

「レインボーブリッジ」吊橋主塔の製作および架設

上 條 建 夫	機械鉄構事業本部橋梁事業部横浜第三工場生産管理部 部長
加治家 清 史	機械鉄構事業本部橋梁事業部建設技術部 部長
能 勢 卓	機械鉄構事業本部橋梁事業部設計部 専門課長
鈴 木 通 正	機械鉄構事業本部橋梁事業部管理部 専門課長
浜 田 久	機械鉄構事業本部呉新宮工場生産管理部

Fabrication and Erection of Suspension Bridge "Rainbow Bridge" Tower along Route No. 11

Tateo Kamijo
Kiyoshi Kajiya
Takashi Nose
Michimasa Suzuki
Hisashi Hamada

Metropolitan Express Route No. 11 is a 4.5 km long bridge spanning Tokyo Bay between the Shibaura district of Minato-ku and the Tokyo Bayshore subcenter. The three-span (two-hinged) suspension bridge over Channel No. 1 with a truss stiffening girder has a total length of 798 m (570 m central span). The top deck of stiffening girders carries a four-lane highway and the bottom deck provides a four-lane bayside road with pedestrians, and a rail track for the new transportation system. Rahmen structures are adopted for a part of the tower above the road surface. Field-welding joints were largely employed for the columns to improve the appearance of the tower together with rounded corners. This paper describes the fabrication and erection of the Daiba-side tower, undertaken by IHI.

1. 緒 言

首都高速11号線は、東京都港区の芝浦地区から東京港を横断して台場地区の臨海副都心を結ぶ延長：4.5 km の高架橋で、その東京第一航路に架けられる吊橋は橋長：798 m、中央径間：570 m のダブルデッキ3径間2ヒンジ補剛トラス橋である。首都高速4車線、臨港道路4車線、新交通システム複線および両側の歩道からなる複合交通施設として建設されるもので、高速道路網の充実による渋滞の緩和はもとより、東京臨海部の中央に位置することから21世紀の国際都市「東京」のシンボルとして、親しまれている。

1988年10月、IHI・サクラダ・春本建設工事共同企業体は首都高速道路公団から1222工区高架橋の主塔、側塔およびケーブルアンカフレームの新設工事を受注した。それらのうち、当社が担当した主塔の製作、架設工事につき、ここにとりまとめて報告する。

2. 構 造

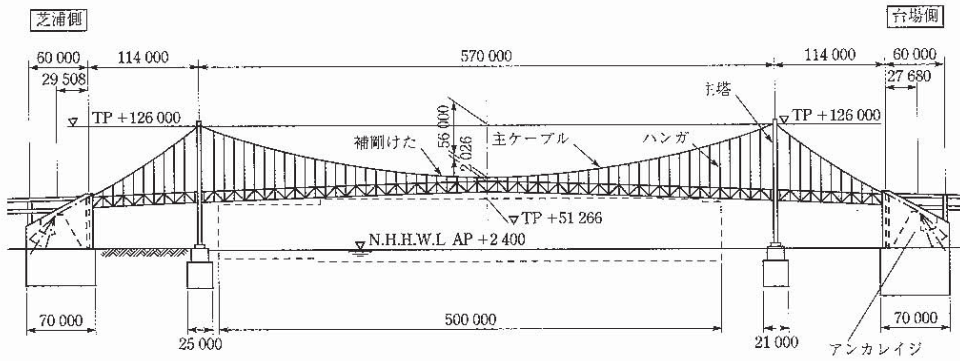
「レインボーブリッジ」吊橋の一般図を第2図に示す。主塔は、第3図に示すように、路面上に斜材、水平材を配



