

伊良部大橋における鋼橋の 耐久性向上を目指した取り組み

仲 嶺 智・翁 長 正 勝・山 城 明 統

伊良部大橋橋梁整備事業は沖縄県の離島である宮古島と伊良部島を結ぶ事業延長 6.5 km（うち海上部 4.3 km）の離島架橋整備事業である。海上部にかかる延長 3.54 km の橋梁区間は、長山水路を跨ぐ 3 径間連続鋼床版箱桁橋（以下「主航路部橋梁」）と、32 径間及び 14 径間の多径間連続 PC 箱桁橋で構成されている。本稿では、鋼橋区間である主航路部橋梁の耐久性向上を目指した取り組みと、工場製作から海上輸送、架設までの施工状況を紹介する。

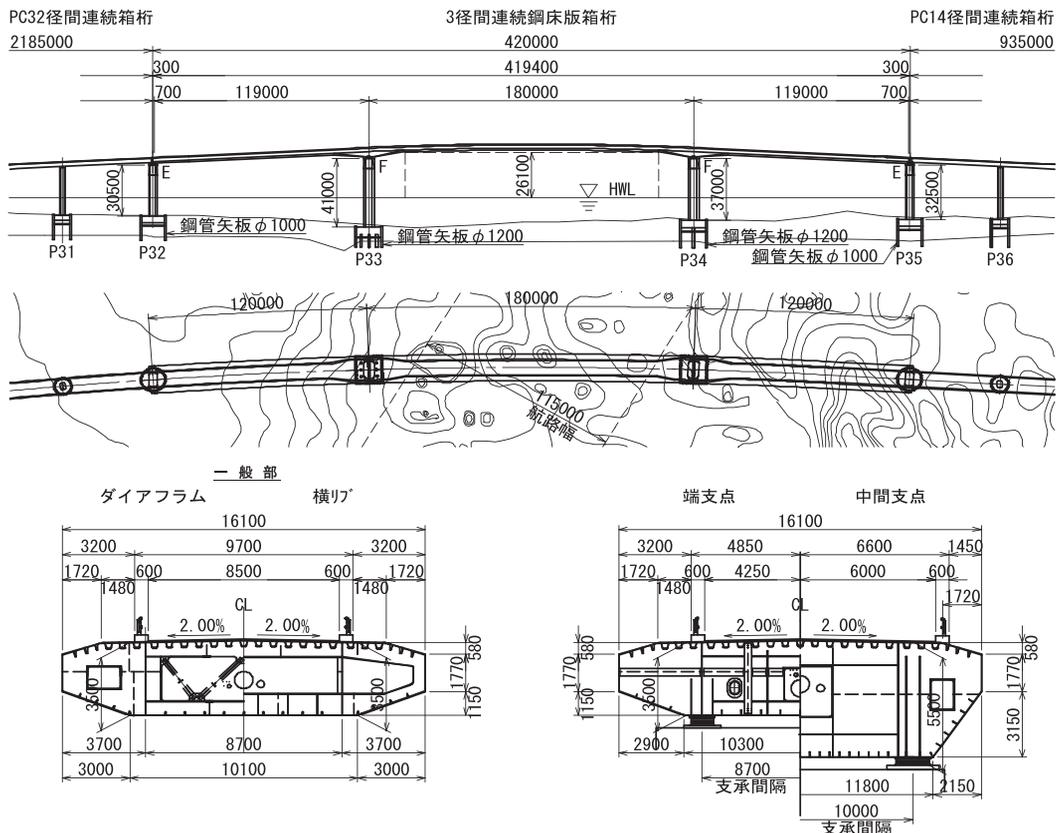
キーワード：Al-Mg 溶射、大ブロック海上輸送、FC 一括架設

1. はじめに

沖縄本島から南西に約 290 km の位置にある宮古島のさらに離島である伊良部島は、医療、教育、福祉等の面において不利・不便を余儀なくされており、過疎化の進行や産業の衰退等といった離島特有の諸問題を抱えている。

