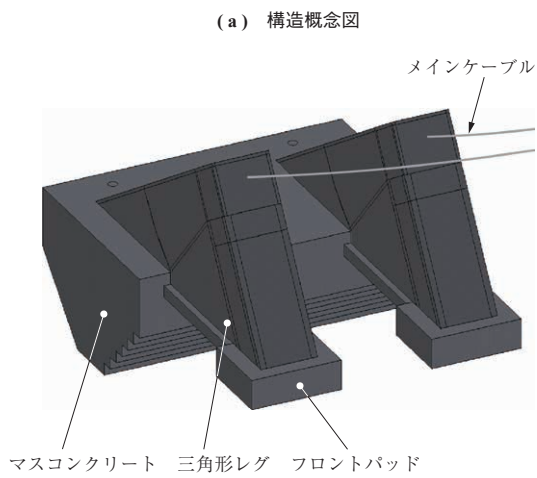


第 10 図 ケーソンの沈設作業の様子
Fig. 10 A look at the caisson sinking operation

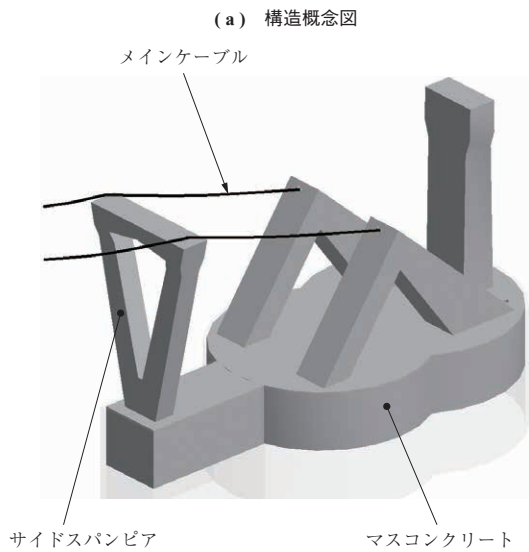
も困難な作業の一つであった(第 13 図)。マスコンクリート部はほとんどが地下水位以下であるため、施工中の水没を避ける必要がある。このため、ジェットグラウト工法(高圧噴射攪拌工法)による遮水壁を構築した後、開削を実施したが、追加の遮水対策にもかかわらず出水を完全に止めることができなかった。そこで、開削ピット内の水をポンプで外に排出しながら、コンクリートの打設作業を行った(第 14 図)。

2.2.2 南側アンカレッジエリアの整備

南側アンカレッジエリアは、もともとは浅い砂浜であったため、準備工として全長 1 120 m の護岸の建設および



第 11 図 北側アンカレッジ
Fig. 11 North anchorage



第 12 図 南側アンカレッジ
Fig. 12 South anchorage



第 13 図 北側アンカレッジ掘削状況
Fig. 13 Rock excavation for north anchorage



第 14 図 北側アンカレッジのコンクリート打設状況
Fig. 14 Concrete casting for massive part for north anchorage

50 000 m² の埋め立てを行った (第 15 図)。

軟弱地盤にあることから、開削中ののり面の安定および開削内部のマスコンクリートの施工性向上のため、巨大な地中連続壁を 2 連つなげた二重円構造を採用した。これはアーチ効果によって、壁を支持するための内部支持梁や、ロックアンカーを不要とし、マスコンクリートの打設作業の効率向上に高く寄与した。第 16 図に南側アンカレッジエリアの地中連続壁およびコンクリートの打設状況を示す。



第 15 図 南側アンカレッジエリアの埋め立て
Fig. 15 Reclamation of south anchorage area



第 16 図 南側アンカレッジの地中連続壁およびコンクリート打設状況
Fig. 16 Diaphragm wall and mass concreting for south anchorage

2. 2. 3 コンクリート打設

マスコンクリート部分は、北側アンカレッジは 11 層とし各層 2 m の高さで打設し、表面の打ち継ぎ目やひび割れ箇所には防水処理を行った。南側アンカレッジは 10 層とし各層 1.6 m の高さで 73 回の打設で施工した。地上の三角形レグはケーブル架設作業との干渉を避けて、スプレーサドルを支持する高さまでの第 1 段階と、ケーブル架設完了後の第 2 段階に分けて施工した。