第1図 レインボーブリッジ

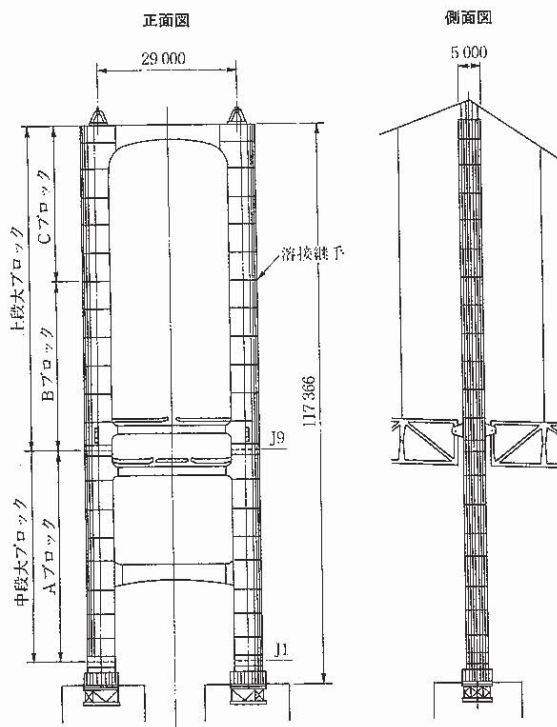
Fig. 1 Rainbow Bridge

置しない3層ラーメン形式で、塔柱の外側コーナ部を半径：1 500 mm の曲面とすることにより円柱的印象をもたせ、かつ塔柱継手を溶接することによりなめらかさ、柔らかさを表現している。断面はSM570Q材の60 mm（フランジ）と50 mm（ウェブ）で構成されており、塔柱のプロッ

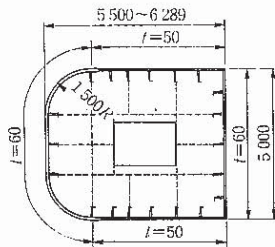


第2図 「レインボーブリッジ」吊橋一般図 (単位: mm)

Fig. 2 General arrangement of suspension bridge (unit: mm)



塔柱断面図(材質: SM58)



第3図 主塔組立図 (単位: mm)

Fig. 3 Arrangement of main tower (unit: mm)

ク長はプレス能力の関係から最大: 6.1 m となっている。付属品を含め鋼重は約4 650 tである。とくに、J1 と J9 は大ブロック連結部であるため、R 部にも高力ボルトを配置している。

本橋のような大形吊橋の主塔において、その大部分の継手に溶接を採用することは初めての試みであった。すべて

を現場で行なうことは工程、精度確保のうえから非常にむずかしかったため、主塔は工場において三つの立置ブロックで地組を行ない、大形フローティングクレーンにより曳航し、大ブロック工法により架設することとした。主塔底板下のコンクリート打設は、これまで行なわれていた研磨仕上法からわが国の吊橋では初めてグラウト注入工法

が採用されている。

3. 工場製作

従来の主塔と異なり高度な精度管理が必要とされたため、多くの事前検討を重ね品質管理を行なった。

3.1 SM570Q 材の検討

母材特性 (ひずみ時効シャルピー衝撃試験, 最高硬さ試験, 斜めY型・Z窓わく拘束割れ試験など), 耐ラメラティア, 加工性 (冷間曲げ, 線状加熱), 溶接性 (低温割れ, 溶接条件), 溶接継手特性 (溶接方法, 継手形状, 予熱層間温度の組合せ) などについて検討し, 各試験を通して良好な結果を得た。

3.2 曲げ加工 (第4図)

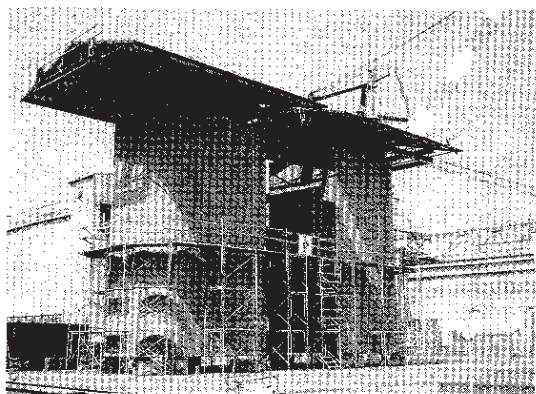
曲げ加工における懸案事項はR部のしわとブロック継手部での目違いである。このため、事前に施工試験を行ない, その結果にもとづいて本工事に用いる金型を作成し, 作業基準を作成したR部パネル内の板継ぎには「板継ぎ後曲げ」と「曲げ加工後板継ぎ」があるが, 精度確保の面から前者を採用した。

孔明後, 曲げ加工の精度を確認したところ, 孔明部がなめらかなRとならず角変形的に折れることが判明した。さらに, 曲げ加工部の孔形状は内面側が上下方向, 外面側が



