

# 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

## Design for “IZMIT Bay Bridge” (Osman Gazi Bridge) in Design & Build Project

井上 学	株式会社 IHI インフラシステム	海外プロジェクト室トルコプロジェクト部	主幹
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
社浦 潤一	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	理事
山崎 康嗣	株式会社 IHI インフラシステム		技師長

株式会社 IHI インフラシステムは、中央径間 1 550 m の「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。設計は、ヨーロッパ基準・トルコ基準をベースに進めたが、長大橋に適用できないものや規定がないものがあり、また、基本条件も請負者の責任で調査・決定して、プロジェクトに即した包括的なプロジェクト設計基準 (Design basis) を独自に策定する必要がある。本稿では、データ収集、分析、試験、実験などをおして作り上げた Design basis について、幾つかの検討例を交えて紹介する。また、Design basis を基に進めた主要構造物の設計についても概説する。

IHI Infrastructure Systems Co., Ltd. entered into a contract for a Design & Build project for the IZMIT Bay suspension bridge, with a main span of 1 550 meters, in Turkey. In addition to the design, which is to follow Eurocode and/or Turkish standards, the contractor is responsible for study and development with regard to certain requirements which are not suitable for longer bridges or that are not covered in Eurocode or Turkish standards, as well as with regard to the design conditions. In this regard, a comprehensive basis for project design, or a design basis, has been established. In this paper, selected examples related to design basis are introduced. An introduction is also give to the design of major structural components.

### 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 IZMIT

(イズミット) 湾をまたぐ全長 2 907 m、中央径間 1 550 m (世界第 4 位のスパン) を誇る吊橋となる「イズミット湾横断橋」の建設工事を手掛け、2016 年 7 月 1 日に交通開放させた。「イズミット湾横断橋」(第 1 図) は、



第 1 図 「イズミット湾横断橋」全景  
Fig. 1 General view of “IZMIT Bay Bridge”

オスマン帝国の祖にちなみ、正式名称を「オスマン・ガズイー橋」「Osman Gazi Bridge」と名付けられた。本稿では、これまで使われていた呼称で、かつ、日本でなじみの深い「イズミット湾横断橋」という名称を使用する。

IIS の工事範囲は、EPC 契約（Engineering, Procurement, Construction：吊橋一式の設計・調達・建設までを一括で請け負う）に基づく Design & Build であり、気象・地震・地盤などの設計基本条件も請負者の責任で調査・決定する。設計はヨーロッパ基準（Eurocodes：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、規定がないものなどがあり、この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）を独自に策定する必要があった。本稿では、① データ収集、分析 ② リスクアナリシス ③ 試験・実験、などをおして作り上げた Design basis を使って進めた設計について、幾つかの事例を交えつつ、主要構造物ごとに概説する。

## 2. プロジェクト<sup>(1)</sup>

本橋は、トルコ第 1 位の都市イスタンブール市と第 3 位の都市イズミル市を結ぶ約 420 km のゲブゼーイズミル高速道路の BOT（Build Operate Transfer）プロジェクトの一部である。高速道路 BOT プロジェクトは、トルコとイタリアの建設業 6 社から成る JV（以下、NOMAYG JV）が受注し、そのうちのイズミット湾を南北に横断する吊橋 EPC 工事が、NOMAYG JV と IIS・伊藤忠商事株式会社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、事故などの困難を乗り越えて、42 か月で完成させた。

この高速道路プロジェクトは、トルコの道路事業としては BOT 運営の先駆けである。BOT のコンセッション期間は 22 年 4 か月、うち、道路全体の建設期間が 7 年、管理運営期間が 15 年 4 か月の計画である。全線が開通すると、トルコ北西部と西部地域の経済・産業の発展とともに雇用促進が期待され、さらには、マルマラ海周辺を結ぶ道路のインフラ整備がより進むことになるため、いっそうのビジネスの機会が生まれると考えられている。「イズミット湾横断橋」が完成すると、湾をまたぐ対岸への交通の所要時間が、現状の船による約 1 時間、湾を迂回する道路の約 1.5 時間から、6 分に短縮される。

IIS は、IHI 時代から多くの海外橋梁工事を手掛けてき

た。特にトルコにおける橋梁事業としては過去 40 年以上の歴史をもつ。しかし、全長 3 km に及ぶ吊橋の建設を IIS 単独で請け負うことは初めてであり、また、完成するとトルコ最長の橋という高い注目度、かつ、BOT 工事の特徴である工期厳守が第 1 の目的とされており、とてもチャレンジングなプロジェクトであった。

コンクリート、鋼材ともに相当な物量であるため、工期に与える数量のインパクトは大きく、いかに数量を最適化した設計ができるかがプロジェクト成否のカギを握るが、同時に、施工の安全性、品質確保、将来の維持管理の容易性も求められる。設計・施工において、斬新かつ大胆な改善による合理化と、施工の確実性への高い信頼性が要求された。

IIS は、プロジェクト遂行のために各種専門下請け会社を起用した。設計では、デンマークのコンサルタント会社、IDC（Independent Design Checker）として、イギリス（本体構造物＋一部仮設構造物）とアメリカ（仮設構造物）のコンサルタント会社を起用した。そのほか、ケーブル調達は日本の製作専門業者、桁塔の製作はトルコの製作専門業者、土木工事はトルコの海洋土木会社など、専門性・工期・費用を考慮のうえ、発注業者を決めた。ただし、ほとんどの業者は吊橋の施工経験がないため、スーパーバイザーを派遣して技術的な指導と品質・工程管理を行った。

## 3. 耐震設計<sup>(2)</sup>

トルコは世界有数の地震国である。架橋地点であるイズミット湾には、アナトリア半島北部を東西に約 1 200 km にわたり横断している北アナトリア断層があり、架橋地点はこの断層から約 2 km の位置にある。1999 年には、イズミット湾で M7.4 を記録したコジャエリ地震によって、約 17 000 人もの死者が出ている。

耐震設計には性能照査型設計法を採用しており、再現期間 150 年（FEE：Functional Evaluation Earthquake）、1 000 年（SEE：Safety Evaluation Earthquake）、そして 2 475 年の地震（NCE：Non Collapse Earthquake）に対して、それぞれの要求性能を満足するように設計している。第 1 表に耐震性能要求を示す。① FEE に対しては軽微な損傷を許容するが、地震後に直ちに供用可能であること ② SEE に対しては修復可能な損傷を許容するが、地震後に限定的な供用が可能であること ③ NCE は損傷を許容するが橋が崩壊しないこと、が要求性能である。

第 1 表 耐震性能要求  
Table 1 Seismic performance criteria

耐震性評価区分	再現期間 (年)	要求性能
FEE ( Functional Evaluation Earthquake )	150	地震後も機能は健全で、補修しないで使用可能である ( 最小限の損傷 ) .
SEE ( Safety Evaluation Earthquake )	1 000	地震後に適切な残存耐力を有し、緊急輸送路としての機能を確保するとともに、点検・補修が可能である.
NCE ( Non Collapse Earthquake )	2 475	地震によって構造物全体系が崩壊しない.

( 注 ) FEE : 損傷の最小化  
SEE : 非破壊要求 2  
NCE : 非破壊要求 1

「イズミット湾横断橋」の耐震設計の特徴として、主塔基礎の免震構造、アンカレッジの設計、主塔の設計が挙げられる。これらの設計は、地盤調査・試験、架橋地点の地震特性調査・解析と並行して進められた。地盤調査では、ボーリング、CPT ( コーン貫入試験 )、ボーリングサンプルによる特性把握試験、層の全体像と断層の有無を確認するための超音波による地質調査を実施した。

北アナトリア断層の主断層は架橋地点の南側約 2 km であるが、南側は断層の遷移区間の境界付近に位置し、付随する 2 次断層が当初想定していた南側アンカレッジ位置の直下で発見された。これに伴い、中央径間長さを変えずに、橋の位置を北側に約 150 m 移動させた。第 2 図に架橋地点周辺の断層を示す。

