

伊良部大橋主航路部鋼橋の新防食技術への挑戦

沖縄県 土木建築部
都市計画・モノレール課
主任 我謝将人

1. はじめに

沖縄県の橋梁は、高温多湿で全地域で海塩粒子が飛来する自然環境にあることから、塩害による劣化損傷が著しく、今後の維持管理の増大が懸念されている。このため、これから建設される橋梁においては、塩害に対する耐久性設計を行うことが維持管理費の縮減と長寿命化の観点から重要となってくる。

伊良部大橋は、沖縄県が実施している宮古島と伊良部島を結ぶ総延長 6.5km の離島架橋事業であり、海上部延長は 4.3km、本橋部が 3.54km の橋梁である (図-1)。伊良部大橋は、2000t 級の貨物船や旅客船の航路 (長山水路) を跨ぐ主航路部橋梁の 3 径間連続鋼床版箱桁 (橋長: 420m、支間: 120m + 180m + 120m、有効幅員: 8.5m) と、その両側に位置するプレキャストセグメント工法による PC 連続箱桁橋の側径間部から構成されている (図-2)。本稿は、高温多湿の塩害環境における主航路部鋼橋の耐久性確保に向けた取り組みについて報告するものである。



図-1 伊良部大橋の位置図

2. 防食に配慮した構造設計について

本橋は厳しい塩害環境の中で 100 年間の供用期間中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¹⁾を参考に以下の防食に配慮した構造設計を行った。

2. 1 主桁断面

本橋の主桁断面は、維持管理費の縮減から飛来塩分の付着量を減らすとともに、塗装の塗替えを軽減することができる表面積が少ない単箱断面を採用した。(図-3)

