

論文・報告

レインボーブリッジ補剛桁の 設計・製作・架設

Design, Fabrication and Erection of Stiffening Truss in RAINBOW-BRIDGE

伊藤 博 章*
Hiroaki ITOU

内 田 修 平**
Shuhei UCHIDA

木 村 宏***
Hiroshi KIMURA

木 村 公 男****
Kimio KIMURA

志 村 勉*****
Tsutomu SHIMURA

RAINBOW-BRIDGE is suspension bridge, which is in Route 11 (Daiba-line) of the Metropolitan Expressway across Tokyo port.

The stiffening truss is double deck structure, upper floor for Metropolitan Expressway then lower floor for Bayfront Roadway, New Waterfront Transportation System and Walkway.

This report is to describe outline of Design, Fabrication and erection this bridge.

Kyeword : RAINBOW BRIDGE, Suspension-bridge, Double-deck Stiffend-girder

1. まえがき

レインボーブリッジは、首都高速11号台場線（高速湾岸線と首都高速1号線を結ぶ路線）が芝浦埠頭と台場間を結ぶ、東京港を横断する部分に計画された吊橋で、東日本では初の本格的吊橋となる、また、首都高速道路のほかに、臨海副都心と都心を結ぶ都道（臨港道）、臨海新交通システムおよび遊歩道からなる2層構造の併用橋である。

本橋の補剛桁工事は吊橋を中央で2分する1221、1222工区に分かれており、川田工業では平成元年10月に三菱・川田・日車による1222補剛桁特定建設工事共同企業体として受注し、補剛桁の実施設計、製作ならびに架設を行った。

本文は、本橋の概要および特徴を紹介し、製作、施工の概要と、筆者らが設計担当した主構横フレームおよび新交通システム床組、緩衝装置を中心に実施設計の概要を報告するものである。

2. 設計の概要

本橋の主要諸元を表-1に示す。

本橋の特徴として、まず高速道路鋼床版の中央径間・側径間それぞれの全径間連続化が挙げられる。特に、中央径間では初めて“重ね梁形式”の連続鋼床版を採用し、車両走行性の向上を図っている。

また、本橋の下層には、臨港道路および新交通システムが設けられるため、対傾構部材を設けることができず、

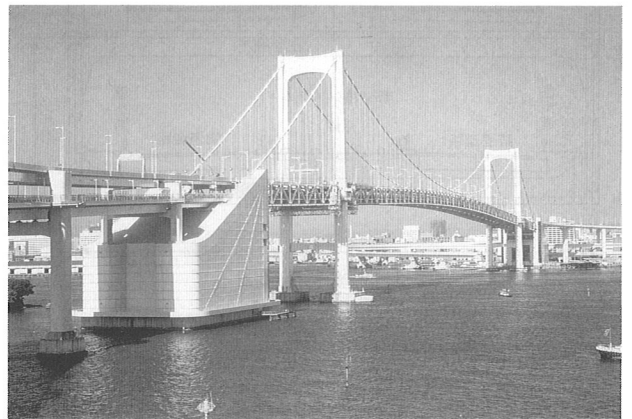


写真-1 完成写真

表-1 構造基本諸元

橋梁形式	3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋		
支間割	114m+570m+114m(補剛桁支間)		
主構形式	垂直材を有するワーレントラス		
首都高速	道路規格 第2種第2級, TL-20		
臨港道路	道路規格 第2種第2級, TL-20, TT-43		
新交通	ガイドウェイバス方式		
航路限界	略最高高潮面(N.H.H.W.L.)上50.0m		
吊構造鋼重	高速道路	4 900 t	補剛桁 10 700 t
	臨港道路	4 600 t	付属物 800 t
	新交通	2 300 t	合 計 23 300 t

横フレームをラーメン構造として設計している。そのため、継手は支柱の中央付近となった(図-3参照)。

*川田工業(株)技術本部技術部次長 **川田工業(株)生産事業部四国工場生産技術一課課長 ***川田工業(株)橋梁事業部工事部工事一課係長
****川田工業(株)技術本部長大橋部技術開発課係長 *****川田工業(株)技術本部技術部設計一課係長

