

海上に架かるPC桥梁の防食対策

—岩城アイランドブリッジの塗装工事—

川上 洵*1・佐々木 一郎*2・須合 孝雄*3・山本 幹雄*4

1. はじめに

岩城アイランドブリッジは秋田県由利郡岩城町に位置する海上橋である。本橋は沖合いに建設されるウィングラス型と呼ばれる島式漁港と既設護岸を結ぶ連絡橋として計画されたもので、冬期には海からの季節風が著しく、強い波しぶきを受ける環境にある。現地における飛来塩分量調査とコンクリート中の含有塩分量調査を行い、その結果に基づいて塗装によるコンクリートの塩害対策を行った。

塗装材料については、本橋の立地条件などにより、耐凍害性、耐磨耗性をも含め、種々の室内試験を実施し、中塗りに厚膜型エポキシ樹脂塗料、上塗りにふっ素樹脂塗料を選定した。

表-1 桥梁概要

工事名	道川漁港 漁港修築事業
工事場所	秋田県由利郡岩城町道川地内
事業主体	秋田県
施工者	ドービー建設工業(株)
工期	自:平成7年11月～
橋種	プレストレストコンクリート道路橋
橋格	一等橋(TL-20)
形式	PC3径間連続箱げた×3連
橋長	356.00m
けた長	118.50m×3連
支間長	3@39.10m×3
全幅	10.75m
有効幅員	車道7.25m 歩道2.50m
斜角	90°
架設工法	押しし架設工法(SSY式反力分散方式)

