

鋼中路式アーチ橋の 大ブロッケー括架設における閉合装置

道 菅 裕 一

平成 23 年 4 月、広島県呉市の音戸海峡にて鋼中路式アーチ橋を、3700 ton 級海上起重機船を用いて大ブロッケー括架設を行った。一括架設は、起重機船で吊り上げた状態での閉合を行う、空中ジョイント工法を採用している。一括架設の閉合作業は、閉合部アーチ部材の仕口の先端に、軸力導入ジャッキとかんぬきから構成される閉合装置を用いて実施した。閉合作業は製作誤差や架設誤差を勘案し、種々の対策を行った。かんぬき装置の作用により、当初想定していた架設誤差を発生させずに一括架設を完了させることができた。

キーワード：アーチ橋・大ブロッケー括架設・空中ジョイント・閉合装置

1. はじめに

アーチアバットで端部を固定し水平反力を得る形式のアーチ橋は、一般的にケーブルエレクション工法が採用される。アーチ橋は死荷重断面力をアーチ部材に軸力として導入する必要があるため、アーチ閉合前にはベントやケーブルなどによる外力で自重を支え、閉合後にそれらを解放することでアーチ部材に軸力を導入するためである。

また、タイとして補剛桁を有し、支承から水平反力を受けないアーチ橋は、架設場所以外のところで地組を行い、海上起重機船（以下、FC）にて一括架設することも可能である。地組を行うことで、上弦材と下弦材を閉合させ、構造系を完成させた上で大ブロック

として現場に架設するため、自重による死荷重断面力がアーチ部材に軸力として作用するためである。

鋼中路形式のアーチ橋は、アーチの中央部に補剛桁を有する形式であり、このような形式のアーチ橋では補剛桁の下側（以下、陸上部）は陸上からベントで支えて架設し、補剛桁を含むアーチ上部（以下、海峡部）は地組を行った上で大ブロックとして陸上部に搭載する工法が有効である。この場合、架設において課題となるのは、

- 1) 大ブロックの搭載精度
- 2) 陸上部側のアーチ部材への軸力導入の方法の2点となる。

広島県呉市に架設された第2音戸大橋(図-1参照)は、閉合装置を用いることにより、鋼中路形式のアー

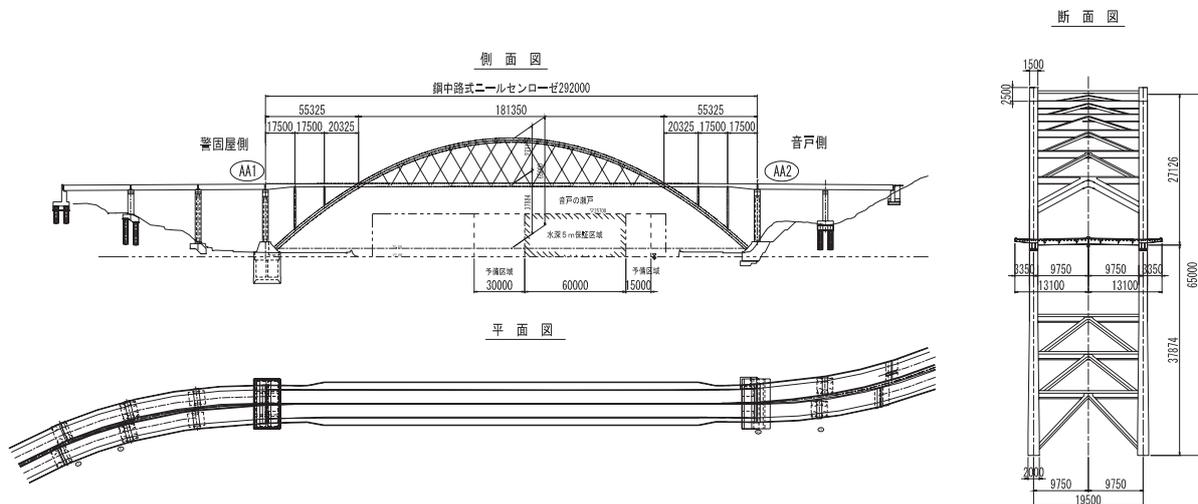


図-1 第2音戸大橋 橋梁一般図

チ橋をFC一括工法で架設した。この閉合装置は、FCで吊られた大ブロックを強制的に陸上部の仕口に誘導すると同時に、陸上部側アーチ部材への軸力導入を可能としている。本稿は、この一括架設工法で使用した閉合装置を紹介するものである。

