

「ニューカルキネス橋」(アメリカ) 補剛桁の製作・輸送工事

Fabrication and Transportation of Deck Units for “New Carquinez Bridge”

柳 原 正 浩	物流・鉄構事業本部橋梁事業部海外プロジェクト部 課長
喜 田 章 裕	株式会社アイ・エイチ・アイ・エスエーテック 知多工場生産部 課長
山 根 三 弘	物流・鉄構事業本部橋梁事業部海外プロジェクト部
中 山 岳 史	物流・鉄構事業本部橋梁事業部海外プロジェクト部
村 田 眞 司	物流・鉄構事業本部生産センター愛知工場製造部

当社は、サンフランシスコ近郊のカルキネス海峡に架かる既存橋の架け替えとして建設された吊橋補剛桁の製作・輸送工事を受注し、総桁質量 12 700 t を当社愛知工場で製作、現地まで海上輸送して納入した。厳しい客先の品質要求に対してさまざまな試みによる技術検討を重ねて対応した結果、元請 JV および施主である Caltrans（カリフォルニア州交通局）の高い評価を得た。また、冬期太平洋上で大型ブロックを段積み運搬した海上輸送は、社内外の協力を受けた事前検討によって課題を克服し、3 回の航海を無事に完了し、客先納期にこたえた。

IHI obtained the subcontract for fabrication and delivery to the site of orthotropic box girders for the suspension bridge, which was constructed to replace the existing bridge over the Carquinez Strait in the vicinity of San Francisco. A total of 12 700 t steel structures was fabricated in Aichi works and transported across the Pacific Ocean. With technical trials and investigations, IHI succeeded in fulfilling the client's high quality requirements and won satisfaction from the general contractor and the owner. With regards to ocean transportation, which was done with double stacking of heavy units and across the Pacific Ocean in winter, all three voyages were successful to deliver on time with no problem.

1. 緒 言

「ニューカルキネス橋」はサンフランシスコ湾に架かる橋梁の耐震性向上策の一環として、1927 年に建設された「第一カルキネス橋」の架け替えとして計画され、正式名称は「アルフレッド・ザンパ記念橋」“The Alfred Zampa Memorial Bridge”という。

中央支間 728 m、全長 1 055 m の 3 径間連続吊橋で、主塔が鉄筋コンクリート製、補剛桁が鋼製である。本橋の建設プロジェクトは、カリフォルニア交通局（以下、Caltrans と呼ぶ）が発注し、FCI Constructor Inc., Cleveland Bridge California Inc., a JV（以下、JV と呼ぶ）が全体工事を受注し、当社は補剛桁の製作・輸送を JV から受注した。JV 架設計画に基づき分割された 24 ブロック（ブロック標準質量 570 t、総桁質量 12 722 t）を当社愛知工場（以下、愛知工場と呼ぶ）で製作し、現地へ海上輸送した。

本稿では、当社が担当した本橋の補剛桁の製作・輸送工事全般について報告する。

2. 工 事 概 要

2.1 プロジェクトの背景

2003 年完工した「ニューカルキネス橋」は、サンフランシスコの北東約 30 km に位置するカルキネス海峡を横断（第 1 図）し、1927 年および 1958 年に建設された 2 橋のカンチレバートラス橋梁に並設される 3 本目の橋梁である（第 2 図、第 3 図）。カリフォルニア州は、1971 年の



第 1 図 架橋位置図
Fig. 1 Site location

「ニューカルキネス橋」 「第一カルキネス橋」 「第二カルキネス橋」



第 2 図 「ニューカルキネス橋」完成後の現場
Fig. 2 Site photo after completion of “New Carquinez Bridge”

「ニューカルキネス橋」 「第二カルキネス橋」



第 3 図 既設「第一カルキネス橋」撤去後の現場
Fig. 3 Site photo after demolition of “1st Carquinez Bridge”