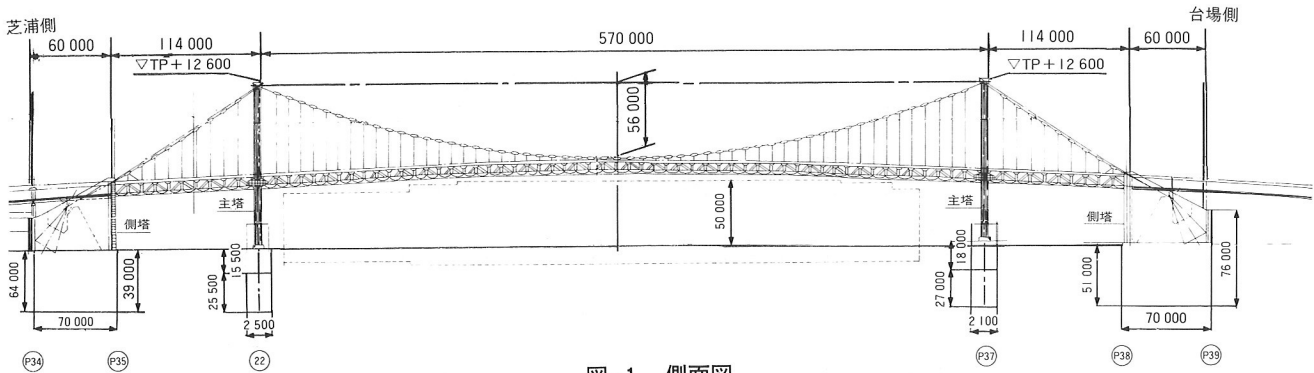


図-1 側面図

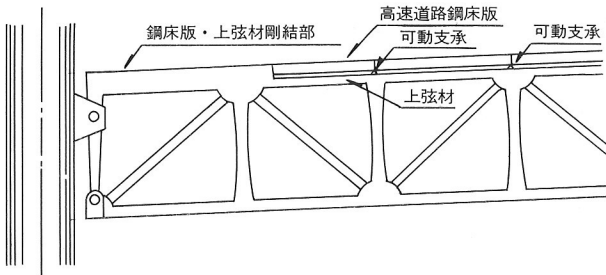


図-2 中央径間端部構造図

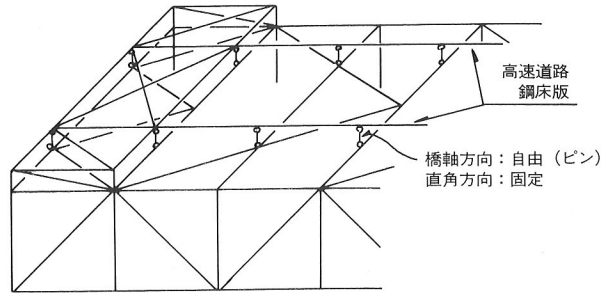


図-4 立体トラスモデル中央径間端部の概要

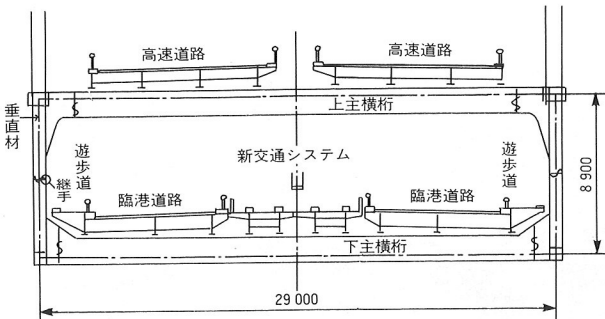


図-3 標準部断面図

高速道路床組を考慮している。図-4に立体トラスモデルの中央径間端部の概要を示す。

b) 動的解析

地盤（沖積粘土層）の影響を考慮した下部工，および主塔・側塔を含む立体魚骨（トラス）モデルを用いて，CQC法による応答スペクトル解析により行った。各応答値は地盤の変形係数により大きく左右されるが，変形係数はバラツキが大きく一義的に決定できないため，補剛桁各径間ごとに応答値が大きくなる値を用いて解析を行った。

c) 断面設計

中央径間においては，連続鋼床版が上弦材の軸力を分担することにより，上弦材に作用する軸力が小さくなっている。断面計算結果を表-2に示すが，下弦材が60キロ鋼を使用しているのに対し，上弦材は50キロ鋼となつて