2. 架設概要

第2音戸大橋は、陸上部をベントを用いて単材架設し、海峡部は別途地組した大ブロックをFC一括架設工法にて閉合する工法を採用した(図-2, 3参照)。FCは3700 ton吊り級を採用し、大ブロック重量は補強材なども含めて3500 tonである。陸上部と海峡部の接合箇所は、高力ボルト接合となっている。

FCの操船による大ブロックの設置精度は、 ± 500 mmまでに設定した。操船により大ブロックを目標の仕口付近に誘導したのち、陸上部側から海峡部大ブロックに控え索をとり、ワイヤリングにより、設置精度 ± 200 mmまで引き寄せせる。その後、 ± 200 mmから高力ボルト接合位置までは閉合装置により誘導させた。

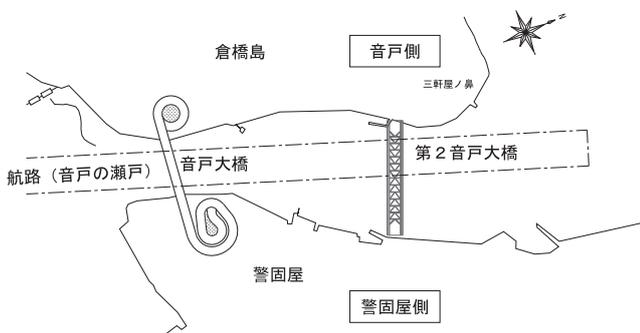


図-2 架橋地点

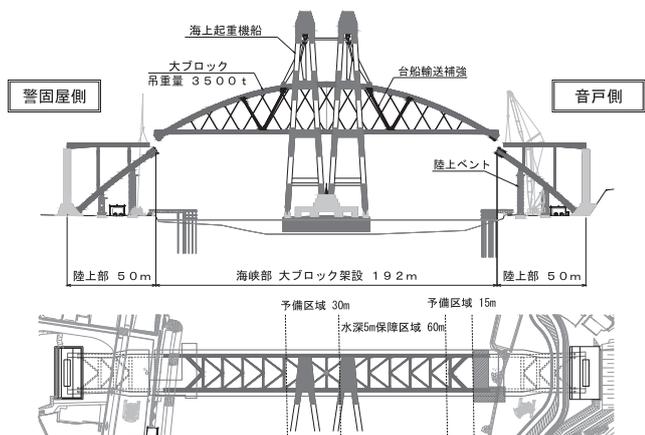


図-3 一括架設概況図

アーチは2主構あるため、一括架設時に閉合させる架設仕口は4カ所ある。閉合装置による一括架設は、FCで海峡部大ブロックを吊り上げたままで行う。閉合後、そのままFCの荷重を解放することにより海峡部大ブロックの自重を、陸上部のアーチ部材に軸力として荷重伝達をさせた。この軸力はいったん閉合装置を通じて荷重伝達されており、一括架設完了後に、後日、添接作業をおこなった。高力ボルトには、添接作業完了後に、閉合装置を解体することで、荷重が均一に作用することとしている。

3. 閉合装置の構造

閉合装置は、以下、三つの機能の組み合わせで構成されている(図-4参照)。

- 1) ± 200 mm から ± 75 mm まで大ブロックを誘導する、ガイド装置
- 2) ± 75 mm から正規位置に大ブロックを固定する、かんぬき装置
- 3) 海峡部大ブロックの自重を陸上部に伝達させる、軸力導入装置

