

# トルコ、イズミット湾横断橋の工事報告

## － 上下部一括デザインビルドによる長大吊橋の建設 －

海外事業委員会

高井祐輔 田中剛 關真二郎 島宜範

### 1. はじめに

イズミット湾横断橋(正式名称：オスマン・ガーズィー橋)は、世界第4位の中央径間長(1550m)を誇る、全長 2682m の鋼 3 径間連続吊橋である。人口がトルコ第1位の都市イスタンブル市と第3位の都市イズミル市を結ぶ約 420km のゲブゼーイズミル高速道路の BOT (Build, Operate and Transfer) プロジェクトの一部として建設された。(図-1)。工事中はイズミット湾横断橋の名で知られていたが、1299年にオスマン帝国を建国したオスマン I 世(1259-1326)にちなみ、正式名称をオスマン・ガーズィー橋(Osman Gazi bridge)と名付けられた(写真-1)。

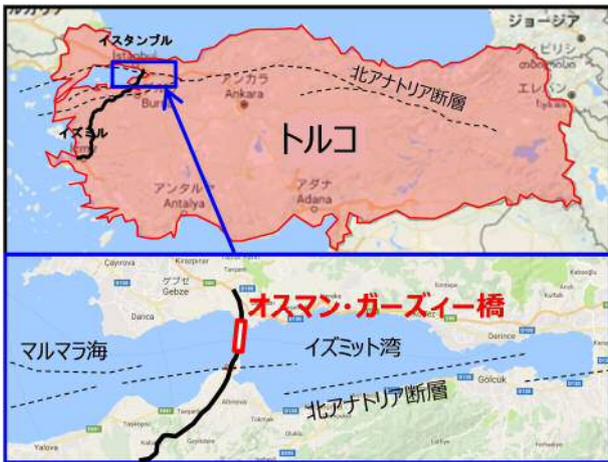


図-1 オスマン・ガーズィー橋位置図



写真-1 オスマン・ガーズィー橋全景

高速道路 BOT プロジェクトは、トルコとイタリアの建設会社6社からなる JV(以下 NOMAYG-JV)が受注した。

そのうちのマルマラ海奥のトルコ随一の工業地帯であるイズミット湾を南北に横断する吊橋 EPC 工事(Engineering, Procurement and Construction=吊橋一式の設計から建設までを請け負う)が、NOMAYG-JV と(株)IHI インフラシステム(以下 IIS)・伊藤忠商事(株)(以下伊藤忠)のコンソーシアム間で2011年9月に契約調印された。その後設計に着手し、2013年1月1日に現地工事を正式着工、事故復旧等の困難を乗り越え、42ヵ月後の2016年7月1日に開通させた。

吊橋を含む高速道路の開通によって、トルコ北西部と西部地域の交通事情が大幅に改善され、周辺インフラ整備も合わせて、さらなる経済・産業の発展や雇用促進が期待されており、今後のトルコの経済発展に大きな役割を果たすことになる。

本稿では、プロジェクトの概要から EPC 方式における上下部一括の長大吊橋建設について、設計・製作・架設について概説する。

### 2. 橋梁諸元及び工事概要

トルコにおける工業発展は、最大都市イスタンブルと工業地帯であるイズミット湾沿岸のある北西部が大部分を占めている。そこで南北の経済格差を解消し、さらなる経済発展を促すべく、南西部にある第3の都市イズミルに至る 420km の高速道路の計画が進められた。

1990年代に入札があり、一度は(株)IHI を含むコンソーシアムが受注したが、1999年に発生したマグニチュード7.4及び7.2のコジャエリ大地震による周辺地域の被災を受け、いったん中断された。

その後耐震設計の見直し等を経て、2008年にトルコ初の道路 BOT 事業として 420km のゲブゼー～オルハンガズィー～イズミル高速道路が入札公示、2009年に NOMAYG-JV が SPC(Special Purpose Company)として落札、2010年に契約調印が行われた。道路(吊橋以外の道路区間も含む)の建設期間7年を含めて22年4ヵ月

のコンセッション期間である。その後 2011 年 7 月 16 日に吊橋区間の EPC 契約を、IIS-伊藤忠コンソーシアムが受注した。契約形態はランプサム(総額一括)である。BOT プロジェクトを含む全体的な契約関係を図-2 に示す。

ファイナンスクローズ期間を経て、2013 年 1 月 1 日着工、同規模の他の海外吊橋で 52-56 ヶ月要していた工期を、後述する水深 40m に位置する海中主塔基礎など、より厳しい条件下での工事にもかかわらず 12 ヶ月短縮し、わずか 42 ヶ月後の 2016 年 7 月 1 日に開通させた。工事概要を表-1 に示す。

表-1 工事概要

|             |  |
|-------------|--|
| 所在地         | トルコ共和国 Kocaeli 県 ~ Yalova 県  |
| BOT 発注者     | トルコ共和国 高速道路局 (KGM)   |
| BOT 請負者(客先) | OTOYOL AS (トルコ5社+イタリア1社のJV)  |
| コンセッション期間   | 22年4ヵ月 (道路建設期間7年含む)  |
| 契約形態        | 吊橋上下部工一式EPC, デザインビルド   |
| 請負者         | IHIインフラシステム - 伊藤忠商事コンソーシアム   |
| 工期          | 2011年 7月16日: 吊橋EPC契約調印<br>2013年 1月 1日: 工事着工<br>2016年 6月30日: 完成引渡 (42ヵ月)<br>(施工速度 世界第1位)<br>2016年 7月 1日: 交通開放 |
| 工費          | 11.1億USD   |
| 橋長・支間割      | 2,682m (566m+1,550m+566m)<br>(中央径間長 世界第4位)   |
| 主工事数量       | コンクリート総体積: 183,500m <sup>3</sup><br>鋼材総重量: 83,500t   |