2. 2 現場継手

現場ボルト継手部は、現場塗装前の塩分に付着、ナット部の塗膜厚の確保が困難なことから、一般部に比べ腐食しやすい部位となっている。本橋では、桁外面のボルト

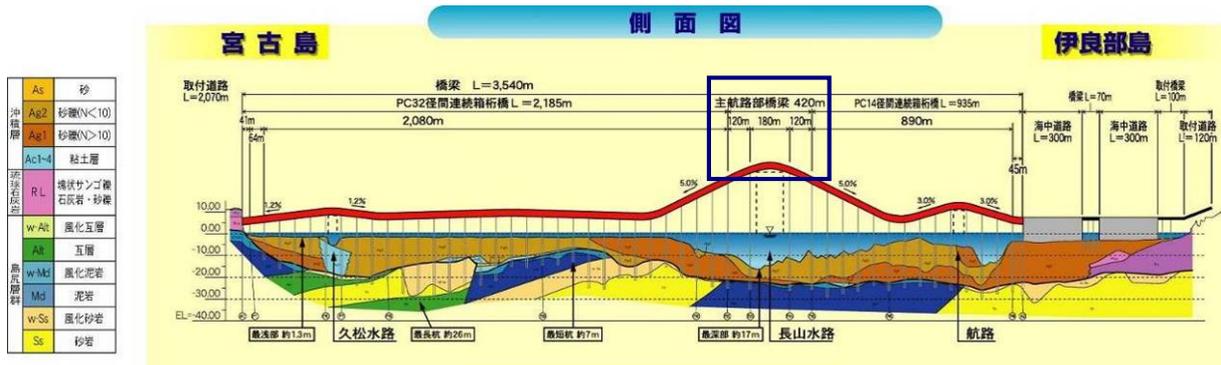


図-2 伊良部大橋の側面図

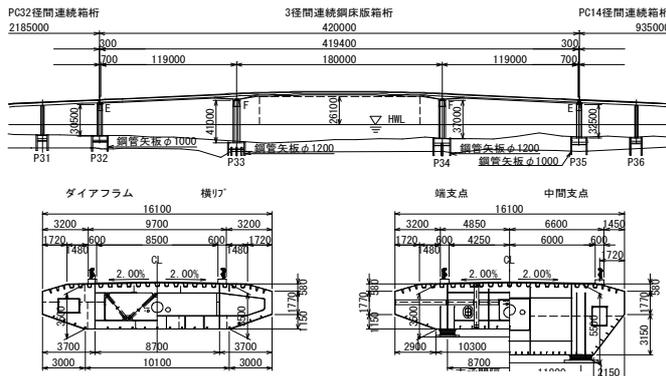


図-3 伊良部大橋主航路部一般図



図-4 完成イメージ

継手をなくし、桁外面のボルト継手をすべて溶接継手とするとともに溶接ビードは平坦仕上げを採用した。

2. 3 部材角部形状

部材の角部は、部材切断切削仕上げにより鋭いエッジになっていると、その部分に塗装をしても薄膜仕上げとなり早期発錆につながることから、本橋では、フランジの角折れ部を曲げ加工とし、フランジとウェブの溶接を角溶接とした。また、すべての外面部材の角部に対して、 $R = 3 \text{ mm}$ の曲面加工を採用した。(図-5)

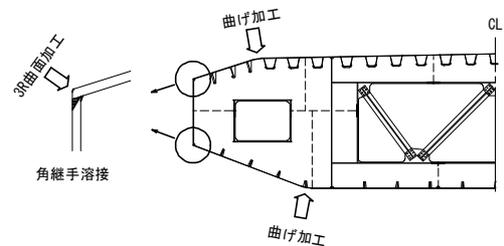


図-5 部材角部形状

2. 4 足場用吊金具

従来の維持管理用の足場吊金具は、突起状の鋼板を設ける場合が多く、足場チェーンの取り付け時に塗膜に損傷を与える恐れや角部の塗膜厚不足による腐食が懸念されることから防食の弱点となりやすい。本橋では、図-6に示すようにアイボルト式の足場用吊金具を採用するものとした。母材に $\phi 32$ の孔をあけておき、使用時にアイボルトを設置するもので、未使用時にはシリコン製のキャップを設置しておく構造である。

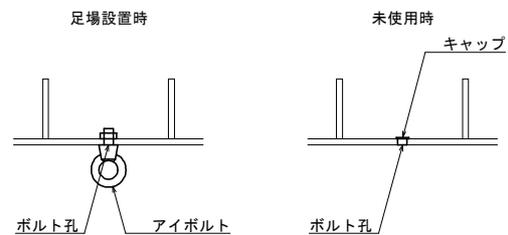


図-6 足場用吊金具

3. 鋼材の防食について

鋼橋において、塗装の塗替えが維持管理上の最も大きな負担となっており、厳しい塩害環境にある本橋においては、塗装寿命の長期化は最も維持管理の軽減になると考えられる。そこで、現時点で最も長期耐久性が期待できる防食下地として、アルミニウム・マグネシウム合金 (Al95% - Mg5%) 溶射 (以下 Al・Mg 溶射) を採用した。Al・Mg 溶射は、犠牲防食により鋼材を保護するもので、自己修復機能を有している特徴があり、北海油田など海洋構造物の防食用として海外で多くの実績のある防食法である。表-1に伊良部大橋主航路部の塗装仕様を示す。(外面塗装面積約 13,000m²)

3. 1 Al・Mg 溶射の施工前品質確認試験

全国的にみても大規模橋梁での Al・Mg 溶射の施工実績が少ないことや、金属溶射の品質確保が本橋の長期耐久性を確保する上で必須条件であることから本施工前に施工性や品質の検証を行い、実施工に反映させることを目的に施工前品質確認試験を実施した。

3. 2 プラズワイヤー工法とガスフレーム工法の施工前品質確認試験

施工者より Al・Mg 溶射工法として提案のあったプラズワイヤー工法（以下 PW 工法）とガスフレーム工法（以下 JIS 工法）について、施工姿勢（上向き・横向き・下向き）や除錆度（Sa2.5・Sa3.0）の違いによる品質への影響を把握するために、PW 工法と JIS 工法を同じ環境条件のもと同時に施工を行い、表面粗さ、溶射膜厚、密着力を測定した。