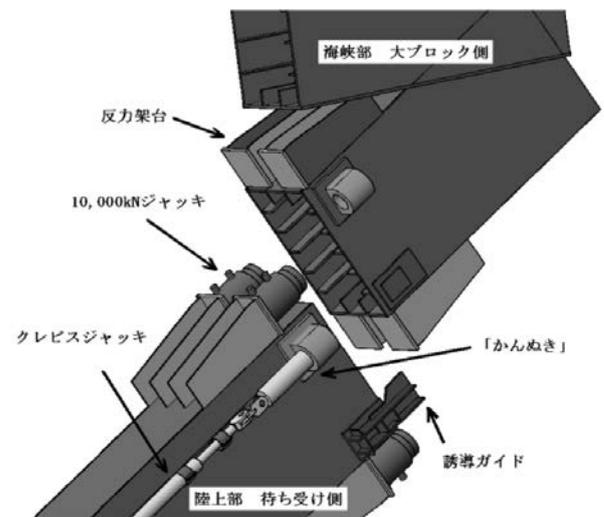
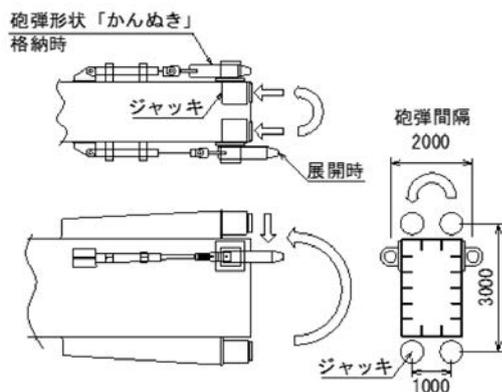
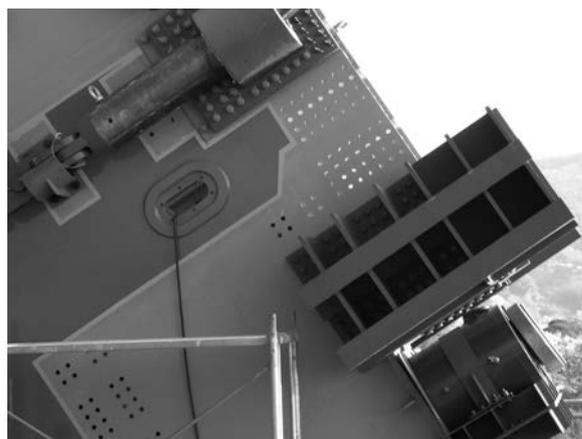


図-4 閉合装置の構造

閉合装置には、かんぬき装置と軸力導入装置により架設仕口に発生する部材断面力を伝達させる役割も与えた。一括架設時に仕口には主として軸力が作用するが、架設から高力ボルト接合を行うまでの期間に考慮した地震力や温度荷重では、仕口に曲げモーメントとせん断力が作用する。したがって、閉合装置により部材に発生する6断面力を伝達させる必要がある。6断面力とそれを伝達する方法は次の様に計画した(図-5参照)。



図一五 閉合装置と断面力の関係



写真一 陸上部側誘導ガイド装置

- 1) 軸力
 - ・フランジに配置した4組のジャッキによる。
- 2) 面内・面外曲げモーメント
 - ・4組のジャッキの偶力抵抗による。
- 3) 面内・面外せん断力
 - ・ウェブに配置した、2組のかんぬきによる。
- 4) ねじりモーメント
 - ・ウェブに配置した、2組のかんぬきによる。

(1) 誘導ガイド装置

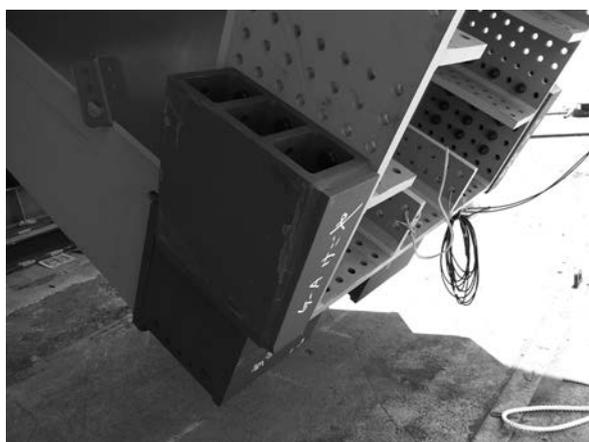
誘導ガイド装置は、仕口断面の下端に配置した。仕口の上側に配置した場合は、まだ閉合位置に無い状態で誘導ガイド装置が海峡部大ブロックに干渉する危険性がある。仕口の下端に配置することで、海峡部大ブロックを陸上部に誘導する過程の最終段階において、仕口を正規の位置に誘導させることが可能となる。