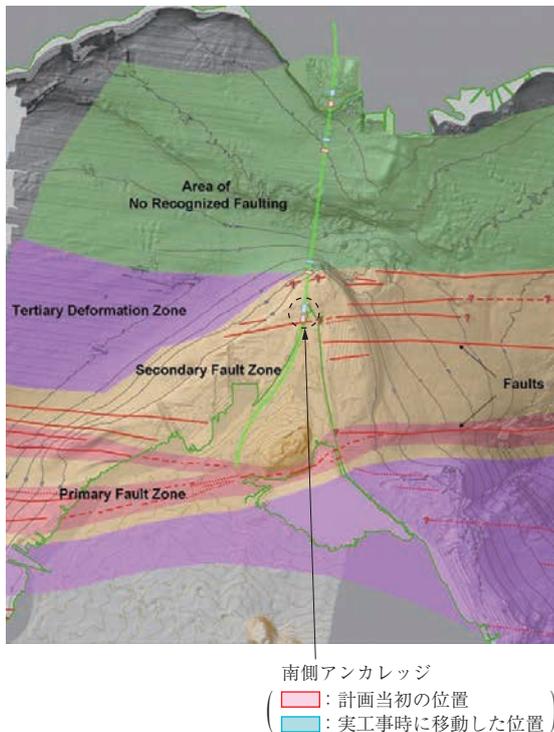
主塔基礎構造は、① 鋼管打込みによって改良された地盤 ② 砕石層 ③ コンクリートケーソン ④ 鋼コンクリート

の合成構造であるシャフト ⑤ 鋼製主塔との接合部となる基礎土台 ⑥ 基礎土台を結ぶタイビーム、から成る。第 3 図に主塔基礎を示す。

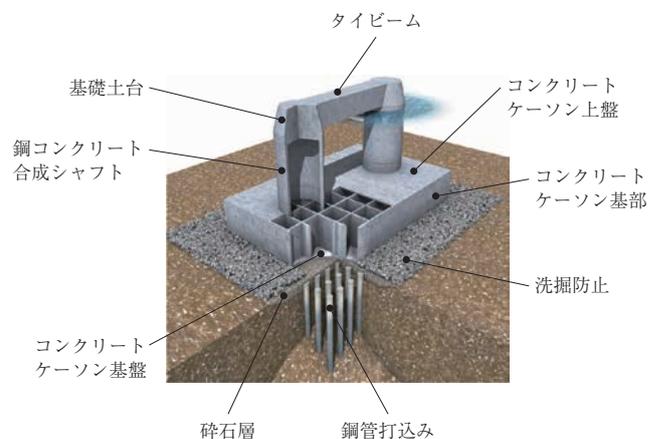
コンクリートケーソンは砕石層の上に載っているだけであり、大地震時には、主塔基礎と地盤の間の水平荷重に対するヒューズシステムとして機能する。この免震構造は、吊橋では初めて採用されたが、これによって、基部から伝わる外力を減らすことで経済設計を行っている。

大地震時のヒューズシステムを含む非線形な挙動と、鋼管打込みによって改良された地盤を適切に評価して設計に反映するために、地盤調査結果を基にした 2D および 3D の FEM ( Finite Element Method ) モデルによるローカルな検証 ( PLAXIS と ABAQUS を使用 ) に加え、全体解析モデルに使用するための非線形ばね支点モデルの設定を行った。第 4 図に主塔基礎部の非線形ばねモデルを示す。第 5 図に大地震 ( NCE ) を代表する設計地震動 ( 計 7 波 ) におけるケーソンと地盤の橋軸方向の相対変位時刻歴プロットを示す。残留相対変位は約 0.6 m であり、大地震後の要求性能を十分満足している。

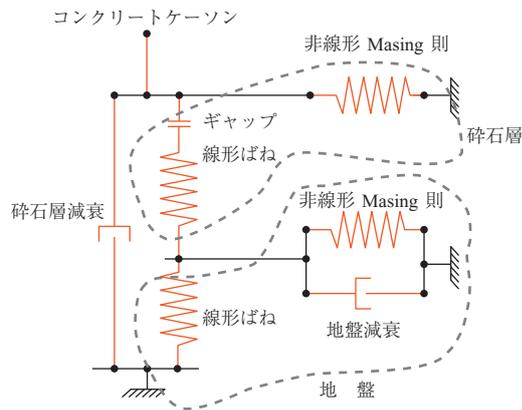
第 6 図に南側アンカレッジを示す。コンパクトなアンカレッジ設計を可能にするために、メインケーブルはサイドスパンピア上のサドルで偏向している。前述のとおり、



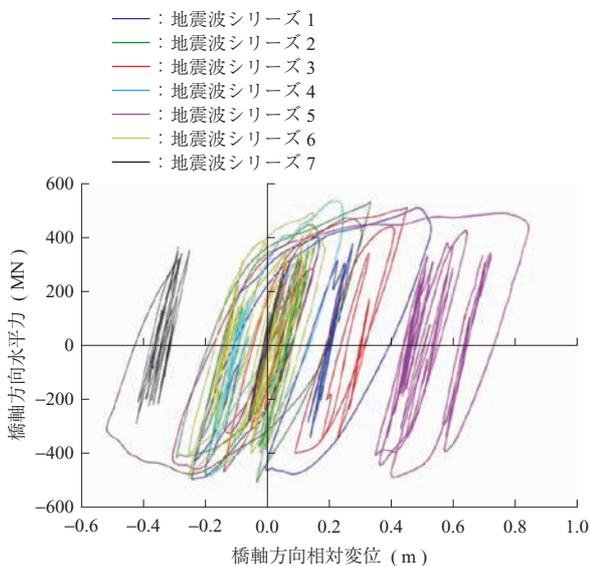
第 2 図 架橋地点周辺の断層  
Fig. 2 Seismic faults around bridge location



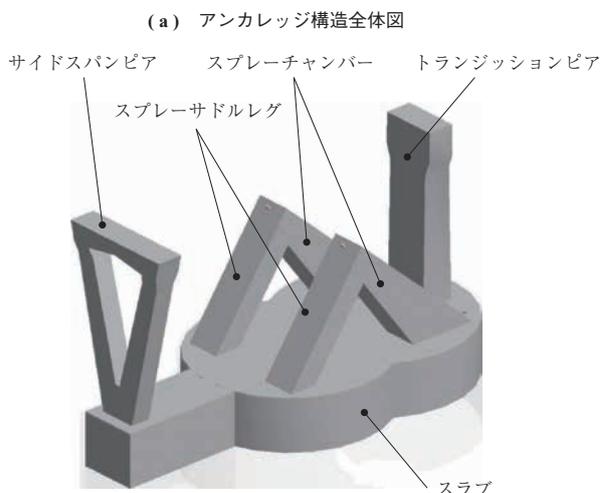
第 3 図 主塔基礎  
Fig. 3 Tower foundations



第 4 図 主塔基礎部の非線形ばねモデル  
Fig. 4 Soil/structure interaction model for tower foundations



第 5 図 NCE 時の橋軸方向相対変位と水平力  
Fig. 5 Relative displacement and horizontal force in longitudinal direction for NCE



第 6 図 南側アンカレッジ  
Fig. 6 South anchorage

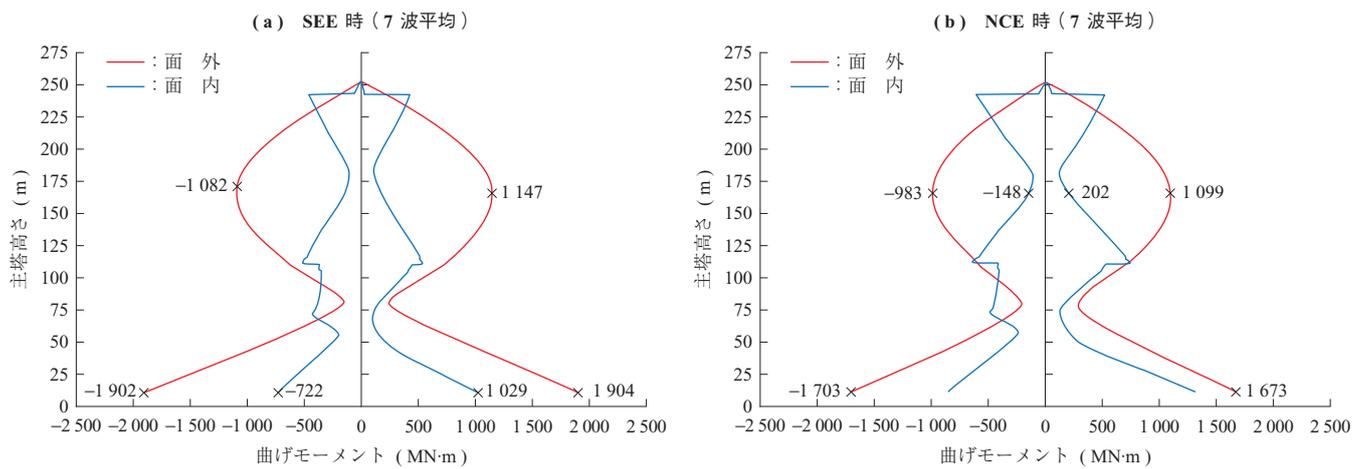
南側アンカレッジは、北アナトリア断層から遠ざかる方向に、当初想定位置から約 150 m 移動させたが、2 次断層がアンカレッジ下で発生しないと結論付けることは不可能であり、この可能性を考慮した設計を行った。大地震時に、2 次断層によってアンカレッジとサイドスパンピア間に相対変形・回転が発生すると、橋としての機能を提供できなくなるばかりか、非常に大きな付加断面力によって橋の倒壊を招きかねない。このため、アンカレッジとサイドスパンピアは、厚さ 16 m の堅固なスラブを介して一体化した。この解決策は、アンカレッジに大きな冗長性を与えることになり、結果として、たとえ斜め滑り断層運動 (Oblique-slip fault movement) が起きたとしても耐え得る構造となった。大地震時の 2 次断層に対する構造安全性は、700 × 1 400 × 130 m 範囲の地盤モデルを用い、地中の下層に幾つもの想定断層ずれを発生させてその影響を確認した FEM 解析 (PLAXIS 3D を使用) をはじめとした複数の検討によって保証されている。

