

【論文・報告】

本州四国連絡橋・櫃石島橋製作 および桁大ブロック架設

Fabrication and Construction of HITSUISHIJIMA Bridge

原 章*
Akira HARA

西岡 武雄**
Takeo NISHIOKA

高田 和守***
Kazumori TAKADA

宮本 義雄****
Yoshio MIYAMOTO

片山 哲夫*****
Tetsuo KATAYAMA

多田 賢*****
Satoshi TADA

1. まえがき

櫃石島橋は本州四国連絡橋・児島～坂出ルートに属し、櫃石島と岩黒島を結ぶ全長790m、中央径間420mの3径間連続斜張橋であり、上路部は自動車専用道路、下路部は鉄道在来線が走る道路鉄道併用橋である。

本橋の工事は三菱・川田・鋼管・宮地・日橋共同企業体で昭和58年3月に受注し、昭和61年10月現在、中央径間の閉合も終え、昭和63年3月には全ルートとともに完成の予定である。

ここでは、既に完了した11パネル桁大ブロックの工場製作と架設について報告する。

本橋の一般図、工事概要および現時点の架設状況写真を図-1、表-1および写真-1に示す。

表-1 工事概要

発注者	本州四国連絡橋公団 第2建設局	
路線名	(道路)一般国道30号線 (鉄道)本四備讃線	
形式	3径間連続斜張橋	
支間	185m+420m+185m	
車線、軌道	(道路)4車線 (鉄道)在来線2軌道	
縦断勾配	1%直線	
横断勾配	2%直線	
道路巾員	10.75m×2 (括弧部14.0m×2)	
床形式	(道路)主橋トラス合成鋼床版 (鉄道)縦桁直結軌道方式	
架設重量 (Ton)	塔本体	7,400
	主桁本体	19,100
	付属物	7,100
	ケーブル	1,700
	合計	35,300
11パネル ブロック 重量 (Ton)	主桁本体	3,900
	付属物	930
	仮設物	570
	合計	5,400
	長さ	133.2
寸法 (m)	幅	34.0
	高さ	15.0

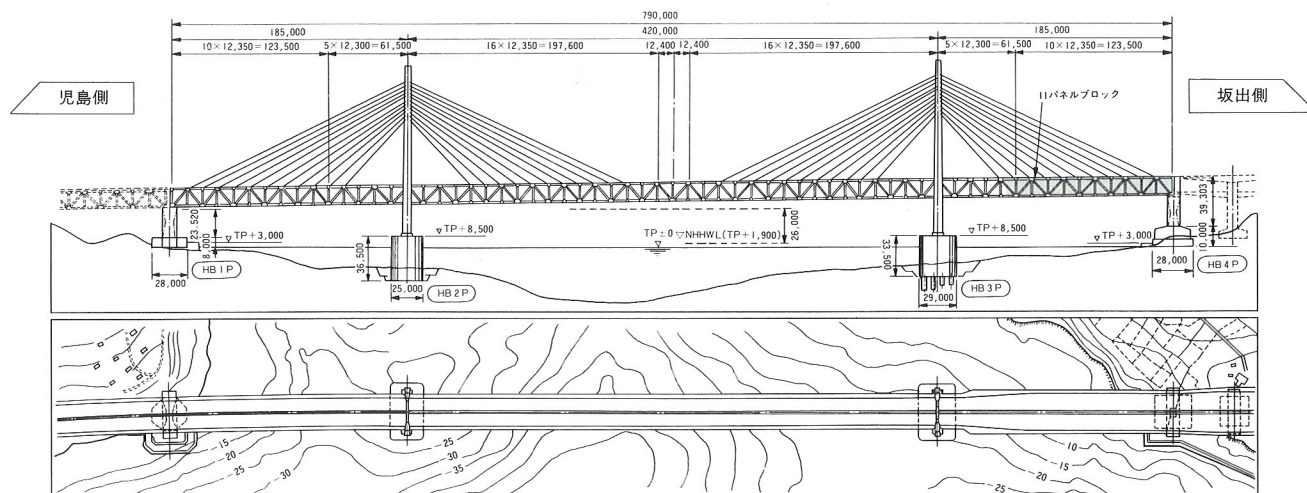


図-1 一般図

* 川田工業(株)四国工場工場長 ** 川田工業(株)工事本部工事部部长 *** 川田工業(株)四国工場生産技術課課長

**** 川田工業(株)富山本社工事部工事課課長 ***** 川田工業(株)技術本部技術部長大橋課係長 ***** 川田工業(株)四国工場生産技術課

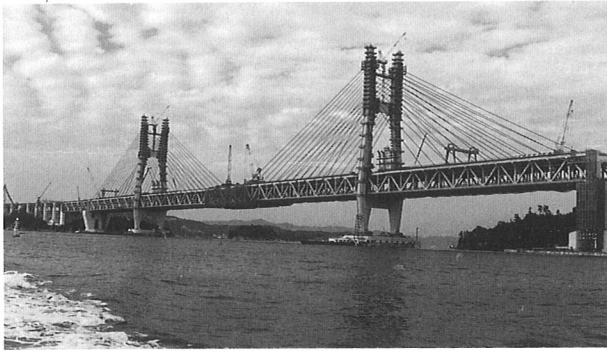


写真-1 昭和61年10月時点の架設状況

2. 工場製作

(1) 製作概要

本橋は道路鉄道併用橋であり、調質高張力鋼を使用した主構トラス下弦材と、鉄道桁が直接乗る床トラス下弦材の製作については、部材の疲労強度を確保するため厳しい品質が要求されている。

従って本橋の製作に当っては当社技報Vol.4で報告した通り実物大の試験桁を製作し、作業要領及び管理要領を決定した。

(2) 原寸

原寸はNCシステムによる自動作画と手作業による定規取り作業の併用とした。その状況は表-2に示す通りであった。

表-2 原寸作業

項 目	記 述
縮尺原図	基本骨組図 部分詳細図
定規の作成	計算により工場製作用テープから手作業にて作成
型 取 り	自動ドラフターによる作図
自動工作法	NCマーキング 自動孔明作業 切削作業