(1) 主構・横構の設計

a) 静的解析

鉛直荷重に対しては，主構を平面トラスモデルとして，有限変位理論により解析を行い，ねじり荷重および水平荷重に対しては，全橋を忠実にモデル化した立体モデルを用いて，線形化有限変位理論による解析を行った。

平面モデル，立体モデルともに，中央径間においては

表-2 補剛桁断面設計結果の概要

	上 弦 材	下 弦 材	斜 材	垂 直 材	横 溝	上主横桁	下主横桁
断面形状							
最大断面	側 径 間 $t=29$ 中央径間 $t=27$ (SM490Y)	側 径 間 $t=25$ 中央径間 $t=26$ (SM570)	700×21 700×23 (SM490Y)	$t_f=44$ $t_w=28$ (SM570)	570×17 680×21 (SM490Y)	$t_f=25$ $t_w=19$ (SM490Y)	$t_f=38$ $t_w=18$ (SM490Y)
最小断面	$t=21$ (SM490Y)	$t=22$ (SM490Y)	700×18 500×18 (SS400)	$t_f=28$ $t_w=28$ (SM490Y)	450×13 450×13 (SM490Y)	$t_f=21$ $t_w=18$ (SM490Y)	$t_f=28$ $t_w=16$ (SM490Y)

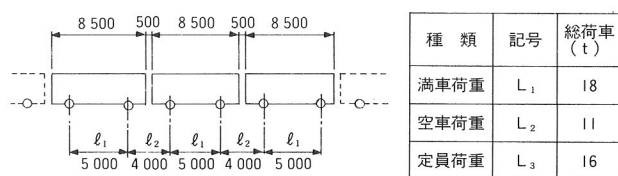


図-5 列車荷重

いる。これに伴い、鋼床版の応力増加が懸念されたが、応力増分として板厚に大きな影響を及ぼすようなことはなく、問題となる点は見られなかった。

なお、主構の疲労については、新交通システムとの併用部材と考え、D等級として照査を行った。

(2) 横フレームの設計

a) 構造解析

横フレームは図-3に示すように、上、下層それぞれの床組を直接支持する上下の主横桁、および主構垂直材とで構成されるラーメン構造である。解析は、このラーメンフレームを平面骨組として取り扱った。

横フレームに作用する荷重として、

- ① 床組からの荷重
- ② 補剛桁全体系としての作用力
- ③ 架設クレーン反力などの架設時荷重

を考慮した。床組からの荷重として、活荷重反力は同時性を考慮して載荷し、床組支承の水平力など横フレーム面外荷重も考慮した。

解析上の支点は、活荷重に対して主構斜材の交点とし、この交点が上弦材側にある場合を上支点、下弦材側にある場合を下支点と区別して解析を行い、死荷重に対してはハンガー定着点を支点として解析した。また、ラーメン面外荷重に対しては、上下弦材位置および横構との交点を支点とした。

b) 断面設計

横フレーム各部材は、2軸方向曲げと軸力を受ける部

材として設計を行った。主横桁の材質は、せん断剛性の確保を目的として、SM490Yを基調としている(表-2)。

上主横桁の仕口部は、円弧ハンチ形の隅角部のためブライヒの曲がり梁理論⁹⁾を適用し、下主横桁の仕口部は、直線ハンチ形隅角部として奥村・石沢の式²⁾を適用して設計を行った。また、両隅角部ともにFEM解析を実施し、設計の妥当性を照査している。