誘導ガイド装置は、陸上部側は上に開いたラップ形状とし、海峡部大ブロック側はそのラップに沿わせて落とせる様にスペーサーを配置している。写真一は海峡部側の誘導ガイド装置であり、写真二は陸上部側の誘導ガイド装置である。

(2) かんぬき装置

陸上部側の仕口にて添接板を高力ボルトで固定するため、架設完了時には陸上部側と海峡部側の仕口の相対誤差を極力少なくする様に閉合する必要がある。海峡部側のウェブ厚は42mmであり、陸上部側は断面変化をさせて22mmである。設置誤差により海峡部の断面から陸上部の断面が飛び出ない様に、目標精度を板厚差の20mmに設定した。20mmの誤差については一括架設完了後にフィラープレートを用いて添接する計画とした。この大ブロックを20mmの精度で設置するために、アーチ仕口の上端にかんぬき装置を設けた(写真一参照)。

かんぬき装置は、機械構造用炭素鋼のS45Cで製作された直径300mmの棒状で先端は円錐形状とした(写真一参照)。海峡部側には、漏斗上の受け金物を設置し、棒状のかんぬきを陸上部側からジャッキで上から下に向けて押し込む構造としている。これらの受け金物は、あらかじめ工場での仮組時に実際のかんぬき装置を用いて設置し、高力ボルトの本締めによりアーチ部材に固定した。



写真一 海峡部側誘導ガイド装置



写真一 かんぬき装置



写真-4 かんぬき製作状況

押し込みに必要な力は 800 kN に設定した。かんぬき装置の挿入には、900 mm 程度のストロークが必要となるため、押し込みに使用するジャッキは 1200 mm のストロークが確保できる、クレビスジャッキを使用している。かんぬき先端の円錐形状がもたらす、斜め分力の効果で、800 kN の押し込み力にて、直角方向の矯正力は 2000 kN 得られる構造としている。設計では円錐部の摩擦係数を 0.2 とし、実施工では円錐表面と受け金物の内面にグリースを塗布した。

かんぬき装置には、陸上部と海峡部大ブロックの仕口合わせの他、仕口位置に発生するせん断力の伝達も期待している。常時のせん断力は大きな力では無いが、地震時や温度変化時などにはアーチ部材にも曲げモーメントとせん断力が発生する。一括架設から高力ボルト本締め施工までの安全を確保するため、2 本のかんぬきでせん断力に抵抗できる様に配慮している。

(3) 軸力導入ジャッキ

海峡部大ブロックの自重は、閉合部仕口の高力ボルト施工前に、陸上部アーチ部材に伝達する必要がある。そのため、陸上部アーチ部材の閉合箇所ジャッキ架台を設け仕口の左右上下端の 4 カ所に 10,000 kN ジャッキを設置した (写真-5 参照)。

一括架設時に仕口に作用する断面力は、海峡部大ブロックの自重を斜め方向に受ける軸力となる。4 カ所にジャッキを設置しているため、軸力の他曲げモーメントも伝達させることが可能であるが、常時では軸力が卓越し、曲げモーメントとせん断力はほとんど発生しない。

一方で、地震時や温度変化時は架設仕口位置でも曲げモーメントが発生する。架設から高力ボルト接合を行うまでの期間に軸力に対して曲げモーメントが卓越すると仕口部で引張力が生じることになるが、死荷重