(3) 切断

切断はフレームプレーナー、自動ガス切断機、型切りならい切断機及びノコ盤によった。なお、自由縁の面取りは1mm程度とした。

(4) 孔あけ

孔あけ区分は表-3に示した。また、高力ボルト用の孔については厚膜型無機ジンクリッチ塗装を行うため、1mm程度の孔面取りを行った。

(5) 部材組立

各部材は、それぞれ決められた組立順序により組立を行った。特に調質高張力鋼については、部材に傷をつけないようにナイロンスリング・無傷クランプを使用するとともに、溶接時の磁気吹きを防止するためにマグネットリフターの使用を禁止した。

表-3 孔あけ区分

区 分		孔あけ時期	孔あけ方法	使用機器
主 構	下弦材	ウェブガセット	単材時	テンプレート
		ウェブ・フランジ	突合せ溶接後	ラジアルボール盤
		落し込みフランジ	部材完了後	ラジアルボール盤
	上弦材	ウェブガセット	単材時	ラジアルボール盤
		ウェブ・フランジ	突合せ溶接後	ラジアルボール盤
	斜材・垂直材	ウェブ・フランジ	部材完了後	ラジアルボール盤
床トラス	上・下弦材	ウェブガセット	単材時	ラジアルボール盤
		ウェブ・フランジ	突合せ溶接後	ラジアルボール盤
	斜材・垂直材	ウェブ・フランジ	部材完了後	ラジアルボール盤
下横構		ウェブ・フランジ	部材完了後	ラジアルボール盤
鋼床版	縦 桁		単材時	電気ボール盤
	横 桁		部材完了後	電気ボール盤
	デッキプレート		部材完了後	電気ボール盤
添接版		部材完了後	テンプレート NC	NCボール盤 ラジアルボール盤
ガセット・その他		単材時	テンプレート	ラジアルボール盤

(6) 溶接

① 使用鋼材はSM58Q, SM50YA, YB, YCであり板厚は9～52mmであった。

② 主構・床トラス下弦材の溶接については、専用の溶接架台にて行った。

③ 溶接詳細については、既報のVol.4にて報告を行っている。

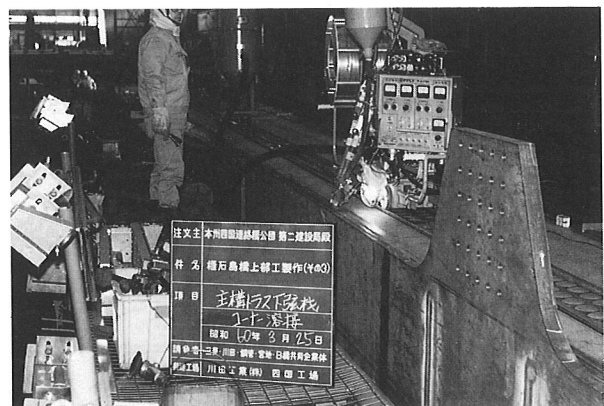


写真-2 溶 接

(7) 端面切削

主構トラス上下弦材及び床トラス下弦材は全ての溶接完了後、歪取り、再野書、孔あけを行い、部材精度を確保するために端面切削を行った。

3. 仮組立

(1) 作業概要

本橋は主構トラスと鋼床版が合成構造となっているため立体仮組立に先立ち、主構・床トラス上弦材と鋼床版のみを平面で仮組立を行った。また、立体仮組立は5,000tを超える大ブロックとなるため工場敷地外ヤードにて行った。

(2) 作業手順

仮組立は、図-2に示す手順にて行った。

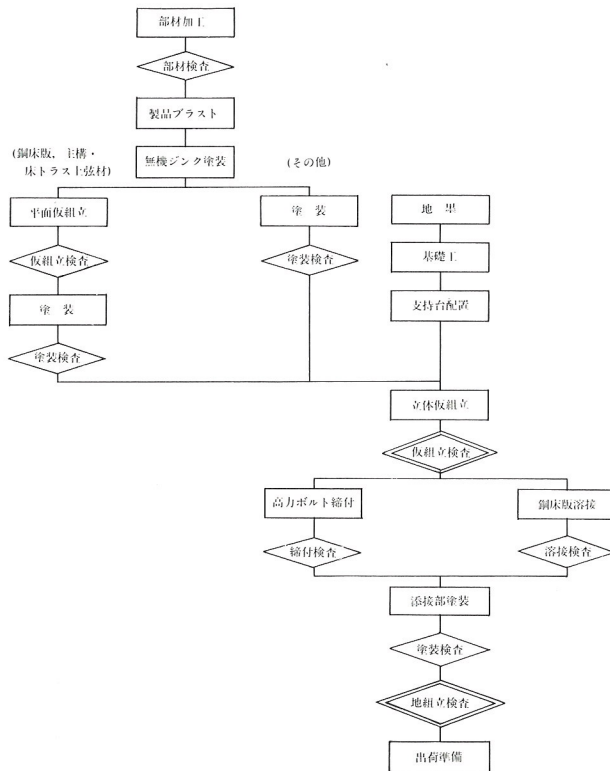


図-2 仮組立作業手順

(3) 仮組立精度

仮組立の要求精度は表-4, 5に示す通りであり、本四公団監督員の立会の下に計測された。その結果はどれも良好なものであった。

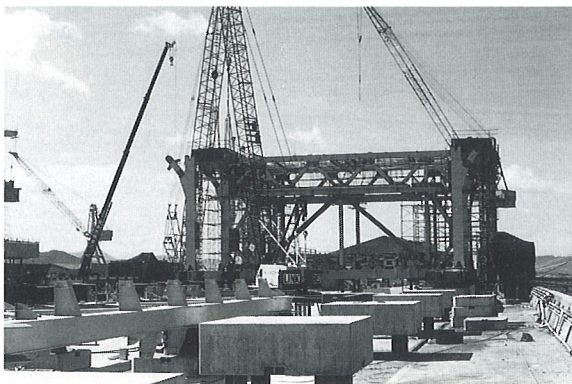


写真-3 立体仮組立

表-4 平面仮組立精度

検査項目	許 容 差		備 考
	基 準	実数値(mm)	
全 長	$2 \times N$ (N: パネル数)		部分組立
格 間 長		± 3	
中心間距離	主構間隔 $0.5(B-5)$ (B: 設計主構中心間距離m)	± 11	
	鋼床版縦桁間隔 $1+0.5(B-2)$ (B: 設計縦桁中心間距離m)	± 1.5	
対角線長 (主構トラス)	$0.5(B-5)$ (B: 主構トラス幅m)	± 11	対角線長の差は $0.25(B-5)=5.5\text{mm}$ 以下
鉛 直 度 (鋼床版縦桁)		4	
そ り (主構・床トラス)	$L \leq 20$	± 5	隣接する格点位置での 差は5mm以下
	$20 < L \leq 40$	$-5 \sim +10$	
	$40 < L \leq 80$	$-5 \sim +15$	
	$80 < L \leq 200$	$-5 \sim +25$ (L: 仮組立長さ)	
通 り (主構トラス)	$L \leq 20$	5	隣接する格点位置での 差は5mm以下
	$20 < L \leq 40$	10	
	$40 < L \leq 80$	15	
	$80 < L \leq 200$	25 (L: 仮組立長さ)	