3. 2. 1 試験体・試験方法

平成 22 年 11 月に JFE エンジニアリング津工場において PL12×1,000×1,000(SM490YA) の鋼板に、実施工で使用するスチールグリッドにてブラストを行い、除錆度 Sa2.5 と Sa3.0 の 2 種類の試験体を作製した。次に、その試験体の表面粗さを測定した後、施工姿勢ごとに両工法とも同時に溶射（写真-1）を行い、溶射膜厚を測定した。後日アドヒージョン試験（引張試験）を実施し密着力の測定を行った。なお、密着力及び膜厚測定箇所は 1 枚当り 49 点測定することとした。



写真-1 上向き溶射



横向き溶射



下向き溶射

3. 2. 2 試験結果

試験結果を表-2 に示す。すべての試験体において規定の表面粗さ（Ra:8 μ m 以上・Rz:50 μ m 以上）、密着力（4.5N/mm² 以上）及び溶射膜厚（150 μ m～500 μ m）を満足していた。図-7 に示すとおり両工法とも除錆度 Sa2.5 よりも Sa3.0 が密着力が高い傾向を示した。また、横向き・Sa2.5 の試験体においては、両工法とも密着力が最も低い結果となったが、その一因として図-8 に示すとおり表面粗さが他の試験体に比べ低いことから、密着力低下に影響したものと考えられる。

次に、施工姿勢ごとの溶射膜厚の最小値、最大値、平均値の測定結果を図-9 に示す。両工法とも平均で約 200 μ m 確保されていたが全体的にバラツキがみられ、規格値の最小皮膜厚さ 150 μ m も確認された。そのバラツキの要因として、手動での溶射は、溶射

表-1 伊良部大橋主航路部の外面塗装仕様

塗装工程		塗料名	使用量 (g/m ²)	膜厚 (μ m)
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 μ m 以上 Rz50 μ m 以上		
	金属溶射	A195-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	

ガンの溶射距離・角度や、溶射帯（1回の溶射施工幅）の重なり具合など溶射作業者の技量によるところが大きいと考えられる。

表-2 表面粗さ・溶射膜厚・密着力試験結果

溶射工法	溶射姿勢	除錆度	表面粗さ		溶射皮膜厚さ			密着力試験		
			Ra	Rz	最低	最高	平均	最低	最高	平均
			μm		μm			N/m ²		
PW プラスワイヤー	横向き	Sa3	18.8	117.1	161	325	221	6.61	11.42	9.25
		Sa2.5	13.5	81.9	164	278	211	4.75	6.88	5.89
	上向き	Sa3	15.0	89.1	163	369	226	7.65	11.44	9.76
		Sa2.5	14.0	86.2	157	308	205	5.44	9.72	8.14
	下向き	Sa3	15.9	96.1	166	382	227	7.28	9.66	8.55
		Sa2.5	14.6	98.8	157	289	209	6.80	8.68	7.82
JIS カスフレーム	横向き	Sa3	14.5	88.5	168	282	209	5.31	10.35	9.03
		Sa2.5	12.4	78.0	158	285	207	4.75	6.80	5.85
	上向き	Sa3	16.8	106.4	151	295	205	7.40	9.82	8.91
		Sa2.5	14.3	82.0	150	303	215	5.74	8.81	7.33
	下向き	Sa3	14.0	86.1	168	305	218	6.69	11.48	9.95
		Sa2.5	14.8	81.0	158	309	202	6.18	8.68	7.75