伊良部大橋は、平成 17 年に伊良部町を含む 5 市町村の合併により誕生した宮古島市の一体化と効率的な行政を支援するとともに、伊良部島の医療・教育・福祉の向上や架橋による物流コストの低減、観光産業による地域経済の活性化等、宮古圏域の地域振興を図ることを目的とし建設された。

伊良部大橋主航路部橋梁の諸元を以下に示す（図一



図一 伊良部大橋主航路部橋梁一般図

1 参照)。

路線名：一般県道平良下地島空港線
 上部工形式：3 径間連続鋼床版箱桁橋
 橋長：420 m
 幅員：8.5 m
 使用鋼重：約 4,200 t
 外面塗装仕様：Al (95%) -Mg (5%) 金属溶射 (以下 Al-Mg 溶射) + C5 系塗装
 下部工形式：T 型橋脚 基礎形式：鋼管矢板井筒基礎

2. 主航路部橋梁の特徴

主航路部橋梁周囲の環境は、宮古島と伊良部島間の開けた海上に位置することから、飛来塩分が橋面に付着しやすく、亜熱帯地域の高湿多湿な気候の下、鋼橋にとっても厳しい腐食環境である。また、宮古島が台風常襲地域であり、架設位置が海面上 30 m となることから、設計基準風速が大きく高い耐風安定性が求められた。

耐久性向上を目的とし鋼橋区間である主航路橋梁においては、おもに耐風安定性の確保及び防錆防食に配慮した取り組みを行った。

(1) 耐風安定性の確保

橋種選定において、経済性、施工性、景観、に加え、風洞実験で耐風安定性が確認された単箱の 8 角形断面を有する鋼床版箱桁橋が選定された。

(a) 設計風速の決定

宮古島には、これまでも勢力が強い台風が襲来し多大な被害をもたらしている。主航路部橋梁の耐風設計では過去に襲来した台風から設計基準風速の設定を行った。

下記に設計風速決定のフローを示す。

- ①宮古島地方気象台の観測データを統計処理。
- ②宮古島地方気象台における 100 年再現期待値の設定 (粗度区分 II, h = 13.5 m)。
- ③架橋地点への補正 (粗度区分 0, h = 33.0 m)。

表一 1 粗度区分の比較

道路橋耐風設計便覧	改訂前	平成19年12月改訂
架橋地点粗度区分	I	0
架橋地点高	33m	33m
設計基準風速U ₃₃	73.4m/s	82.2m/s
観測点粗度区分	II	II
観測点高	13.5m	13.5m
観測点風速(100年再現期待値)	57.5m/s	57.5m/s

平成 19 年 12 月に耐風設計便覧の改訂があり「広大な海面上」を対象とした粗度区分 0 が追加されている。表一 1 に粗度区分 I と 0 の場合の比較を示す。本橋では粗度区分 0 と判断し、設計基準風速は 82.2 m/s と設定した。

(b) 風洞実験による検証

風洞実験の結果、8 角形断面では発散振動が発現しなかったものの、渦励振が発現し最大振幅が許容値を上回ることが確認された (写真一 1, 表一 2)。そのため、下斜めフランジの角度を調整することで最大振幅を許容値以下にするとともに、地覆外へ平場を付加することで、渦励振が抑制され耐風安定性が向上することが確認された。

(2) 防食設計と細部構造の工夫

防食設計と細部構造を工夫することで耐久性の向上を図った。

(a) 防食下地への Al-Mg 溶射の採用

防食効果の向上を図るため、一般部外面 C-5 系塗装



写真一 1 風洞実験状況

表一 2 風洞実験結果 (概略)

下斜めフランジ角度	渦励振	最大振幅 (mm)	許容値 (mm)
9.4°	発現する	95.6	58.4
20°	発現する	24.4	58.4
20° (平場付加)	発現しない	0	58.4