表-5 立体仮組立精度

検査項目	許 容 差		備 考
	基 準	実数値(mm)	
全長・支間長	$2 \times N$ (N: パネル数)		部分組立
格 間 長		± 3	
主構中心間隔	$0.5(B-5)$ (B: 設計主構中心間距離m)	± 11	隣接する格点位置での 差は5mm以下
高 さ (主構・床トラス)	$0.5H$ (H: 設計高さm)	± 6.5	"
対角線長 (主構トラス)	$0.5(B-5)$ (B: 主構トラス幅m)	± 11	対角線長の差は $0.25(B-5)=5.5\text{mm}$ 以下
鉛 直 度	$H/1000$ (H: 設計高さm)	13.5	
そ り (主構・床トラス)	$L \leq 20$	± 5	隣接する格点位置での 差は5mm以下
	$20 < L \leq 40$	$-5 \sim +10$	
	$40 < L \leq 80$	$-5 \sim +15$	
	$80 < L \leq 200$	$-5 \sim +25$ (L: 仮組立長さ)	
通 り (主構トラス)	$L \leq 20$	5	隣接する格点位置での 差は5mm以下
	$20 < L \leq 40$	10	
	$40 < L \leq 80$	15	
	$80 < L \leq 200$	25 (L: 仮組立長さ)	
床トラス下弦 材間隔	鉄道縦桁用台座間隔(橋軸方向)	± 14	-

4. 工場塗装

(1) 塗装仕様

本橋は過酷な腐食環境下にある海上橋であるため長期防錆型の塗装仕様が採用されている。表-6に本工事の塗装仕様を示す。

表-6 塗装仕様

[illegible]

5. 地組立

(1) 地組立概要

立体仮組立が完了した部材は高力ボルトの締付と鋼床版の自動溶接を行い、付属品の取付けを行なった。

(2) 高力ボルト締付

① 高力ボルトは摩擦接合用防錆処理高力ボルトを使用した。

② 高力ボルトサイズはM30, M24, M22を使用した。

③ 締付方法は耐力点法により行った。耐力点法は降伏点法、トルク勾配法ともいわれ、鋼材が弾性域から塑性域に移る点をナットの回転速度と電流の関係より検出する方法である。図-3 にフローチャートを示す。

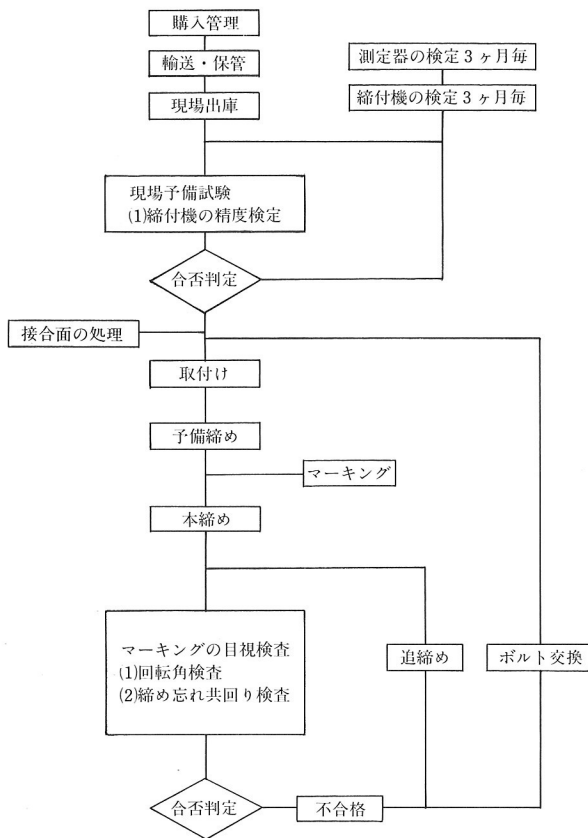


図-3 高力ボルト締付フローチャート

(3) 鋼床版の自動溶接

鋼床版は立体仮組立完了後、片面自動溶接でデッキプレート、手溶接ではめ込みトラフリップの溶接を行った。



写真一 4 鋼床版溶接

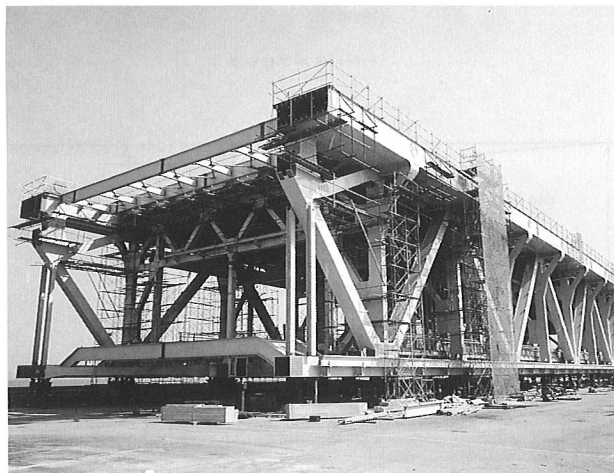


写真-5 地組立完了

6. 浜出し

(1) 浜出し概要

地組み立てされた11パネルの桁は表-1に示すような巨大なブロックである。

浜出しは大型クレーン船（以下F/Cと記す）2隻の相吊りにより吊り上げ、輸送用台船に搭載するものであり、F/Cには3,500t吊り（第50吉田号）と3,000t吊り（武蔵）を、輸送用台船には16,000t積み（菱洋）を使用した。