シルマー地震, 1989 年のロマ・プリエタ地震, 1994 年のノースリッジ地震などの災害に遭遇した。このため, 既存 2 橋梁を含む州内すべての橋梁で耐震診断を実施した。この結果, 1958 年建設の第 2 橋については, 耐震補強を施せば供用可能と判定されたが, 1927 年建設の第 1 橋については, 十分な耐震対応ができないと判定され架け替えが決定され, 3 本目の橋梁が建設された。架け替えに当たっては, 旧橋と同じカンチレバートラス形式, ダブルアーチ形式, 斜張橋形式が候補に挙がったが最終的には 3 径間連続吊橋形式が採用された。アメリカでの近代的な吊橋施工は, 1973 年の「チェサピーク・ベイ橋」以来, 約 30 年ぶりである。

本橋の正式名称である「アルフレッド・ザンパ記念橋」“The Alfred Zampa Memorial Bridge”の由来は, 1927

年の「第一カルキネス橋」建設以来, 「オークランド・ベイ橋」, 「ベネシア橋」, 「リッチモンド・サンラファエル橋」そして「ゴールデンゲート橋」などこの地区の橋梁建設工事に功績のあった鉄骨組立工のアルフレッド・ザンパ氏にちなんで名付けられた。

2.2 入札

以下に, 入札公示から発注までの日程を示す。

入札公示日	1999 年 8 月 23 日
入札日	2000 年 1 月 13 日
入札額 (最安値)	\$ 187 837 346
元請発注日	2000 年 1 月 28 日
当社への製作発注日	2000 年 4 月 15 日

本工事は, 州および地域予算のみで実施され, 連邦政府資金は含まれない。このため, 桁やケーブルなどの鉄鋼製品もバイ・アメリカ条項は適用除外工事である。

2.3 契約関係

本工事の主たる契約者を次に示す。また, 契約に当たって, Caltrans は JV に対し 50% の履行保証, 下請支払い保証を義務付けた⁽¹⁾。JV は当社に対し 100% の支払い保証を発行し, 当社は JV に対し 100% の履行保証を発行した。

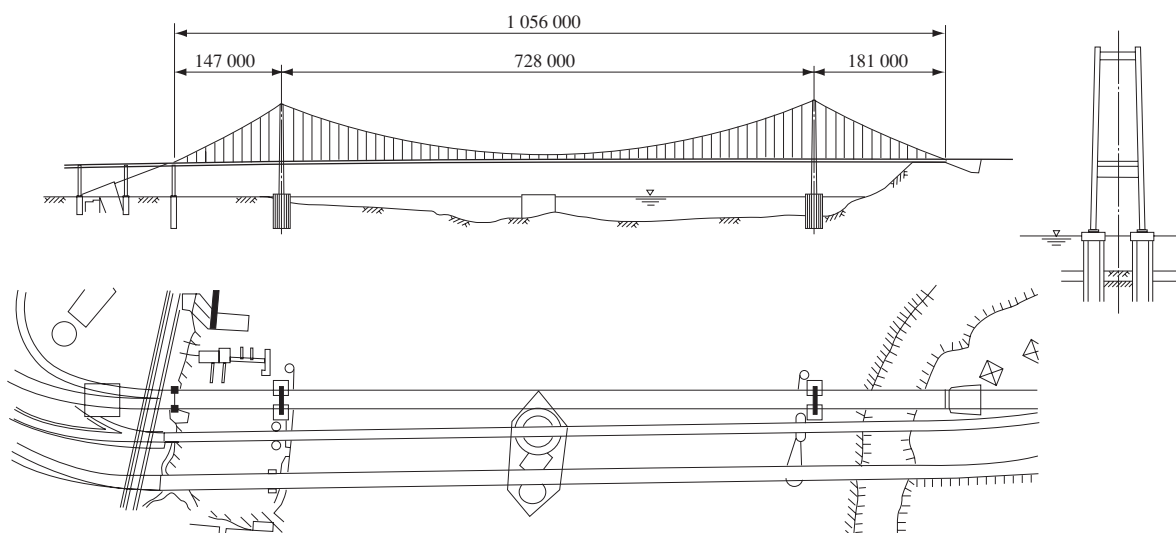
施主	Caltrans (California Department of Transportation)
設計	Deleuw Cather, OPAC, Steinman
元請	FCI Constructor Inc., Cleveland Bridge California Inc., a JV
補鋼桁製作	石川島播磨重工業株式会社
輸送	石川島播磨重工業株式会社
引渡条件	DDP, Incoterms 2000 ⁽²⁾