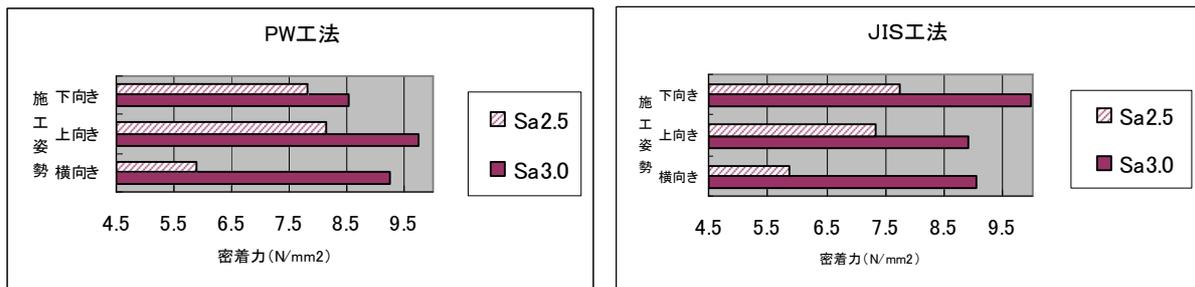


図-7 除錆度と密着力の関係

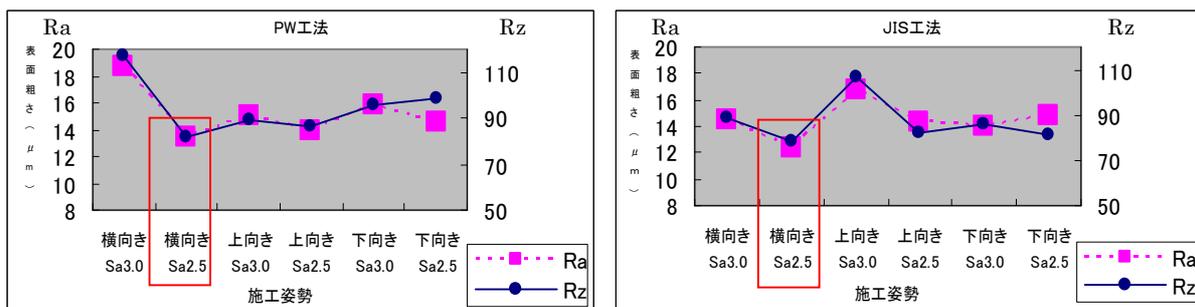
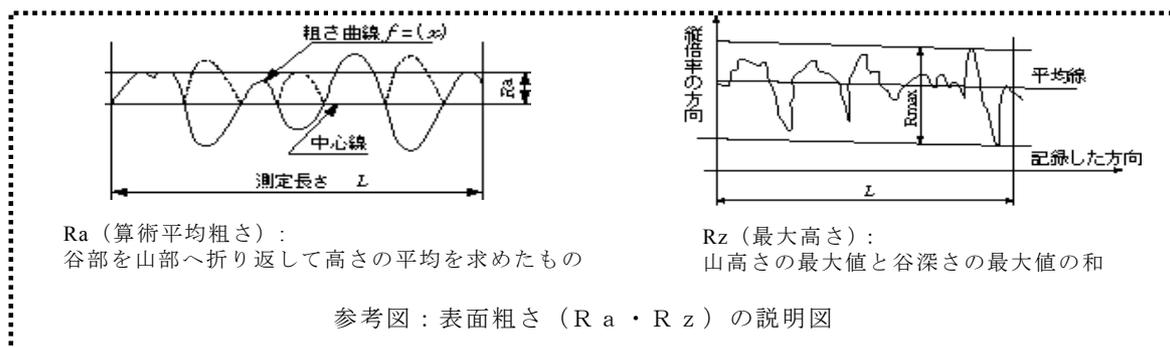