せん断剛性の照査に際しては、隅角部の部材剛性の評価が困難だったので、立体FEM解析を実施して照査した。

(3) 新交通システム床組、緩衝装置の設計

a) 臨海新交通システムの概要

臨海新交通システムは、両側のガイドウェイ(案内軌条)に誘導され、軌道上をタイヤで走行するものである。

以下に、主な設計条件を記す。

b) 一般部床組の設計

一般部床組は図-6のような2主桁の鋼床版桁で、耐風安定性向上のため上下線を分離した構造となっている。

鋼床版上にはH型钢を横にし、コンクリートを充填した走行路を設置し、両側にガイドウェイを固定させる側壁支柱が2mおきに設けられている。また、橋梁中心には点検通路が設置されるほか、臨港道路や遊歩道とも隣接しているため、それらからの人の侵入を防止する目的でアルミ製の柵が設けられている。

構造解析は、6および8両編成による連行荷重を載荷した梁の解析を行い、吊橋の主構変形による影響は変形曲率に相当する支点変位として与えた。また、連続桁の鋼床版現場溶接によって生じる収縮変形を支点を拘束した梁に与えて、発生応力を考慮している。

断面計算における疲労の検算方法は、国鉄建造物設計標準と同様とし、疲労等級は引張り・圧縮がD等級 $\sigma_{f0}=800\text{kgf/cm}^2$ 、せん断はS2等級 $\tau_{f0}=820\text{kgf/cm}^2$ とした。ま

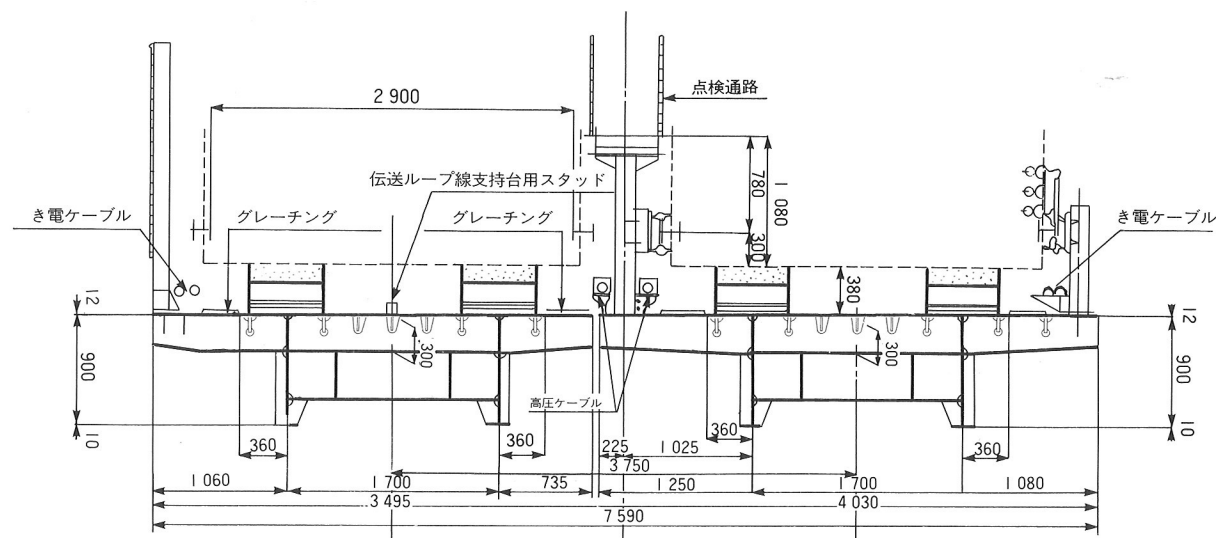


図-6 新交通桁一般部断面図

た、累積疲労被害効果を表す低減係数は $a=0.65$ とした。

c) 緩衝装置の概要

本橋は2ヒンジ吊橋のため、主塔部において側径間と中央径間のそれぞれの主構の間に折れ角が生じる。この折れ角は、鉄道や新交通システムでは鉛直方向加速度が、乗客の乗り心地を悪くする。そこで、図-8に示すような角折れ桁を設けることで、折れ角を分散した。図-7に、その概念図を示す。

一方、地震応答解析の結果などより地震時の水平移動量が+850~-950mmにも及ぶため、これを吸収するための伸縮装置を設けている。これらの角折れ桁と伸縮装置を含めて、緩衝装置と呼んでいる。