カリフォルニア州公共契約規約⁽¹⁾では, 遂行能力がない下請に発注することは禁じられている。また, 元請は, 入札時に想定している主要下請の企業名を提出しなければならない。

2.4 橋梁概要⁽³⁾,⁽⁴⁾

橋梁一般図を第 4 図に, 橋梁諸元を次に示す。

橋梁形式	3 径間連続吊橋
支間割	183 m + 728 m + 148 m
有効幅員	25 m (4 車線 + 路側帯 + 歩道)
主塔	鉄筋コンクリート製, 高さ 131 m
	多層自昇式 (Multi-tiered self climbing) 型枠システムによって施工, 1 サイクル = 4 m, 最短 2 日 / 1 サイクル



第 4 図 橋梁一般図（単位：mm）
Fig. 4 General drawing of the bridge (unit : mm)

ケーブル 素線 $\phi 5$ mm（イギリス製）
素線 8 584 本／ケーブル，素線 232 本／ストランド，質量約 1 t／コイル，施工はエアリアルスピニング工法，スピニング中は素線自重の 15% がキャットウォークに掛かるように引出し素線張力をコンピュータで管理

ラッピング $\phi 3.5$ mm の亜鉛めっき丸鋼ワイヤ

下塗り ジンクペースト + アクリルポリマー塗装（3 層）

補剛桁 鋼床版 1 箱桁（総質量：12 722 t）
鋼床版箱桁はアメリカの吊橋では初めての形式

基礎 鋼管杭
直径 3 m，総延長 6 030 m，支持層約 - 50 m，フーチングは現場近くの工場で製作されたプレキャスト

橋面舗装 防水層 + トリニダードレイクアスファルト

2.5 工 程

本工事の全体の工程を第 1 表に示す。

3. 設 計

3.1 設計概要^{(4), (5)}

設計の概要を次に示す。ただし，詳細設計の実施は，前述のとおり Deleuw Cather, OPAC, Steinman であり，当社は直接，詳細設計にかかわっていない。

(1) 設計法

補剛桁，主塔は AASHTO LRFD（荷重係数設計法）を，ケーブルは ASD（許容応力度法）を適用した。

(2) 設計活荷

AASHTO（アメリカ全州道路行政官協会）の基準に基づいた。

第 1 表 工事工程
Table 1 Construction schedule

年 月 項 目	2000												2001												2002												2003												2004				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5												
基 礎 ， 塔																																																					
ケーブル架設																																																					
桁 製 作																																																					
桁 架 設																																																					
橋 面 工																																																					

(3) 耐震設計

再現期間 300 年の地震に対し損傷がなく、1 000 ～ 2 000 年の地震に対しては交通を確保する。

(4) 耐風設計

100 年再現期待値の風速とする。

(5) 疲労設計上の特徴

トラフリブの溶接は 80 % 以上の溶込みを確保する (ただし、メルトスルーは不可とする)。トラフリブスカラップの形状が工夫されている。

(6) 塗 装

内面は水性無機ジンクリッチ塗装 100 ～ 200 μm ，
外面は水性無機ジンクリッチ塗装 100 ～ 200 μm + ラ
テックス (ゴム系) 塗料 100 ～ 200 μm とする。