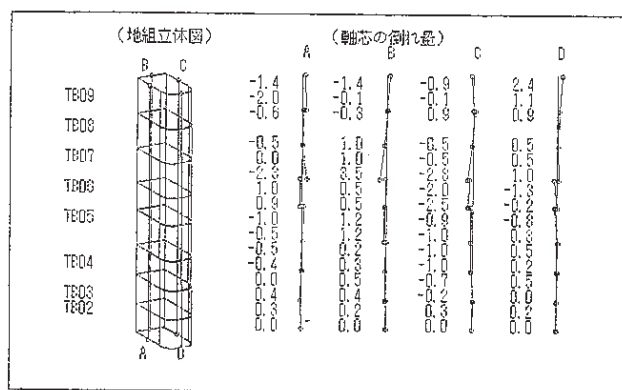
第4図 曲げ加工

Fig. 4 Bending



第 5 図 仮組立

Fig. 5 Shop assembly



第 6 図 累積精度管理結果の一例

Fig. 6 Example of accuracy control result for yard erection of main tower

水平方向の長円となり、孔径差が 1.5 mm 以上にもおよんでいた。これらの結果から、孔加工は曲げ加工後に行なうこととした。

3.3 組立作業および溶接

塔柱部材はパネル工法とし、一部の縦リブはブロック組立後に取り付けた。縦リブのパネル溶接は脚長：12 mm のすみ肉溶接であり、通常の水平姿勢では 1 パス施工は不可能であった。そこで、各種施工試験を行なった結果、パネルを傾斜して溶接することで 1 パスでの施工が可能であり、かつ外観、品質（溶込みなど）にも問題ないことを確認することができた。

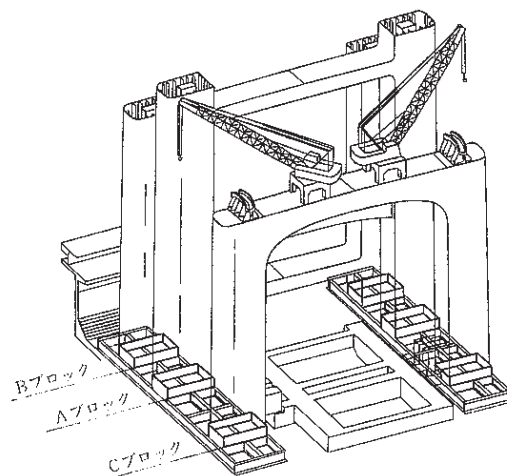
突合せ継手は、ひずみ対策を含む精度管理上からも部分溶込みのほうが望ましいため、設計上、問題とならない継手は一部を部分溶込みとして施工した。

3.4 芯出し、切削、部材検査

塔柱の組立、溶接、ひずみ取り後、芯出し、端面切削を行なった。芯出し、切削とも横置で、フェーシングマシンにより行なった。塔柱の単体ブロック全数に部材検査（立置）を行ない、製作基準値をすべてみたすことができた。

3.5 仮組立（第 5 図）

塔柱の仮組立は立置 2 段で、また、水平部材は取り合う



第 7 図 地組立

Fig. 7 Yard erection

塔柱ブロックを含む状態で立置で行なった。そのため、高さ制限から屋外での仮組みとなり、日照による倒れ、雨風による作業効率などの影響をきよく避けるため、専用屋根を用いた。上下部中間水平材の仮組みは、大ブロック継手である J9 での精度向上を目的として一体で行なった。

塔柱仮組時の鉛直度を地組立ブロックごとに累積管理した結果の一例を第 6 図に示す。この仮組数値は、「軸心基線の管理システム」（後述）の基本データとなる。

4. 主塔の地組立

主塔の架設に 3 600 tf フローティングクレーンによる一括架設工法が採用されたため、主塔を三つの大ブロックに分割して地組立した（第 7 図）。一般に、平面地組立で行なわれるが、本工事には下記の点から立置地組立が採用された。

