

論文・報告

日本一厳しい環境に耐える橋梁

～伊良部大橋の製作および架設～

Fabrication and Construction of “IRABU BRIDGE”

木下 晴英 *1
Haruhide KINOSHITA仲谷 洋 *2
Hiroshi NAKATANI有村 章平 *3
Syohei ARIMURA川原 桂史 *4
Keiji KAWAHARA北村 正見 *5
Masami KITAMURA長坂 康史 *6
Yasushi NAGASAKA

伊良部大橋橋梁整備事業は沖縄県の宮古島と伊良部島をつなぐ事業延長 6.5km の離島架橋事業である。海上部の橋梁延長 3.54km のうち、大型客船も航行する主航路部と前後橋脚間を含めた 420m が 3 径間連続鋼床版箱桁橋であり、それ以外の一般部は PC 連続箱桁橋で構成されている。架橋地点は亜熱帯地域特有の高温多湿に加え、台風が頻繁に襲来する海上部であることから、日本一厳しい環境であると言える。この厳しい環境下での 100 年の耐久性維持に配慮した構造の改良と製作・架設における技術的な対応について報告する。

キーワード：アルミニウム・マグネシウム溶射、製作ヤード地組立、大ブロック輸送、FC 大ブロック架設

1. はじめに

本工事は伊良部大橋橋梁整備第 5 期工事として、主航路部を 3 工区に分割し、沖縄県より発注され、その 1 工事を川田工業㈱・㈱仲本工業・(有)福地組特定建設工事共同企業体として受注した。宮古島と伊良部島をつなぐ離島架橋であり、架橋地点は日本のほぼ最南端に位置し、気候的にも亜熱帯地域であることや、直接外洋に面していることから、常に風速 10m/s 程度の風が吹く。また、台風の襲来も頻繁な地域であるため、この地域特性から考えて日本一厳しい環境であると言える。

本橋はこの「日本一厳しい環境下において、100 年の耐久性を維持する橋梁」を築き上げることであり、橋梁計画および実施設計の段階より検討委員会も含めた協議決定がなされてきた。この現場での施工は非常に厳しくなることが予想され、耐久性の観点においても、この施工環境に左右されることが大きいものと考えられた。従って、受注当初より施主・検討委員会・施工業者により、この厳しい環境に対応すべく、最適な構造および施工体制を目指して工事を進めてきた。

本文ではこの「日本一厳しい環境下において、100 年の耐久性を維持する橋梁」のための構造改良および製作、架設における技術的な対応について報告するものである。

2. 工事概要

発注者：沖縄県

工事名：伊良部大橋橋梁整備第 5 期工事
(主航路部上部工その 1)

工期：2010 年 3 月～2012 年 10 月

橋梁形式：3 径間連続鋼床版箱桁

橋長：420.0m (JV 施工長：P32～J15, 140.0m)

施工重量：1,354t (その 1 工事のみ)

輸送：大型台船による大ブロック輸送

架設：FC 大ブロック架設

外面防錆処理：Al (95%) - Mg (5%) 合金溶射 + C-5 系塗装



図 1 架設地点

*1 川田工業㈱橋梁事業部工事部大阪工事部工事課 工事長
*2 川田工業㈱橋梁事業部工事部大阪工事部工事課 総括工事長
*3 川田工業㈱橋梁事業部工事部大阪工事部工事課