3.2 製作図面

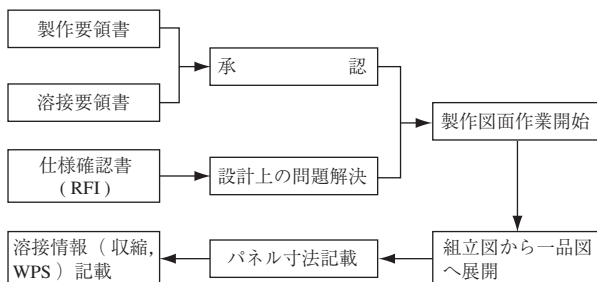
当社は、本工事において製作、輸送を受注した。したがって当社の設計作業は製作図面の作成が基本となる。製作図面の作成手順を第 5 図に示す。

アメリカの製作図面は、製作前の最後の技術責任者 (The Engineer) の承認対象ドキュメントであり、我が国でいう原寸検査はない。製作図面には溶接収縮情報、付属品の取付情報を含む必要がある。また、組立順序の情報が製作図面に含まれることもアメリカの製作図面の特徴である。それらの情報を付加したうえで、本工事では約 1 300 枚の製作図面を作成した。

4. 製 作

4.1 概 要

製作は愛知工場で実施した。工場資格としてアメリカ鋼構造協会 (AISC) の分類のうち主要橋梁の製作 (Major bridge)，崩壊に対する要部位^{かなめ}の製作 (Fracture critical)，重防食塗装 (Sophisticated paint) についての資格取得および Caltrans の工場審査 (Audit) 合格が必要とされた。架設計画に基づき全橋を 24 分割し、工場屋内では各架設



第 5 図 製作図面の作成手順
Fig. 5 Procedure of shop drawing

ブロックを 3 分割して製作した。これらを一つのブロックに組み立てるブロック組立工法を採用、1/3 ブロックを工場の地組・仮組定盤で架設単位に溶接、ボルト接合した後、仮組を実施する。

客先の検査・管理は Caltrans のエンジニア、検査官：4 ～ 8 名、JV：1 ～ 3 名が常時工場に駐在するという体制で行われた。

4.2 製作基準

本工事の主な仕様書を次に示す。

① Standard Specifications

State of California Business, Transportation and Housing Agency Department of Transportation 1999

② Special Provisions for Construction on State Highway in San Francisco County in San Francisco from 0.6 km to 1.3 km East of the Yerba Buena Tunnel East Portal

③ AWS D1.5 (1996)

4.3 鋼 材

主要鋼材は、ASTM A709M Gr345T2 (JIS : SM490Y 相当) である。板厚、ヒート (Heat) ごとに試験片 (Check sample) を切り出し、機械試験を実施し鋼材性能を保証した。

4.4 溶接、歪取り

4.4.1 溶接施工承認

本工事の溶接施工に当たっては、仕様書およびアメリカ溶接規格 (AWS D1.5) を遵守し、満足させるものでなければならなかった。これは非常に厳格なものであり、工場側の安易な解釈は一切認められることはなかった。

このため、仕様書要求どおり QCP (Quality Control Procedure) を提出し、客先承認を得ることが必要であった。これは、それぞれの溶接方法における溶接施工管理方法、溶接検査、非破壊検査の要領を網羅するものであり、特に、溶接施工方法については、AWS D1.5 を完全に適用することが求められ、すべての溶接に対し WPS (Welding Procedure Specification) が必要であった。このため WPS の管理値 (Essential variable) を得るため、事前に PQR (Procedure Qualification Record) と呼ばれる溶接施工試験を実施した。

溶接施工方法は溶接箇所、溶接プロセス、溶接姿勢で分類されるため、本工事では WPS が 124 件、PQR が 62 試験を実施した。なお、これは今後の AWS 規格の工事にお