表一 3 塗装仕様

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m ²)	膜厚 (μm)	
橋梁製作工場	素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2.5 → Sa3.0 に変更 表面粗さ Ra8 μm 以上 Rz50 μm 以上		
	金属溶射	Al95-Mg5 合金溶射	150~500	
	封孔処理	金属溶射封孔処理剤	200	-
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540	120
	中塗	ふっ素樹脂塗料中塗	170	30
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140	25

仕様の防食下地である無機ジンクリッチペイントに変えて、長期耐久性が期待できる Al-Mg 溶射を採用している（表-3）。

(b) 桁外面ボルト継手の排除

鋼橋におけるボルト継手部は、凹凸部分への飛来塩分の付着や塗膜厚の確保が困難なことから、腐食しやすい部位となっている。そのため外面のボルト継手を無くし、溶接継手とするとともに溶接ビードは平坦仕上げとし凹凸の少ない外面とした（写真-2）。



写真-2 桁外面状況

(c) 部材角部の形状

部材の角部は塗膜が薄くなる箇所であり、施工、管理が難しいことから、フランジの角折れ部を曲げ加工とし、すべての外面部材の角部に対して、 $R=3\text{ mm}$ の曲面加工を行った（写真-3）。



写真-3 部材角部形状

3. 施工段階での取り組み

主航路部橋梁の架設工法は、高所の海上部における強風下での現場溶接、溶射を最小限にするため、大ブロックによる FC 一括架設工法が選定されている。こ

のため橋長 420 m の主桁は、140 m づつ、3つの工区に分けて県外の工場で作られた。工場製作、大ブロック海上輸送、FC 一括架設、現場溶接、溶射段階での取り組みを述べる。

(1) 工場製作

平成 22 年 10 月～平成 24 年 3 月にかけて香川県、千葉県、三重県の各製作工場で、それぞれ 140 m の鋼桁製作を行った。

工場製作では特に Al-Mg 溶射及びヤード溶接を重点管理項目とし、ほぼ全数の立会を行った。

(a) 工場における Al-Mg 溶射

溶射管理マニュアルを作成し、素地調整後の粗さ、除錆度の確認を入念に実施した。また、素地調整直後は鋼素地が露出し腐食しやすい状態となることから、素地調整完了後から 4 時間以内で規定膜厚以上の確保を目標に溶射を実施した（写真-4）。その結果、全てのブロックにおいて 4 時間以内に規定膜厚以上を確保し溶射を完了した。また、溶射作業前には密着力試験を実施し密着力が基準値である 4.5 MPa 以上であることを確認した。



写真-4 工場溶射状況

(b) 工場ヤード溶接

金属溶射、塗装完了後に製作ヤードにてベントによる多点支持のもとヤード溶接を実施している。

ヤード溶接は、適切な溶接環境を確保すべく継手箇所に風防設備を設置し溶接を行った（写真-5）。

外面は全て完全溶込み溶接であり、溶接箇所には全数の非破壊検査を実施し問題となる欠陥がないことを確認した。

(2) 大ブロック海上輸送

製作された 140 m の鋼桁は、各工場の地組立てヤー



写真—5 地組立て、ヤード溶接



写真—7 横移動制限装置



写真—6 工場ヤードからの浜出し

ドから、吊能力 3,000t クラスの FC 船を使用して浜出しされたのち、(写真—6) 大型台船を用いて宮古島まで海上輸送された。このうち、輸送距離が最長となったのは、中央径間のブロックであり、工場のある千葉県から宮古島までの輸送距離は約 2,000 km に及ぶ。

大ブロック輸送時の台船上の支持点として、側径間の桁が支承箇所を使用できるのに対し、中央径間のブロックでは、工場において溶射、塗装まで完了した下フランジ面で支持することとなる。このため、外面塗装の損傷を抑えるための最小箇所での支持、かつ波浪による外力及び応力による桁損傷を回避できる位置での支持を検討し輸送荷姿に反映した。