*4 川田工業㈱生産本部四国工場生産技術課
*5 川田工業㈱生産本部四国工場生産技術課 課長
*6 川田工業㈱橋梁事業部技術部東京技術部設計二課 課長

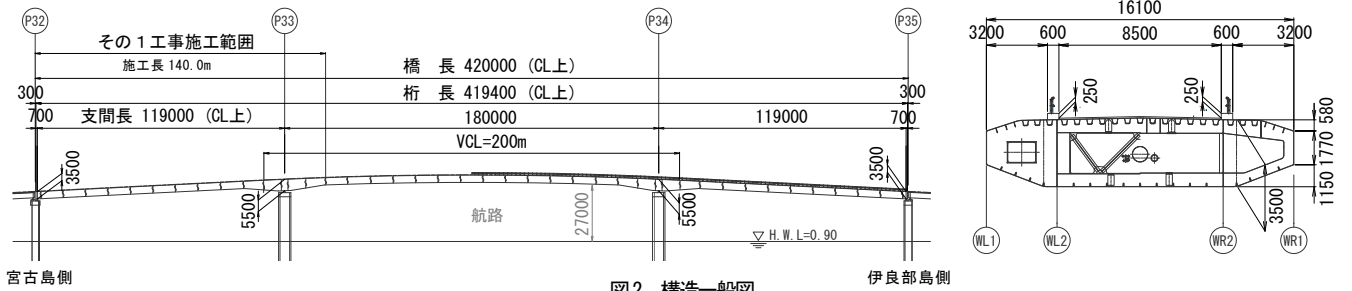


図2 構造一般図

3. 耐久性を考慮した付属物の改良

一般的に付属物は支持金具や細かな部材で構成され、桁外面に設置されることが多い。しかし、本橋では耐久性を向上させるため、極力、桁外面には部材を設置しない構造を採用しており、受注後にも付属物の改良を実施している。主な項目の概要と特徴について、以下に述べる。

(1) 排水装置の改良

一般的に排水装置は路肩に設置される排水柵を用いて集水し、排水管にて桁下へ導水する構造を採用している。しかし、本橋では図2の断面図に示す通り、車道幅員よりも箱桁幅が広いことから、排水管は箱内を貫通させる必要があり、塩分を含んだ潮水の吹上げにより貫通部付近の主桁への腐食が懸念された。従って、図3に示すように路肩の鋼製地覆を切欠き、開口部を設けることで、雨水を車道幅員の外に排出させる構造を採用した。また、鋼床版の張出し部に鋼製の通水樋を設置した場合、塩分付着による腐食の原因となることから、導水部材を省略し、直接、鋼床版上面を雨水が流れる構造とした。なお、最外面の上塗り塗装には、汚れ防止効果を有する耐久性の高いフッ素樹脂塗料を用いて、水道となる部分の汚れを防ぐことに配慮している。

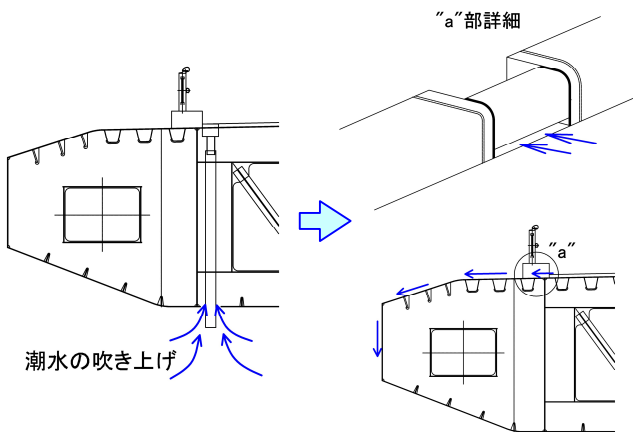


図3 改良型排水構造

(2) 足場用吊金具の改良

実施設計での足場用吊金具は150φの蓋し開口を設け、使用する際に格納した支持材を組立てる方法で計画されていた。しかし、開口部は鋼製の蓋による凹凸ができ、

塩分が付着すると腐食の原因になる可能性があるため、実施工ではアイボルト式の吊金具を採用することとした。図4に示すように母材に32φの孔を明け、足場設置時にアイボルトを取付け、未使用時にはシリコン製のキャップで蓋をしておく構造である。キャップは母材板厚+2mmのものをを使用するため、外面の鋼材には凹凸が無く、塩分の付着による腐食を回避できるものと考えた。