従来、海外における長大橋建設は ODA(円借款)もしくは各国自己資金を利用した事業形態が主であった。しかし相手国の経済発展もしくは財政状況の変化もあり、現在の海外大型インフラプロジェクトでは、先進国・発展途上国問わず民間の資金や提案力によって創造される PPP (Public Private Partnership) 事業が中心となっており、その中においては長大橋の建設は主ではなく、あくまでも BOT 事業の一部としての EPC 契約による建設という形態になっている。政府としてはコンセッション期間の短い SPC に工事を進めさせたい、SPC としては短いコンセッション期間の中でより長く運営を行い、通行料収入を得たい、という思いがあった。従って、長大橋の建設も如何に工期を短縮し、かつ確実に遂行できるかという点に重きが置かれていた。

本プロジェクトでは IIS が日本企業として初めて、上下部一式 EPC フルターンキーによる海外長大吊橋建設に取組み、同規模の吊橋と比較して 12 ヶ月、約 20% 工期を短縮し、42 ヶ月間で成功裡に完成させたもので

ある。表-1 に示すものをはじめとして 10 ヶ国以上のサブコンを用い、品質、工程、安全管理を行った。

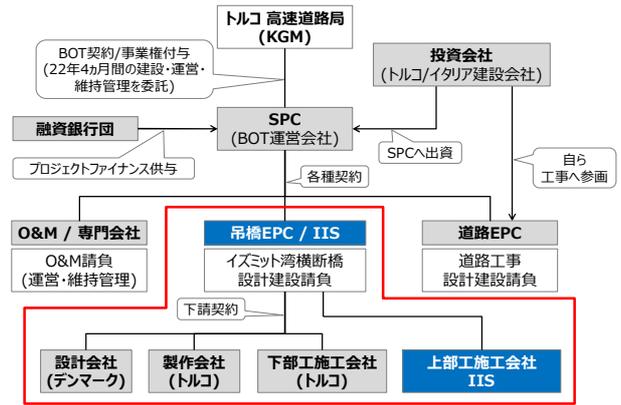


図-2 プロジェクト組織図

### 3. 吊橋の設計

本プロジェクトにおける IIS の契約範囲は、吊橋上下部一式の設計から建設までを請け負うデザインビルドである。ここでは、気象・地震・地盤などの設計基本条件から請負者の責任で調査・決定する必要がある、吊橋本体構造物のみならず、高速道路区間の一部として運営・維持に必要な全ての設備も含まれていた。IIS ではプロジェクト遂行のために各種専門下請会社を起用し、必要な調査を含めた設計・施工を行った。本体の設計はデンマークのコンサルタント COWI と契約し、IDC (Independent design checker, 設計を行うコンサルタントとは独立して設計の妥当性を確認する)として本体構造物はイギリスの Halcrow (現 CH2M), 仮設構造物はアメリカの T.Y. Lin と契約した。これら 3 社と協業し、現地工事と並行しながら、デザインビルド工事の特徴の 1 つである非常に早いスピードで、必要な調査・実験を含めて設計を進めた。本章では設計基準及び関連する調査、設計全体について述べる。各構造物の設計上の特色については施工と合わせて後述する。

#### 3. 1 設計基準

設計は欧州基準(Euro Norm, 以下 EN)とトルコ基準をベースにして進めたが、長大橋にそのまま適用できない規定や、規定が無いものなどがあつた。また、プロジェクトの性質上、次の 6 つに設計の主眼を置いた。

- (1) 高品質
- (2) 信頼できる/安全な構造物
- (3) 高耐久性/維持管理しやすい

- (4) 経験に優れる
- (5) 短い工期
- (6) コスト効率が良い

上記を網羅し、かつ十分に証明され、信頼できる技術をもとにした最新技術を含む設計を行うため、本プロジェクトに即した包括的なプロジェクト設計基準(以下、Design Basis)を独自に策定した。

### 3. 2 地盤調査

本プロジェクトに関連して、橋を中心とした約10km四方範囲の陸上・海上部において物理探査調査、ボーリング、コーン貫入試験などを用いた地盤調査を行った。北アンカレッジ・南アンカレッジの地盤概要を図-3、4に示す。

北アンカレッジは比較的状态の良い均質な石灰岩の地盤に位置する。アンカレッジ前縁から湾側に約25mあたりからこの石灰岩は地下にもぐり込み、その上に砂層・礫層が堆積している。これらの層は大地震時に液状化することが確認された。

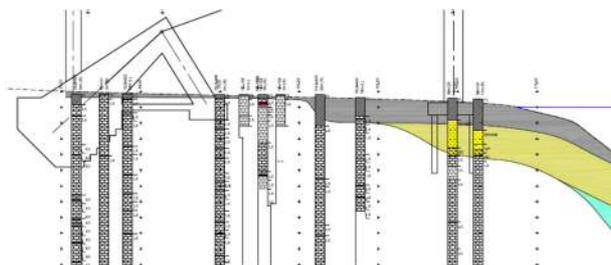


図-3 北アンカレッジ部の地盤

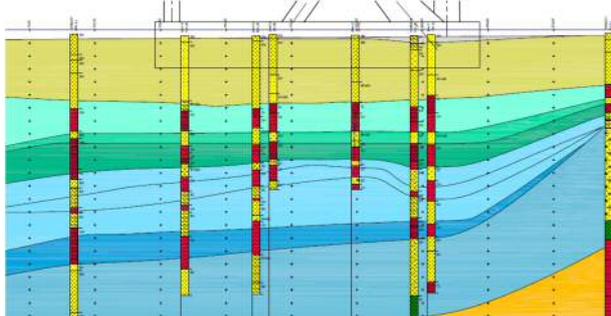


図-4 南アンカレッジ部の地盤

一方、南アンカレッジは北アンカレッジとは全く異なる性状を有していた。施工前は水深2m程度の浅瀬地帯であったが、ここを埋め立てし、アンカレッジを施工した。上層部はシルト等を若干含む砂であり、厚さは30mある。このうち上部8m程度は液状化の可能性がある。30mより下の層は密な粘土が続いている。日排水強度は25m深さで95kPa程度、40m深さで140kPa