イ) 角折れ桁の設計概要

本吊橋の基準では、折れ角量は0.5度程度以内にしよう制限されている。しかし、主構解析結果では角折れ桁端部に発生する最大角折れが0.466度であったため、箱桁断面を比較的厚い板厚構成とすることにより、桁剛性の増大を図った。

ロ) 伸縮装置の概要

伸縮装置では走行路、ガイドウェイ、点検通路、電気・通信ケーブル類などの伸縮に対応する必要がある。

①走行路の伸縮には、図-9のようにくし形金物と呼ばれる厚板で作ったくし状の部材を、ローラ巻に載せた構造によって伸縮させており、角折れに対応できるようにボルトで回転できるようになっている。また面外方向の角折れについては、くし歯の隙間で対応する。

②ガイドウェイの伸縮は+850~-950mmの大移動に対応できないため、-950mmの移動に対して接触しないように、ガイドウェイに空きを設けた。従って、この区間はガイドが無くなってしまったため、走行車両に補助輪を設け、固定案内板と呼ばれる補助的なガイドウェイを伸縮

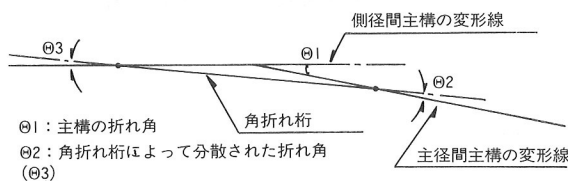


図-7 角折れ桁の概念図

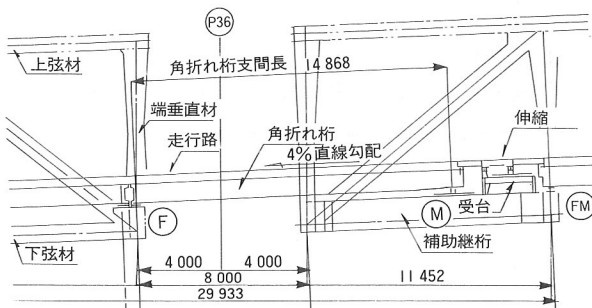


図-8 緩衝装置概要

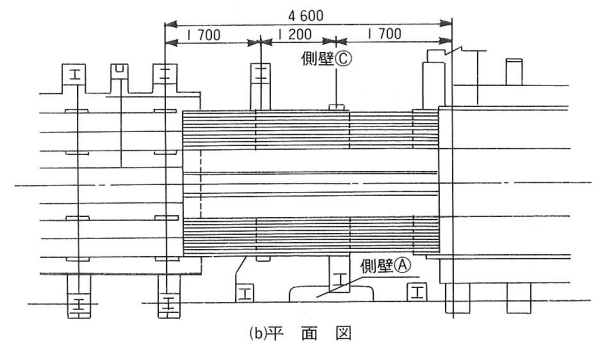
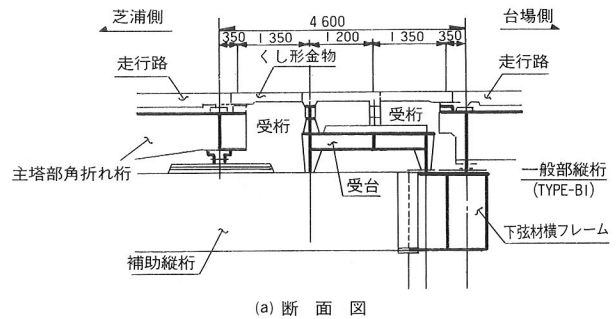