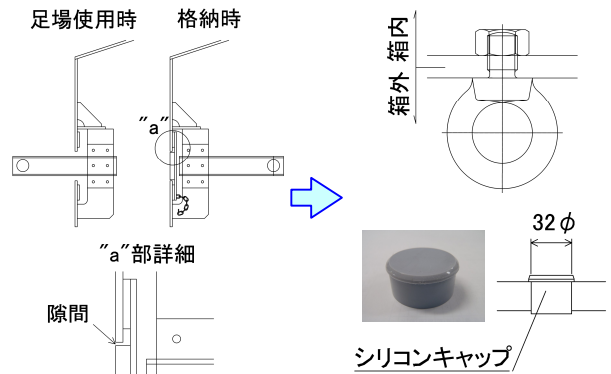


図4 足場用吊金具の改良

(3) スラブドレーンの流末形状

近年、スラブドレーンは桁端部床版付近の漏水対策や耐久性向上に不可欠な橋面排水の構造である。本橋でもスラブドレーンを伸縮装置の手前、鋼床版上面の横断勾配の低い箇所に設置している。ただ、構造上、導水管は桁内を貫通し、桁下への排出が必要となるが、前述の通り、排水装置と同様に塩分付着による主桁への影響を回避する必要があった。従って、図5に示すように桁外面に突出する部分はアクリル樹脂系のソケットを独自に製作し、ネジ方式で固定する構造を採用、突出部の腐食を回避させることとした。

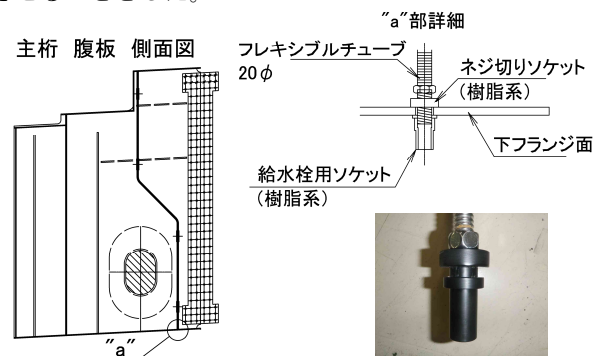


図5 スラブドレーン流末部の構造

4. 製作関連

(1) 部材の大型化

本工事は材料の納入から現地への搬入まで、全て海上輸送となるため、製作可能な大きさまで部材を大型化することが可能となった。従って、部材の分割位置を削減し、部材の大型化を図ることとした。製作部材寸法の決定根拠としては次の3点が挙げられる。

- ① 鋼材を海上輸送にて搬入できるため、鋼材の最大ロール寸法まで手配可能（幅5.2m、長さ23m、重量18t）
- ② 工場のプラスト設備に収納可能な大きさから、部材長は22m以下
- ③ 工場建屋内クレーンの部材反転能力から、部材の幅・高さは8m以下

以上を考慮し、部材長は最大21.9mまで長尺化して製作を行った（写真1）。この結果、工場ヤードでの溶接延長およびボルト添接箇所の低減による製作コストの縮減が可能となり、また、継手箇所の減少に伴う工場塗装範囲の拡大を図れることで塗装の均一化および外観の向上を図ることができた。



写真1 大型部材の製作状況

(2) 防食に配慮した構造設計

本橋梁は厳しい自然環境のもと100年間の耐久性を確保するとともに、維持管理を軽減するため、過去の損傷事例を参考に防食に配慮した構造設計を行っている。代表的な構造の特徴と受注後にJVが実施した製作に関する対策について、以下に紹介する。

(2)-1 外面防錆仕様

鋼橋においては塗装の塗替え作業が維持管理上の最も大きな負担となっており、本橋のように厳しい環境下では特に重要視されるポイントである。そこで、本橋の防食下地は現時点で最も長期耐久性が期待できるアルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金溶射（以下、Al-Mg溶射）を採用している。しかし、国内での実績が少なく、安定した品質の確保が容易ではないことが懸念された。従って、防食下地としてのAl-Mg溶射の上にC-5塗装系の