いて、愛知工場の貴重な財産となる。

同様に溶接作業者の資格試験もAWS D1.5 に従い実施した。これは取付職の仮付け溶接にも及び、延べ 130 人の作業者がこの資格を取得した。

4.4.2 溶接施工品質管理

同時に溶接施工における品質管理も厳しい管理が要求された。工場には Caltrans から派遣された溶接検査を専門とする検査官が常時 4 人、交代で常駐していた。

工場では QC 検査官として、AWS-CWI 資格者、アシスタント QC として AWS-CAWI 資格者が現場から 30 分以上離れることなく施工管理を実施することが仕様書要求であった。AWS 規格工事ではこの資格者なしで工事を実施することは不可能であり、急きょ資格を取得し、最終的には工場で 5 人の資格者を中心に検査を実施した。

4.4.3 歪 取 り

歪取り処理のための入熱を最小限にする目的で、溶接時にプレキャンバを設け歪発生を最小限に抑える技術を確立した。また、全部材（約 1 300 部材）に対して、歪取り作業前後の部材の形状データ、入熱位置の記録をとり、入熱履歴を管理した。

4.5 パネル組立

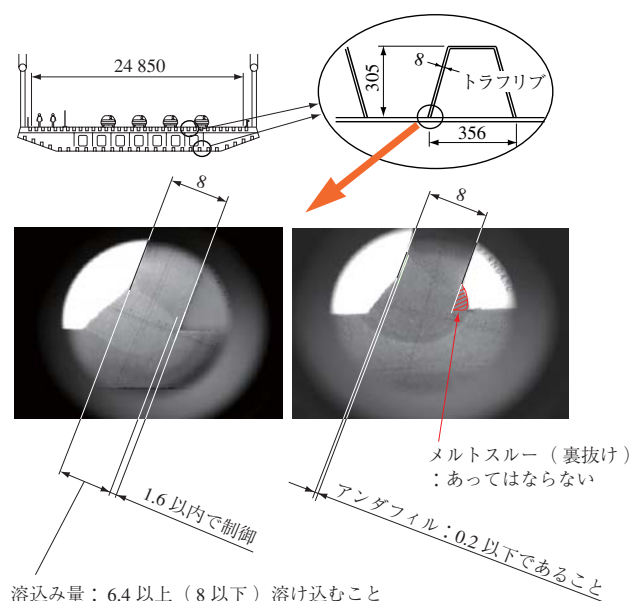
パネル組立においては、箱桁の全トラフリブとデッキおよびボトムプレートとの溶接に対して、溶込み量の管理値としてトラフリブ板厚の 80%以上 100%以下が要求された。すなわち、80%未満の溶込みのほかに、板厚を抜ける溶接も欠陥とみなされた。この要求を満たすために溶接施工方法の検討と試験を繰り返した。そのため客先の追加品質要求への対応も含め、承認を得るため 1 年を要した。

非破壊検査は溶接線長の 15%に対して UT（超音波探傷試験）を行ったが、万一 UT で不良箇所が発見された場合は、不良が発見されたパネルの全トラフリブに対してその溶接延長の 100% UT が要求された。

溶接外観としては滑らかな形状が要求され、アンダフィルの許容値として 0.25 mm 以下が規定された。溶接マクロ写真を第 6 図に示す。

トラフリブの溶接は、外板上にギャップ 0.6 mm 以下で仮付け溶接によって取り付けした後、本溶接を行ったが仮付け溶接が本溶接の溶込みを邪魔し、溶込み不足が生じた。このため、仮付けを本溶接中の溶接歪で割れない程度まで小さくし、かつビードを薄く削り落としてから本溶接を行った。

溶接プロセスについては各種実験、試験を繰り返した結



第 6 図 溶接マクロ写真（単位：mm）

Fig. 6 Photo of cross section of trough rib welding (unit: mm)