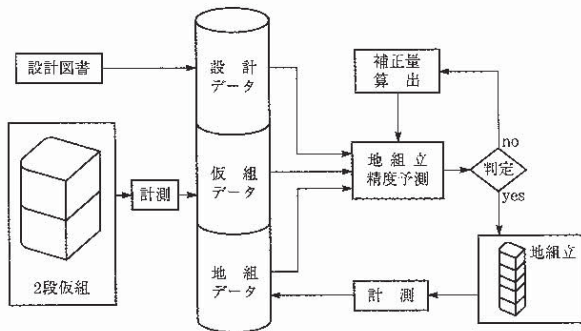
1. 溶接変形を考慮した高精度の管理
2. フローティングクレーンによる大ブロックの立起しに関する問題
3. 大ブロックへの艀装の作業性

立置地組立の場合、地盤に大きな地耐力が求められるが本工事においてはビルディングドックを使用でき、この点をクリアすることができた。

4.1 溶 接

高材質、極厚の横向突合せ溶接を行なうにあたり、品質確保、高効率化の観点から 4 施工法につき検討を重ねた結果、当社における原子力格納容器での実績と実施した施工試験結果から良好なデータが得られたので、パルス MAG 溶接を採用することとした。

塔内面は縦リブにより断続されるため半自動溶接、外面からは完全自動溶接により施工した。また、溶接ひずみをきよく小さくするため、断面に 10 箇所の開先残し部をバランスよく配置した。



第8図 精度管理フロー

Fig. 8 Flow of accuracy control

4.1.1 開先形状

極厚材の開先形状としてはX開先、レ開先、K開先（内面ガウジング）、K開先（外面ガウジング）などがあるが、精度確保、溶着量の均一性、溶接作業性などの観点からK開先（外面ガウジング）を採用した。

4.1.2 検査

事前に、60 mm 鋼板による放射能透過試験、自動超音波探傷試験の欠陥検出比較試験により性能を確認した結果、後者を用いることとした。

4.2 精度確保

地組立精度は、架設完了時の精度を考慮して1/7 500の鉛直精度を目標とした。この値は本橋のように溶接継手の多い製造物にとっては非常に高精度のもので、その精度を確保するため「塔軸心基線の精度管理システム」を開発した。

精度管理フローを第8図に示す。さらに、つぎの処置を施した結果、非常によい精度で目標値を確保することができた。

(1) 溶接変形を考慮した地組立寸法

- Aブロックの塔柱間隔 + 4 mm
- 溶収縮の伸び + 2 mm/ブロック

(2) 溶収縮計測結果のフィードバック

- Cブロックでの伸び 1 mm/ブロック

(3) 仮組から地組への移動

中間水平材および塔頂水平材は、塔柱を含めた立置仮組後、ただちに高力ボルトの本締め、溶接を行ない、中ブロックとして地組立でブロックへ搭載した。高さ調整は、計画時には各ブロックに1段の調整ブロックを設け、そのブロックの端面切削で行なうこととしていたが、実際には精度に及ばず影響が大きいAブロックのみ行ない、B、Cブロックにはその必要がないと判断した。

4.3 塗装

主塔外面はフッ素樹脂塗料、内面は変性エポキシ樹脂塗料が採用された。溶接による塗装面の汚れを防ぐため、外面は全面にわたり中塗上塗を残し、内面は溶接のあるダイヤフラム間を全地組立完了後に仕上塗装を行なった。

5. 架 設

本橋の架設地点が東京湾の主航路をまたぐ位置にあることから、海上交通が錯綜する狭隘な海面での作業となり、十分な事前協議と安全対策が求められた。基礎コンクリートに埋め込まれるアンカフレーム、その上の底板、主塔基部ブロックは、それぞれ1 500 t台船で輸送され1 050 tfフローティングクレーンにより架設された。塔基部据付面の施工には、わが国における長大吊橋の架設工事で初めてグラウト注入工法が採用された。

主塔中段の大ブロックは3 600 tfフローティングクレーン、上段のそれは4 100 tfフローティングクレーンにより曳航されたのち一括架設された。主塔の架設フローを第9図に示す。