下塗り～上塗りを組み合わせて使用する防錆仕様が採用された（表1）。

表1 外面防錆仕様

塗装工程	塗料または素地調整程度	方法	使用量 (g/m ²)	標準膜厚 (μm)
素地調整	プラスト処理:ISO Sa2.5 → Sa3.0 に変更			
	表面粗さ: Ra8 μm以上, Rz50 μm以上			
金属溶射	Al(95%)・Mg(5%)合金溶射	プラズマ	500	150
封孔処理	金属溶射封孔処理剤	エアレス	200	—
下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗り	エアレス	540	120
中塗り	フッ素樹脂塗料中塗り	エアレス	170	30
上塗り	フッ素樹脂塗料上塗り	エアレス	140	25

(2)-2 継手部の構造

ボルト継手構造は添接板の段差やボルト頭部など、外面に露出する部分の凹凸が多く、また、現場塗装による施工が基本となるため、施工環境にも左右され易いことから、一般部と比較して腐食し易い箇所である。従って、本橋梁では実施設計より、桁外面に露出する部分のボルト継手を無くし、全て溶接継手とするとともに突合せ溶接部およびウェブとフランジの角溶接部も全線の溶接ビードに平坦仕上げが適用された。これにより、防錆面での弱点を減らし、かつ、外観の向上も考慮されている。

(2)-3 部材角部の形状と膜厚管理

一般的に部材角部は塗膜厚が薄くなり易く、部分的な増塗りを行うことにより、規定膜厚の確保を行っている。本橋は厳しい自然環境に対応するため、桁形状の計画段階から、できるだけ部材角部を省略する構造が採用されていたが、板と板の角溶接部などは必然的に角部が生じることとなる。この部材角部の膜厚を確保するため、桁外面に生じる部材角部の全ての箇所にR=3mmの曲面加工を施すことにした。3R曲面加工の代表的な例として、鋼床版とウェブの角部や鋼製地覆の角部などが挙げられる（図6）。

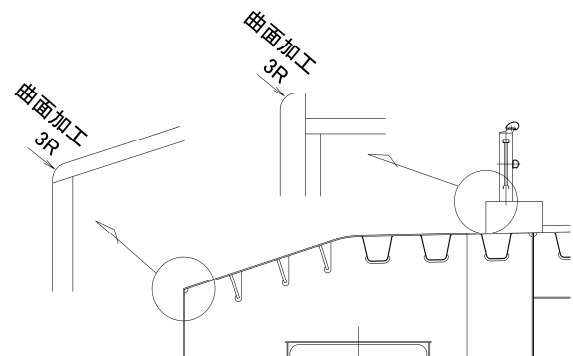


図6 3R曲面加工の該当箇所

また、この部分の膜厚確保が本橋梁での防錆上の重要な箇所となることから、標準膜厚を確保するための施工試験（写真2）を実施し、試験の結果に応じて膜厚の増厚に対する設定を行った。



写真2 試験体の作成状況

角部の膜厚は汎用性のある計測機器での正確な計測は困難であることから、角部近傍の平坦部と角部のマクロ試験(写真3,4)により、膜厚の相関を計測することで、実施工における角部付近の塗布膜厚および膜厚管理の目安を設定することとした。

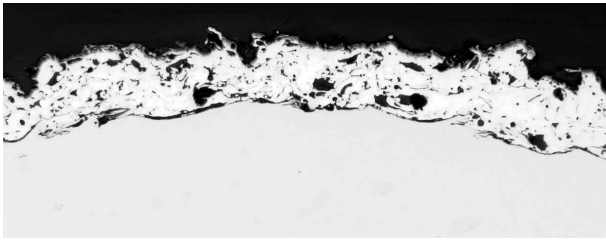


写真3 試験体のマクロ写真(角部)