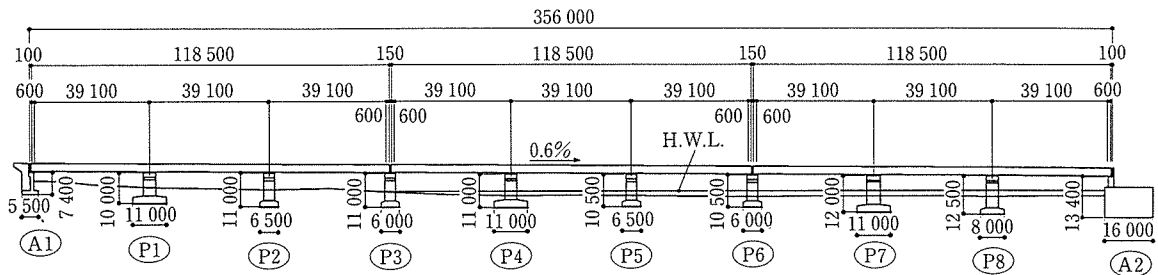


図-1 側面図

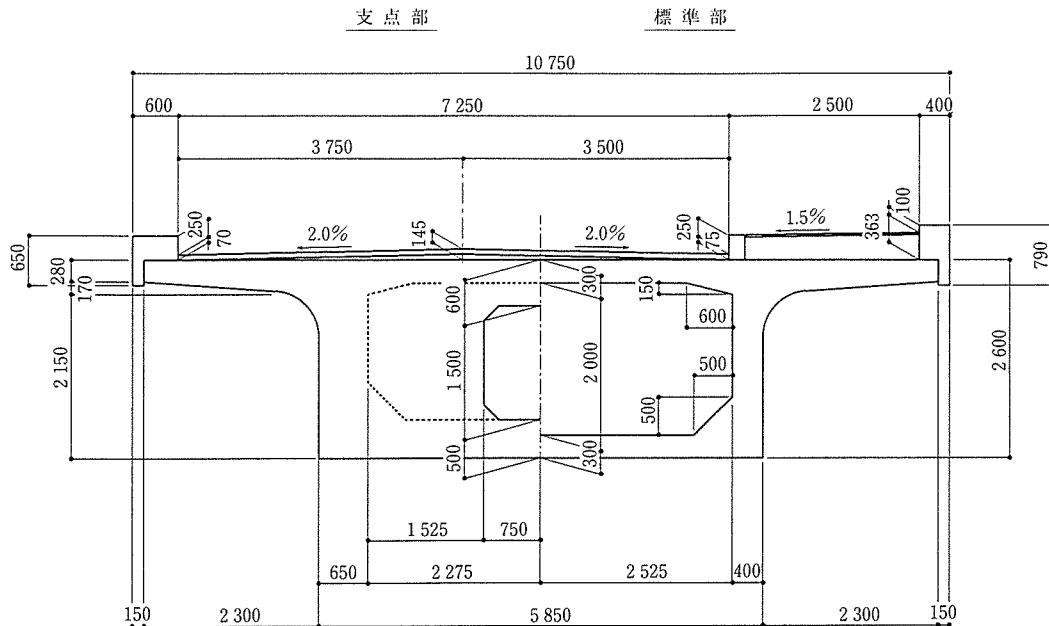


図-2 断面図

*1 Makoto KAWAKAMI: 秋田大学鉱山学部 土木環境工学科 教授
 *2 Ichiro SASAKI: 秋田県由利農林事務所 土地改良課 課長補佐
 *3 Takao SUGO: ドービー建設工業(株) 道川漁港連絡橋工事作業所 所長
 *4 Mikio YAMAMOTO: ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 山本研究室 室長

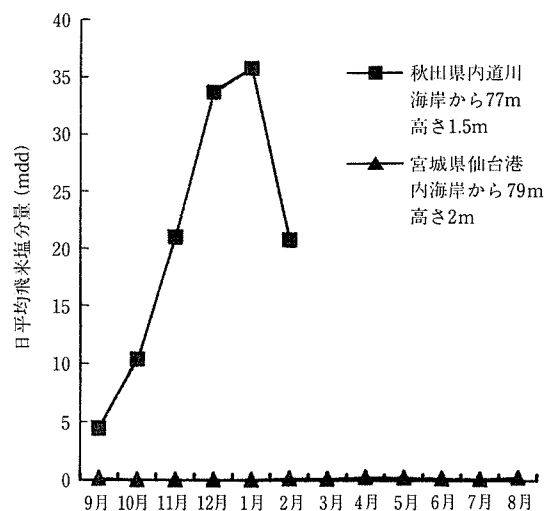
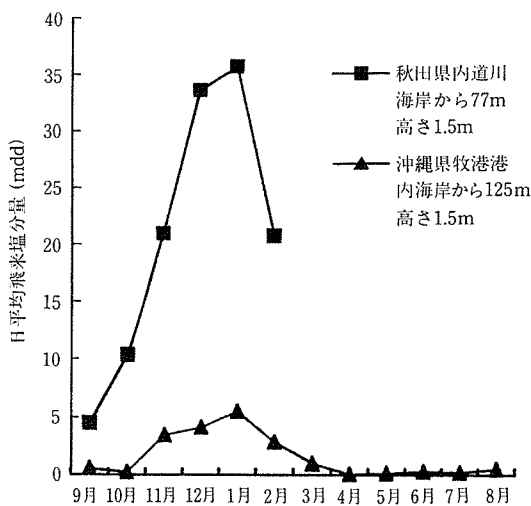
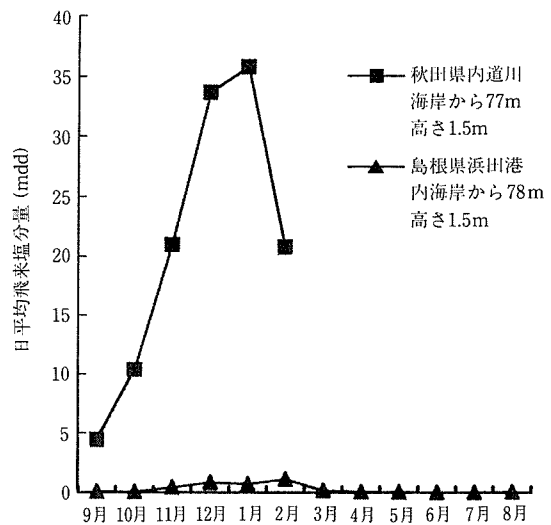
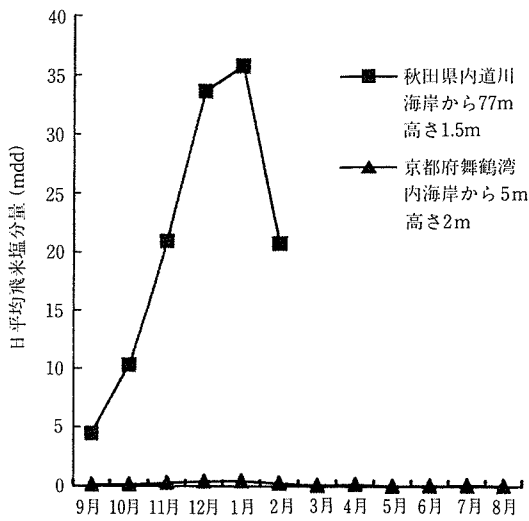
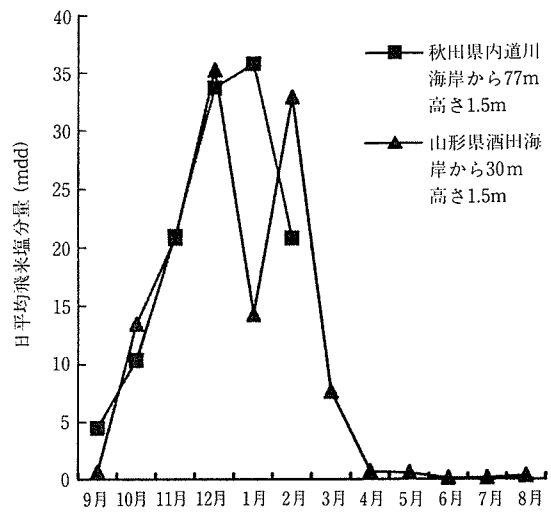
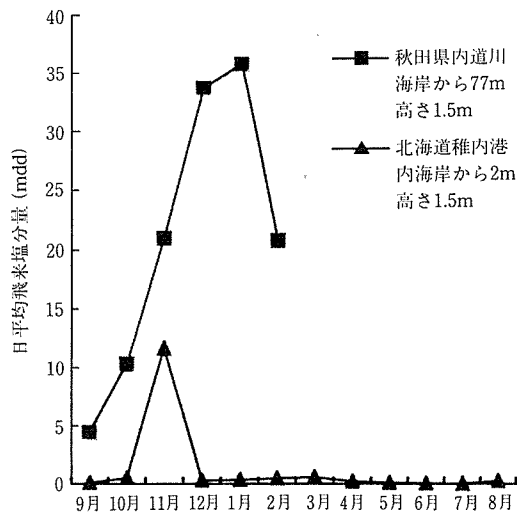