図-9 伸縮装置図

部のみに設置している。

3. 工場製作

補剛桁（トラス）製作における特徴は、仮組立にある。ここでは、仮組立の要領を中心に述べる。

本工事の仮組立は、補剛桁（トラス）とそれぞれの床組（鋼床板）を分割して行い、下記の要領でおのおの精度を確認後に補剛桁と床組の取り扱いに反映させた。

(1) 仮組立方法

a) 補剛桁（トラス）の仮組立

補剛桁の仮組立は写真-2のように、四国工場製作範囲で全数を立体仮組立とし、他工場との取り扱い誤差を小さくするため、上、下弦材と斜材の仕口を有する検証治具（写真-3）を設け、寸法の確認をした。なお、中央径間端部付近は、首都高速道路の床組鋼床版と上弦材が一体となった構造のため、床組鋼床版の端部一パネルを搭載した。

b) 首都高速道路、臨港道路床組の仮組立

首都高速道路および臨港道路床組は写真-4のように、床組だけを単独で仮組立を行った。

なお、高速道路床組は連続桁の途中で製作範囲境界があるため、リブ、デッキプレートのボルト孔データを、他工場と互いに交換し、添接板の製作に反映させた。

c) 新交通システム床組の仮組立

新交通システム床組の仮組立は、写真-5のように、単独で各連続桁単位で行っている。

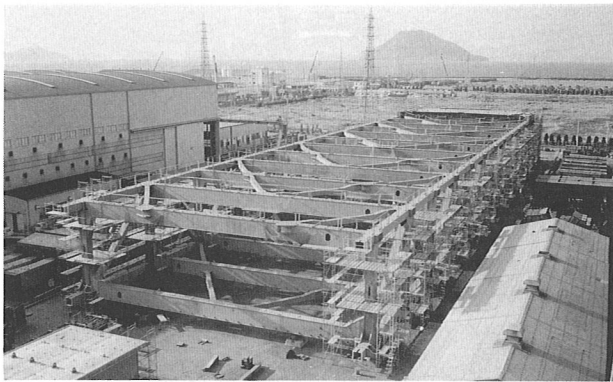


写真-2 補剛桁の仮組立



写真-3 検証治具

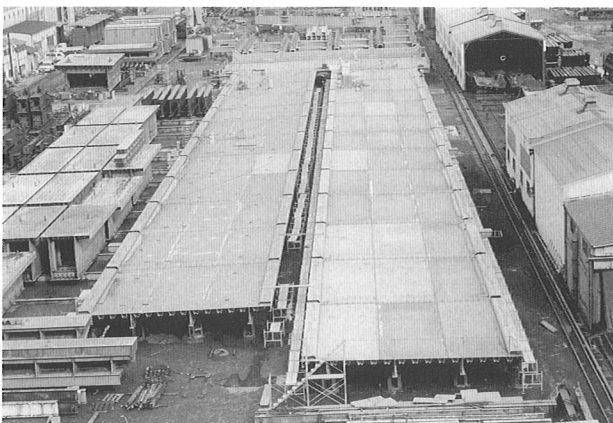


写真-4 首都高速道路床組の仮組立



写真-5 新交通システム床組の仮組立

(2) 仮組立結果の反映要領

補剛桁と各床組との取り合いは、下記の要領でそれぞれの仮組立結果を反映させた。

a) 床組支承の取り付け位置（長さ寸法）

首都高速道路、臨港道路および新交通システムそれぞれの床組において、ソールプレートの位置を計測し、それを補剛桁の仮組立時に横フレーム上にけがき出して、床組支承の取り付け位置とした。

b) 床組支承高さの調整

床組は仮組立完了後に、長さ約10mの架設単位となるパネルに解体し、できるだけ無応力状態に近くなるように4点で支持している。そのとき、計算で求めたソールプレート下面の標高との誤差を確認した。

また補剛桁は、仮組立時に、床組支承取り付け位置での標高の誤差を確認し、床組の計測結果と合わせて、支承下に取り付ける調整プレートの板厚を決定した。

4. 施 工

本橋の架設地点は、東京港の出入口である東京第1航路上であり、1日当たり3000船以上の船舶の往来がある。そのため本工事は、海面上50m以上の高所作業であるばかりか、万一の落下物等による航行船舶への被害を生じさせないように、十分な安全対策が要求された。