5.1 底板の架設

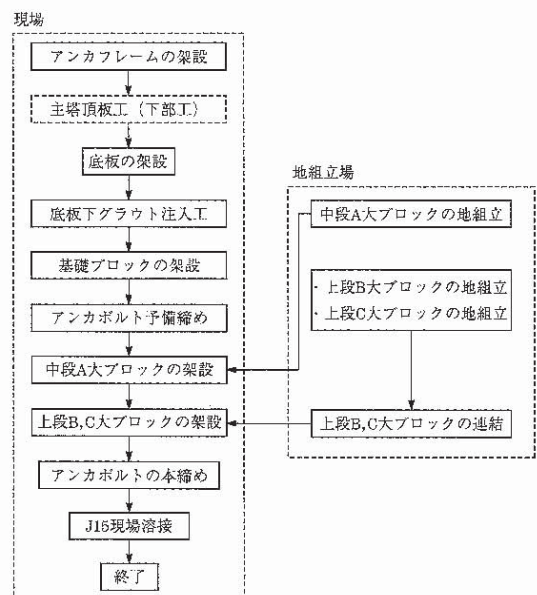
底板の据付精度は、主塔の鉛直精度を大きく左右し、さらにその上に据え付ける主塔基部とはメタルタッチで設計されていることから、高精度な管理が求められた。そのため、底板上面に60 cmメッシュの測点を設けて計測し、底板に配置された12個のボルトで調整した。その結果、底板の全面にわたり±0.2 mmの精度を確保することができた。

5.2 底板下グラウト注入工

わが国における長大吊橋の主塔としては初めて、塔基部据付面をモルタル注入方式により施工した。底板寸法は7.8 × 6.5 mで、これを5区画に分け、隔壁にはバグパイプを用いた。開放された流出側には底板下面より5 cm高さの堰を設け、注入量の約25%をオーバフローさせた。平均充填率：97%が得られた。

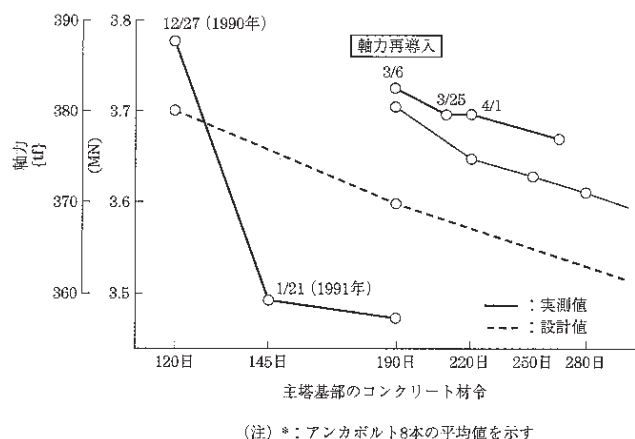
5.3 アンカボルトの軸力

アンカボルトには中段大ブロック架設時に100%軸力(3.7 MN {380 tf})をそれぞれに導入し、50日後に軸力の減少を



第9図 主塔架設フロー

Fig. 9 Flow of main tower erection



第10図 主塔アンカボルトの軸力*

Fig. 10 Axial force of main tower anchor bolt

補うため、再度、付加軸力を導入した（第10図）。その後の軸力の変化量は設計値に沿っていることから、これを最終軸力導入とした。

5.4 中段大ブロックの架設

中段大ブロック（高さ：41.1 m、重量：1890 t）には、架設地点におけるフローティングクレーンのアウトリーチの条件から、3600 tf フローティングクレーンが必要となった。フローティングクレーンの4フックを用いてブロックの2点を吊る形となったため、このワイヤリングに専用の大形吊天秤を設計した。工場から曳航後、その吊姿勢のまま基部ブロック上に架設した。

5.5 上段大ブロックの架設

5.5.1 浜出し

上段大ブロックは、上下2段に分割して地組立した。浜出し時に上段Cブロックを下段Bブロックにのせ、主塔内の縦リブをボルトで連結することにより両ブロックを一体化したのち全体を吊りあげ浜出した。

5.5.2 曳航

曳航時の吊荷の重心がほぼ吊点と同位置になるため、フローティングクレーンによる曳航中の形状をモデルに動揺解析を行ない、その安定性を確認した。

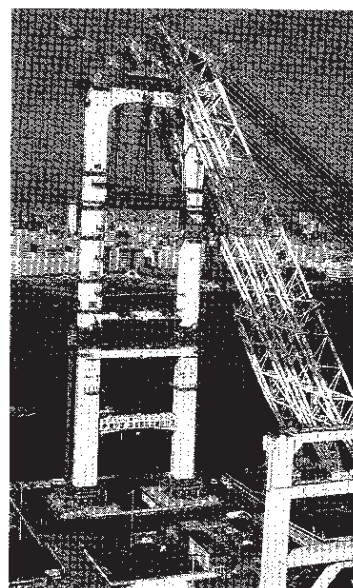
曳航時に風速：16 m/s、有義波高：35 cm の波に遭遇したが、動揺は計算値と同様に小さく、ローリング角も0.05度以下であった。