2. 2. 4 クロスヘッドスラブおよび PT (Post-Tensioning) ストランド

三角形レグの第 1 段階完了後、メインケーブルを固定するためクロスヘッドスラブ (以下、CHS) の設置を行った (第 17 図)。設置の許容値が水平方向の 10 mm、角度 0.2 度と非常に厳しいため、位置確認には特別に開発したレーザによる確認方法を採用した。

CHS 設置後、PT ストランド (15.7 mm 径の 7 本重鉛めっき鋼より線) の設置および緊張を行った。PT ダクトおよびアンカーキャップ内は防錆のため乾燥空気を循環させているが、将来ストランドの交換が必要になった場合に備えて特別なジャッキを製作し、ストランドの実物大模型でその作業性を事前に確認した。

3. 上部工の製作⁽⁴⁾

本橋の主構造の鋼重量は合計約 86 500 t (鋼管杭 : 13 000 t、主塔 : 18 000 t、ケーブル : 19 500 t、補剛桁 : 36 000 t) である。メインケーブルおよびハンガーは、日本企業の中国国内工場で作成し、現場に輸送した。主塔および補剛桁の製作フローを第 18 図に示す。製作を行った C 社工場は架橋地点から約 80 km 離れたゲムリク (Gemlik) にあり、C 社造船所は架橋地点から約 30 km

(a) クロスヘッドスラブ

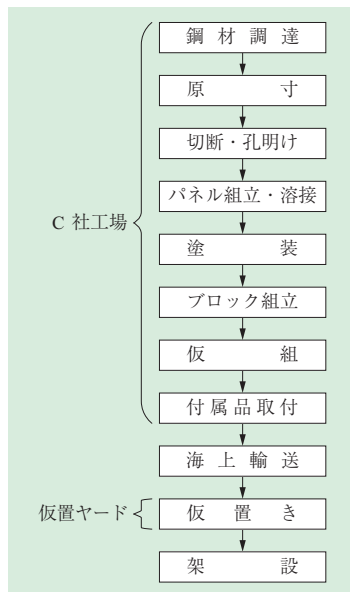


(b) アンカーキャップ

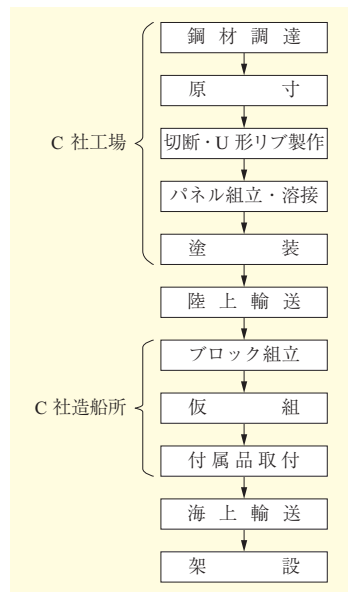


第 17 図 クロスヘッドスラブおよびアンカーキャップ
Fig. 17 Cross head slab and anchor cap

(a) 主塔



(b) 補剛桁



第 18 図 上部工製作フロー
Fig. 18 Fabrication step for tower and deck

離れたギョルジュク (Gölcük) にある。

3.1 主塔

製作・架設の条件から、高さ方向に 22 個のブロックに分割し、皮板の現場継手間は全断面溶接、縦リブ間は高力ボルト摩擦接合とした。ただし、12 段目より上のブロックは、パネル姿での発送・架設とするため、4 枚のパネルに分割し、パネル間は高力ボルト摩擦接合とした。第 19 図に主塔パネル製作状況を示す。

製作・品質管理は EN (European Norm: 欧州規格) 1090-2 に基づいて行った。EN では鋼構造物の構造・使用鋼材・使用用途の重要性に応じて Execution Class (以降, EXC) が 1 から 4 まで設定され、各クラスに応じた品質レベル (Quality Level) が規定されている (EXC4 が最も厳しい)。主塔、補剛桁とも基本的には EXC3, Quality



第 19 図 主塔パネル製作状況
Fig. 19 Tower panel fabrication

Level B であったが、製作初期の限定ブロックの一部の箇所には EXC4 に準拠した検査率を適用した。

本橋の塗装仕様は、ISO 12944-5 に基づき 25 年間大規

模塗替えなしという客先要求に沿って策定し、パネル単位で塗装を行った。なお、主塔および補剛桁内部には乾燥送気システムを導入しているため、防錆上は無塗装が可能であるが、システム稼働までの一時防錆のため、無機ジンクリッチペイント 1 層を施工した。第 1 表に主塔および補剛桁塗装仕様を示す。