(a) 支持点の工夫

大ブロックの台船上での、支持点は最小限の 2 箇所とし、前後の動揺を抑えるべく下フランジの貫通穴から桁内横リブへ固定した、橋軸方向移動制限装置を 1 箇所、支持点両脇には、橋軸直角方向の移動を制限するための横移動制限装置を設置した(写真—7)。ま

た、事前に試験体を用いて輸送時の加重で圧縮試験を行い、塗膜へ損傷を与えないことを確認したうえで、高強度ナイロン板を支持点に挟み込み、塗装面の損傷を防止した。

(b) 輸送時の運行管理と大ブロックのモニタリング
鋼橋の海上輸送に際しては、東京ゲートブリッジにおける桁輸送中の損傷事例があり、その原因としては、海上輸送中の波浪の揚圧力によるとされた。そのため、下記のとおり品質管理の重点項目を定め海上輸送を実施している(写真—8)。



写真—8 大ブロック海上輸送状況

①有義波高 2.5 m 以下での輸送の実施

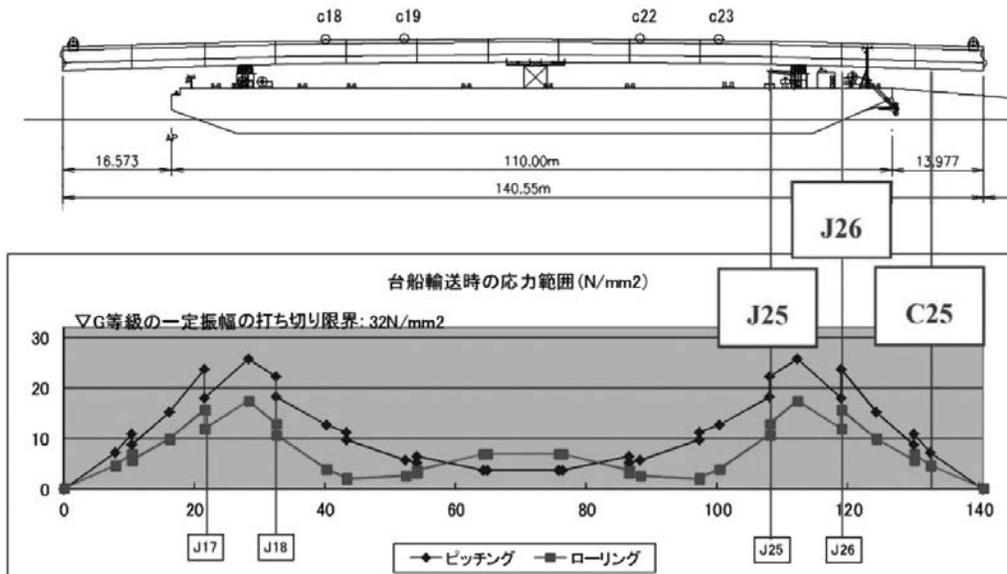
動揺解析から桁と波の衝突条件を求め、有義波高 2.5 m 以下での輸送を行った。