鋼製主塔は、大地震時の塑性変形を許容する設計としたが、主塔断面の高さ 125 ~ 200 m 範囲が、地震時挙動が支配的であった。地震による橋軸方向の曲げモーメントは、NCE より再現期間が短い SEE の方が大きな力を発生させる。第 7 図に地震による主塔曲げモーメントを示す。

設計は EN1998-2 をベースにし、細部については、一部イタリア基準を採用して、以下の四つのステップで行った。

- (1) 主塔断面の塑性耐力の評価
- (2) 主塔断面の回転変形耐力の評価
- (3) 主塔全体系としての挙動評価
- (4) 残留変形による影響評価





第7図 地震による主塔曲げモーメント  
Fig. 7 Bending moment in tower leg due to seismic events

実際に塑性変形するかどうかは鋼材の特性に依存する。このため、評価は設計上の降伏応力度、およびその値の1.25倍に対して行った。設計上の降伏応力度の1.25倍でのケースは、塑性変形が発生しないことによる影響（たとえば、ほかの構造部材への作用断面力が大きくなるなど）を正しく評価するためである。「イズミット湾横断橋」の主塔の場合、1.25倍のケースでは塑性変形は発生しない。第8図に使用鋼材の降伏応力度と設計降伏応力度との差を示す。16 mm 以上 40 mm 以下の厚板では設計上の降伏応力度に対して、実際の降伏応力度は最も低かったケースでも13%、平均では20%以上高い値を示しており、このようなアプローチが現実に即していることが分かる。

設計上の降伏応力度を使用した評価では、最大の残留塑

性ひずみは0.0008であった。この値は、初期不整として設計上考慮している値よりも十分に小さく、地震時の塑性変形が問題ないことが確認できた。

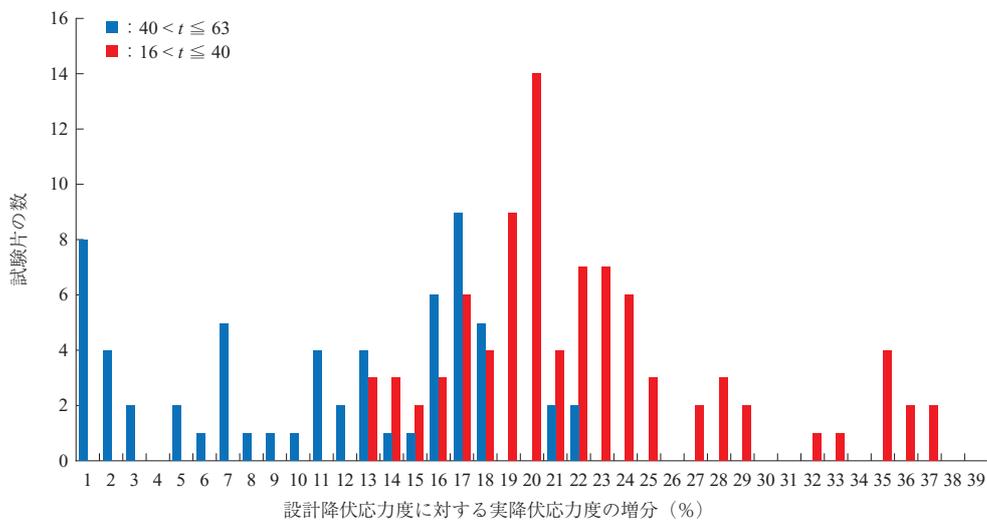
#### 4. リスクアナリシス

「イズミット湾横断橋」は、以下の二つの思想のどちらかを満足するように安全設計された。

##### (1) Design strategy-1

偶発事故に対して、適用可能な規定、客先からの特別な要求、広く一般に知られている事例を基に橋やその付帯物の設計を行う。構造物を損傷させる可能性のある以下のリスクを Strategy-1 の適用とする。

- ① 地震
- ② 自動車荷重



(注) t: 板厚 (mm)

第8図 使用鋼材の降伏応力度と設計降伏応力度との差  
Fig. 8 Differences between steel plate yield stress and design yield stress

- ③ 風
- ④ 温 度
- ⑤ 高水位および波

(2) Design strategy-2

適用可能な規定や事例がない特定のリスクに対して、リスク許容値を定義し、リスクアナリシスを行って評価・設計を行う。以下のリスクを Strategy-2 の対象とする。

- ① 火 災
- ② 爆 発
- ③ 危険物の放出
- ④ 船舶衝突
- ⑤ 航空機衝突
- ⑥ 自動車の主塔・ハンガーへの衝突
- ⑦ 津 波
- ⑧ 海底洗掘
- ⑨ ユーザーの死亡に係る自然災害
- ⑩ ユーザーの死亡に関連する交通事故

4.1 方法論

リスクアナリシスは、以下の四つのステップに分けて実施した。

- ステップ-1: 必要なデータの収集
- ステップ-2: 全体的な危険有害物・事象の特定
- ステップ-3: 特定した個々の危険に対するリスクアナリシス、および関連するリスク軽減策検討
- ステップ-4: 結果集約、および全体的なリスクアナリシス

可能な限りトルコの現状を反映したが、関連データがない場合には、ヨーロッパ諸国のデータを使用した。

リスクアナリシスは、構造物の詳細設計と同時進行で実施した。これら四つのステップの実施中、リスクアナリシスに最新設計状況を反映し、かつ、リスクアナリシス結果が影響を与える箇所的设计に適切に反映されるように、リ

スクアナリシスチームと構造設計チームとの意見・情報交換を定期的に行った。

リスクアナリシスをとおしての安全設計を実施するに当たって、次の2点をリスク対応の最重要方針とした。

- (1) 橋のユーザーへのリスクが、高速道路の同等の長さおよび陸上の道路交通に対するものよりも、著しく大きくないこと。ただし、橋の特殊性と高速移動を可能にする利便性を鑑みて、幾つかの追加リスクは許容する。
- (2) ある期間以上の橋の通行止めにつながる事故の可能性は、類似の橋梁に対するものよりも著しく大きくないようにする。

評価は20年の供用期間、すなわち、2015年および2035年に対して実施した。なお、本体の工事開始は、BOTのファイナンシャルクローズとリンクしているため、詳細設計段階では供用開始時期を特定できない。そのため、詳細設計時(2012年)に想定し得る最も早い供用開始予定で評価した。

Design strategy-2 に対するリスク許容基準は、ALARPの原則 (the risk shall be As Low As Reasonably Practicable) に従っている。第9図にALARPの原則を示す。Design strategy-2に関連するリスクが、許容上限リスク以下となるように設計し、かつ、ALARP範囲にあるリスクに対し、ALARPの原則に基づき、必要な追加リスク軽減対応策を施している。

具体的なリスク許容基準は、ユーザーリスク、社会的ユーザーリスク、通行止めリスクに対して、それぞれ以下のように設定した。

4.1.1 ユーザーリスク

ユーザーリスクすなわちドライバーのリスクは、橋の上での“利用者の1km当たりの死亡率”で表現される。許容上限値は、リスク対応の最重要方針に従い、トルコ的高速道路におけるドライバー死亡率の50%増しに設定し

範 囲	リスクの大きさ	説 明
ハイリスク範囲	リスク大	異常事態以外はリスクを認められない。
ALARP 範囲		リスク低減コストが、それによって得られる改善を大きく上回る場合には、リスクの存在が許容される。
受入れ可能範囲	無視できるリスク	定性的評価でリスクは無視し得るレベルに近い。