図-3 秋田県内道川と各地3)の月別平均飛来塩分量

本報告では塗装による岩城アイランドブリッジの塩害対策について述べる。

2. 岩城アイランドブリッジの概要

本橋は海上橋であり、冬期の季節風も著しいため架設工法としては押し出し工法が採用された。

本橋の橋梁概要を表-1に、側面図および断面図を図-1、図-2にそれぞれ示す。構造形式は3径間連続げたの3連であるが、押し出し架設時には3連をPC鋼材で仮連結した9径間連続げた構造としている。

なお、鋼材のかぶりは、日本道路協会の「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」¹⁾の対策区分Ⅰを準用し、以下の厚さで施工している。

主げた暴露面	t: 70mm
上床版上面および地覆	t: 50mm
箱げた内部	t: 35mm
下部工	t: 150mm

3. 海塩粒子の影響

海岸付近のコンクリート橋の塩害は、飛来する海塩粒子がコンクリート表面に付着し、経年とともに浸透、蓄積することにより内部鋼材が腐食するために起こると考えられている。このため、本橋のように海上に橋梁を架設する場合、飛来塩分量とコンクリート中の含有塩分量(塩分の浸透状況)を把握しておくことが非常に重要となる。

3.1 飛来塩分量の調査

飛来塩分量の調査方法には、JIS Z 2381に規定されているガーゼ法がある。この方法は、海岸線から離れた地点や比較的弱い風によって飛来する微細な粒子は捕集できるが、波しぶきなどの粒径の大きな海塩粒子は捕集が困難とされている²⁾。このため、今回の調査では粒径の大きな海塩粒子や波しぶきなどの飛沫も捕集することができる土研法(建設省土木研究所で考案)を採用した。なお、飛来塩分量の測定は、塩分の飛来が最も多いと思われる9月から2月までの6ヵ月間行った。