②気象、海象予報に基づく輸送可否判断

輸送可否判断は、通過海域の気象予報に基づき実施し、その履行は曳船の定時報告及びリアルタイム・ナウファスを用いて確認した。

③輸送前、後における輸送ブロックの計測

大ブロックのたわみ量計測、疲労亀裂の発生に伴う塗膜割れの有無、局部座屈が懸念される箇所の残留変形有無の確認を行った。



図一 2 輸送中の繰り返し応力範囲

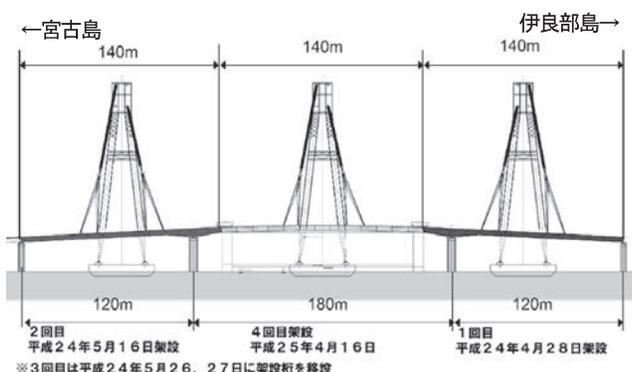
④ 応力の計測

波浪による応力を確認するため、J25・J26の継手箇所において、Web スカーラップ近傍の応力計測を行った(図一2)。

これらの結果、外観検査において損傷は無いこと、応力最大値は一定振幅の打ち切り限界を下回っていることから、輸送時に疲労損傷が起こっていないことを確認した。

(3) FC 一括架設の実施

架設には、国内最大級となる4,000tの吊上げ能力を持つ大型FC船(W=44m, L=120m, H=140m)を使用した。大ブロック架設は、宮古島内に接岸可能な岸壁が平良港下崎地区の-10mの岸壁1バースに限られること、架設地点の水深の関係から、側径間の架設が宮古島側と伊良部島側で架設方向が南北逆となり、中央径間の架設前にPC部の架設桁の移設を行う必要があったことから、架設順序は図一3の通りとなった。



図一 3 架設順序

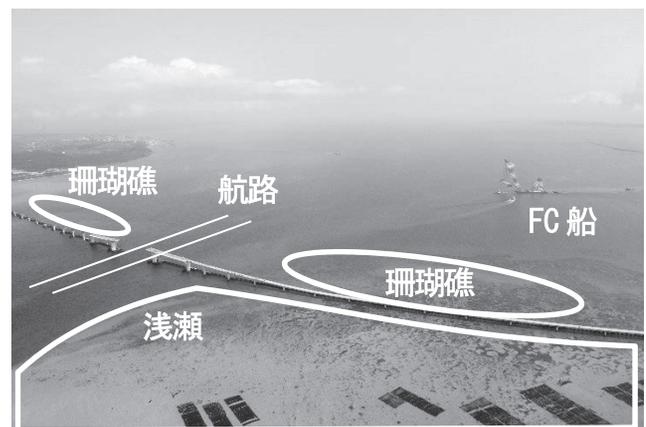
また、気象条件に左右されやすい環境であるため、流れの緩やかな小潮で、かつ平均風速10m/s以下、波高0.5m以下の条件が必要となった。さらに、航路幅が狭く、航路部以外の浅瀬にはサンゴ礁や浅瀬が点在しているため、吊曳航と架設位置における係留を慎重に行う必要があった(写真一9)。

平成24年4月28日に伊良部島側側径間の架設を開始し、同年5月16日に宮古島側側径間、5月26日、27日にPC部架設桁の移設(写真一10)、台風の影響による作業の順延があったものの、最終的に平成25年4月16日に中央径間の架設(写真一11)が完了した。