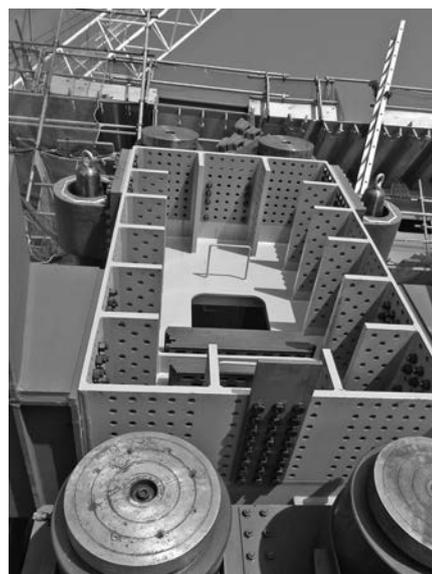


写真-5 軸力導入ジャッキ

の軸力が大きい地震時でも 4 カ所のジャッキの反力が計算上マイナスになることは無い。自重による部材軸力は、約 12,300 kN 作用し、軸力によるジャッキ反力はその 4 分の 1 である 3,100 kN の計画であった。

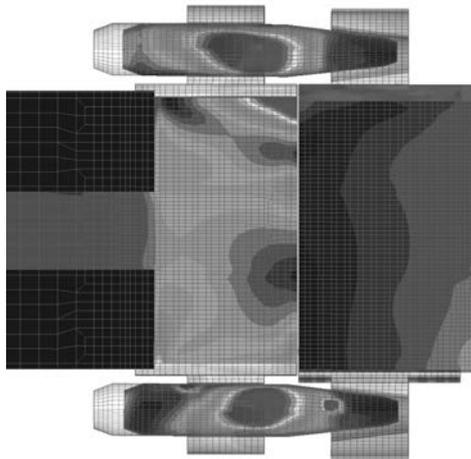
一括架設途中では、FC の吊り荷重を解放することにより、ジャッキの反力が増加する。したがって、4 仕口に設置した 4 カ所のジャッキ、合計 16 台のジャッキ反力をモニタリングし、計画通りに断面力が伝達されることを確認した。

4. 閉合装置による仕口合わせ

陸上部と海峡部大ブロックの仕口合わせは、主としてかんぬき装置を押し込むことにより発生する直角方向の矯正力による。かんぬき装置は、アーチ部材の断面に対して、上側に偏芯させた状態で取り付けている。このため、かんぬき装置を挿入することにより、アーチ部材にねじり断面力を発生させ、仕口合わせを困難にすることが想定された。

そこで、アーチ部材を骨組みモデルで全橋再現させ、架設閉合仕口付近を FEM モデルとして、かんぬき挿入の過程での仕口の変形の程度を、解析にて再現させた (図-6 参照)。かんぬきの円錐状の部分と受け金物の内面は、接触解析とした。

解析の結果、アーチ部材は面内・面外曲げ剛性と比較して十分ねじり剛性を有するため、かんぬきの挿入により仕口がねじれるような変形は見せ無いたが、解析の結果より確認できた。



図一六 閉合装置のFEM解析（上側からアーチ部材を見た図）

5. 閉合装置の設計荷重

閉合装置の設計荷重は、アーチ橋に作用する断面力を解析により算出し、荷重組み合わせにより決定している。荷重ケースは次の10項目で、その組み合わせは8ケース考慮した。表一1に荷重ケースとその値を、表一2に組み合わせケースを示す。

(1) 基本鉛直荷重：Po

一括架設時に海峡部大ブロックの自重により発生する断面力。

(2) 誤差補正荷重：S

製作・架設誤差は、部材に付加断面力を与える。し

たがって、部材寸法などに施工管理基準を設定し、それに対応する矯正力を考慮した。考慮する誤差量は、以下の4項目としている。

- ①部材長誤差（長さ方向） ± 80 mm
- ②閉合誤差（断面方向） ± 40 mm
- ③主構長差（左右の出入） ± 10 mm
- ④主構間隔（幅方向） ± 13 mm