また、海水が直接捕集される場合を避けるため捕集器は海岸より77m、高さ1.5mの砂浜上に設置し、飛来塩分量の測定を行った(写真-1)。

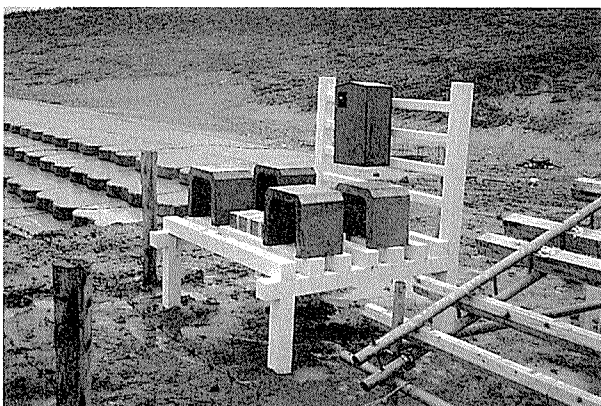


写真-1 飛来塩分捕集器と暴露供試体

その結果、図-3のように日平均飛来塩分量は1月で最も多い36mdd (mg/dm²・day)を示し、各地の飛来塩分量に比べ著しく大きく、塩害対策の必要性が裏付けられた。塩分の飛来傾向は山形県酒田海岸の測定結果と類似しており、距離的にも近いことから、本橋に飛来してくる月別の塩分量は酒田海岸と同様な傾向を示すものと考えられる。

3.2 含有塩分量調査

本調査は、現地に暴露したコンクリート供試体の塩分浸透状況を調査することにより、本橋に対する塩害対策の必要性を確認するために行ったものである。

(1) 供試体の製作および暴露方法

供試体の寸法は10×10×20cmとし、コンクリートの配合は表-2に示す上部工のコンクリートと同配合とした。供試体は建設中の岩城アイランドブリッジに近い砂浜上に150×150cmの架台を設置し、暴露した。暴露状況を写真-1に示す。なお、供試体の半数は桁下面を想定して、雨が直接あたらないようにU字溝をかぶせて暴露した。残りの半数は張出し部を想定して、雨が直接あたる状態で暴露した。

各供試体は1面からのみ塩分を浸透させるため5面をしゃ塩性に優れたエポキシ樹脂塗料でシールし、10×10cmの開放面を海側に向けて暴露した。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(g/m ³)
					W	C*	F	S	G	
20	8	41.2	4.5	28.3	166	403	-	486	1216	4030

*早強セメントを使用

(2) 含有塩分量の測定

暴露後、開放面と平行な面でコンクリートを14mm間隔(うち4mmはダイヤモンドカッターの刃の厚さ)で切断分割し、それぞれを微粉碎して含有塩分量を測定した。塩分の分析は日本コンクリート工学協会の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」⁴⁾に準じて行った。

なお、含有塩分量の測定は5ヵ月、1年6ヵ月、2年8ヵ月、5年暴露後にそれぞれ行った。

(3) 測定結果

表面から深さ1cmでの全塩分量を図-4、図-5から見ると、わずか5ヵ月の暴露で、コンクリート1m³あたりの塩化物イオン量は、U字溝をかぶせた供試体で約3kg、雨が直接あたる供試体で約1.5kgと非常に大きな値を示した。

既往の研究によると、塩化物イオンによる鉄筋の発錆限界値は1.2~2.5kg/m³の範囲であることが指摘されている⁵⁾。

かりにコンクリート中の鉄筋が腐食し始める塩化物イオン量を1.2kg/m³とすると、5年の暴露で、鉄筋が腐食し始める深さ(かぶり厚さ)は、U字溝をかぶせた供試体で約4cm、雨が直接あたる供試体で約3cmとなり、本橋付近はコンクリート構造物にとって、塩害対策上、非常に過酷な環境下にあることがうかがえる。なお、雨が直接あたる供試体の方が、あたらない供試体に比べ塩分の浸透が少なくなっている。これは、前者では、付着した塩分の一部が雨で流されるためと考えられる。