主塔鉛直精度の設計要求は仮組時 1/5 000、架設時 1/2 500 であったため、限られた工期内で要求品質を確保するために、3 点反力管理システムを用いた水平仮組を採用した（第 20 図）。仮組で調整した精度を基準に現地で調整するため、各継手にはマッチングピースを取り付けた。

3.2 補剛桁

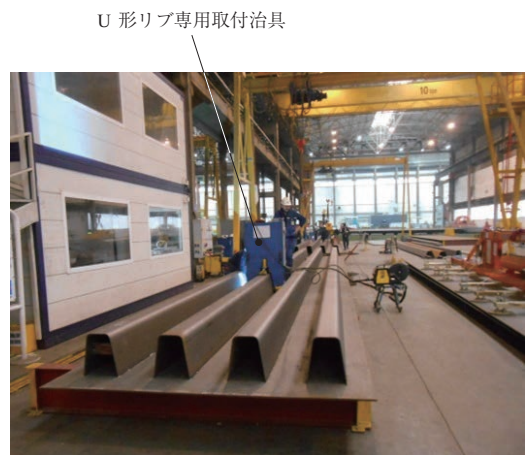
デッキ（上面パネル）側の U 形リブについては疲労対策上、ルート部の未溶着深さ 2 mm 以下を要求されたため、所定の溶込み量を確保するよう、加工・取付時に工夫を行った。具体的には、U 形リブを精度良く形成するためのプレス機の新規導入、事前試験による開先形状の決定、U 形リブ専用取付治具の導入などである。第 21 図に桁パネル製作状況を示す。これによって、品質の安定化、作業の効率化に貢献した。

吊橋の製作経験がない C 社であったが、日本から派遣した IIS 技術者による技術指導や工程短縮のための要領立案・変更指導を行った。その結果、C 社造船所の屋内建屋でブロック組立（第 22 図）を、屋外で仮組立（第 23 図）をそれぞれ連続的に実施することが可能となった。この結果、短い工期ではあったが、契約どおり完了することができた。

また、現地溶接工程短縮のため、中央径間の 52 個の隣り合う 25 m ブロックを造船所内で事前につなぎ、26 個の 50 m ブロック地組溶接を行うことで、26 継手分の現地溶接を省略した。残り 86 継手には、現地作業を効率的に行えるよう、固定吊り足場をあらかじめ設置して発送した（第 24 図）。



第 20 図 主塔の水平仮組
Fig. 20 Trial assembly of tower



第 21 図 桁パネル製作状況
Fig. 21 Deck panel fabrication



第 22 図 屋内連続組立
Fig. 22 Block assembly of deck

第 1 表 主塔および補剛桁塗装仕様
Table 1 Paint specification for tower and deck

塗装部区分	塗装塗布状況	名 称	塗膜厚さ (μm)	塗膜合計厚さ (μm)
外 面	1 層目	無機ジンクリッチペイント	60	320
	2 層目	エポキシ樹脂塗料	200	
	3 層目	ポリウレタン樹脂塗料	60	
内 面	1 層	無機ジンクリッチペイント	60	60



第 23 図 屋外連続仮組
Fig. 23 Trial assembly of deck



第 24 図 吊り足場の設置
Fig. 24 Installation of scaffolding

4. 上部工の施工⁽⁵⁾

4.1 主塔架設

主塔は、下部水平梁を含む 11 段目までは FC によるブロック架設（第 25 図 - (a)）、上部水平梁を含む 12 段目から 22 段目までは、ジブクライミングクレーン（以下、JCC）によるパネル架設（- (b)）を採用した。JCC

(a) FC によるブロック架設状況



(b) JCC によるパネル架設状況



(注) FC：フローティングクレーン
JCC：ジブクライミングクレーン

第 25 図 主塔架設
Fig. 25 Tower erection

は、工程短縮のため FC で一体組据付けを行い、下部水平梁から立ち上げた。

主塔の鉛直度管理は、各架設ブロックの頂部 4 か所に GPS 受信機を設置して GPS 測量で行った。鉛直度が規定を超過することが予想された場合にはマッチングピース部でシムによる調整（第 26 図）を行い、最終的にはすべて許容値に収めることができた。第 2 表に主塔架設完了時における鉛直度結果を示す。