第9図 ALARPの原則  
Fig. 9 ALARP principle

た。また、ALARP 範囲の下限値は、許容上限値の 1/1 000 に設定している。第 2 表にユーザーリスクに対する許容値を示す。

#### 4.1.2 社会的ユーザーリスク

社会的ユーザーリスクは、“ユーザーリスク × 橋長 × 1 年間に橋を通行する人数”で表現される。つまり、許容上限値は、ユーザーリスクに対するものと同じものを使うことができる。

#### 4.1.3 通行止めリスク

許容上限値はそれぞれの事故に対して設定されるが、30 日以上の橋の全面通行止めとなるような事象の発生確率を、それぞれのリスクに対して年間  $1 \times 10^{-4}$  以下であることを設計要求とした。下限値は、上限値の 1/100、すなわち  $1 \times 10^{-6}$  である。

### 4.2 リスクアナリシス結果

ここでは、リスクアナリシスの事例として、火災・爆発

に対する検討を紹介する。

火災および爆発に対するリスクアナリシスは、以下の七つについて実施した。

- (1) 橋の設備の火災
- (2) 自動車・航行船舶・近隣施設の火災
- (3) 自動車・船舶・航空機・近隣設備から流出した可燃性物質による火災
- (4) 橋の設備の爆発
- (5) 自動車・航行船舶・近隣施設の爆発
- (6) 自動車・船舶・航空機・パイプライン・近隣設備からの可燃性ガス流出による自由空間蒸気雲爆発
- (7) 自動車・船舶からの可燃性ガス流出による BLEVE (プレビー：沸騰液体蒸気膨張爆発)

このうち、船舶の火災・爆発および船舶の衝突・座礁に関するリスクは、船舶関連の一連のリスクアナリシスにて評価しているため、ここでは割愛する。

これらの火災・爆発によるユーザーリスクを第 3 表に、火災・爆発による 30 日以上の通行止めリスクの評価結果を第 4 表に示す。いずれも、道路上での火災・爆発によるものが支配的であった。第 4 表に示すリスク値“－”は、発生頻度が非常に低いとの評価結果が出て、リスクが

第 2 表 ユーザーリスクに対する許容値

Table 2 Criteria for user risk

項目	単位	2015 年	2035 年
許容上限	死亡率/ユーザー × 1 km	$9.7 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$
ALARP 下限	死亡率/ユーザー × 1 km	$9.7 \times 10^{-12}$	$1.3 \times 10^{-12}$

第 3 表 火災・爆発によるユーザーリスク

Table 3 User risk due to fire and explosion

リスク項目	単位	2015 年	2035 年
自動車からの可燃物による火災	死亡率/ユーザー × 1 km	$7.3 \times 10^{-11}$	$2.0 \times 10^{-10}$
パイプラインからの火災・爆発	死亡率/ユーザー × 1 km	$2.1 \times 10^{-12}$	$3.8 \times 10^{-12}$
ガス・タンカー船からの爆発	死亡率/ユーザー × 1 km	$7.3 \times 10^{-15}$	$1.3 \times 10^{-14}$

第 4 表 火災・爆発による 30 日以上の通行止めリスク

Table 4 Disruption risk due to fire and explosion

リスク項目	年	危険物車両火災・爆発 (リスク/年)	重量積載物車両火災 (リスク/年)	船舶 (リスク/年)	パイプライン (リスク/年)
3 本以上ハンガー火災損傷	2015	0	－	$2.0 \times 10^{-7}$	－
	2035	0	－	$3.7 \times 10^{-7}$	－
メインケーブル火災損傷	2015	$1.8 \times 10^{-5}$	$9.6 \times 10^{-7}$	－	－
	2035	$4.9 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-6}$	－	－
主塔火災損傷	2015	$8.0 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	－
	2035	$2.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-7}$	－
補剛桁火災損傷	2015	－	－	$3.3 \times 10^{-7}$	－
	2035	－	－	$6.0 \times 10^{-7}$	－
橋内部での火災	2015	0	－	－	－
	2035	0	－	－	－
道路上での爆発	2015	0	－	－	－
	2035	0	－	－	－
橋内部での爆発	2015	0	－	0	0
	2035	0	－	0	0
その他爆発	2015	－	－	$1.1 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-7}$
	2035	－	－	$2.1 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-7}$

発生した際の影響度を評価するまでもなく影響度を無視できると結論付けたものである。

第3表および第4表から明らかなように、火災・爆発によるユーザーリスクのうち約98%、30日以上通行止めリスクの約90%が、道路上の危険物に起因する火災によるものである。

#### 4.3 追加リスク軽減対策

「イズミット湾横断橋」では、想定し得るすべてのリスクで許容上限値を満足したが、ここでは、ALARP 範囲のリスクに対しての追加リスク軽減対策について説明する。

第3表に示す火災・爆発によるユーザーリスクおよび第5表に示す30日以上通行止めリスクまとめから、道路火災・爆発によるリスクが支配的であることが分かる。さらに、第4表に示す火災・爆発による30日以上通行止めリスク評価結果から、危険物車両の火災・爆発による主塔、メインケーブルの損傷が支配的であるといえる。このことから、「イズミット湾横断橋」では、ALARP の原則に従い、主塔およびメインケーブルの危険

物車両火災・爆発に対するリスク軽減対応策を実施した。以下に主塔に対する対策概要を説明する。

詳細設計時、ADR（欧州危険物国際道路輸送協定）の分類において、どのような通行規制が橋に適用されるか不明であったため、ADR Class 1のみ通行を規制するとの前提で検討を進めた。後日、供用直前に詳細が確定し、現在はADR Class 4までの通行を規制して運用されている。すべてのADR Classを運ぶ車両に対するClassごとの比率を第6表に示す。「第2ポスポラス橋」の実績を基に、通行規制の違いを考慮した補正を行った。なお、検討においては、すべてのADR Classを運ぶ車両には先導車は付かず、かつ、終日通行可能であると仮定した。

車両火災・爆発による主塔、およびメインケーブルの損傷のなかで、対象となる事故は重量積載物車両火災およびハイドロカーボン火災（ジェットおよびプールそれぞれ）である。しかし、供用時には、前述のようにADR Class 1～4の通行が規制されているため、ここでの対策は危険物を搭載していない重量積載物車両火災に対してのみが対象となる。

危険物を搭載していない重量積載物車両の火災モデルは、ヨーロッパのUPTUNプロジェクト（Upgrading Tunnel Project）によるノルウェー・Runehamarトンネルでの大規模火災実験結果を基に、熱発生率200 MW、継続時間を約30分（2000秒）とした。一般に、危険物を搭載していない重量積載物車両によって発生する火災は、銅部材に対してプール火災と同様のインパクトがあるとみなせる。200 MWの火災は、石油タンクの50 mm孔から漏れる50 m<sup>2</sup>のプール火災と等価である。

第10図にプール火災による炎の高さ・水平到達長さを示す。風速2 m/s、5 m/s および10 m/sについて計算した。風速が速くなれば、炎の高さは低くなり、水平方向の

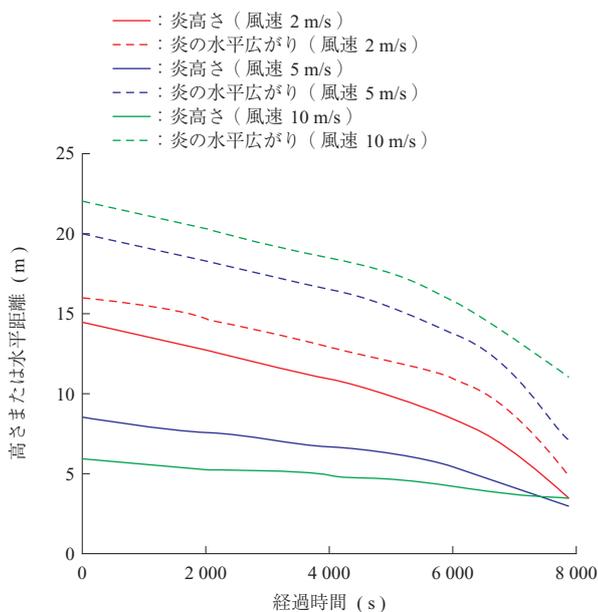
第5表 30日以上通行止めリスクまとめ  
Table 5 Summary of disruption risk