程度である。

### 3. 3 耐震基準

イズミット湾はマルマラ海の東端に位置し、北アナトリア断層に沿った地殻変動によって生まれた。北アナトリア断層は、トルコ東部から西部エーゲ海までの1200kmにわたってアナトリア半島北部に現れており、イズミット湾においても3つに分かれた断層線の1つが架橋地点の南側2kmの位置を通っている(図-1, 5, 6参照)。

南アンカレッジは断層の周辺区域(すなわち二次断層の可能性のある範囲)の境界付近に位置している。地盤調査の結果、二次断層の跡が当初想定していたアンカレッジ位置の真下で発見されたため、中央径間長1550mを変えずに、吊橋全体を北アナトリア断層から遠ざかる方向に約150m移動させた。しかし二次断層がアンカレッジ下で発生しないと結論付けることは不可能であったため、この可能性を考慮した設計を南アンカレッジで行った。



図-5 トルコ周辺の地質構造図

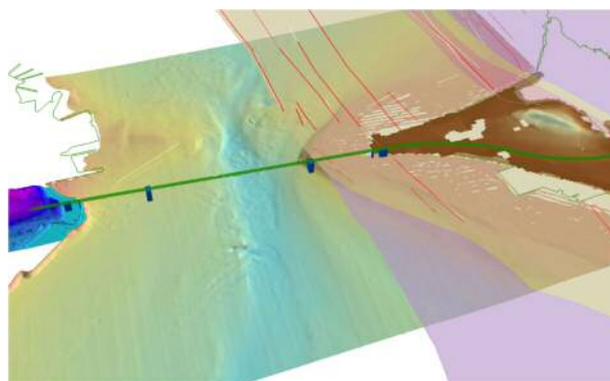


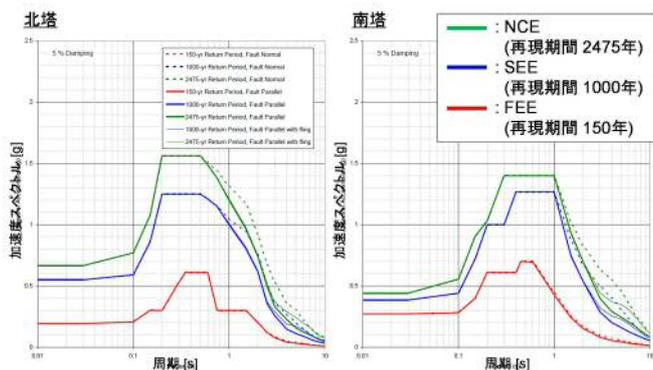
図-6 架橋地点周辺の断層

耐震照査では性能照査型設計法を採用しており、表-2に示すように、再現期間150年、1000年、2475年の地震に対してそれぞれの要求性能を満足するように設計した。図-7に例としてそれぞれの地震に対する

主塔位置での設計水平加速度応答スペクトルを示す。

表一 地震荷重の設定

| 地震区分                                   | 再現期間                     | 1999年地震との比較 | 供用状態                   | 橋梁の損傷状態    |
|--|--------------------------|-------------|------------------------|------------|
| FEE (Functional Evaluation Earthquake) | 150年 (100年間に起こる確率: 50%)  | ほぼ同等        | 地震後すぐの供用開始             | 損傷無し       |
| SEE (Safety Evaluation Earthquake)     | 1000年 (100年間に起こる確率: 10%) | 2.5倍        | 限定された供用 (車線規制, 時間規制など) | 補修可能な損傷    |
| NCE (No Collapse Earthquake)           | 2475年 (100年間に起こる確率: 4%)  | 3.5倍        | -                      | 橋梁が崩壊しないこと |



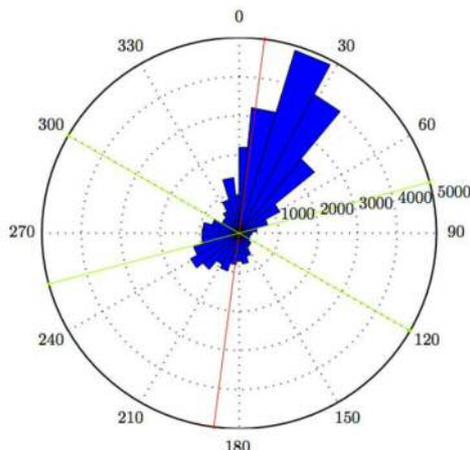
図一 主塔の設計水平加速度応答スペクトル(例)

### 3. 4 現地風況

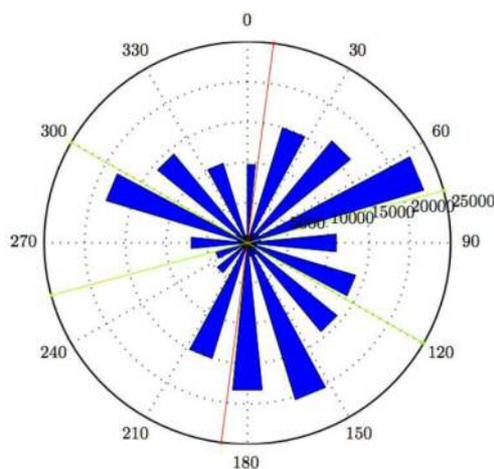
架橋地点の設計風速等は、近隣の 3 つの気象台の、古くは 1981 年からの観測データをもとにした分析、確率的アプローチによって決定した。設計風速の再現期間は 100 年であり、設計風速等を決める際には、EN1991-1-4、及び PD6688-1-4 も参照した。