浜出し日は、現地架設日より逆算し、F/C及び台船の回航順序・日数を考えて、比較的潮位の高い昭和60年9月16日に決定した。

当日は風力、波高、視程等の作業条件を確認し、F/Cが作業可能潮位となる午前8時より作業を開始し、図-4の作業手順にしたがい、各種計測・点検等の安全確認を行いながら浜出し作業を進め、予定より約2時間早く桁の積込み作業を終了した。

図-6, 7, 8に浜出し概要図を、図-5にタイムスケジュールの実績を示す。

(2) 浜出し時の計測および施工管理

a) 管理計測項目

浜出し時は以下に掲げる項目について計測及び点検し、安全性の確認を行うとともに架設のための諸データを収集した。

- ① F/Cの荷重管理。
- ② 地切り時および積込み時の橋体の形状計測。
- ③ F/Cの巻き上げ、巻き下げ高さの計測。
- ④ F/Cの前進・後退の距離計測。
- ⑤ F/C中心と吊点位置の計測（F/Cの誘導）。
- ⑥ 水深、潮位および吃水の計測。
- ⑦ 吊具および地組立て架台等の安全点検。

ここでは上記管理項目の中より図-9に示すF/Cの荷重管理と台船搭載時の桁形状計測について、その内容と結果について報告する。

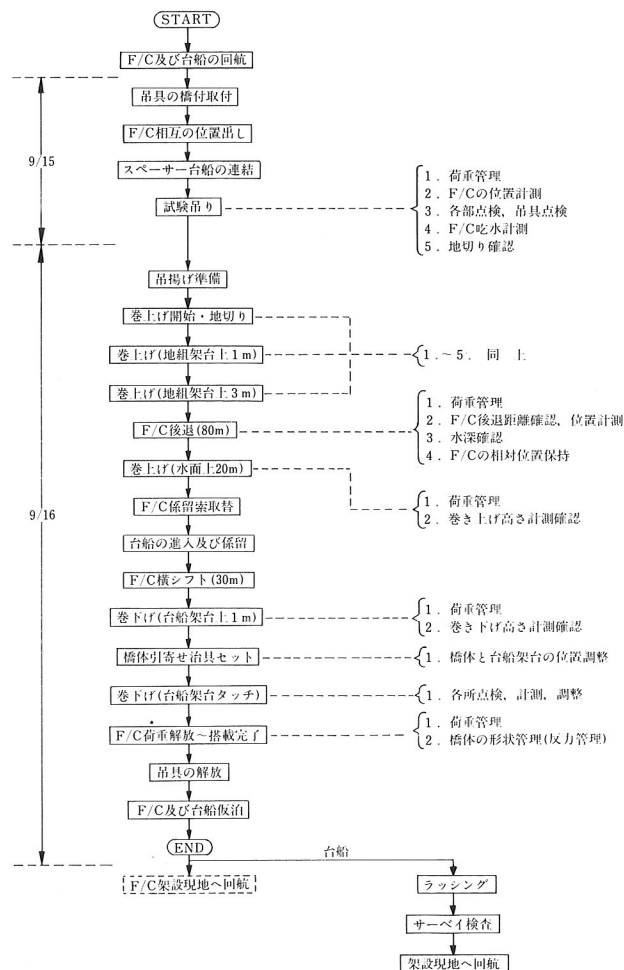


図-4 浜出し作業手順

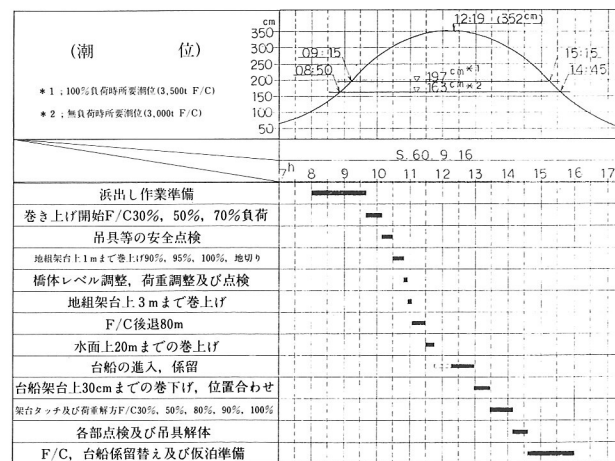


図-5 タイムスケジュールの実績



写真-6 浜出し状況

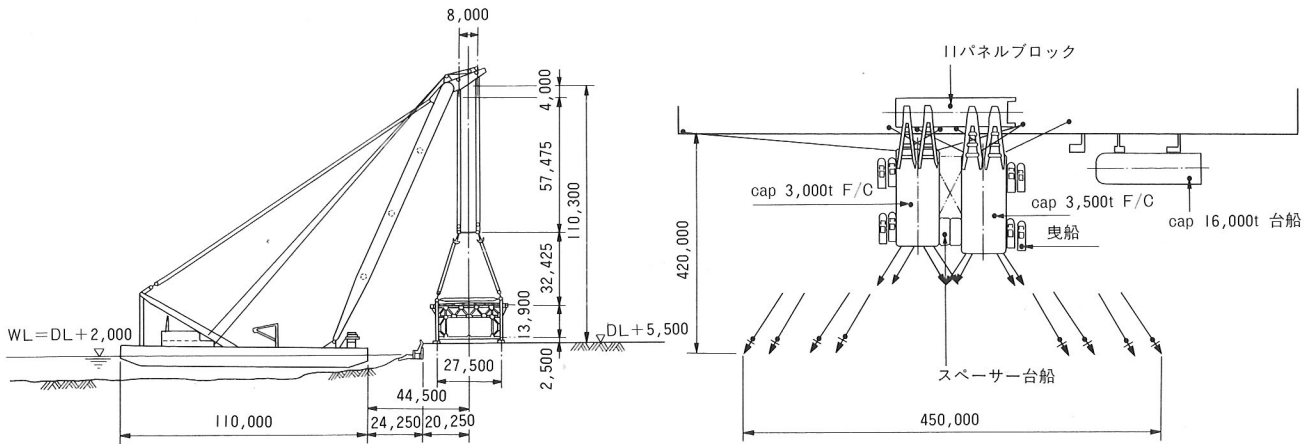


図-6 浜出し概要図(巻き上げ開始状況)