施工管理基準は、設計で考慮した誤差量の2分の1管理としている。

(3) 気温変化荷重：T

鋼桁全体に温度荷重を ± 10度考慮し、それにより発生する断面力。

(4) 温度差荷重：T

日照による温度差を考慮して、片側主構に温度荷重15℃を作用させた断面力。

(5) 風荷重：W

風速12m/sを全橋に載荷したときに発生する断面力。

(6) FC 動揺荷重：DYO

最大波高1 m時に発生するFCの動揺加速度を、ピッチング・ローリング・ヒービング方向に載荷させた断面力。

(7) 地震荷重：EQ

水平震度0.1を作用させた断面力。

表一1 閉合装置に考慮する荷重ケースと発生断面力

Case No	荷重種類	記号	荷重条件	仕口に発生する主構の断面力 (kN kN.m)						機材荷重 (kN)	
				N	Sy	Sz	T	My	Mz	ジャッキ	砲弾
1	基本鉛直荷重	Po	モーメント連結断面力	13,186	19	298	103	8,141	288	4,797	201
11	全長誤差補正	S	±120mm	265	0	173	0	948	0	224	86
12	出入誤差補正	S	δ 20mm	230	21	139	162	801	179	281	151
13	主構間隔補正	S	±30mm	0	115	0	0	0	0	0	58
21	気温変化	T	±10℃	122	0	79	1	1,768	2	326	40
22	気温温度差	T	δ 15℃	243	1	116	440	1,316	160	360	278
31	風荷重	W	橋軸 風速12m	347	1	151	7	2,568	9	519	79
32	風荷重	W	橋直 風速12m	869	372	39	449	18	3,323	1,882	307
41	橋軸動揺 (ローリング)	DYO	最大波高1m (=0.03)	226	1	98	5	1,669	6	338	51
42	橋直動揺 (ピッチング)	DYO	最大波高1m (=0.04)	808	346	36	418	17	3,090	1,750	285
43	鉛直動揺 (ヒービング)	DYO	最大波高1m (=0.02)	244	0	6	2	151	5	89	4
51	橋軸方向地震	EQ	レベル1地震動の1/2 (=0.09)	625	2	272	13	4,622	16	935	142
52	橋直方向地震	EQ	レベル1地震動の1/2 (=0.09)	1,564	670	70	808	32	5,981	3,387	552
61	衝撃荷重	I	衝撃係数 (=0.06)	791	1	18	6	488	17	288	12
71	不均等荷重	U	不均等係数 (=0.20)	2,637	4	60	21	1,628	58	959	40
81	照査水平荷重	Ho	照査水平震度 (=0.05) 橋軸・橋直同時	1,216	373	190	456	2,586	3,332	2,401	373

表一2 閉合装置の設計組み合わせケース

Case No	荷重種類	記号	荷重組合せ条件	仕口に発生する主構の断面力 (kN kN.m)						ジャッキ耐荷力			砲弾耐荷力		
				N	Sy	Sz	T	My	Mz	作用荷重	終局耐力	安全率	作用荷重	終局耐力	安全率
101	常時	Po	1	13,186	19	298	103	8,141	288	4,797	25,000	5.2	201	2,700	13.5
102	動揺時	DYO	41+42+43	1,278	347	140	424	1,837	3,102	2,176	25,000	11.5	331	2,700	8.2
103	誤差補正時	Po+S	1+11+12+13	13,681	155	610	265	9,890	467	5,302	25,000	4.7	444	2,700	6.1
104	温度時	Po+Ho+I+U+S	1+11+12+13+21+22+71+81	17,899	533	1,055	1,183	17,188	4,019	9,349	25,000	2.7	1,150	2,700	2.3
105	衝撃時	Po+Ho+I+U+S	1+11+12+13+21+22+61+71+81	18,690	534	1,073	1,189	17,676	4,036	9,637	25,000	2.6	1,162	2,700	2.3
106	風時	Po+W+U+S	1+11+12+13+31+32+71	17,534	532	859	742	14,104	3,857	8,662	25,000	2.9	843	2,700	3.2
107	橋軸地震時	Po+EQ+U+S	1+11+12+13+51+71	16,943	161	941	298	16,140	541	7,196	25,000	3.5	625	2,700	4.3
108	橋直地震時	Po+EQ+U+S	1+11+12+13+52+71	17,882	828	740	1,094	11,550	6,506	9,649	25,000	2.6	1,006	2,700	2.7