架設は、航路幅が狭いため、フローティングクレーンを使用した大ブロック架設は行えず、塔付パネルを含め、すべて面材による張り出し架設を行った。

(1) 架 設

a) 架設概要

上塗り塗装の完了した部材は、台船で現場まで輸送され、主塔の基部に設けた栈台上に仮置した。仮置された部材は、塔付ジブクレーンを使用して橋上まで荷揚げし、補剛桁上の運搬台車で架設先端まで運び架設したが、中央径間は450t吊、側径間は、300t吊の汎用型クローラクレーンを使用して行い、中央径間は2パネル、側径間は1パネルに面組した部材を1サイクルとして面材架設を行った。

架設用クレーンは、自重が大きいため鋼床版上に直接搭載することができない。そこで、補剛桁上に走行架台を設け、走行架台上に架設用クレーンを搭載している。走行架台は、後述する補剛桁の勾配に対応できるようレベリング装置を備え、常に架設用クレーンを水平に保てるようにした。

架設順序は、主塔から中央および側塔に向けての張出し架設を行い、全体の荷重バランスを図るため、中央径間の架設を10パネル先行させた後、側径間の架設を開始した。

b) 盛替え架設

本橋は、メインケーブルとハンガーロープおよび補剛トラスが同一面内にあるため、補剛トラスの架設において、架設用クレーンのブーム先端がメインケーブルより高くなると、架設用クレーンの巻きワイヤーがキャットウォークに干渉し、補剛トラスを架設位置まで直接吊り込むことが不可能となる。

そこで中央径間では、メインケーブルに設けた仮ハンガーに補剛トラスを仮吊りし（写真-6）、その後、架設用クレーンで吊り直して架設位置まで吊り込む、盛替え架設を行っている（写真-7）。

側径間ではキャットウォークを回避し、補剛トラスを架設位置まで直接吊り込むことが可能なコ字型天秤を使用し、架設を行った。また、架設機材の取り付け、撤去には、へ字型天秤を使用している（写真-8）。

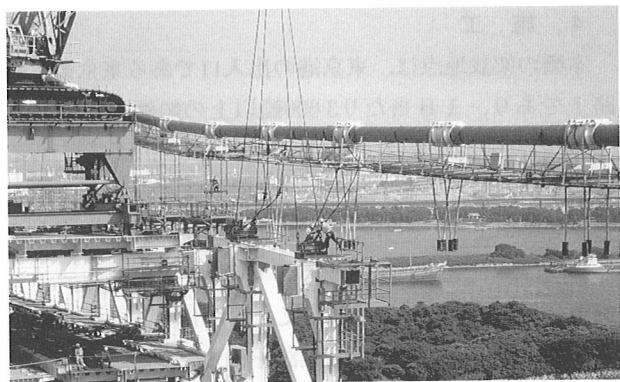


写真-6 メインケーブルを使った盛替え(1)

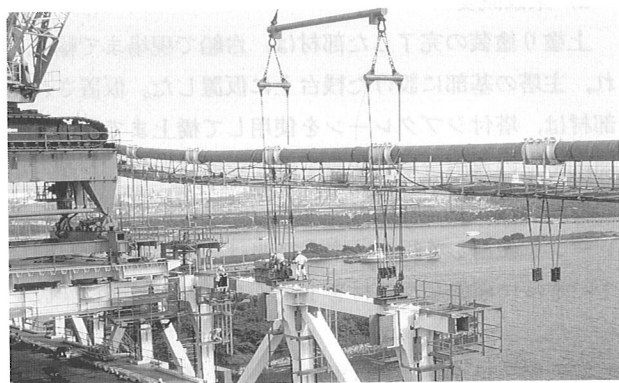


写真-7 メインケーブルを使った盛替え(2)



写真-8 コ字型天秤を用いた部材架設

c) 中央径間鋼床版の架設

前述のように、高速道路の中央径間は56径間連続桁としたため、架設途中、鋼床版側の上支承と上横桁側の下支承に大きな相対ズレが生じる。このズレを吸収するため、鋼床版の支承を移動量の大きな可動支承とし、ズレ量を計測、架設に反映させている。

また、連続鋼床版、死荷重における軸力分担を考慮していないため、後死荷重を搭載した後、中央の1パネルを閉合し、全径間を連続させている（写真-9）。

(2) ハンガーロープ引込み管理

架設は、補剛桁を剛結しながら行う逐次剛結無ヒンジである。この工法は、架設先端のハンガーロープ張力が過大になる欠点があるが、これに対処するため、架設先端3格点のハンガーロープが等張力になる3格点調整引