図一 8, 9 に架橋地点から数 km にある南北気象台の風向分布を示す。図中、赤線(0° -180° ラインから若干右回りにずれたライン)は橋軸方向を表している。北側気象台位置の風向は北北西が支配的であり、この特徴は通年で変わらない。一方、南側気象台位置の風向は支配的な方向を決めることが出来ず、橋軸・橋軸直角方向共に平均的に吹いている。これら気象台のデータをもとに、ガンベル分布を用いた極値統計解析を行い、架橋地点での設計風特性を決定した。

10m 高さにおける再現期間 100 年の設計 10 分間平均風速を 25.4m/s と統計解析から求めた。また、高さ方向の風速分布、風向による補正、ガストの影響等も別途算出している。塔頂部(標高、+252.2m)での設計風速は 43.8m/s である(ガストなし、橋軸直角方向)。



図一 8 風向分布(通年、架橋地点の北側地区気象台)



図一 9 風向分布(通年、架橋地点の南側地区気象台)

### 3. 5 設計の全体概要

本橋では上述の各種調査を元に作成した Design Basis を用い、さらにリスクアナリシスを行い、設計を行った。図-10, 11, 12, 13 に吊橋各構造物の一般図を示す。深さ 40m の海底に立つ総高さ 292m の主塔と、メインケーブルを定着する両端のアンカレッジ、道路面を構成する補剛桁、及びそれを吊るメインケーブルから構成される。中央径間 1550m の 3 径間連続吊橋であり、世界第 4 位の長さを誇る。中央には 1000m×64m の船舶航行空間が確保されており、イズミット湾の工業地帯や軍事施設からの大型船舶が安全に航行できるよう配慮した。

前述のように IIS の契約範囲は Design & Build であり、吊橋構造物の他に、道路照明、航空・船舶航路障害灯、VMS/VTS、消火設備、SHMS などが含まれている。