(8) 衝撃荷重：I

衝撃計数値 0.06 を作用させた断面力

(9) 不均等加重：U

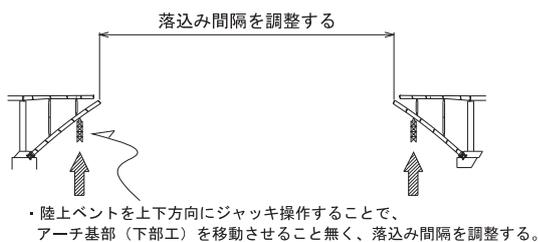
連動ジャッキ作業による不均等係数 0.2 を基本鉛直荷重に乗じた値。

(10) 照査水平荷重

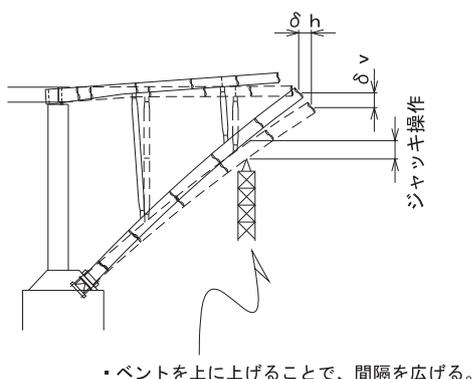
地震・風加重とは別に水平荷重を設定。水平加速度を 0.05 考慮。橋軸方向・直角方向に同時載荷した。

6. 閉合要領

大ブロック一括架設は、先行して架設された陸上部アーチの間に落とし込みで行われる。本橋は固定アーチでありセットバックなどの作業が出来ない。さらに架設では空中ジョイントを行うため、調整ブロックを設けることが出来ない。そのため、別途寸法調整機能を設ける必要があった。これは渡海間隔が 192 m あるため、事前に大ブロック寸法計測を行ったとしても、架設時の構造系の変化・測定誤差・温度変化の影響で必ずしも確実な架設ができる保証とはならないためである。そこで、陸上部アーチに設置している陸上ベントを上下することで、擬似的にセットバックを可能とさせた（図一7、8参照）。ベント高さの調整により、陸上ベントの反力が変動するため、変動後の反



図一7 空中ジョイントによる間隔調整



図一8 陸上ベントの調整要領

力を解析にフィードバックさせている。

7. 一括架設の流れ

実際の一括架設の流れと、その状況写真を以下に記す。

Step1 海上起重機船の操船

操船により大ブロック架設できる範囲は、陸上部の補剛桁上面と、大ブロック補剛桁下面のクリアランスが 500 mm までとした。補剛桁の桁高が 2.5 m あるため、正規位置から 3 m 上空までが操船による架設範囲となる（写真一6）。



写真一6 操船により接近

Step2 引き寄せワイヤーの設置

正規位置から 3 m に大ブロックが位置すると、橋軸方向および直角方向に引き寄せワイヤーを設置した。以降ワイヤリングで大ブロック位置を微調整しながら海上起重機船の巻き下ろしを行う。陸上部側には、引き寄せワイヤーのサポートとして上開きのラップ形状をした、誘導ガイド装置を設置し、大ブロックが正規位置に近づくとき、陸上部との相対誤差を矯正できる様にした。巻き下ろし作業は設計上 4 仕口同時であるが、架設作業は大ブロックの挙動を制御すること



写真一7 引き寄せワイヤー設置

を目的として、警固屋側から陸上部にタッチさせることを目標として実施した（写真一七）。

Step3 「かんぬき」の挿入

大ブロックが正規位置に近づくと、最後の目違い矯正は砲弾型「かんぬき」の挿入によるものとした。「かんぬき」を挿入することにより、大ブロックの陸上部の相対位置を合わせると同時に、部材軸直角方向のせん断力を伝達できる様にする。この状態では海上起重機船の荷重解放は行っていない（写真一八）。