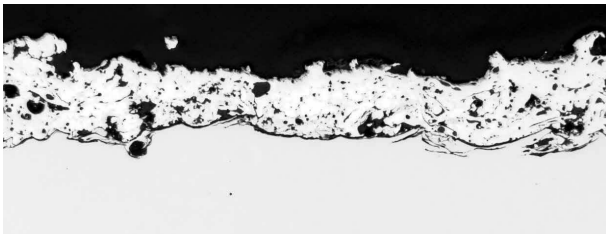


写真4 試験体角部のマクロ写真(平坦部)

施工試験結果の角部膜厚増厚量を元に、基準値を下記の通り設定した。

① Al-Mg溶射：

一般部膜厚の20%増し(一般部 150μ →角部 180μ)

② エポキシ樹脂塗料下塗り：

一般部膜厚の10%増し(一般部 120μ →角部 132μ)

マクロ試験の結果、角部近傍(角部から50mmの範囲)の平坦部と角部の膜厚は良く一致していることから、角部膜厚の管理は角部より50mm以内の平坦部において、汎用性のある電磁膜厚計による計測および管理を行うこととした。

(3)大型部材の溶射作業

溶射において、最も重要な管理項目の1つに活性化しているブラスト処理面に対して、規定の4時間以内に次層のAl-Mg溶射を完了させることが挙げられる。ただ、部材を大型化したことによって、1ブロックあたり最大約 250m^2

もの広大な溶射面積となるため、4時間以内での溶射完了が課題となった。そこで、平坦な面で構成される下フランジ下面と外ウェブ側面の溶射については移動式の自動溶射装置を計4台設置(写真5)し、常時稼動状態にすることで、溶射速度を向上させた。また、自動溶射装置が設置できない斜め下フランジは溶射工4名、斜め上フランジには5名を配置することで同時に13機の溶射装置が同時に稼働できる体制を構築した。しかしながら、1溶射機あたりの施工面積は $4.0\text{m}^2/\text{h}$ 程度であり、溶射装置の稼働率を向上させたとしても、4時間では約 200m^2 の施工が限界であるため、大型部材の 250m^2 を全て溶射することは困難であった。従って、これ以上の台数を設置することは品質管理面にも影響があるため、1ブロックを半分毎、2日間に分けて施工を行うこととした。

多くの溶射装置を同時に稼働した結果、装置のトラブルにより、施工当初はメンテナンスのための待機時間が嵩む状態となり、時間をロスするケースが多発した。従って、体制を見直し、メンテナンス専門の作業員を常時1名追加、予備の溶射装置を数台用意することで、溶射装置のトラブル発生時には直ちに予備機と交換し、溶射時間にロスが生じないようにも配慮した。



写真5 溶射作業状況

(4)工場ヤードでの地組立への配慮

現地での施工を減らすため、地組立は工場のヤード内にて全て実施し、大ブロックでの一括輸送を行った。従って、防錆処理が完了した各部材は場内の地組立ヤードへ搬出し、「地組立⇒ヤード溶接⇒ヤード溶射⇒ヤード塗装」という流れで順次施工していく。ただし、ブロック単位で先行した溶射面や塗装皮膜に損傷を与えないように、以下の3点に配慮して施工を行った。

- ① 外面塗装部と接触しない枠組み足場を構築
- ② 地覆手前に進入防止柵を設置し、立入り制限を実施
- ③ 先行の工場溶射+塗装皮膜部は養生シートにて完全に被覆