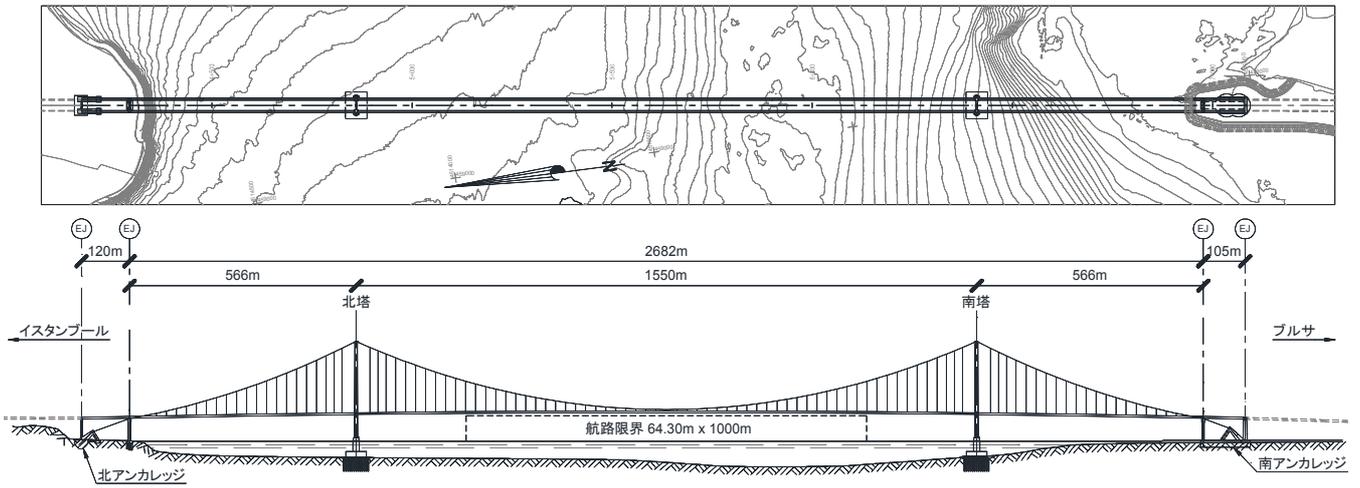


図-10 吊橋一般図

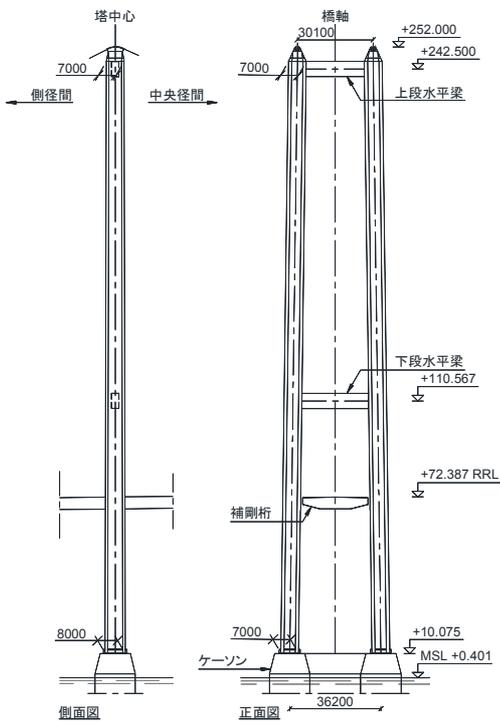


図-11 主塔一般図

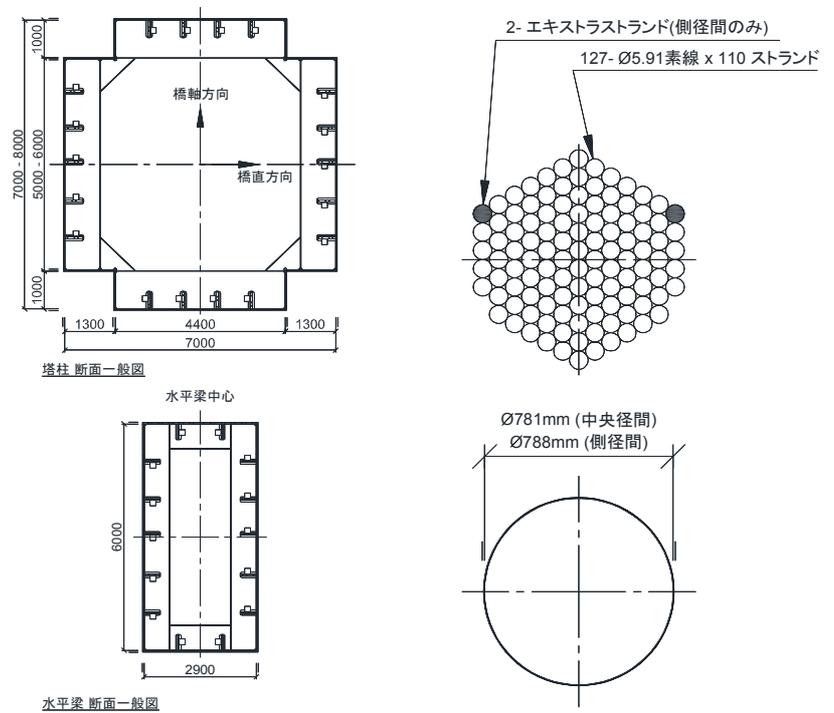


図-12 メインケーブル断面図

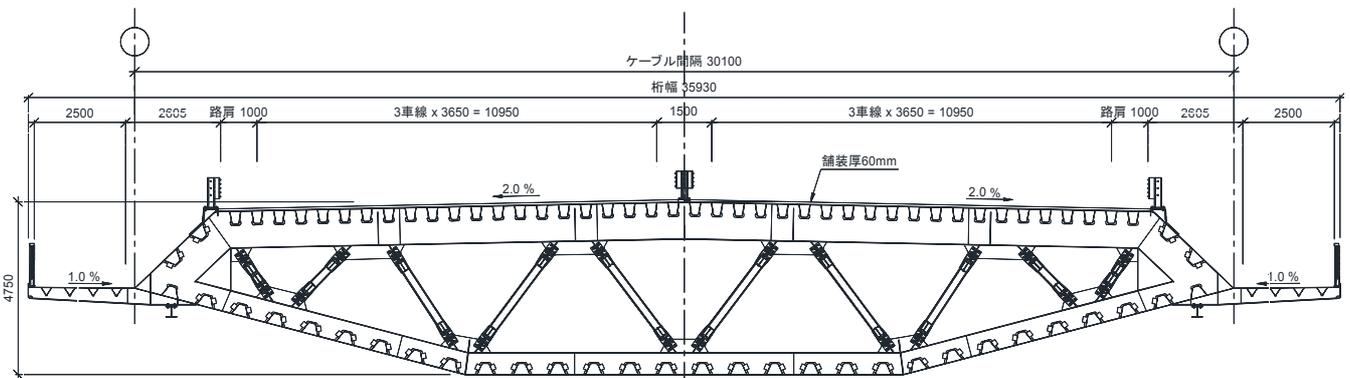


図-13 補剛桁一般図

## 4. 下部工の設計と施工

### 4. 1 主塔ケーソン基礎

主塔基礎は、鋼管杭(インクルージョンパイル)により改良された地盤、碎石層、コンクリートケーソン、鋼・コンクリート合成シャフト、鋼製主塔との接合部となる基礎土台、及び基礎土台をつなぐタイビームからなっている(図-14)。

前述の北アナトリア断層によって引き起こされる将来の大地震に対する安全性を有する構造としており、再現期間 2475 年の NCE 時には、主塔基礎が水深 40m の海底面上を滑り、主塔に伝わる水平力を低減する構造となっている。つまりコンクリートケーソンは碎石層の上に載っているだけであり、主塔基礎と地盤の間の水平荷重に対するフューズシステムとして機能する。これにより、大地震時には上部構造への入力地震エネルギーの低減が可能となり、スレンダーで経済的な上部工の設計を達成、工期短縮を実現した。これは世界の吊橋で初めて採用した耐震構造である。

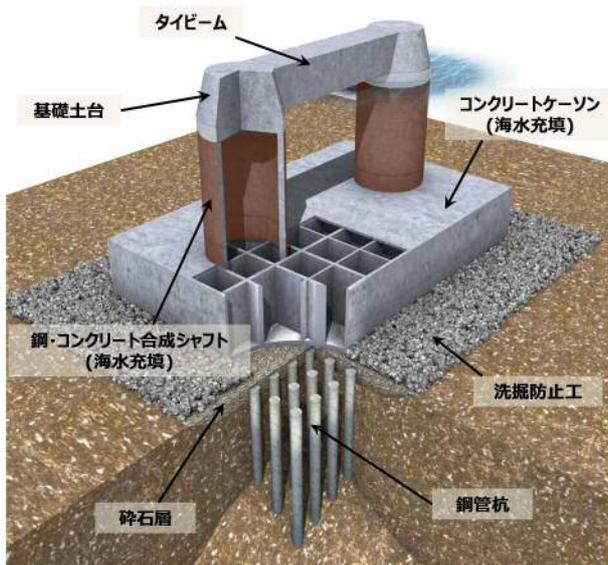


図-14 主塔基礎ケーソン模式図

コンクリートケーソンは幅 54m×67m×高さ 15m であり、その上に外径 16m、厚さ 1.2m の 2 基の円筒形鋼・コンクリート合成シャフトが載る。シャフト上部には鋼製主塔との接合部となるコンクリートの基礎土台があり、2 つのシャフトはコンクリートの梁(タイビーム)で接続される。主塔基礎は水深 40m の海底の上に立つが、コンクリートケーソン及び鋼シャフト(内部コンクリート打設前)は現場近くに準備したドライドック(写真-2)、ウェットドック(写真-3)で建設・一体化し、それを架橋地点まで曳航・沈設(写真-4)した。