写真一八 「かんぬき」挿入

Step4 腹板中央の仮添接板の本締め

荷重解放過程において、「かんぬき」にブレが生じると思わぬ衝撃を発生させる恐れがある。「かんぬき」によるせん断力伝達の冗長性も含めて、腹板中央に仮

添接板を設置し、HTBにて本締めを行った。

Step5 ジャッキのストローク調整

仮添接板の設置が完了すると、ジャッキ16台のストロークをのばし、陸上部側から大ブロック側にタッチさせた。このとき、ジャッキには500 kNの荷重を導入した。

Step6 海上起重機船荷重解放

仕口の固定が完了すると、海上起重機船の荷重解放を行う。荷重解放は、20%刻みに5回に分けて実施し、都度ジャッキの反力を確認している。

Step7 仕口縦リブ仮添接板の本締め

海上起重機船の荷重解放が完了すると、縦リブに仮添接板を設置しHTBの本締め作業を行った。本添接板は架設完了後に現場実測し製作することとしているため、本添接板取り付けまでの期間の安全対策として、長孔を有した仮添接板を設置した。

なお、10,000 kN ジャッキは、本添接板を設置するまでの間、軸力を負担するため、荷重をかけたままの状態を維持させることになる。

Step8 玉掛け解除

縦リブの仮添接板はそれ単体で軸力を負担できる様に設計しているため、ジャッキの冗長性を担っている。縦リブの本締めが完了した状態から、海上起重機船の玉掛けを解除することとした（写真一九）。

表一三 一括架設タイムスケジュール

項目	時刻	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 朝礼ミーティング		30分												
2 橋体水切り		30分												
3 タッチアップ		30分												
4 橋体吊上げ約47m		30分												
5 FC 係留解除			60分											
6 FC 吊り運搬			45分											
7 架設現場 FC係留			60分											
8 架設 位置決め			15分											
9 大ブロック 架設			150分											
10 FC 吊具解除				90分										
11 FC 係留解除				60分										
12 FC 帰航(呉港 川原石岸壁)											120分			
航泊禁止時間														

表一四 大ブロック架設タイムスケジュール

項目	時刻	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30
1 引き寄せワイヤーセット		30分	(残降下量: 2.5m)				
2 FC降下 2m			10分	(残降下量: 0.5m)			
3 引き寄せワイヤー調整			20分				
4 FC降下・誘導ガイド挿入(※1)				10分	(所定高さ到達)		
5 かんぬき挿入				10分			
6 腹板仮添接セット(※2)				20分			
7 軸力伝達ジャッキ展開				10分			
8 FC吊荷重解放・反力調整				20分			
9 縦リブ添接本締め				20分			
FC 吊具解除							



写真-9 荷重解放完了

8. タイムスケジュール

表-3に一括架設のタイムスケジュール、表-4にその中での大ブロック架設のタイムスケジュールを示す。海上作業は日の出となる午前5時から開始を行い、海峡部の船舶航行禁止時間は、午前6時から午後1時までの7時間としている。この中で海上起重機船の曳航と係留を行うため、大ブロック架設は150分で計画した。

実際の作業では45分で計画したFC吊り運搬が、30分程度遅延したが、大ブロック架設が順調に実施できたことにより、船舶航行禁止時間内で作業を完了させることができた。

9. おわりに

今回の一括架設は、1万5千人以上の見学者が見守る中、2011年4月24日に無事完了することができた。入念な計画を行った上で、何度もシミュレーションを行い施工に臨んだが、当日の天候が穏やかであったこともあり、誤差もほとんど無い状態で、一括架設を終わらすことができた。鋼中路式アーチ橋の架設では、海峡部にセッティングビームを用いて陸上部に荷重を預ける工法も考えられる。但しセッティングビームを用いた架設を行う場合は、架設時にアーチ部材に架設系の断面力が作用し、大がかりな本体補強が発生する可能性もある。今回用いた空中ジョイント工法は、アーチ部材に軸力を主体的に導入することにより、供用時以上の断面力を架設時に発生させることは無かった。これにより、大がかりな本体の補強を不要とする事が可能となった。架設工事の省力化の一例として、今後の工法検討の参考になれば幸いである。

文末になりますが、本工事に対しご指導・ご協力いただいた皆様に、ここに感謝の意を表します。

JICMA

【筆者紹介】

道菅 裕一（どうかん ゆういち）
IHI インフラシステム
橋梁技術部設計2課
課長