ヤード溶接部用の枠組み足場図と地組立状況写真を図7、写真6に示す。

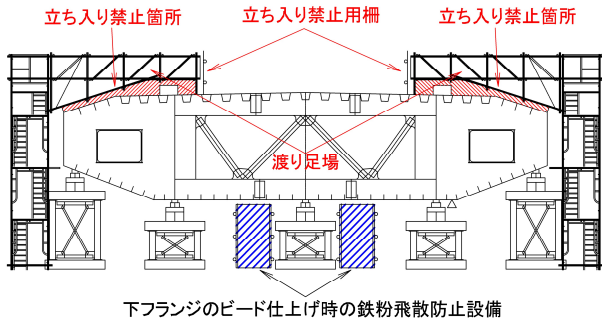


図7 枠組み足場概要図



写真6 地組立状況

5. 大ブロック輸送

前述の通り、桁部材は工場ヤード内での一括地組立としたため、輸送も大型台船（部材長から25,000tの台船を選定）による大ブロックでの海上輸送が必要となった。海上輸送時に配慮した内容について以下に示す。

(1) フルオーニング

台船での航行は延べ1330km（約6日間）であり、海上輸送の時間が非常に長く、豊後水道を通過後は外洋にも出ることになるため、海塩粒子が部材表面に付着し、防食皮膜の劣化原因になり易い状況であった。また、輸送時期は4月初旬を予定していたため、黄砂の飛来するピークの時期でもあった。従って、地組立した部材全面を覆うオーニングを行い、飛来粒子を完全に遮断する配慮を行うこととした。オーニングの主材料はビニール製シートを採用したが、長期間の輸送によるシートの破損が懸念されたため、シートの繋ぎ目は強力な粘着テープによる接続とネットで更に覆う補強を行った（写真7）。



写真7 フルオーニング状況

輸送完了後はオーニングの撤去前にシートおよびネットの破損状況を確認し、破損箇所については部分的な洗浄を予定していた。点検の結果、破損箇所は無く、塩分測定においても良好な結果が得られたため、フルオーニングの効果が発揮できたと言える。

(2) 浜出し作業

浜出し作業は本体の現地架設と同等の能力を有した3,000tクラスのプロテイングクレーンにて行った。地切りの際には重心位置のずれによる桁部材の横移動が懸念されたため、解析による重心位置の算出やベント位置での地切り順序について、細心の注意を払って実施した。



写真8 浜出し作業状況

(3) 輸送中の高波に対する配慮

外洋を航行する際には風や波を遮る陸地がないため、高波が発生する確率が高くなる。気象状況をリアルタイムで把握し、航行に支障が出るような高波が予想される場合は近くの港に寄港する計画を行っていた。しかし、台船から張出した桁部分に波が接触し、また、台船の振動により桁が共鳴して桁が部分的に疲労損傷する可能性が懸念されたため、桁張出し側の台船の先端部に監視カメラを設けて、波の接触を確認ができるようにした。更に、波の振動による疲労解析を基にひずみゲージを用いた応力測定も一部区間（那覇港～宮古島）で試みたが、問題となる結果は得られなかった。



写真9 輸送中の高波に対する配慮

6. 大ブロック架設

(1) フローティングクレーン大ブロック架設

本橋の架設は4,000tフローティングクレーン（以下、FC）による大ブロック架設で行われた。宮古島最大の岸壁である平良港に接岸された台船より、直接、桁部材をFCにて吊上げ、架設地点まで5km程度、主航路を吊曳航させて、そのまま、所定の橋脚位置に据え付けた。ただ、吊曳航時に航行する主航路の幅は狭く、また、主航路をはずれる水深2~4mの海底にはサンゴ礁が至るところに点在しているため、フローティングクレーンの曳航と架設地点付近での設置は慎重に行う必要があった。