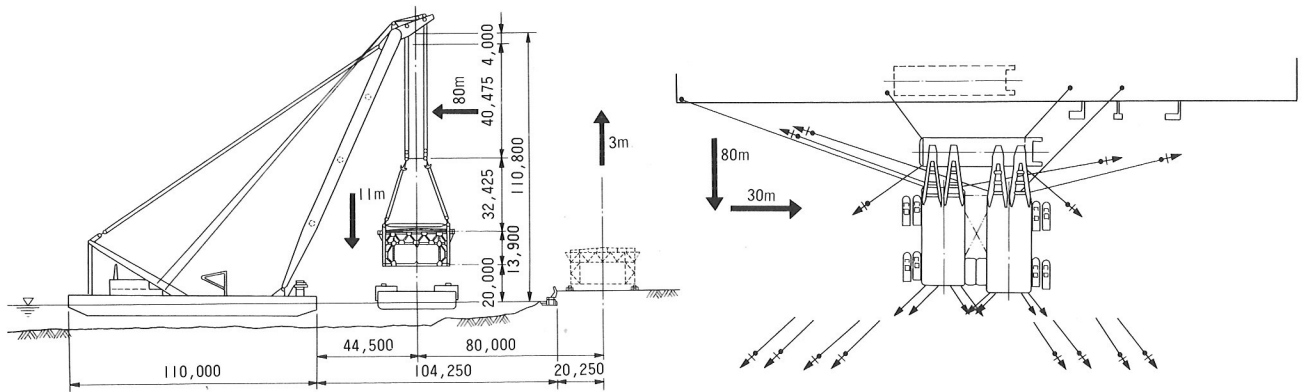


図-7 浜出し概要図(巻き上げ～後退～巻き下げ～搭載)

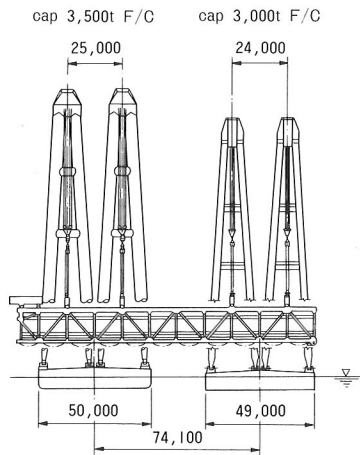


図-8 浜出し概要図(F/C相吊り状況)

b) F/Cの荷重管理

2隻のクレーン船で吊り上げられる桁の吊り点は8ヶ所(図-8参照)であり、不静定支持構造となる。このため吊り点相互の荷重バランスを精度良く管理することが大切である。そこで図-9に示す各ステップ(F/Cの荷重負荷率)についてF/Cの巻き上げまたは、巻き下げ作業を停止して荷重計測(F/Cの荷重計による)を行い、設計値と対比して安全性を確認した。

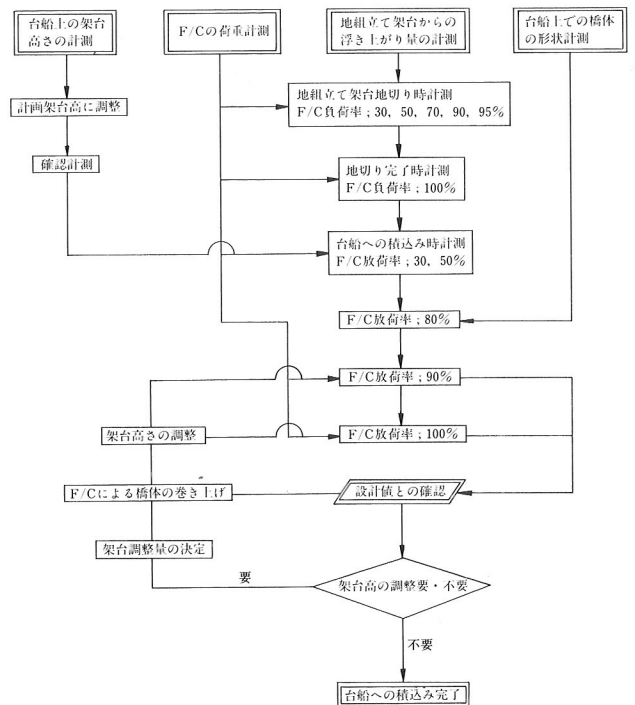


図-9 浜出し時の荷重および形状計測フロー

各ステップでの設計荷重値と計測荷重値の最大誤差は5%程度であった。

100%巻き上げ時(地切り直後)の全荷重は表-7で示すように、1.5%の誤差($W=70t$)であり荷重計の誤差範囲内であった。また2隻の荷重分担率も設計値と良く一致しており、計算上の重心位置に大きな誤差がなかったことを示すものであり、このことは地切り時に橋体の横振れがほとんどみられなかったことから確認できた。

なお、表-7に記入した荷重値は何れもシーブ効率を考えた数値であり、実際の荷重(設計値)は $\Sigma W=5,387t$ である。

表-7 F/C吊荷重表(100%負荷時)

F/C 吊钩No	3,000t F/C					3,500t F/C					合計
	No.4	No.3	No.2	No.1	計	No.4	No.3	No.2	No.1	計	
設計荷重	588	598	588	598	2,372	675	685	675	685	2,720	5,092
実荷重	590	590	570	570	2,320	670	680	670	680	2,700	5,020
実荷重/設計荷重	1.003	0.987	0.969	0.953	0.978	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.986

c) 台船への積み込み時の反力管理

① 概要

11パネル桁大ブロックは台船上の4つの架台(片主構当り)で支持され、張出しを有する3径間連続トラス構造となる。このため桁剛性が極めて大きいこともあって支点反力のバランスは非常に悪い。したがって4つの架台の相対高さを調整して反力の平均化を計るものとした。また反力調整の結果は、桁の形状を測定することによって確認するものとした。

以下にその方法と結果について報告する。

② 反力調整量の計算

反力調整量計算のための解析モデルは図-10に示すように、台船を弾性床(浮力分布)の梁とし、トラスと一体の力学モデルにて解析した。

調整量の計算では以下の荷重を考慮し、トライアル計算を行って台船・架台および橋体の安全性にとって最も好ましい調整量を決定した。

- 桁、台船等の自重
- 浮力
- 桁上・下弦材の温度差の影響(15°C)
- 台船に波がSAGGING状態で作用した場合
- 波による動揺
- 架台高さの誤差(架台相互で $\pm 5mm$)