リスク項目	単位	2015年	2035年
航空機衝突	リスク/年	-	-
船舶衝突	リスク/年	2.2 × 10 <sup>-6</sup>	5.7 × 10 <sup>-6</sup>
船舶火災・爆発	リスク/年	6.5 × 10 <sup>-7</sup>	1.2 × 10 <sup>-6</sup>
道路火災・爆発	リスク/年	2.7 × 10 <sup>-5</sup>	7.6 × 10 <sup>-5</sup>
パイプライン事故	リスク/年	4.5 × 10 <sup>-7</sup>	8.1 × 10 <sup>-7</sup>
自然災害	地滑り	リスク/年	極小
	津波	リスク/年	< 1.0 × 10 <sup>-4</sup>
	海底洗掘	リスク/年	< 1.0 × 10 <sup>-4</sup>
	豪雨	リスク/年	< 1.0 × 10 <sup>-4</sup>
その他	リスク/年	極小	極小
合計	リスク/年	< 3.3 × 10 <sup>-4</sup>	< 3.8 × 10 <sup>-4</sup>

第6表 ADR Class ごとの比率  
Table 6 Contribution by each ADR Class

ADR Class	単位	第2ポスポラス橋	ゲブゼーイズミル高速道路	イズミット湾横断橋
1 爆発物	%	通行禁止	1	通行禁止
2 ガス	%	通行禁止	6	1 <sup>*1</sup>
3 可燃性液体	%	70	65	70 <sup>*1</sup>
4 可燃性固体	%	1	1	1 <sup>*1</sup>
5 酸化性物質	%	1	1	1
6.1 毒劇物	%	3	3	3
6.2 病原菌物質	%	通行禁止	1	1
7 放射性物質	%	通行禁止	1	1
8 腐食性物質	%	17	15	16
9 その他有害性物質	%	2	1	1
1～9の組み合わせ	%	6	5	5

（注） \*1：開通直前に通行禁止が決定された。



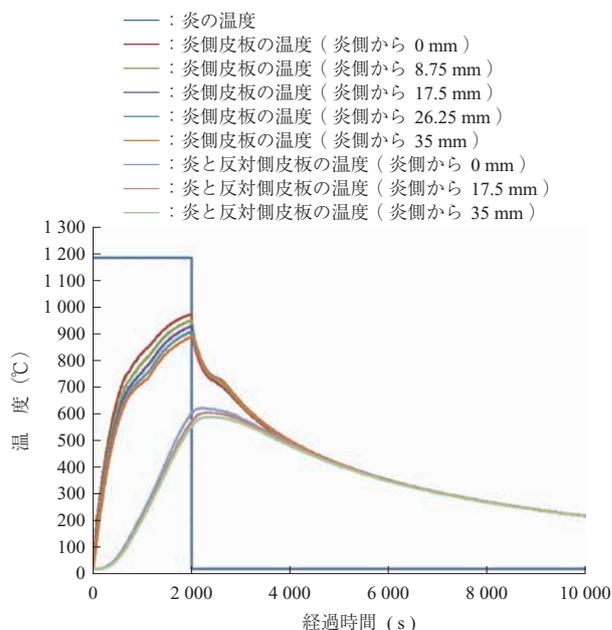
第 10 図 プール火災による炎の高さと水平到達長さ  
Fig. 10 Flame height and horizontal reach

到達長さは長くなる。

道路上の火災によって、炎が主塔外面の 1 面に届く状態を検討する。該当部の主塔皮板の板厚は 35 mm であるが、炎にさらされる側およびその反対側の皮板の 2 000 秒間続いたプール火災による板厚内部の温度時間変化を第 11 図に示す。

対策を施さない場合、プール火災にさらされてから 1 000 秒後には、炎にさらされている面の皮板はすでに 700 ~ 800℃ に達する。この温度では、鋼材は常温の 15% の強度、10% の剛性しか発揮できない。吊橋の主塔は、メインケーブルからの非常に大きな圧縮力を常に受けるが、主塔の圧縮耐力は、軸方向、および直交方向の補剛鋼板によってもたらされており、それらは面外変形に非常に影響される。火災による温度上昇で伸びが鋼板に発生するが、大きな軸方向圧縮力および周辺の常温（に近い）のパネルに拘束されるため、この伸びは面外への座屈という形で現れ、結果として全体の耐力低下を招く。残存圧縮耐力が作用力を下回ると、主塔の倒壊、すなわち、橋が崩壊する。これらを踏まえて、ALARP の原則によって、耐火能力を向上させる対策を施すことにした。

要求性能として、道路面から 25 m 高さまでの道路に面した主塔外面（3 面）が、1 000 ~ 1 200℃ の炎に 2 000 秒間さらされても鋼材温度が 150℃ を超えないこととした。この耐火策を施すことによって、該当箇所での火災があったとしても、橋の全面通行止め期間を 1 週間未満に減らすことができる。



第 11 図 プール火災による 35 mm 板厚内部の温度変化  
Fig. 11 Temperature vs. time for 35-mm tower steel plate exposed to pool fire

耐火策として、適用しやすさや将来の維持管理・更新を考慮して、耐火塗装を採用した。該当箇所には、エポキシ系膨張耐火塗料（合計膜厚：5 700 μm）を塗布した上に、一般外面と同じポリウレタン塗料（膜：60 μm）を塗布して、見た目の統一感を出すようにした。第 12 図に主塔に対する耐火塗装を示す。

## 5. 主要構造物の設計

第 13 図に橋梁の全体図を示す。本橋梁は海底 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メインケーブルから構成される。

### 5.1 主塔基礎<sup>(3), (4)</sup>

主塔基礎の設計で考慮し、かつ解決すべき項目は、主に以下に示す 6 項目である。

- (1) 軟弱な地盤
- (2) 大地震地帯
- (3) 大型船舶衝突
- (4) 大水深への沈設作業
- (5) 短い建設工期
- (6) 海洋環境での耐久性

このうち、軟弱な地盤上での免震設計についてはすでに概説したのでここでは割愛する。

イズミット湾には工場が多数あり、また、湾の奥には海軍基地があるために、多くの大型船舶が「イズミット湾横



第 12 図 主塔に対する耐火塗装 (単位: mm)  
Fig. 12 Tower fire protection paint (unit: mm)

断橋」の下を通過する。大型船舶航行は年間約 20 000 隻であり、大きなものでは 180 000 DWT の石油タンカーや 90 000 DWT のコンテナ船がある。そのために、橋の下には幅 1 000 m、高さ 64 m の航行用クリアランスが設定されているが、それに加えて、主塔基礎に船舶が衝突するアクシデントを考慮した設計を行った。既存航行データおよび将来の周辺を含めた工業地域の変化を考慮したリスクアナリシス結果によって船舶衝突シナリオを設定し、衝突荷重、範囲を設定して、構造物の設計に適用した。

コンクリートケーソンは幅 54 m、奥行 67 m、高さ 15 m であり、その上に外径 16 m、厚さ 1.2 m の 2 基の円筒形の鋼コンクリート合成殻のシャフトが載る。シャフト上部には鋼製主塔との接合部となる基礎土台が EL. + 10 m まであり、二つのシャフトはコンクリートの梁 (タイビーム) で連結されている。主塔基礎は、水深 40 m の海底の上に立つが、コンクリートケーソンおよび鋼シャフト (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、ウェットドックで建設・一体化した。それを架橋地点まで曳航・沈設させたのち、シャフト内のコンクリート打設、およびその上の基礎土台、タイビームを現場施工した。沈設は、コンクリートケーソン内の小部屋 (コンパートメント) への水の注入管理によってバラスト調整しながら行った。第 14 図にコンクリートケーソンバラスト用コンパートメント区分を示す。沈設時には、コンクリートケーソン上面が水面下に入る瞬間が最も安定性が低くなるが、より安全な沈設作業のために、主塔基礎を意図的に傾けた状態で沈設した。第 15 図に主塔基礎の沈設を示す。コンクリートケーソンの壁は、このバラスト調整時の水圧による影響も検討され、一部はこの状態が支配的となって壁厚を決めている。