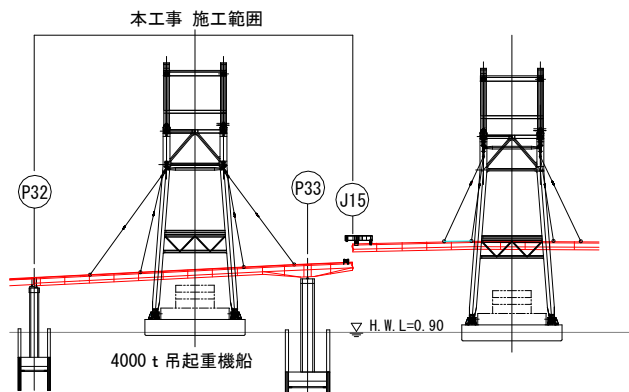


図8 架設計画図



写真10 架設状況

(2) 気象条件に左右される現場状況

架設予定日の条件は、潮流の穏やかな小潮の期間を狙い、かつ、安全上、風と波の予報は一定の基準を下回ることが必要であった（最大瞬間風速：10m/s以下、最大波高：1m以下に設定）。これまで、本土や沖縄本島におけるFC架設では、設定した気象条件を超えることが少なく、気象条件によって架設日が大幅に順延になることは稀であった。しかし、外洋に面している本工事の架設地点では、常に風速10m/s程度の風が吹いており、先行する他工区の大ブロック架設も、この影響で順延となった。従って、当初、2012年4月末に予定していた本工事の架設も、次の小潮期間である5月12日以降に順延された。5月12日の架設予定日はほぼ1日中、晴天の予報であったが、吊曳

航の時間帯（午前6~8時）には、表2に示す通り瞬間最大風速が10m/sを超える予報が出されていた。従って、曳航中のFC船の座礁や据付時の動揺による危険性が懸念されたため、更に架設は順延されることになった。何日か順延を繰り返し、ようやく風の治まる予報が5月15日夕刻に出され（表3）、架設は4日遅れの5月16日に無事、行うことができた。

表2 気象予報1（5月11日16:00）

日時	5月11日(金)				5月12日(土)				5月13日(日)										
	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
風向	E	E	E	E	ESE	ESE	SE	ESE	ESE	ESE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
平均風速 m/s	8	7	8	8	7	7	7	6	6	6	7	9	9	9	9	9	9	9	10
最大瞬間風速 m/s	11	11	12	12	10	10	10	9	9	9	10	13	13	13	13	13	13	13	14
単線波高 m	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
有線波高 m	1.1	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最大瞬間風速 m/s	11	11	12	12	10	10	10	9	9	9	10	13	13	13	13	13	13	13	14
単線波高 m	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
有線波高 m	1.1	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
天候	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀

表3 気象予報2（5月15日16:00）

日時	5月15日(火)				5月16日(水)				5月17日(金)										
	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
風向	SSW	S	S	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
平均風速 m/s	7	6	6	5	4	5	6	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4
最大瞬間風速 m/s	11	9	8	8	5	8	8	9	10	9	9	7	7	7	7	5	5	5	6
単線波高 m	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
有線波高 m	0.9	1.5	1.4	1.2	1.2	0.6	0.8	0.9	0.9	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.0	0.9	1.2	1.1	1.1
最大瞬間風速 m/s	11	9	8	8	5	8	8	9	10	9	9	7	7	7	7	5	5	5	6
単線波高 m	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
有線波高 m	0.9	1.5	1.4	1.2	1.2	0.6	0.8	0.9	0.9	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2	1.0	0.9	1.2	1.1	1.1
天候	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀

7. おわりに

本橋は他工事である中央径間の架設と一般部PC区間（伊良部側）の架設を残しており、2015年1月の完成を目標に工事が進められている。本橋の開通は宮古島と伊良部島の島民にとって、待ち望まれた橋梁であり、地域活性の一部を本工事により我々が携われたことは誠に光栄である。また、本報告が同形式の橋梁計画や製作、架設の一助となれば幸いである。

最後に本工事の製作、施工にあたり、ご助言・ご指導頂きました関係者各位に厚く御礼申し上げます。



写真11 その1工事架設完了状況

参考文献

- 1) 宜保, 我謝, 原田, 梅崎: 塩害環境下にある伊良部大橋主航路部の計画と設計, 橋梁と基礎Vol.45, 2011.7