沈設は、ケーソン内の小部屋に配管・バルブ設置を行い、海水を注入管理することで姿勢・速度を制御し、所定の位置に精度良く設置することができた。シャフト内のコンクリート打設及びその上の基礎土台、タイビームは現場施工とした。



写真-2 ドライドックでのケーソン製作



写真-3 ウェットドックでのケーソン製作



写真-4 ケーソン沈設

### 4. 2 アンカレッジ及び側塔

北アンカレッジは比較的良好な石灰岩盤が地表面近くに達しているが、岩盤面のひび・空隙への水の浸入に起因する将来のリスクを鑑み、岩盤を直接使用するロックアンカレッジではなく、岩盤部に躯体が一部

埋め込まれた形をした重力式アンカレッジを採用した。躯体は33m×22m×50mからなるコンクリート体である。

本橋では塔頂サドルとスプレーサドルの間に側塔及び側塔サドルを配置し、メインケーブルを偏向させることで、スプレーサドル設置位置を低くし、アンカレッジのコンクリート量を低減している。またトランジションピアは、上部構造・橋脚からの鉛直力がアンカレッジの抵抗量に寄与するような位置に配置し、効率化を図った(写真-5)



写真-5 側塔・サイドスパン俯瞰

施工に際しては、ブレイカーとダイナマイトによる掘削を行ったが、途中で斜面崩壊の懸念が生じたため、ロックアンカー、ワイヤメッシュと吹付コンクリートを施工した(写真-6)。



写真-6 北アンカレッジ掘削・コンクリート打設

南アンカレッジでは、前述のように二次断層が存在する可能性を考慮した設計を行った。アンカレッジをコンパクトな設計とするため、メインケーブルを側塔上で偏向させる構造を採用しているが、大地震時に二次断層によりアンカレッジと側塔間に相対変形・回転が発生すると橋としての機能を提供できなくなるばかりか、非常に大きな付加断面力の発生により橋の崩壊

を招きかねない。そのため、アンカレッジと側塔を厚さ16mの堅固なスラブを通して一体化した。

スラブの施工には地下15mまでの掘削が必要であったが、施工位置は埋め立てた場所であり、軟弱な地盤条件の上、掘削時の大きな側圧に対して如何に掘削量を抑え、安全で早い施工を可能とする構造にするかが課題であった。そこで掘削にあたっては、深さ28m前後にある粘土層までコンクリート壁を貫入させ、かつ、アーチアクションによって土圧に耐える支保構造として2つの円を組合せた地中連続壁を施工した。これにより地中アンカー等が不要となり、また掘削時の安全性・作業性の向上に大きく寄与した(写真-7)。



写真-7 南アンカレッジ コンクリート打設

## 5. 上部工の設計・製作・施工

### 5.1 主塔

主塔は2本の塔柱と2本の水平梁で構成された高さ242mの鋼製主塔である。日本では多数実績があるものの、世界の長大吊橋では例が少ないが、主塔基礎工事と塔ブロック工場製作とを平行して進めることで、架設期間を最小とする目的で採用した。塔柱中心間隔は塔基部から塔頂で36.2mから30.1mに漸変している。断面は国内吊橋でも実績のある隅切り断面を採用し、設計断面力に応じて橋軸方向幅が塔基部から塔頂で8mから7mに変化させた(図-11 参照)。使用鋼材はS460(設計降伏応力460MPa)を基本として、一部の縦リブ添接板にS620を使用している。主塔の主構造鋼重は橋梁全体で約18,000tである。

主塔の製作は全てトルコ国内工場で行った(写真-8)。架橋位置から約50km離れた製作工場パネル製作・ブロック組立を行い、バージにて架橋位置近くの仮置ヤードに海上輸送した。



写真-8 主塔パネル製作(左:リブ溶接, 右:組立)

主塔の架設は2段階に分けて行った。塔柱全22ブロック中ブロック11まで及び下部水平梁は、1200t吊フローティングクレーン(以下FC)によってブロック一括架設を行った(写真-9)。ブロック12から22及び上部水平梁は、下部水平梁上に設置した46t吊ジブクラッキングクレーン(以下JCC)により架設した。塔柱ブロックはクレーンの重量制限からパネルごとの架設とした(写真-10)。



写真-9 FCによる主塔ブロック架設

主塔の製作・架設に際しては、過大な付加応力が生じるのを防ぐため、鉛直精度の確保が求められた。工場仮組時1/5000、主塔架設完了時1/2500が設計要求であったが、最終的に表-3に示す精度で架設を完了した。

表-3 主塔鉛直度計測結果(主塔架設完了時)

| 箇所  |   | 橋軸方向       | 橋直方向       | 許容値       |
|-----|---|------------|------------|-----------|
| 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 |           |

## 5.2 ケーブルシステム

メインケーブルはケーブル架設期間の短縮及び施工性の観点からPPWS工法(Pre-fabricated Parallel Wire Strand 工法)を採用した。過去の吊橋で採用された中で最大径の5.91mm 亜鉛めっき鋼線127本(破断強

度1760MPa)を束ねたストランドを中央径間は110本、側径間は2本のエキストラストランドを含む112本使用し、メインケーブルを構成した。



写真-10 JCCによる主塔パネル架設

アンカレッジの定着部は、PPWSのアンカーソケットを、テンションロッド、クロスヘッドスラブを通して、PCストランドでアンカレッジ・メインブロックに定着する構造とした。ストランド定着をコンパクトに集約することにより、アンカレッジのコンパクト設計を可能にした(写真-11)。