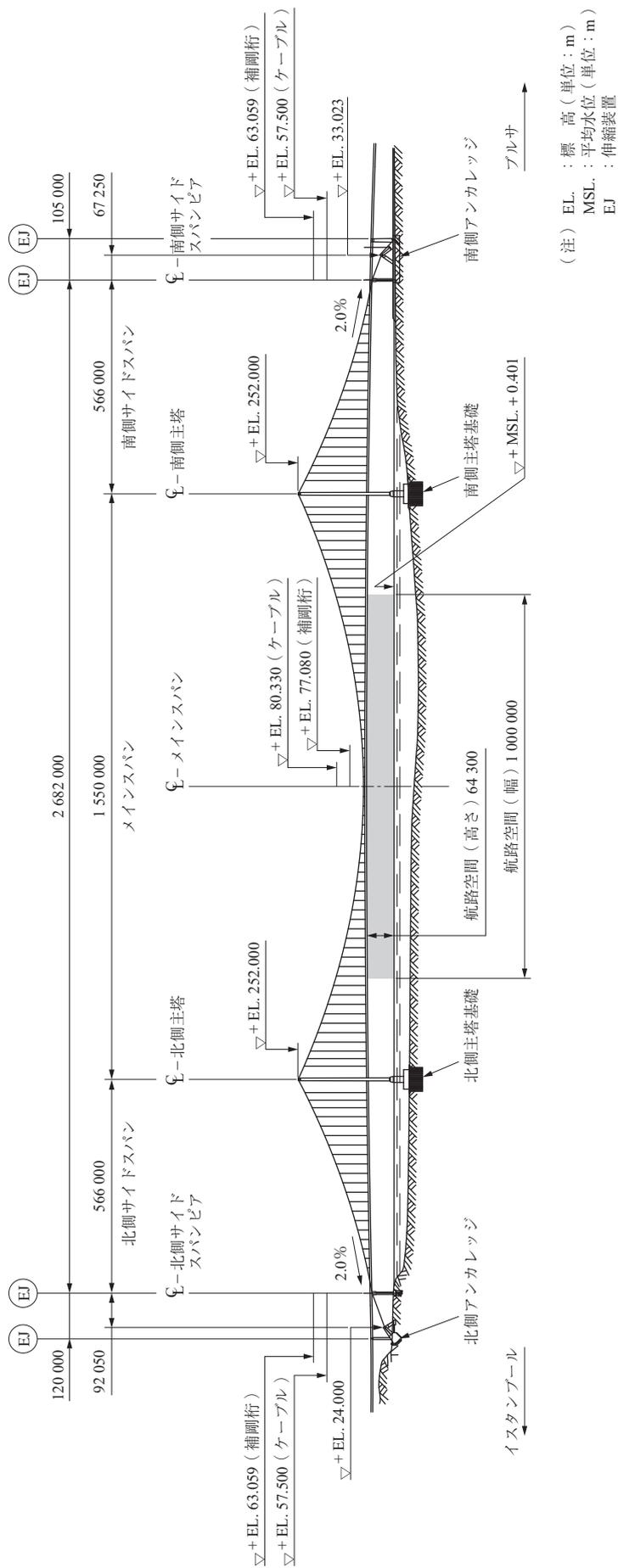
耐久性に配慮し、シャフトの海中部には電気防食を施し、飛沫部についてはステンレス鋼を貼り付けることで防食性能を向上させた。

## 5.2 アンカレッジ<sup>(5)</sup>

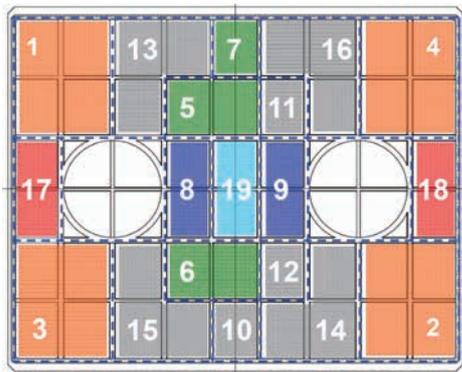
アンカレッジはケーブルの力に対して自重で抵抗する重方式であるが、地盤状況などがそれぞれ異なるために、北側と南側では異なったコンセプトを採用した。

北側アンカレッジ部は、比較的良好な石灰岩盤が地表面近くまで達していたため、この岩盤に一部が埋め込まれた形とし、掘削は 33 × 50 m 範囲を深さ 22 m まで行った。アンカレッジのサイズをよりコンパクトにするために、アンカレッジ上のトランジションスパン (単径間箱桁) の橋脚位置を調整し、その反力もケーブルの力に対する抵抗力として付加している。

南側アンカレッジは、前述のように 2 次断層の影響でアンカレッジとサイドスパンピアを、厚さ 16 m の堅固なスラブを介して一体化している。このスラブの施工のために、地下 15 m までの掘削が必要であったが、アンカレッジ施工位置は埋め立てて準備した場所であり、軟弱な地盤条件のうえ、掘削時の大きな側圧に対して、いかに掘削量を抑え、安全で早い施工が可能な構造とすることが課題であった。掘削に当たっては、深さ 28 m 前後にある粘土層までコンクリート壁を貫入させ、かつ、コンクリート壁のアーチアクションによって土圧に耐え、地中アンカーなどを必要としないシンプルな支保構造として、二つの円を使ったギター型にダイアフラムウォールを施工した。第 16 図に南側アンカレッジ、2 重円ダイアフラムウォールを示す。この構造によって、掘削量を少なく抑えたことに加え、2 重円形部には円が交差する位置の中間サポートのみで掘削時の安定を保持するため、作業性向上・工期短縮に



第13図 橋梁全体図 (単位: mm)  
Fig. 13 General arrangement (unit: mm)



第 14 図 コンクリートケーソンバラスト用コンパートメント区分  
Fig. 14 Caisson compartment for ballasting



第 15 図 主塔基礎の沈設  
Fig. 15 Sinking operation for tower foundations



第 16 図 南側アンカレッジ、2重円ダイヤフラムウォール  
Fig. 16 South anchorage, dual-circular diaphragm wall

大きく寄与した。

### 5.3 主塔

第 17 図に主塔断面を示す。鋼製主塔は高さ 236.4 m で、-40 m の海底に据えられた主塔基礎に、水面上 10 m の位置でアンカーボルトによって固定されている。主塔は 1:80 の傾きをもつ 2 本のレグおよびその間を結ぶ中間部および上部の二つのクロスビームから成る。レグは、耐風安定性を高めるための隅切り断面を有する箱構造であり、製作・架設の条件から、高さ方向に 22 個のブロックに分

割され、12 段目より上については、さらにブロックを 4 枚のパネルに分割している。これは、海上 +146 m まででは大型フローティングクレーンでのブロック架設を行うのに対し、それより上では、中間部クロスビーム上に据えたクライミングクレーンでパネル架設を行うため、そのクレーン能力によって決めたものである。ブロック間の継手は、リブは高力ボルトによる摩擦接合、外板は完全溶込み溶接と、複合構造を採用している。12 段目より上のレグのパネル間の長手方向の接合は、高力ボルトによる摩擦接合である。