果、最終的には前述の仕様書、客先要求を満たすことを確認し、SAW（サブマージアーク溶接）に決定した。溶接作業状況を第 7 図に示す。

このほか、パネル同士のシーム溶接には、片面サブマージ溶接（FCB 法）を適用した。この溶接方法は、AWS 規格にはない方法であったため、施工承認に当たっては多くの試験、書類を必要とした。しかし、FCB 法によって施工した結果、歪の発生が少ないこと、自動溶接であるため欠陥が少なく品質が安定していることから、客先から高い評価を得た。

4.6 地組立、仮組立

地組立では、1/3 ブロック間のバット溶接によるねじれ変形の影響が桁内に残っていないことの証明が必要であっ



第 7 図 パネル組立溶接作業状況

Fig. 7 Welding work on panel assembly

た。そこで、溶接順序の確立、遵守と溶接作業中の桁支持点 24 か所の反力変動をリアルタイムで表示するシステムを構築し、出来型管理と反力管理によって、ねじれ変形量が許容値内であることを確認し、影響がないことを証明した。また、検査時における同一ブロック内の温度差を $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内にするため、仮設テントを設置し、検査対象ブロックをすべて覆うようにした。これによって、日照による桁の部分的な温度上昇を最小限に抑え、夜間の桁温安定までの時間を早めることで、温度条件を満たす夜間作業時間を確保した。

仮組立においては、現場継手部の遊間を規定値に収めるため、各架設ブロックの地組立完了後に現場継手部の仕上げ切断が義務付けられ、JV 検査として検査官立会いのもと切断量、切断マーキンラインの確認が仮組立検査前に全ブロックについて行われた。

仮組立検査時には、当社の計測と同時刻かつ同計測点に対して、Caltrans 検査官も独自に三次元計測を行い、当社の計測結果報告と $\pm 1\text{ mm}$ （最大 2 mm ）の誤差内であることが全ブロックについて客先確認された。その結果、合格となれば、現場継手部のトラフリブの孔明け（当てもみ）実施が了解される。それを受けて、温度上昇が始まらない未明までに孔明けを完了させ、必要数のドリフトピンを打ち込む。その状態で、今度は JV 検査官による現場継手部のルートギャップおよび目違い検査を受けて仮組立検査が無事完了となる非常にタイトなスケジュールであった。

溶接順序、出来型管理、反力管理、温度管理を厳密に実施した結果、デッキエレベーションおよび通り芯の許容値、ハンガー定着用ピン孔中心のエレベーション許容値、それぞれ $\pm 2.5\text{ mm}/50\text{ m}$ 、 $\pm 3.0\text{ mm}/100\text{ m}$ という客先要求を満足した。

4.7 塗 装

VOC（揮発性有機化合物）規制の関係で水性塗料の使用が規定されており、工場では、内外面に 1 層ずつ水性無機ジンクリッチ塗料（ $100 \sim 200\text{ }\mu\text{m}$ ）を適用した。施工環境制限が $7 \sim 29^{\circ}\text{C}$ 、付着力の最低要求値が 4 MPa と厳しいものであったが、建屋内での厳格な空調管理のもとに施工し、要求品質を確保した。

5. 輸 送

5.1 概 要

桁ブロックは全数で計 24 ブロックあり、客先の要望から輸送は 8 ブロックずつ 3 回に分けて行った。輸送コスト

削減のため、桁ブロックを上下 2 段積みし、1 回当たり 8 ブロックの輸送を 1 船で行えるようにした。その際、客先仕様書上、桁ブロックの直接段積みが禁止されていたため、特殊架台をデッキ上に設置し、上下段を切り離して段積みした（第 8 図）。

また、客先から指定された納期の関係から、3 回の輸送を同一船の往復航海で行うことができず、3 船別々の船を上海（中国）にある ZPMC 社傘下の ZPMC Shipping 社から備船した。輸送架台の製作は ZPMC 社本体へ、また、日本国内および現地（アメリカ）での乙仲業務、備船契約仲介および係留業務は義勇海運株式会社へ発注した。