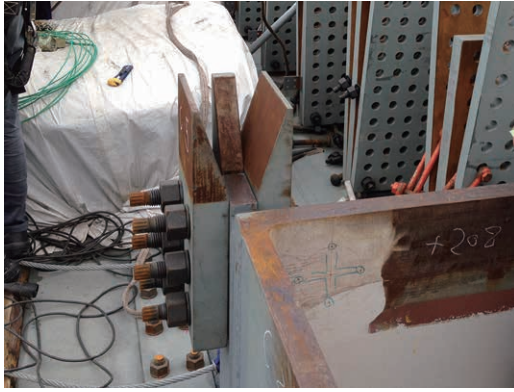
4.2 ケーブルシステム

ストランド架設に先立ち、ストランドを運搬するホーリングシステムと作業足場となるキャットウォークを施工した。第 27 図にホーリングシステムおよびキャットウォークを、第 28 図にキャットウォーク完成後を示す。キャットウォークはそれ自体の耐風性能を高く設計することで、従来用いられたストームシステムを省略でき、仮設備の施工期間の短縮と経済化を図った。

メインケーブルの架設には、工程短縮のためプレハブ平行線ストランド（Prefabricated Parallel Wire Strand：PPWS）工法を採用した。さらに、今回使用した亜鉛めっき鋼線はアンカレッジへの定着箇所数を少なくするため、PPWS 工法として過去最大径の 5.91 mm を使用した。また、リールの重量を軽減し、現場でのリール取り回しの手間を減らすため、日本国内では例のない水平巻き取りしたリールの採用を決定した。第 29 図に PPWS 引出し設備を示す。これらは IHI グループとして初めての経験となるため、事前に日本国内で実物大実験を行い、改善点を反映した。

ストランド架設は、北側アンカレッジから南側アンカレッジに向かって、昼間に引出し、夜間に形状計測および調整を行った。第 30 図に PPWS 引出し状況を示す。最

(a) マッチングピース



(b) 調整用シム



第 26 図 マッチングピースおよび調整用シム
Fig. 26 Matching piece and shim plates for geometry control

第 2 表 主塔架設完了時における鉛直度結果
Table 2 Vertical measurement of tower free standing

計測箇所		鉛直度		許容値
		橋軸方向	橋直方向	
北主塔	東	1/3 346	1/12 937	1/2 500
	西	1/6 815	1/14 489	
南主塔	東	1/9 638	1/24 193	
	西	1/73 311	1/13 440	