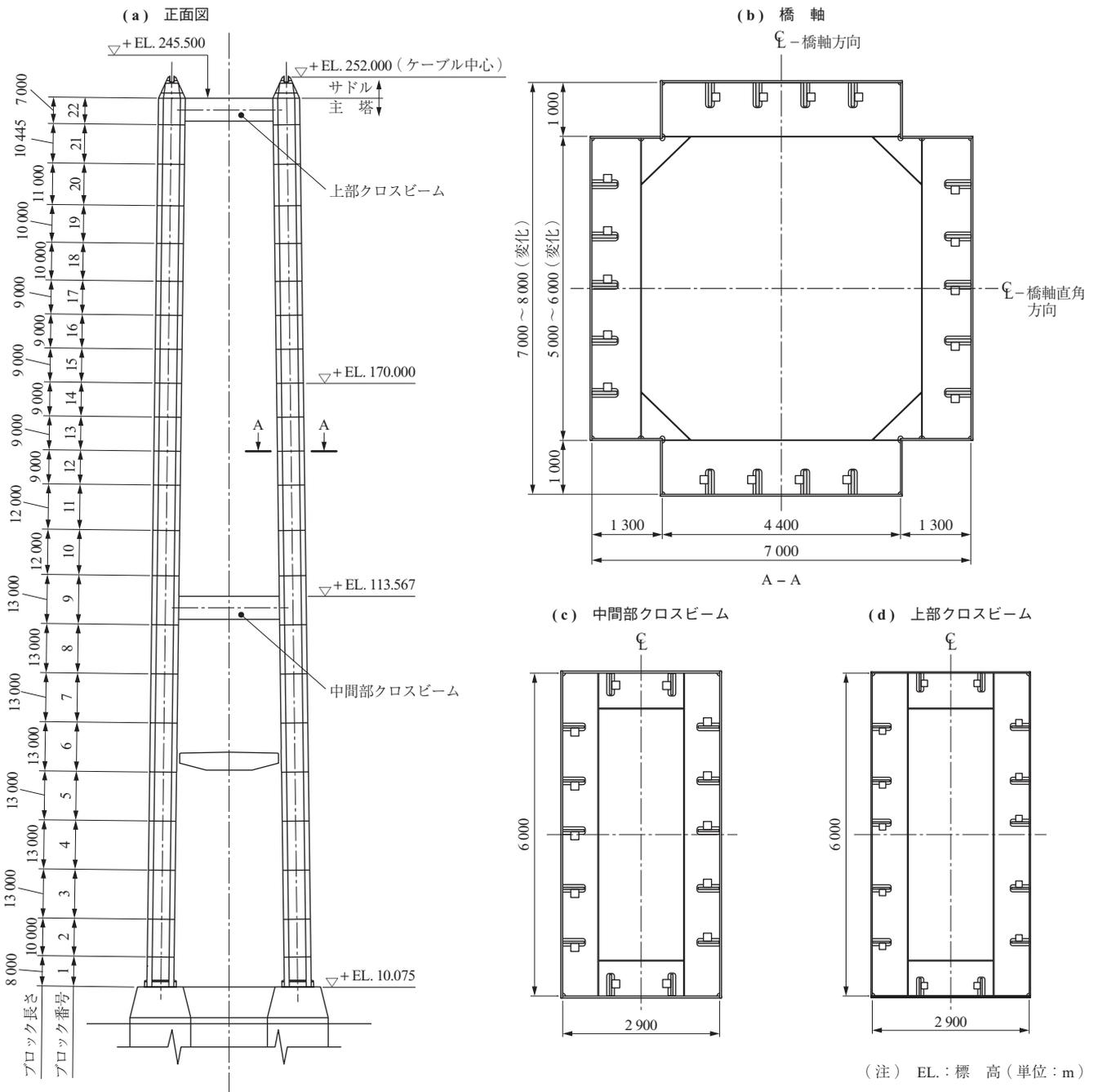
また、風洞試験において、供用時に渦励振による面外 1 次振動の発生リスクが確認されたため、14 段ブロック (EL. + 170 m) に IIS の AMD (Active Mass Damper) を設置し、制振を行っている。この AMD は、架設時の制振にも使用した<sup>(6), (7)</sup>。

### 5.4 メインケーブル

ケーブル架設期間の短縮および施工性の観点から PPWS (Prefabricated Parallel Wire Strand) 工法を採用した。第 18 図にメインケーブル断面を示す。メインケーブルの素線強度は  $f_u = 1\,760$  MPa で、各ストランドは素線径 5.91 mm のめっき素線 127 本で構成される。PPWS は、それぞれメインスパンで 110 本、サイドスパンではエキストラストランド 2 本を含む 112 本の構成となっている。

アンカレッジにおけるメインケーブルの定着構造は、アンカレッジ躯体内を貫通するように設置した PC (Prestressed Concrete) ストランドで躯体に定着された定着版 (クロスヘッドスラブ) に、テンションロッドでストランドのソケットを定着する構造を採用しており、一つの定着版に 2 本もしくは 4 本のストランドを定着する配置としている。PC ストランドを定着しているアンカレッジ躯体側背面には、定着時に使用したスペースをメンテナンス用のスペースとして残すことによって、PC ストランドが損傷した場合にも取換えが可能な構造とした。第 19 図にアンカー部を示す。

防錆方法として、乾燥送気システムを採用している。ケーブル一般部については、S 字ワイヤによるラッピングの上に塗装することによって気密性・水密性を確保する構造とした。アンカレッジ内部も、バックチャンバー、PC ストランドを含め、空間全体を乾燥送気システムで除湿している。第 20 図にバックチャンバー内の PC ストランド乾燥除湿装置を示す。



第 17 図 主塔断面 (単位: mm)  
 Fig. 17 Main tower (unit: mm)

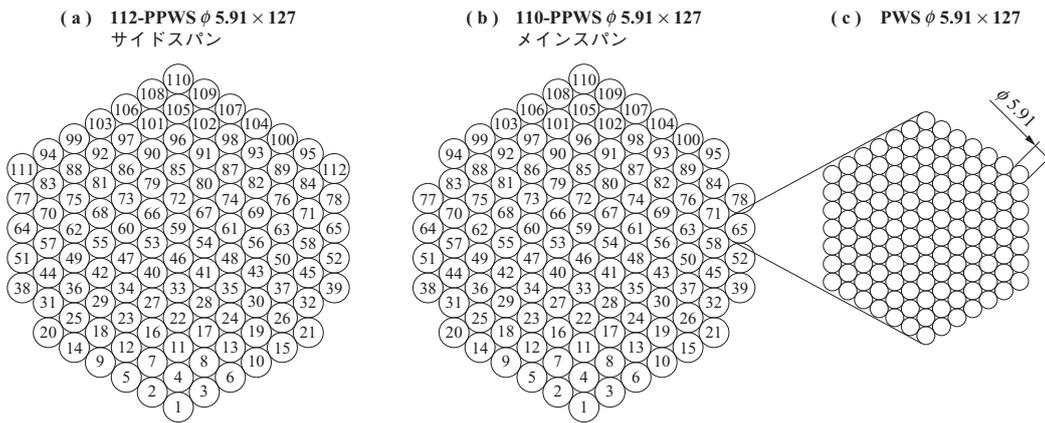
### 5.5 補剛桁

第 21 図に補剛桁断面を示す。補剛桁は、高さ 4.75 m、幅 30.1 m の鋼床版六角扁平箱桁断面であり、両端に幅 2.75 m の維持管理用通路を有する。耐風安定性を考慮し、かつ、「第 1 ボスボラス橋」および「第 2 ボスボラス橋」の外観を尊重したデザインを採用している。標準ブロック長さは 25 m である。

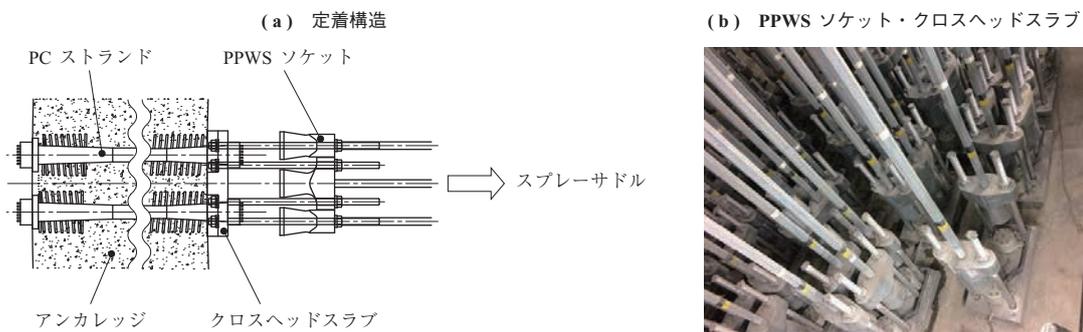
補剛桁の設計においては、主にバフettingの影響を含めた ULS (Ultimate Limit State: 終局限界状態) が支配的であり、地震による影響は小さい。一方で、100 年

の疲労寿命が鋼床版の設計に与える影響は大きく、EN に従った疲労照査のほか、1 日 20 万台以上の交通量がある「第 2 ボスボラス橋」の実測モデルを用いた照査によって、板厚決定や細部設計を行った。

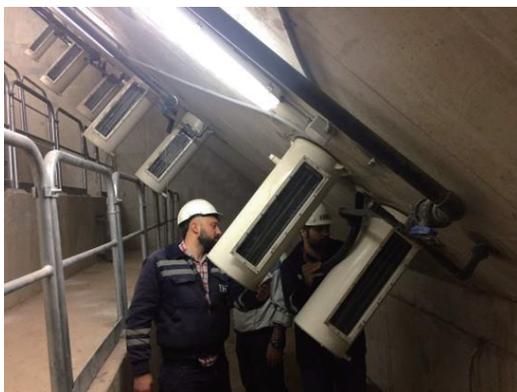
重量および溶接量の削減など製作性の向上のため、ダイアフラム間隔は 5 m と標準的な間隔より広くする一方で、疲労設計への影響を考慮し、鋼床版板厚は 14 mm とし、かつ、トラフの断面を大きくして十分な剛性を確保した。使用鋼材は、鋼床版板厚を一定とすることを目的に、S355 をベースとしながら、桁端部および主塔付近では S420、



第 18 図 メインケーブル断面 ( 単位 : mm )  
Fig. 18 Main cable section ( unit : mm )