5.5.3 架設

主塔の上段大ブロックは、本体のほかに塔頂クレーン、塔頂サドル、吊上架など約1000 t に及ぶ資機材を取り付けるため、その総重量は約3400 t となった。この重量は、3600 tf フローティングクレーンではアンバランス荷重、動揺荷重、制動荷重などが加わると過負荷となるため、世界最大の4100 tf フローティングクレーンを用いることとした。現場では、吊曳航時の高さから架設時の高さまで上段大ブロックを約40 m 吊り上げ、所定位置まで前進させたのち、中段大ブロック上に降下させ架設した（第11図）。

5.6 現場溶接

地組立時のBブロックとCブロックの連結部である J15



第11図 上部大ブロックの架設

Fig. 11 Erection of upper large tower block

は、架設時には縦リブを仮ボルトで連結されていた。この継手は地組立と同様の施工方法により現地溶接を行なった。

5.7 架設精度

全工事完了後の鉛直精度は塔頂で8 mm、J15 位置で7 mm、J9 位置で2 mm で、架設基準値(1/5 000)を十分満足するものであった。

6. 制振対策

主塔模型の風洞実験によると、風速：7.5～15 m/s において主塔面外1次（塔頂加速度：75～230 gal {75～230 cm/s²}）の渦励振の発生が予想された。そこで、架設作業への影響を考慮して20 gal {20 cm/s²} 以下に押えることを目的とし、当社において開発された橋梁主塔用ハイブリッド式制振装置を設置した結果、低風速での実測値は18 gal {18 cm/s²} となった。また、風洞実験において、25 m/s 以上の高風速でねじれ1次および面内1次の振動などの励起が予想されていたため、従来からよく使用されている振子式同調形ダンパを設置した。

7. 結 言

以上、「レインボーブリッジ」吊橋主塔の製作、架設についてその概要を述べた。当社が担当した主塔は、首都「東京」の景観への配慮から路面上に斜材、水平材を配置しない3層ラーメン形式、塔柱外側のわん曲形状の採用、R部にも高力ボルトを配置するなど、前例のない多くの特長をもっている。さらに、長大橋吊橋の主塔としてはわが国で初めて溶接継手を主体とし、大ブロック工法により架設した工事であった。受注の直後から当社の設計・製作・架設担当部門、技術研究所が一体となり、多くの検討を重ね調整を行なった。客先の要求をみだし、無事故で本工事

を完了させることができたことは大きな喜びである。その景観が重視される傾向にある昨今、橋梁形式の選択、塔柱外側のわん曲形状の採用など、本報告が今後の橋梁工事の設計、施工において参考の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 石井紘史, 田嶋仁志: 東京港連絡橋吊橋アンカレイジ, 上部工工事 土木施工 Vol. 32 No. 6 1991年6月 pp. 17-30
- (2) 石井紘史, 田島幸雄, 高橋三雅: 首都高速12号線吊橋の施工状況(主塔工事) 橋梁 Vol. 27 No. 5 1991年5月 pp. 3-13
- (3) 佐藤栄作, 富永博夫, 並川賢治, 清田錬治, 能勢

卓: 首都高速12号線吊橋の主塔架設時制振対策 制動制御コロキウム(土木学会構造学委員会) 1991年7月
(4) 牟田口勝生: 首都高速道路公団 東京港連絡橋(1 222工区) 主塔用制振装置 石川島播磨技報 第31巻第4号 1991年7月 pp. 280-281

— 謝 辞 —

本工事の設計、施工にあたり、首都高速道路公団第3建設部、同公団東京港連絡道路工事事務所の関係各位から多くのご指導とご協力をいただきました。そのうえ、平成四年六月には本件の共同企業体に対し、理事長より表彰状を賜りましたことをここに記し、深く感謝いたします。