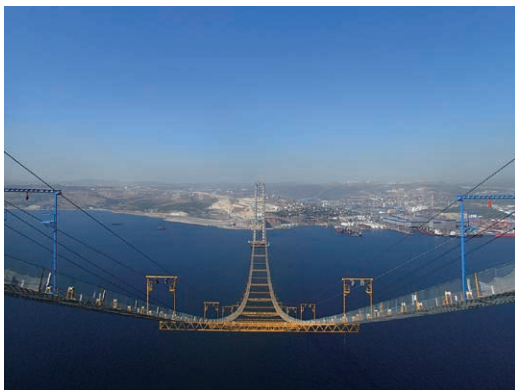
第 29 図 PPWS 引出し設備
Fig. 29 PPWS unreeler



第 27 図 ホーリングシステムおよびキャットウォーク
Fig. 27 Hauling rope and catwalk



第 30 図 PPWS 引出し状況
Fig. 30 PPWS erection

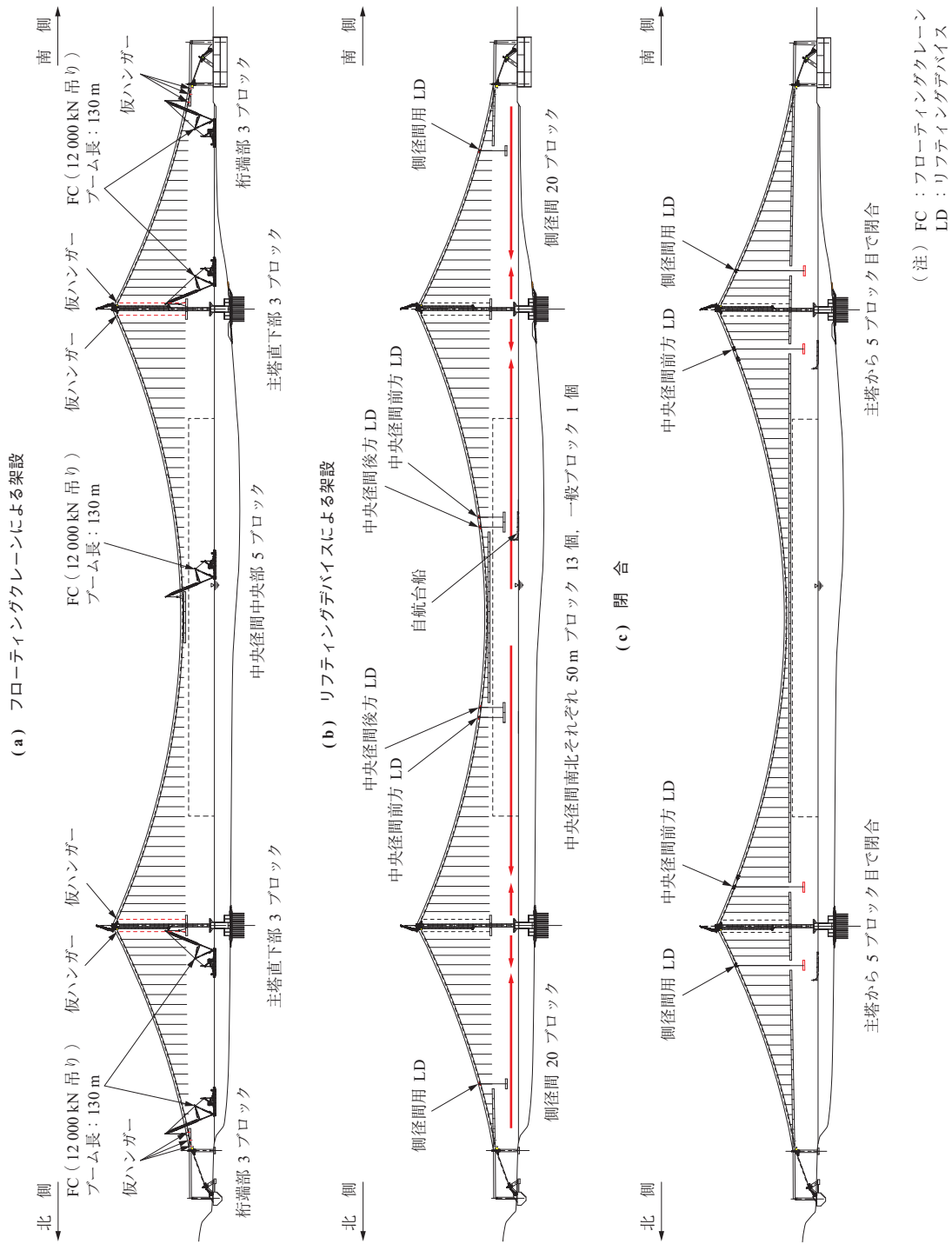


第 28 図 キャットウォーク完成後
Fig. 28 Catwalk completion

最終的にはケーブルコンパクション（巻取り）完了時点でのメインケーブル上下流相対差の結果は、中央径間中央部で許容値 100 mm に対し、実測値 36 mm であった。

4.3 補剛桁架設

補剛桁は全ブロックが海上にあり、特に中央径間は航路上に位置していたが、港湾港長および海事関係者との協議のうえ、航路規制を行うことで、地形的制約を受けずに架設を行うことができた。第 31 図に補剛桁架設ステップを



第 31 図 補剛桁架設ステップ
Fig. 31 Deck erection procedure

示す。

4.3.1 FC 架設部

主塔直下部・桁端部および中央径間中央部については、リフティングデバイス（以下、LD）による直下吊り架設が困難であることから、12 000 kN 吊り FC によるブロック架設を行った（第 32 図 - (a)）。

4.3.2 LD 架設部

補剛桁ブロックは、造船所から架設地点まで自航台船によって輸送したのち、メインケーブル上に配置した LD によって、台船から直接吊り上げた。その後ハンガーと接続、LD の荷重を解放しながら補剛桁ブロックの位置調整を行い、既設桁と連結した（第 32 図 - (b)）。