写真-11 メインケーブル定着部

ハンガーケーブルは7mm径亜鉛めっき鋼線を束ねたPWS(Parallel Wire Strand)で、メインケーブルと共に東京製綱(株)の中国工場にて製作、海上輸送した。

メインケーブルの形状管理は、ストランド製作時に設定した主要ポイントのマーキング位置を参考に、昼間に架設したストランドのサグ形状を温度のばらつきが少ない夜間に計測(写真-12)、調整することで対応した。実際のサグ計測は、ストランド架設の進捗に合せ、絶対サグ計測と相対サグ計測を併用した。ケーブルコンパクション完了時点のメインケーブル左右相対差の出来形は、中央径間中央部で許容値 100mm 以内に対し、実測値 36mm であった。



写真-12 夜間サグ調整

### 5.3 補剛桁

補剛桁は桁高 4.75m、桁幅 30.1m の扁平 6 角形断面を有する箱桁であり、両端部に 2.915m の維持管理用通路を配した構造とした。車道部には厚さ 60mm のアスファルト舗装を採用した。補剛桁の全体重量は 33,000t であり、一般部は S355 を、桁端部及び主塔部の特殊部位は S420 及び S460 の鋼材を使用した。

疲労設計では、EN に沿った設計の他、トルコの厳しい交通事情(重量分布、台数など)を反映するため、第 2 ボスポラス橋の交通調査結果に基づく荷重条件を用いた照査も実施し、最終的にはデッキプレート、及びデッキに溶接されるダイヤフラムの板厚に 14mm を採用するとともに、応力が高い細部においては、仕上げを行うなどの対策を施した。

補剛桁パネルは主塔ブロックと同じ製作工場で作成を行い、イズミット湾奥の造船所に陸上輸送して、全 113 ブロックへの組立を行った(写真-13)。その後排水設備、防護柵支柱等の付属品や仮設機材の艀装を行い、仮置きした(写真-14)。

補剛桁はハンガーケーブル間隔に合わせ、25m ブロックを基本として製作されたが、現場溶接継手数を削

減し、全体工程の短縮を図るため、中央径間のブロックについては事前に仮置ヤードにて 50m ブロックに大型化した。架設位置は全て海上であり、中央径間中央部は航路上に位置するため、港湾港長及び海事関係者との協議を経て一部航路規制を行い、架設を進めた。



写真-13 補剛桁ブロック組立



写真-14 補剛桁製作工場における仮置

一般部はメインケーブル上に設置したリフティングデバイス(以下 LD)によって自航バージから直接吊上げ、ハンガーケーブルとの接続を行った。各径間で並行して架設を進め、約 2000m 分のブロックをわずか 17 日間で架設完了した。一方、主塔部、桁端部及び中央径間中央部については LD による直下吊架設が物理的に困難であるため、合計 17 ブロックについては 1200t 吊 FC による一括架設を行った。



写真-15 LDによるメインスパンの補剛桁架設

補剛桁の閉合は中央径間の南北2カ所、各側径間1カ所の計4カ所で行ったが、落とし込み遊間を確保するため、中央径間先行で閉合し、最後に南側径間の閉合を行った。

その後、補剛桁の現場溶接、路面の防水工・舗装と付属品の設置を同時並行で進め、桁架設完了から交通解放まで、通常6ヵ月程度かかるところを2ヵ月まで短縮することができた。

## 6. 維持管理

本橋では吊橋の維持管理性に考慮し、種々の設備を設置した。

### 6.1 点検・検査用設備

主塔、ケーブル、補剛桁の外面に自走式の検査車(写真-16, 17)を設置し、維持管理時の容易かつ随時のアクセスを可能にした。



写真-16 主塔外面検査車(脚柱・水平梁)



写真-17 桁下検査車

### 6.2 乾燥送気システム

鋼構造物の防錆に関するライフサイクルコスト低減を図るため、主塔、ケーブル、補剛桁の内面に乾燥送気システムを導入した(図-15)。主塔上下部水平梁及び補剛桁内部5カ所に設置した除湿機から乾燥した空気を構造物内に循環させることで、相対湿度を40%以下に保ち、錆びの進行を抑制している。これにより内面塗装を簡略化(工事期間中の一時的な防錆としてジンクリッチペイント塗布)することができ、将来の塗替えに要するコストを削減している。

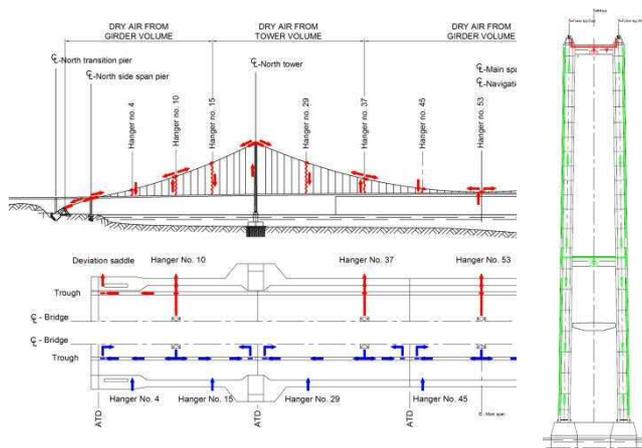
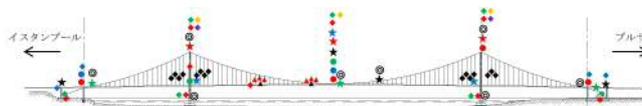