また、この架台反力を満足させるための架台高さは、桁と台船のたわみ、桁の製作キャンバーおよび、養生ゴム板の縮み等を考慮して4支点の相対高さを図-11のように決定した。

③ 架台反力の確認方法

反力調整の結果を確認する方法としては下記のものが考えられる。

- 架台位置にロードセルや油圧ジャッキを配置して

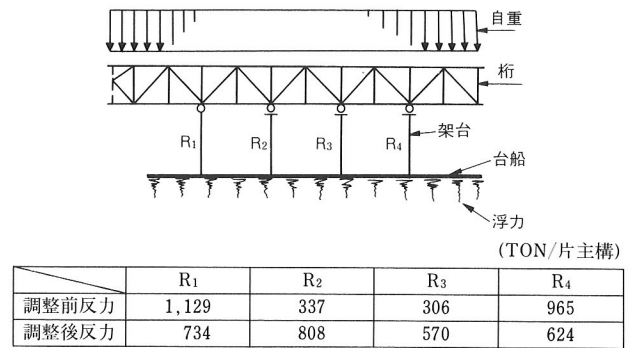


図-10 解析モデルおよび調整反力

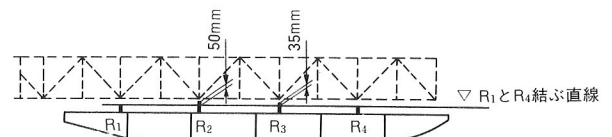


図-11 架台調整高さ

圧力変換器等により、直接反力を測定する。

○橋体に歪ゲージを取り付けて応力管理を行う。

○橋体の形状計測を行う。

本橋の場合には結果の良否を早く決定したい、ジャッキ等の大がかりな測定設備を設けることは構造上無理である。また測定作業を安全に行いたい等の理由により、橋体の形状を計測して架台反力の確認を行うものとした。

海に浮んだ台船上で橋体の形状計測を行う場合には、レベル等の一般的な測量計器を使用することは難しい。そこで図-12に示すような水パイプを橋体に取り付けて、水管式水準測量を行うものとした。

このとき水パイプの立管は台船のトリムを考慮して、1.6mの高さとした。

計測は浜出し作業開始直前に各立管の水位をマジックでマークし、図-9に示す台船への搭載ステップ(F/Cの荷重解放率80, 90, 100%)毎に、マークとその時の水位差を測定した。

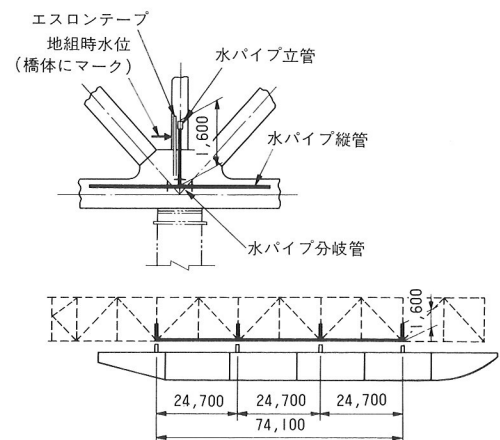


図-12 水パイプの配置および構造

なお、台船の揺れて多少水位が上・下するので各立管全てに計測員を配置し、計測指示の合図で全て同時刻に測定を行った。

④ 測定結果および考察

桁および台船の実際の剛性が明確ではないので、搭載時の橋体形状(4つの支点の相対高さ)を算出するに当たっては、下記の条件を組合わせて許容設計形状(誤差を含む)を求めた。

○桁の剛性が設計値より大きかった場合 ($I = 1.1$ 倍, 1.2 倍)

○桁の上・下弦材に温度差があった場合 (15°C)

○架台相互の相対高さに $\pm 5\text{mm}$ の誤差があった場合

F/Cが100%の荷重放荷(搭載完了)を終了させた時点での測定結果を表-8に示す。

なお、図-11の架台調整高さはブロック載荷前であり、表-8は載荷後の値である。

表-8 形状計測結果と許容値

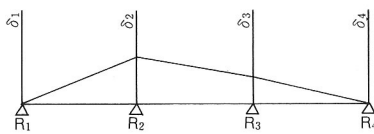
					
		(mm)			
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
		δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
設 限 計 値	実 測 値	0	18	14	0
	誤差を含まない設計値	0	26	22	0
	一様に低い誤差の場合	0	16	12	0
	一様に高い誤差の場合	0	35	27	0

表-8より、形状誤差は限界値に近いものの一応許容値に入っていること、および曳航時の天候(波高)も比較的良好との予測も踏えて、橋体および台船には特に異常な力は作用しないものと判断し、架台高さの再調整は行わず積込みを終了させた。

今回の反力管理は形状計測によったが、大きな設備を必要とせず、比較的精度良く、しかも安全に行えたものと思われる。

なお、台船の揺れにより水パイプ中の水位は $\pm 5\text{mm}$ 程度上下するので、今後このような管理方法を採用する場合には、本体・架台および台船の耐荷力に余裕があれば $\pm 10\text{mm}$ 程度の誤差荷重(相対高誤差)を見込んでおいた方が良いと思われる。