図-8 表面粗さの測定結果



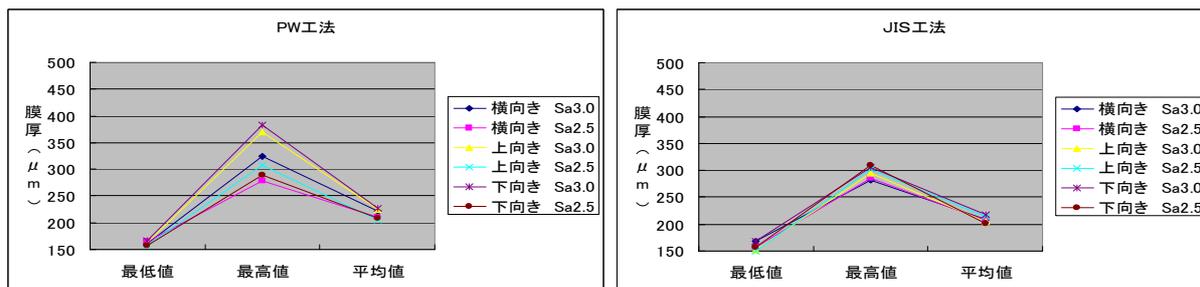


図-9 溶射膜厚の測定結果

3. 3 角部溶射膜厚及び溶射+塗装の密着力試験について

材端角部の膜厚は、平坦部に比べ薄くなる傾向にあり防錆上の弱点となることから、角部の溶射を増厚することとし、増厚の基準値を決定するために試験を行った。また、角部の膜厚を作業時に正確に測定することが困難なことから、角部近傍平坦部の膜厚と角部のマクロ試験による膜厚の相関をとることで角部の必要膜厚を管理することとした。また、PW工法及びJIS工法による溶射+塗装の密着力を確認するために、角部膜厚試験で用いる試験体でアドヒージョン試験を実施し密着力を測定した。

3. 3. 1 試験体・試験方法

試験体は開先角度、溶接方法、溶接姿勢、仕上げ方法、塗装仕様、塗装材料は本体構造と同様とし、当該角部の条件を再現したモデルに溶射のみ3体、溶射+塗装3体を作製した。図10に示す角部の3点(A・B・C)をデッキ側3箇所、下フランジ側3箇所を膜厚計とマクロ試験の断面計測により膜厚を測定し、角部の管理膜厚を定める。

また、表-3と写真-2に示す各溶射工法+塗装の試験体でアドヒージョン試験を行う。側点箇所は、図10に示すウェブとデッキ、ウェブと下フランジが接する熱硬化部(溶接・溶断)において1試験体当たり12点で密着力の測定を行う。

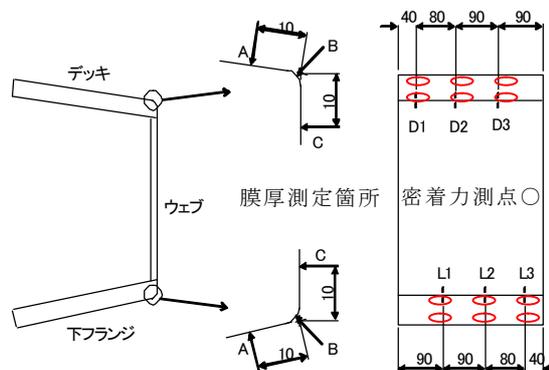


図-10 膜厚及び密着力測定箇所



写真-2 試験体

表-3 試験体

溶射工法	試験体	測点箇所	計
PW工法	3体	12点/1試験体	36点
JIS工法	3体	12点/1試験体	36点

3. 3. 2 試験結果

角部と角部近傍平坦部の溶射皮膜厚について、マクロ試験の結果を写真-3,4に示す。なお、PW工法とJIS工法ではほぼ同様の結果であったことから、PW工法の結果例を図-11に示す。図-11の断面計測値による平坦部と角部の膜厚試験結果によると、全体としては平坦部に比べ角部の膜厚が高い傾向にあるが、No2の試験体で角部の膜厚が平坦部に比べ93%膜厚が薄くなっていることから、角部直近の平坦部の膜厚を規定値の150 μmに対し、170 μm(110%以上)を管理値とした。