図-15 乾燥送気システム概念図

### 6.3 構造健全性モニタリング

本橋では、吊橋の設計性能・設計寿命に関する各種情報を継続的に記録する構造健全性モニタリングシステム(SHMS, Structural Health Monitoring System)を導入した。橋梁全体で約400の各種センサーを設置、継続的に計測を行い、得られた情報は、道路全体の統合管理システム(SCADA)に取り込むことで、吊橋の状況確認及び維持管理計画に用いることを可能とした(図-16)。また、リアルタイムでの計測を行うことで予め設定した閾値に対する警告を発することが可能であり、強風時における走行制限など走行車両の安全確保にも用いられている。これらのデータは全て高速道路全体のコントロールセンターに集約され、道路上のカメラ映像などと合わせて常時監視されている(写真-18)。



| 名称           | 凡例 | 個数 | 名称          | 凡例 | 個数  |
|--------------|----|----|-------------|----|-----|
| 気象計          | ●  | 4  | 2軸加速度計      | ◆  | 32  |
| 雨量計          | ●  | 2  | 3軸加速度計      | ◆  | 17  |
| 日射計          | ●  | 4  | 携帯加速度計      | -  | 6   |
| 鋼構造物表面温度計    | -  | 84 | 超音波距離計      | ◆  | 8   |
| 路面温度計        | ★  | 6  | GPS         | ◆  | 8   |
| メインケーブル表面温度計 | ★  | 6  | 静的傾斜計       | ◆  | 3   |
| ハンガー表面温度計    | ★  | 6  | 動的傾斜計       | ◆  | 2   |
| 桁内温度計        | ★  | 3  | ひずみ計        | -  | 160 |
| 相対湿度計        | ◎  | 16 | 荷重計測ピロ      | ▲  | 2   |
| 路面点検車        | -  | 1  | ハンガー張力変動計測計 | ▲  | 12  |
| 無停止軸重計測計     | -  | 2  | 超音波ボルト長計測計  | -  | 4   |

図-16 SHMSセンサー配置図



写真-18 コントロールルームのモニター  
(橋梁上のカメラ映像, SHMS 情報など)



写真-20 トルコ人と日本人の協業  
(プロジェクトマネジャーと HSE チームによる安全パトロール)

## 7. トルコの技術発展への貢献

これまで述べたように、5 万 t 以上におよぶ、ほぼ全ての鋼構造物についてはトルコ国内業者にて製作を行った。特に主塔・補剛桁の製作工場は過去に IHI との協業経験はあるものの、吊橋経験の無い業者であったため、日本から工場技能者及び橋梁特殊工を派遣し、組立・溶接等の製造技能から、工場内レイアウトなどの生産効率、品質管理手法等の向上について技術指導や各種要領の作成支援を行った。また、上部工架設に際しては、トルコ人労働者を IIS にて直接雇用し、これにより、品質・工程共に日本における工場製作と同等の鋼構造物を保証、客先に納入する、というだけでなく、地元トルコへの技術移転を通して、トルコの技術発展に貢献することができた。また HSE (Health, Safety and Environment: 衛生, 安全, 環境) に関して、国際基準に準拠した上で、日本人 HSE 技術者による下請工場内、現場内のパトロールを行い、トルコ人の安全に対する意識指導を行った(写真-19, 20)。



写真-19 トルコ人と日本人の協業  
(製作工場での精度管理)

## 8. おわりに

トルコ共和国にて 2016 年 7 月に開通したオスマン・ガーズィー橋の設計・製作・施工について概説した。ケーソン沈設、補剛桁の閉合(写真-21)などプロジェクトの節目では首相、大統領をはじめとしたトルコ政府幹部が出席するイベントも催され、厳しい工程の中、スケジュール調整とその厳守に苦労したが、一方でトルコ国内における本橋の認知度の高さを実感することができた。2016 年 6 月 30 日の開通式典(写真-22)では、式典後に大統領とプロジェクトメンバーの晩さん会も催された。



写真-21 閉合ブロックの架設(南側径間)



写真-22 開通式典でのライトアップ

中央径間 1000m 以上の吊橋に限って言えば、国内では本四架橋の来島海峡大橋(完成 1999 年)を最後に主だったプロジェクトが無く、長大橋分野の知見を継承し、事業を継続していくためには海外市場への参画が不可欠である。本プロジェクトでは IIS の橋梁事業として初めて BOT プロジェクトへ参画し、長大橋の EPC プロジェクトを 1 社単独で完工した。今後このようなプロジェクトが世界的に増えていくと考えられる中、本稿を参考の 1 つとしていただければ幸いである。

最後に、本プロジェクト遂行に当たり、工事受注段階から、日本の関係省庁・機関の方々の様々な協力を得ました。この場をお借りして深く感謝致します。

また、NOMAYG-JV、及び(株)長大を含む 3 社からなる KGM 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深く感謝の意を表すとともに、本橋の設計・製作・架設に関わった全ての方々の、個人・組織としての多大なる貢献に敬意と感謝を表します。

[参考文献]

- 1) Yanagihara, et al. : Izmit Bay Suspension Bridge - Overview of the Project, IABSE Conference Nara (2015.05)
- 2) 川上ら：トルコ・イズミット湾横断橋における溶接施工技術と施工事例, 溶接技術 Vol.64 no.10(2016.10)
- 3) 川上ら：トルコ, 世界第4位の長大吊橋の建設 ~BOT方式による Osman Gazi 橋 (IZMIT 湾横断橋)の EPC 建設工事, JSSC(Journal of steel structures & construction) No.28(2017.01)
- 4) 川上ら：オスマン・ガーズィー橋の事業概要, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.8-9(2017.06)

- 5) 井上ら：オスマン・ガーズィー橋の設計, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.10-15(2017.06)
- 6) チェティンカヤら：オスマン・ガーズィー橋の下部工施工, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.16-22(2017.06)
- 7) 村田ら：オスマン・ガーズィー橋の上部工製作, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.23-29(2017.06)
- 8) 工藤ら：オスマン・ガーズィー橋の上部工架設, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.30-35(2017.06)
- 9) 井上ら：オスマン・ガーズィー橋の耐風・制振, 橋梁と基礎 Vol.51, No.6, pp.36-41(2017.06)