輸送船 1 船当たりの平均航海日数は約 20 日間であった。

5.2 船 積 み

標準ブロック質量 570 t の桁は、愛知工場のゴライアスクレーン 2 基の相吊で積み込んだ。その際、仮組方向と船体積み込み方向の違いから、積み込みに先立ち各ブロックをドローリ 4 台で 90° 転回させた。第 9 図に積み込み状況を、第 10 図に転回状況を示す。



第 8 図 桁積み込み完了後の輸送船（第 1 船）
Fig. 8 Transportation ship with deck units doubly stacked (first shipment)



第 9 図 積み込み状況
Fig. 9 Loading unit onto ship



第 10 図 転回状況
Fig. 10 Horizontal turning of unit

桁ブロックのラッシングは、すべて輸送架台の受け点部にあらかじめ架台の一部として設計、設置した拘束ジグを用いて行った。

5.3 海上輸送

桁ブロックの標準サイズは幅 29 m × 長さ 49.6 m であり、同ブロックを 1 船当たり 8 ブロック 2 段積みするため、各ブロックはその長さ方向を船体幅方向に向けて積み込まれた。この結果、船体両サイドから桁ブロックが約 9 m オーバハングする形となったため、輸送中の船体動揺に伴いオーバハング部が波浪によって損傷を受ける懸念があった。このため、輸送架台構造によって桁ブロックを船体デッキ上 6 m かさ上げして搭載したほか、波浪の比較的穏やかなハワイ航路を選択した。

船体の輸送中の動揺は当社基盤技術研究所（横浜）の協力のもと数値的に解析し、積み込み法、輸送経路および輸送中の桁本体への影響について客先に報告し、事前に承認を得た。第 11 図に 3 船の輸送経路を示す。

また、波浪、風雨による桁内面の腐食防止対策として、

桁両端の開口部は航海中の荒天および長期の輸送期間を考慮して、風速 60 m/s にも耐え得るテント材によるオーニングを施した。

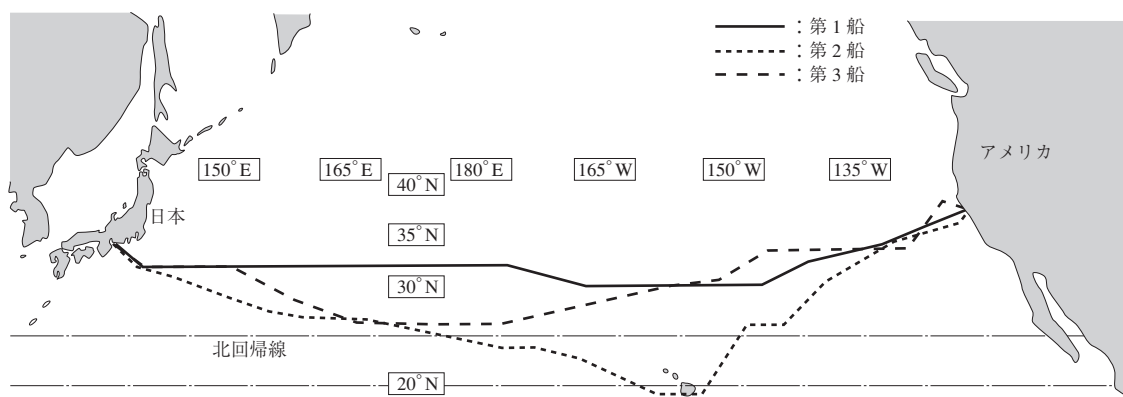
5.4 現場係留・架設

桁ブロックは、架設位置の状況によって輸送船からの直接吊り上げが困難で、小型台船への積替えが必要な一部の桁ブロックを除き、輸送船から直接水切りされ、架設された。そのため、各ブロックを架設する都度、輸送船を待機場所から現場海域内に回航し、海域内に事前設置したアンカーおよび船体デッキ上に現地で設置したウインチによって 4 点係留した。回航、係留に際しては航路内作業であったため、現地パイロットが乗船し、この指示のもと曳船の援助を受けて位置決め、係留作業を行った。なお、JV 所掌である架設ブロックの位置確認は、陸上から光学式測量機によって行われた。第 12 図に係留解除状況を示す。