7. 輸送

16,000t積み台船に搭載された11パネル桁大ブロックは、ラッシングを行い必要な諸検査を終え架設現地まで輸送した。

なお、輸送中止条件は風速(平均風速) 12m/s 、波高 0.75m 、視程 1.0 マイル以下としたが、実際には好条件下

で輸送を完了することができた。図-13に輸送経路の概要を示す。

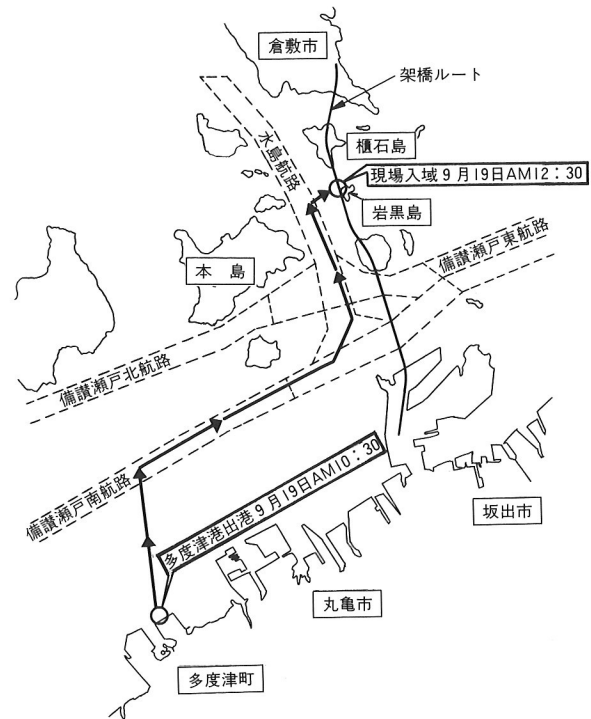


図-13 輸送経路図

8. 架設

(1) 架設概要

架設工法は、台船によって輸送された桁を、浜出し時と同じF/Cを使用して吊り上げ、既架設桁と連結した後、中間ベントに仮支持させるものである。(図-14参照)

桁架設に先立ち、準備工として中間ベントの架設、HB4Pでの支承の据え付け、および大ブロックの引き寄せ装置、添接足場の取付、浜出し時の形状計測結果を基にした各種計測・調整を行い架設日を待った。

架設は大型クレーン船の作業が主体となるため、潮の潮流速が最も小さくなる小潮日を選び、昭和60年9月20日を架設日とした。

午前6時前から開始したクレーン作業は午後3時にはほぼ完了し、橋体を所定の位置にセットした。この間、HB4Pの下部工がほぼ完了していることもあって、F/Cの揚程限界までの巻き上げが必要であった。また、桁の落とし込みの最終段階では隙間が 200mm しかなく、クレーン操作は慎重を極めた。

既設桁との仕口合わせが終わると約1,600本の仮ボルトを2時間で締めつけ、各部の点検を行いながらF/Cの荷重を解放し、午後6時半に全ての架設作業が終了した。(図-15のタイムスケジュール実績参照)

図-16に架設作業手順を示す。

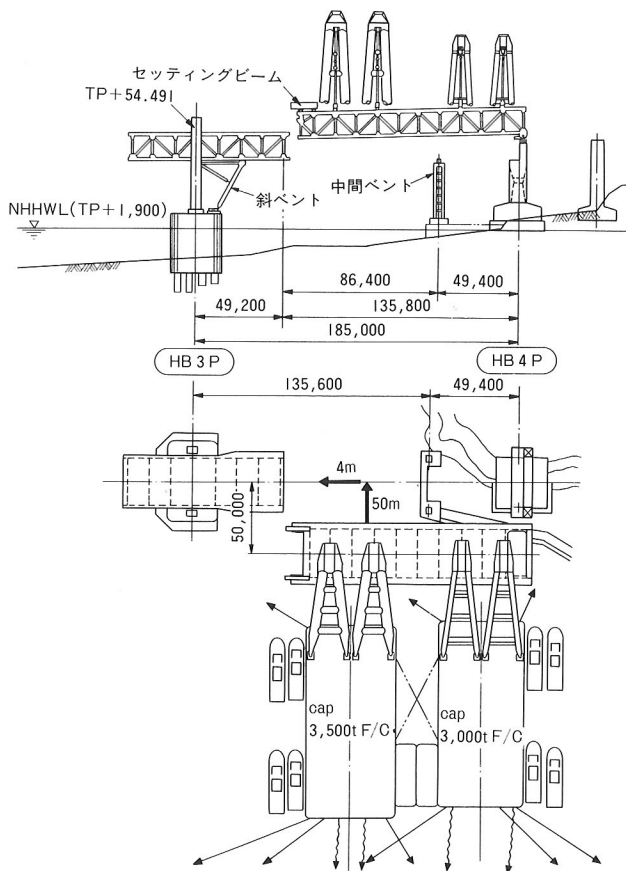


図-14 架設概要図

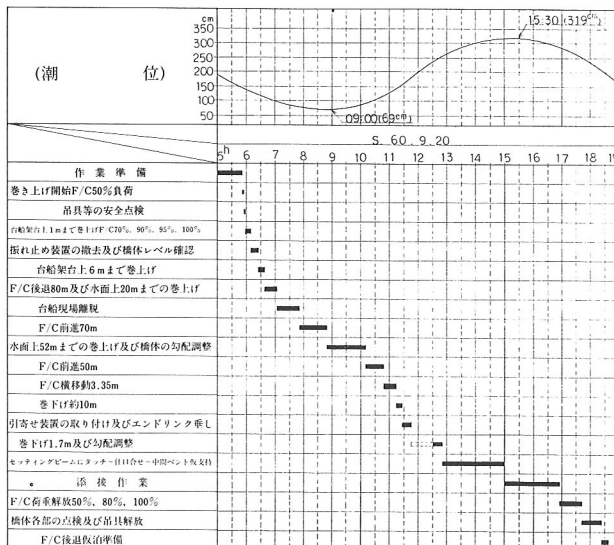


図-15 タイムスケジュールの実績

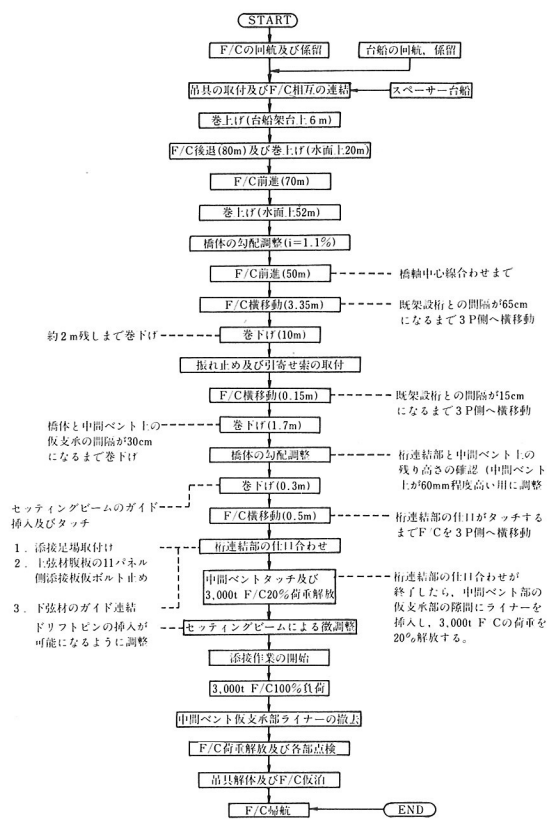


図-16 架設作業手順

(2) 連結部の構造

図-17に既架設桁との連結部の構造を示す。

セッティングビームは、非常時（悪天候等で桁の連結が十分に出来なかった場合等）の荷重伝達部材としての役割りと、仕口合わせを容易に行うためのガイドとして利用する目的で設置した。