閉合作業は、中央径間 2 か所、側径間各 1 か所で行った。中央径間の閉合時は、主塔近傍の既設桁を塔から反力を取って 500 mm 側径間側にセットバックし、作業時の遊間を確保した。側径間については、既設桁をあらかじめ桁端側に 500 mm セットバックした位置に架設し、閉合ブロック吊上げ後、セットバック解放、閉合した（第 33 図）。

補剛桁架設に追従して、側径間の隣り合う 2 ブロックの現場継手溶接を順次進めた結果、桁閉合時点で残り 56 継手となった。桁閉合後は、橋面工（防水工・舗装工）を開始させるために必要最小限の溶接を継手ごとに進め、区間ごとに引き渡すことで全体工程を圧縮した。その結果、閉合後わずか 2 か月で交通開放にこぎ着け、大きく工期短縮に貢献した。第 34 図にさまざまな橋面工が並行して進められている様子を示す。

5. 結 言

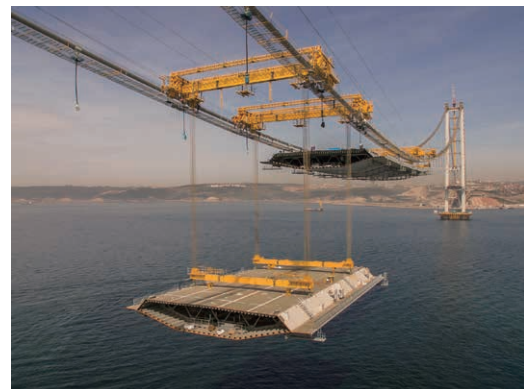
本稿では、2016 年に開通した「イズミット湾横断橋」の施工について概説した。本橋はトルコ初の高速道路 BOT 事業の中核を成すものであり、その短期間での交通供用が強く求められた。工事期間中においても客先のみならずトルコ政府からも工期に関する要求があるなかで、IIS は本橋の EPC 契約者として、上部工・下部工問わずさまざまな工種を並行して進め、また管理することで、全体的としての短工期を実現することができた。

本稿が今後の海外橋梁 EPC 事業における参考となれば

(a) FC によるブロック架設状況



(b) LD による補剛桁ブロック架設状況



第 32 図 補剛桁架設
Fig. 32 Deck erection



第 33 図 南側径間での補剛桁閉合
Fig. 33 Deck closure at south side span



第 34 図 並行する各種橋面工
Fig. 34 Surfacing work on bridge in parallel

幸いである。

— 謝 辞 —

本プロジェクトの遂行に当たり、NOMAYG（ゼネコン6社（トルコ5社、イタリア1社））JVおよび株式会社長大を含む3社から成るKGM（トルコ共和国運輸省道路庁）コンサルタントJVの多大なるサポートと建設的な技術議論への協力に対して、ここに記し深く感謝いたします。

参 考 文 献

(1) 井上 学, 川上剛司, 柳原正浩, 社浦潤一, 山崎康嗣: Design & Build プロジェクト「イズミット湾横断橋」(オスマン・ガーズィー橋)の設計 IHI 技報 第57巻第2号 2017年6月 pp. 64 - 79

- (2) チェティンカヤ トウンチ, 柳原正浩, 川上剛司, 生駒尚己, 山本義人: オスマン・ガーズィー橋の下部工施工 橋梁と基礎 第51巻第6号 2017年6月 pp. 16 - 22
- (3) 井上 学, 山本義人, 川上剛司: イズミット湾横断橋の工事報告 - 構造用コンクリート: CEM III コンクリートの適用 - IHI インフラ技報 トルコ特集号 2017年9月 pp. 77 - 80
- (4) 村田真司, 佐々木智章, 山田真吾, 川野清浩, 森脇清隆, 内藤恵介: オスマン・ガーズィー橋の上部工製作 橋梁と基礎 第51巻第6号 2017年6月 pp. 23 - 29
- (5) 工藤光弘, 山根三弘, 船木正志, 朝倉功次, 下久保慎祐, 折戸宏行: オスマン・ガーズィー橋の上部工架設 橋梁と基礎 第51巻第6号 2017年6月 pp. 30 - 35