架設は潮流が凪かつ上げ潮に向かうタイミングで行われた。これは吊り上げ作業中の船体の揺れを避けるとともに、引き潮による船体降下に伴い意図せず吊り上げ設備に桁荷重が載荷されるのを防止するためである。また、桁ブロックは船体上に 1.5 m の遊間で搭載されていたため、架設



第 12 図 係留解除状況
Fig. 12 Releasing of anchor lines with tug boats



第 11 図 海上輸送経路（実績）
Fig. 11 Sea transportation routes (actual)

時の衝突防止対策として吊り上げガイドを設置した。しかし、係留時の位置決め精度が良かったため架設時の吊りブロック、船体ともに横ぶれすることはなかった。

輸送船は航路である架設現場での係船待機がコーストガードに認められなかったため、現場海域付近の一般係留海域を待機場所とした。待機場所ではスペースの関係から他の海上交通への安全対策として4点アンカーによる係留方式とした。係留はパイロットの指示に従って実施した。

JV 所掌である架設は、待機場所で桁上に事前設置された4台のストランドジャッキによって行われた。数セット用意されたストランドジャッキは架設完了後、後から吊り上げられる桁ブロックの架設準備のため待機場所まで台船輸送され、桁上に設置された。第13図に桁の架設状況を示す。架設作業は、まず係留位置確認後、キャットウォーク上からウインチによって、各ジャッキのストランドエンドを吊り上げ、あらかじめメインケーブルに設置した仮クランプへ定着、再度位置確認を行った後、ジャッキ操作で荷重バランスを確認しながら吊り上げ架設された。

ストランドジャッキ4台およびパワーバックなどの設備はすべて桁上に搭載され、吊り上げ操作は有線のリモートコントローラによって、輸送船上もしくはキャットウォーク上からの集中操作で行われた。1台のストランドジャッキには $\phi 18\text{ mm}$ の垂鉛めっきされたPC鋼より線が19本使用された。また、一部ブロックは設置場所の関係から空中で横移動された。この横移動は2セット(2×4台)のストランドジャッキ間の荷重移動によって行われた(第14図)。

6. 結 言

以上、「ニューカルキネス橋」補剛桁の製作・輸送工事に関してその概要を報告した。厳しい納期のなか、工場、プロジェクトグループが一体となり工事遂行に取り組んだ結果、要求納期どおりに架設現地に納入することができた。厳しい環境と工程のなかで蓄積された技術と経験は、今後の海外案件に生かしていく所存である。

— 謝 辞 —

本工事の実施に当たっては、社内外の関係各位から多く



第13図 桁の架設状況
Fig. 13 Lifting up of unit



第14図 荷重移動による吊り下げ状態での桁横移動状況
Fig. 14 Traversing status of unit performed by load shifting under hoisted condition

のご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) State of California, Department of Transportation : Standard Specification 1999 (1999)
- (2) International Chamber of Commerce : International Commercial Terms 2000 (2000)
- (3) California Department of Transportation : Spanning the Carquinez Strait (2003)
- (4) M. Marquez, R.W. Wolfe and E. Thimmhardy : New Carquinez Strait Suspension Bridge, San Francisco, California Structural Engineering International Vol.13 No.2 (2003)
- (5) Thomas Spoth, 大橋治一：ニューカルキネス橋の設計 橋梁と基礎 Vol.35 No.6 2001年6月 pp.17-25