既架設桁側には方向合わせのためのガイド、架設桁側には高さ調整のためのジャッキ設備が設けられている。

一方下弦材側には、仮連結装置を取り付けて、仕口合わせが完了し、仮ボルトを挿入するまでの間に潮位および、波の影響でF/Cが動揺しても、仕口が振れないように配慮した。

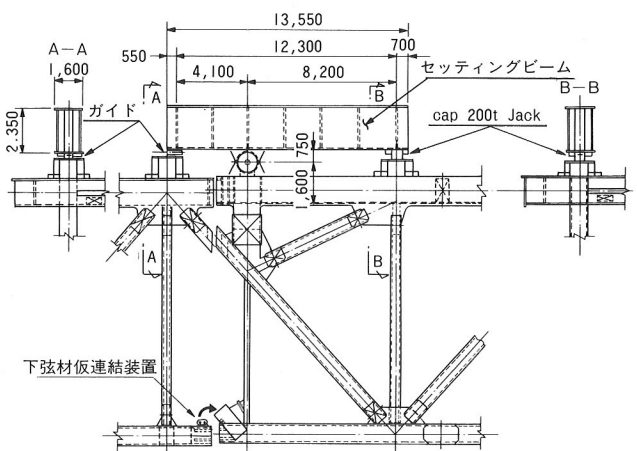


図-17 連結部の構造

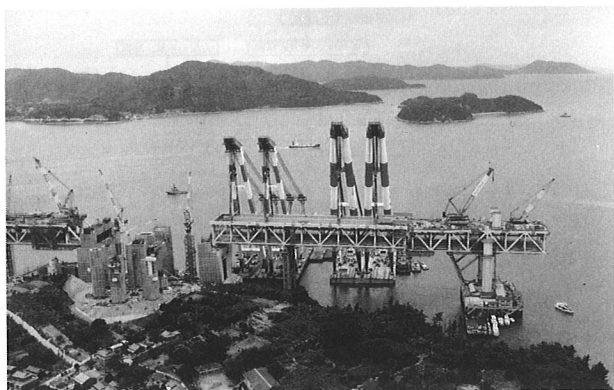


写真-7 架設状況

(3) 管理計測結果

架設作業においてもF/Cの荷重管理、移動時の計測等浜出し時と同様な管理を行って、作業の安全性を確認した。

ここでは、連結作業終了後のF/C荷重解放時に行った計測について記す。

11パネル桁大ブロックの自重はF/Cから解放されると、既設桁から斜ベントを介してHB3 P塔と下部ケーソンに力が伝達され、一方では中間ベントに支持される構造である。

このとき斜ベントの影響でHB3 P塔が傾き、橋体がHB4 P方向に水平移動を起こすことになる。これらの力の伝達が正確に行われているかを確認するために、F/Cの荷重放荷率50%と100%について、HB3 P塔の倒れ量とHB4 Pでの桁端移動量(回転移動量も含む)を計測した。(図-18参照)

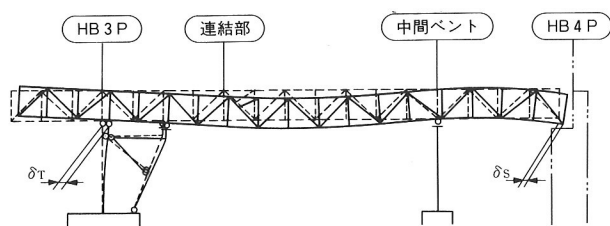


図-18 移動量計測位置

計測結果は表-9のようであり何れも設計値と比較して良く一致している。したがって各部の点検結果も踏えて異常のないことを確認し、一連の架設作業を終了させた。尚、表-9中の数値は何れもF/C荷重解放直前を初期値とした変位量である。

表-9 移動量の比較

	δ_T		δ_S	
	設計値	実測値	設計値	実測値
50%放荷時	11	15	11	10
100%放荷時	22	20	22	20

(mm)

9. あとがき

櫃石島橋の上部工架設においては、大巾な工期短縮をねらって塔下部大ブロック2基(HB2 P, HB3 P)と4つの桁大ブロック(15パネル, 7パネル, 11パネル, 4パネル)を、大型クレーン船の単吊りまたは、相吊りによって一括架設を行った。

本文はその中より、11パネルについて工場製作から現地架設までを、主に管理方法とその内容について述べたが、紙面の都合もあり説明が充分いきとどかなかった面もある。本報告が今後の各種架橋工事の参考になれば幸である。

本橋は桁大ブロックの架設完了後、塔上部の単材架設、ケーブルおよび中央径間の面材架設と進み、昭和61年10月に中央径間の閉合を終えた。この時点で本州と四国は仮設足場等を利用すれば徒歩で渡ることができるようになり、実質的なDルートの閉合ともいえた。今後のケーブルグラウト工事、仕上げ工事も含めて、次回にこれらの架設工事について報告するつもりである。

最後に、本工事の施工に当り御指導を賜った本四公団児島工事事務所旧第5工事、現第3工事の方々並びに共同企業体のメンバーである三菱重工業(株)、日本鋼管(株)、宮地鐵工所、日本橋梁(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本四公団編：櫃石島橋上部工架設工事工事報告書、11パネル浜出し・輸送・架設、1985。
- 2) 西岡・片山・小泉：本州四国連絡橋（櫃石島橋の製作設計）、川田技報、Vol.5、1986。
- 3) 今井・高田・尾崎・菅野・多田：本州四国連絡橋（道路・鉄道併用橋のトラス部材の製作検討）、川田技報、Vol.4、1985。