次に、アドヒージョン試験を行い、PW工法とJIS工法の密着力を測定した。図-12の①~⑥は図-13に示す剥離位置を指している。PW工法では、封孔処理と下塗りの界面(78%(26点/36点))で剥離する結果となった。その最小密着力は6.8N/mm²であった。JIS工法においては、溶射と封孔処理の界面(39%(14点/36点))で剥離する

ものと、封孔処理と下塗りの界面（58%（21点/36点））で剥離するものに分かれた。それぞれの最小密着力は 6.4N/mm² と 6.3N/mm² であった。以上の結果から、封孔処理との界面で剥離する傾向が確認されたが、全ての計測値で密着力の規格値 4.5N/mm² 以上を満足していたことから Al・Mg 溶射と C-5 系塗装との密着力については問題ないと判断した。

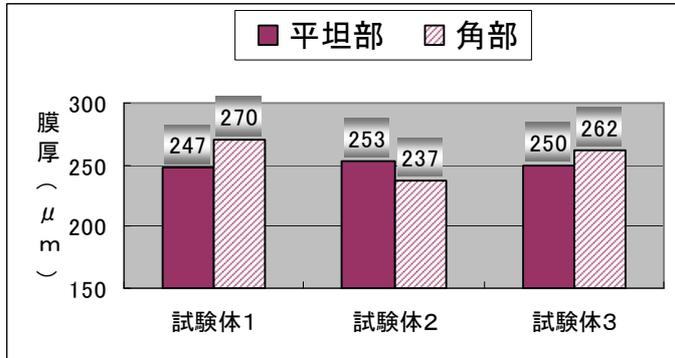


図-1 1 断面計測値による平坦部と角部の膜厚測平均値

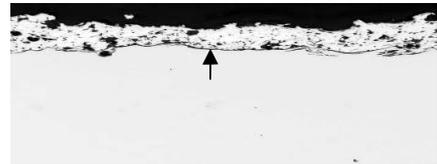


写真-3 平坦部マクロ試験

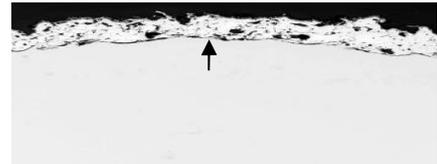


写真-4 角部マクロ試験

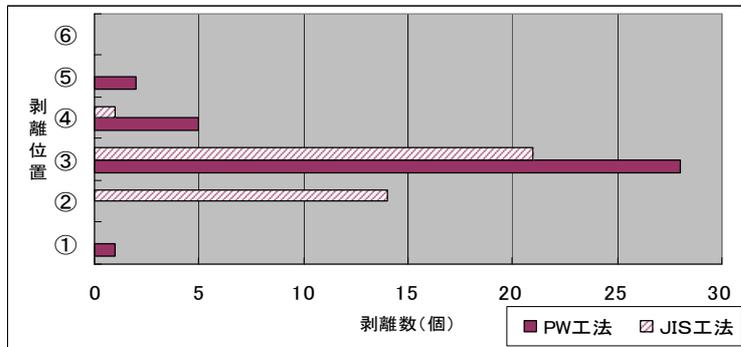


図-1 2 溶射+塗装の密着力と剥離位置

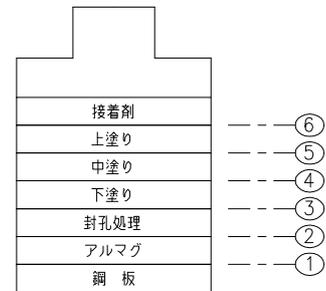


図-1 3 剥離位置図

3. 4 施工前確認試験結果を踏まえた課題の抽出について

試験結果より伊良部大橋の溶射の品質確保にあたっての課題を以下に示す。

- ① 手動溶射機による施工を行う場合、膜厚にバラツキがみられ、均一な膜厚を確保する工夫が必要である。
- ② 溶射皮膜の密着力は、溶射前の鋼材の表面粗さ・除錆度に左右されることから、表面粗さと除錆度の管理が重要である。
- ③ 部材角部は形状や素地調整の精度により、溶射膜厚不足や密着不良の恐れがあることから、3R 角部の形状確保と角部の表面粗さ確保が重要である。
- ④ 部材角部の溶射膜厚は、平坦部に比べ薄くなる傾向にあることから膜厚管理が重要である。