写真-9 中央ブロック鋼床版

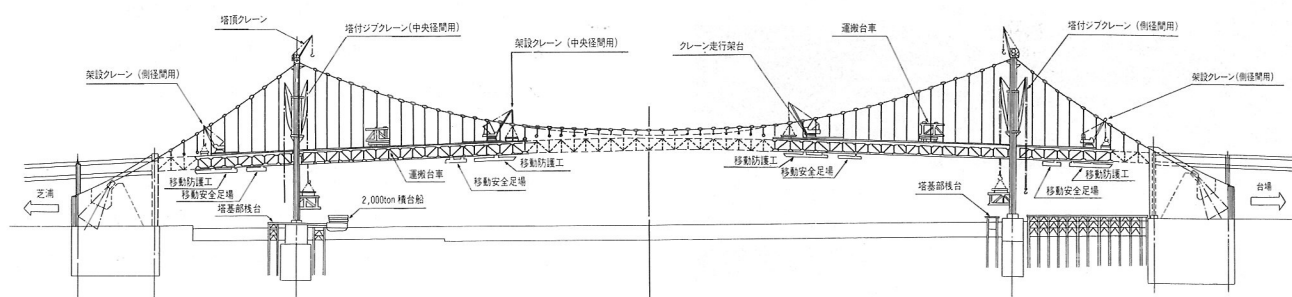


図-10 架設要領図

き込みを採用している。また、張力は6台のジャッキのストロークを油圧により測定し、パーソナルコンピュータにて管理を行った。

中央径間側の架設初期段階では、メインケーブルの形状変化が大きく補剛桁が下り勾配となるが、この勾配が大きいと安全面で好ましくないため、ハンガーロープの過引き込みを行い、勾配を4%以内にとどまるよう管理した(写真-10)。

(3) 架設サイクル工程

表-3に、中央径間の標準架設サイクル工程を示す。



写真-10 中央径間の張出し架設

表-3 サイクル架設工程表

作業内容	日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
面材架設		2面										
横桁架設		1本		1本		2本						
横構架設		2本		2本		4本						
ハンガー引込み装置の盛替												
ハンガー引込み定着												
移動防護工の前進・固定												
新交通桁の架設						4パネル						
臨港道路床組の架設						4パネル						
首都高床組の架設										4パネル		
クレーン移動装置の盛替												
架設用クレーン前進・固定												
運搬台車軌条の配置												
盛替架設準備工												
高力ボルト本締め工												
添接部塗装工												
移動安全足場の前進・固定												
部材搬入、水切り				第2船						第1船		

5. あとがき

本橋は架橋位置の制約から、縦断線形も左右非対称で、平面線形も側径間の途中から曲線になるうえ、2層構造のための特殊性や、利用者へのサービス向上を目指し、高速道路床組の全径間連続化など、新しい試みを採用した吊橋である。さらに、本文でも触れたように架橋地の地盤が悪いため、地震応答解析結果から地震時の移動量がたいへん大きく、新交通システムの床組をはじめ対処

に苦慮を強いられた。

このように、設計的にも多くの難題を克服し、また、船舶の往来の非常に多い航路上での困難な架設条件のもとでの工事も、無事に完成にこぎ着けることができた。

1993年8月26日(木)、レインボーブリッジはついに開通となった。多くの関係者は長年にわたる苦労も忘れ、喜ばれたに違いない。

われわれもこのようなビッグプロジェクトに参加できたことは光栄であり、技術者として誇りに思う。本文が掲載されるころには海の玄関として東京の新名所となり、たくさんの人が訪れていることだろう。

最後に、常に適切な助言をいただいた首都高速道路公団各位、ならびに、1221、1222工区JV各位に感謝の意を表するしだいです。

参考文献

- 1) 池部、高橋、竹山：鉄骨構造(下)、コロナ社、昭和28年。
- 2) 奥村敏恵、石沢成夫：薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について、土木学会論文集 第153号、昭和43年5月。