第 19 図 アンカー部  
Fig. 19 Main cable anchorage



第 20 図 バックチャンバー内の PC スtrand乾燥除湿装置  
Fig. 20 Dehumidification system for PC strands

S460 を採用している。

皮板およびトラフの継手部は完全溶込み溶接を基本としているが、鋼床版トラフの現場継手部は強度区分 10.9 の M24 ボルトによるボルト接合を採用した。また、標準ダイヤフラムである CHS ( Circular Hollow Section ) によるトラス構造のクロスフレームとの継手部は、工場での組立て効率を考慮して、強度区分 10.9 の M30 ボルトによるボルト接合を採用している。施工性向上のため、トラフ継手

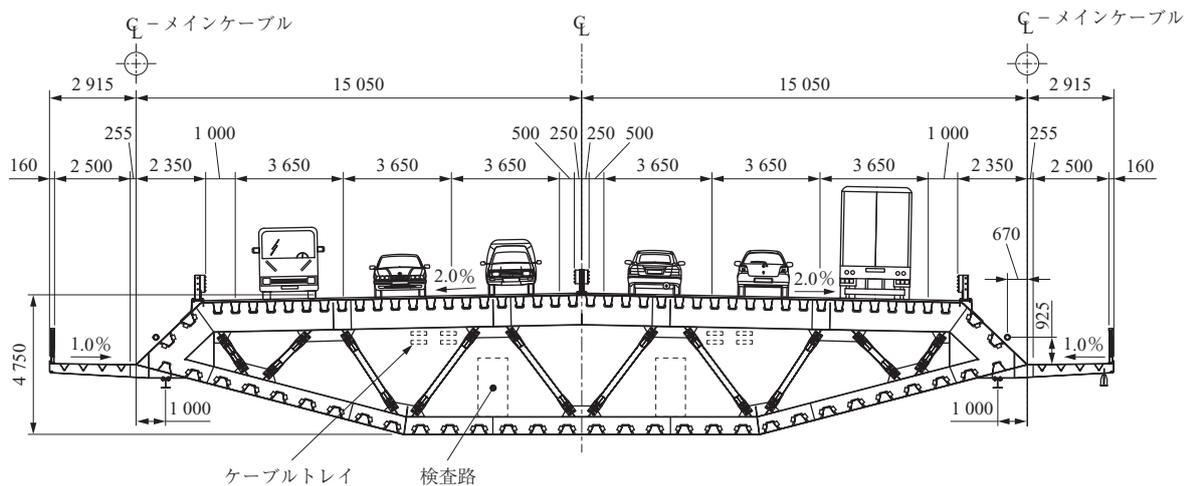
部は母材・添接板ともに、トラス継手部は母材のみに拡大孔を採用した。

### 5.6 舗装および付帯設備

この橋梁の舗装は、防水層としてプライマー、メンブレン、タックコートの上にマスチック 3 cm + 碎石マスチックアスファルト 3 cm とした。

契約範囲には付帯設備として、照明、航空・航路障害灯、電源設備のみではなく、交通のオペレーションに必要な統合管理システム ( SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition ), 消火設備、セキュリティシステム、SHMS ( Structural Health Monitoring System ) やコントロールビルディング建設、維持管理に必要なケーブル・主桁・主塔の検査車なども含まれている。

電源設備は、橋の重要性から、南北両アンカレッジ位置にサブステーションを有し、商用電源からの電気供給が片側で止まった場合には、残っているサブステーションがすべての電気供給を担い、南北両方の電源供給が止まった場合にはジェネレーターによる稼働、さらにはジェネレーター稼働が止まった場合に備えて、72 時間にわたって橋



第 21 図 補剛桁断面 (単位: mm)  
Fig. 21 Deck section (unit: mm)

の運営に最低限必要な設備（道路照明を除く）への電気供給が無停電電源装置（UPS: Uninterruptible Power Supply）によってできるようになっている。

SHMS 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ためのセンサー、コントロールビルディング内にある SCADA、コントロールルーム（第 22 図）での常時監視、あらかじめ設定した管理制限値に対するアラート発信、および橋梁維持管理計画の策定・更新で構成されている。

## 6. 結 言

「イズミット湾横断橋」では、プロジェクトに即した包括的な Design basis を独自に策定したうえで、設計・施工を行った。本稿では、そのなかの特徴的な事例として、耐震設計およびリスクアナリシスについて概説した。早期の交通開放が第 1 優先である BOT プロジェクトにおい

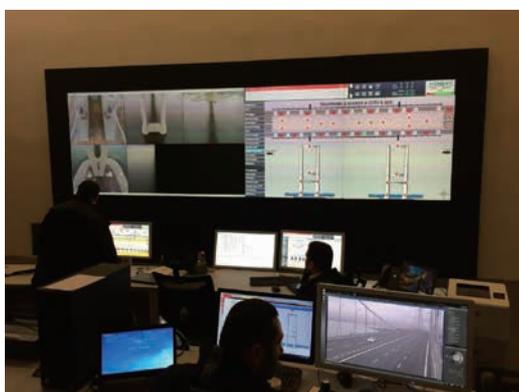
て、建設工期に最も大きな影響力をもつ施工数量を抑え、かつ、施工性の高い構造であることも満足するように設計を行った。非常に短い期間、かつ一部施工との同時並行で設計が進められたなか、架橋地点の状況を分析・予測し、適切な安全・安心・品質をもつ橋を、広範囲・長期的な視野をもちながら、どのように設計していったか、主要構造物ごとに概説した。

2013 年 1 月に着工した工事は、2016 年 7 月 1 日に交通開放を迎えた。大規模橋梁を有する Design & Build プロジェクトの設計においては、多岐にわたるアイテムを広い視野で判断しながら、時に斬新・大胆なアイデアの導入が欠かせない。また、幾つもの制約のなかで、各設計検討事項に対して、数ある選択肢のなかから進むべき道の一つを選んでいく行為は、設計の醍醐味の<sup>だいご</sup>の一つではあるが、決まった正解がないために、常に悩みを伴う作業でもある。今後、世界的には BOT や Design & Build プロジェクトが増えていくと考えられるが、このようなプロジェクトに参画するに当たって、本稿が参考の一助になれば幸いである。

最後に、「イズミット湾横断橋」においても、IHI グループの広範囲な技術を随所に適用したが、同種のプロジェクトにおける IHI グループ内の技術適用、協力に対する改善の余地、将来のさらなる拡張の可能性は大きく、今後の課題事項としたい。

— 謝 辞 —

本プロジェクトの遂行に当たり、NOMAYG JV および株式会社長大を含む 3 社から成る KGM（トルコ道路庁）



第 22 図 コントロールルーム  
Fig. 22 Bridge control room

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を深く感謝いたします。

また、設計コンサルタント COWI で、5 か国のオフィスにまたがり、繁忙期には 200 人近いエンジニアから成る多国籍設計チームを率いた Kent J. Fuglsang, Lars Jensen, Flemming Michael Pedersen, および IDC や各種調査・実験などで本橋の設計に関わった 10 か国以上の社内外のすべての方々の個人・組織としての多大なる貢献に対して、ここに記し、敬意と感謝を表します。

#### 参 考 文 献

- (1) M. Yanagihara, T. Kawakami et al. : Izmit Bay Suspension Bridge – Overview of the Project Elegance in Structures (2015.5)
- (2) B. Foged, J. S. Steenfelt et al. : Geotechnical design of the Izmit Bay Suspension Bridge Elegance in Structures (2015.5)
- (3) F. M. Pedersen, S. C. Christensen et al. : Izmit bay Suspension Bridge – Deep water tower foundations Providing Solutions to Global Challenges (2015.9) pp.1 – 8
- (4) M. Inoue, M. Durmaz, T. Shima et al. : IZMIT Bay Suspension Bridge – Settlement of Tower foundation: Monitoring and Consideration Elegance in Structures (2015.5)
- (5) F. M. Pedersen, S. C. Christensen et al. : Izmit bay Suspension Bridge – Main cable anchorages Providing Solutions to Global Challenges (2015.9) pp.2 125 – 2 132
- (6) M. Inoue, T. Kawakami, Y. Takai and O. Berber : IZMIT Bay Suspension Bridge – Finding and Consideration for Vibration control of Tower by Active mass damper Providing Solutions to Global Challenges (2015.9) pp.2 177 – 2 124
- (7) M. Inoue, Y. Yamasaki, S. Yamamoto et al. : IZMIT Bay Suspension Bridge – Vibration control of Steel tower Engineering for Progress Nature and People (2014.9)