4. 実施工での課題に対する取り組みについて

上記の課題に対し、実施工においては次の対応を行う。

- ① 溶射膜厚を均一に確保するために溶射距離・角度、溶射帯の重なり具合を一定に保つことのできる自動溶射機を下フランジ垂直面及びウェブ水平面に用いて施工する。
(写真-5)
- ② 斜めフランジ面など手動溶射機を行う箇所においては作業時に溶射角度・溶射距離を溶射ゲージにて適宜確認する。(写真-6)
- ③ 密着力を向上させるために除錆度の等級を Sa2.5 から Sa3.0 に上げる。(写真-7)
- ④ 角部の形状を 3R とし、3R 形状確認治具により溶射施工前に同部の形状を確認する。
(写真-8)

- ⑤角部固定用治具を取付け、角部 3R 部の表面粗さを確認する。(写真-9)
- ⑥角部近傍 50mm の溶射膜厚を規定の 110%以上の $170\mu\text{m}$ 以上で管理する。(写真-10)
- ⑦膜厚不足をなくするために溶射施工と膜厚計測を並行作業により膜厚管理を行うとともに平均値の管理ではなく、最小膜厚さで管理する。
- ⑧伊良部大橋主航路部設計施工委員会において施工の品質確保のために発注者の検査体制を充実させる必要があるとの提言があり、素地調整及び溶射膜厚管理については重点管理項目として、発注担当者または現場技術員により立会検査を行う。



写真-5 自動溶射機



写真-6 溶射ゲージ



写真-7 Sa3.0 見本写真



写真-8 3R 形状確認治具



写真-9 角部固定治具



写真-10 膜厚計

6. おわりに

本橋は、非常に厳しい腐食環境にあることから、主桁の表面には、突起物を無くすることによって、耐久性向上を図るとともに、その品質が確保しやすい構造となるように計画、設計を行っている。さらに、Al・Mg 溶射の施工においては施工前に各種試験を実施し、溶射の品質を確保するための課題を抽出し、その結果を実施工に反映させた。

主航路部鋼橋は、平成 24 年 4 月～5 月に 4000tFC により側径間の架設を完了したところである。また、平成 25 年 4 月には中央径間の一括架設を予定している。(図-14、写真-11)

なお、設計・施工に際しては、「伊良部大橋主航路部設計施工委員会」(委員長：有住康則 琉球大学教授、委員：木村吉朗 東京理科大学教授、下里哲弘 琉球大学准教授、村越潤 独立行政法人土木研究所 上席研究員、守屋進 独立行政法人土木研究所 総括主任研究員)にてご審議いただき、委員各位から貴重なご意見を頂いた。ここに深く謝意を表します。

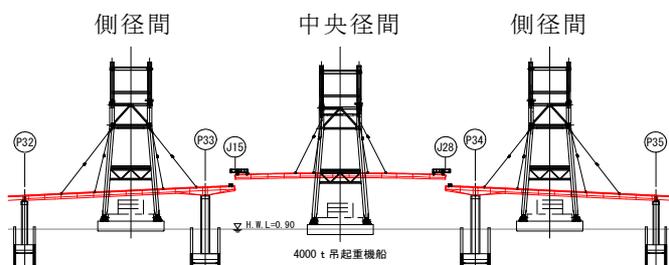


図-14 上部工架設工法



写真-11 側径間架設状況

【参考文献】

- 1) 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部監修：沖縄地区鋼橋塗装マニュアル，(2008.8)