FC一括架設を行ったことで、現場溶接・溶射作業の最小限化が図られ、ブロック継手部の品質向上に繋がった。

(4) 現場溶接

架設ブロックの大型化により、現場溶接箇所は、3ブロックの継手部分の2箇所限定されたが、現場に



写真一 9 架橋地点までの吊曳航



写真—10 PC部架設桁の移設



写真—12 風防設備内 継手溶接状況



写真—11 中央径間の架設

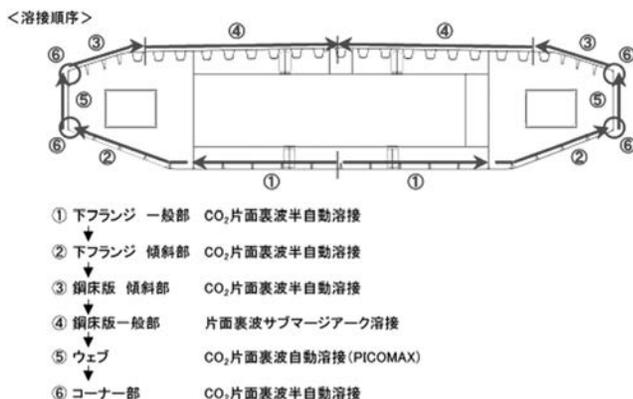
おける溶接は、品質を確保するために十分配慮する必要があった。そのため、風雨の影響を防ぐことを目的として風防設備を設置した。また、風防設備は足場兼用とし架設後すぐに設置できるように、スライド型の設備をヤードにて取り付け、板張り防護の内側からシート貼付・目張りを行うことで、溶接に適した環境を確保できるようにした。なお、ヤードにおいて現地の設備を再現した試験施工を実施し、試験片により溶接品

質に問題ないことを確認した上で現場溶接を行った。図—4に溶接方法、写真—12に溶接状況を示す。

(5) 現場における Al-Mg 溶射

現場における Al-Mg 溶射については、県外の工場と比較して高温多湿な環境となる宮古島において品質を確保するため、溶射付着面の粗さ及び膜厚の管理はもとより、溶射環境の確保が求められた。また、現場溶射においては、ブラスト作業後速やかに環境遮断を行うため、工場施工の半分の2時間で規定の溶射膜厚を確保する必要があった。

ブラスト作業時は環境遮断及びブラスト材の飛散防止のため、板張り及び目張りにより密閉し、風防設備内は作業員1名で作業を行った。その後の溶射作業においては、2時間以内に作業を完了するため、1回当りの溶射面積を少なくし、2パーティ、午前・午後の2サイクルで計4箇所（平均6m²程度）を1日の施工サイクルとした。



図—4 溶接順序、溶接方法



写真—13 風防設備内 Al-Mg 溶射状況

除錆度、清浄度、粗さ、溶射膜厚の確認については全数立会とし、スワイプブラスト完了後2時間の溶射を効率よく作業するため、現場にほぼ常駐して管理を行った。1日当たり約6m²の溶射施工量で、品質を重視した施工を行い、1ヶ月半で主航路部架設後の現場溶射約208m²を実施した(写真—13)。施工時に3回に渡り現場溶射箇所において作成した試験片で密着力試験を実施したところ、工場施工時と同等の試験結果を得ており、現場においても品質の高い溶射作業を行うことができた。

4. おわりに

架橋要請活動開始から40年、建設開始から10年の歳月をかけ、平成27年1月31日、伊良部大橋が完成・供用開始となった(写真—14)。



写真—14 供用開始した伊良部大橋の全景

謝 辞

伊良部大橋の建設に際し、多大なるご指導、ご支援を賜った伊良部大橋基礎工検討委員会(委員長:上原方成 琉球大学名誉教授)、主航路部橋種検討委員会(委員長:上間清 琉球大学名誉教授)、主航路部設計施工委員会(委員長:有住康則 琉球大学教授)を始めとする各委員会の委員の皆様、架橋に携わった関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

J C M A

《参考文献》

- 1) 伊良部大橋における鋼桁大ブロックの海上輸送の報告(2013.10 土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会)九州技報 2011.01 第48号
- 2) 東京ゲートブリッジ若洲側中央径間トラス桁先端部損傷について(最終報告)2011.3

【筆者紹介】



仲嶺 智(なかもね さとる)
沖縄県土木建築部道路街路課
街路整備班 班長
(元伊良部大橋建設現場事務所 主幹)



翁長 正勝(おなが たかまさ)
沖縄県土木建築部道路街路課
道路整備班 主任技師
(元伊良部大橋建設現場事務所 主任技師)



山城 明統(やましろう あけと)
沖縄県企業局 建設計画課
建設第二班 主任技師
(元伊良部大橋建設現場事務所 主任)