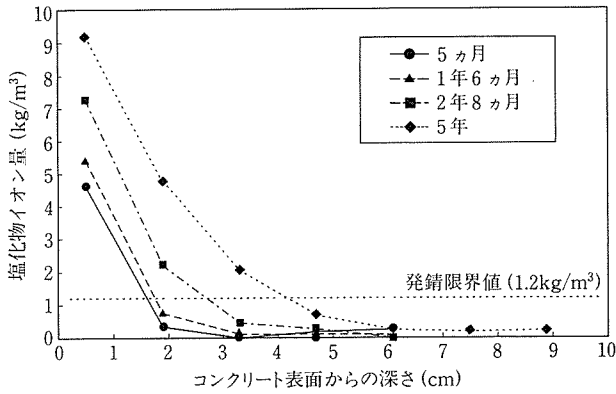


図-4 塩分浸透状況(U字溝あり)

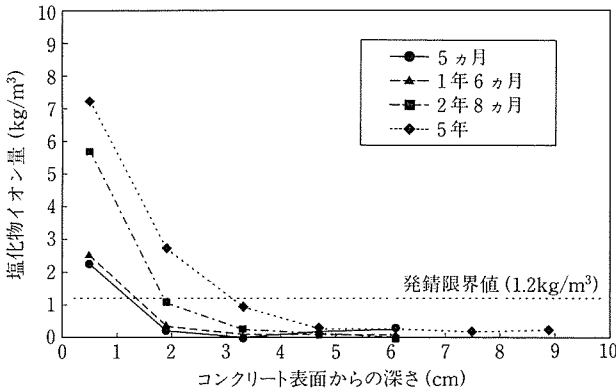


図-5 塩分浸透状況(U字溝なし)

本結果から、雨が当たる張出し部より、あたらない桁下面の方がより厳しい塩害環境下にあることが予想される。

(4) 塩分浸透の将来予測

図-6は図-4の結果から、上部工の鉄筋位置(かぶり7cm)での塩化物イオンの経時変化を推定したものである。建設後約16年で鉄筋の腐食が想定され、上部工に対する適切な塩害対策が必要であると判断される。

なお、この曲線は暴露5年後の含有塩分量調査のデータから表面塩化物イオン量(C_0)および塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)を算定し、Fickの第二法則により求めたものである。

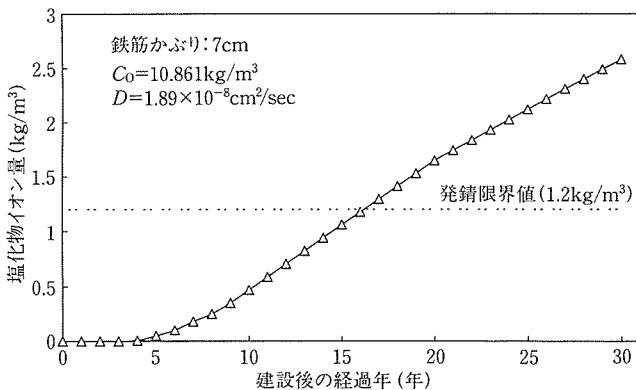


図-6 鉄筋位置における塩化物イオンの経時変化の推定値

4. 塩害対策の基本方針

日本コンクリート工学協会の「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」⁶⁾では、コンクリート構造物の防食方法を、コンクリートのみで対処する第1種防食法と、それ以外の防食法である第2種防食法とに分けている。本橋の場合、環境条件が厳しいため第1種防食法だけでは対策不十分と考え第2種防食法も併用することとした。

第2種防食法としては、エポキシ塗装鉄筋、電気防食、防食型枠、塗装などがあるが、防食性、施工性、経済性、実績等について総合的に検討した結果、本橋では塗装により対処することとした。

図-7は建設1年後に桁下面に塗装を施した場合、鉄筋位置(かぶり7cm)での塩化物イオンが経時的にどのように変化するかを示したものである。塩化物イオンは塗装後も増加するが、飛来塩分が塗装によって遮断されるため、塗装20年後付近から、発錆限界値(1.2kg/m³)以下の一定値に落ち着くものと推測される。この曲線は塗装後は表面からの塩化物イオンの供給がなく、コンクリート中の塩化物イオンは見かけの拡散係数(D)で再拡散するものと仮定し、差分法により計算して求めたものである。

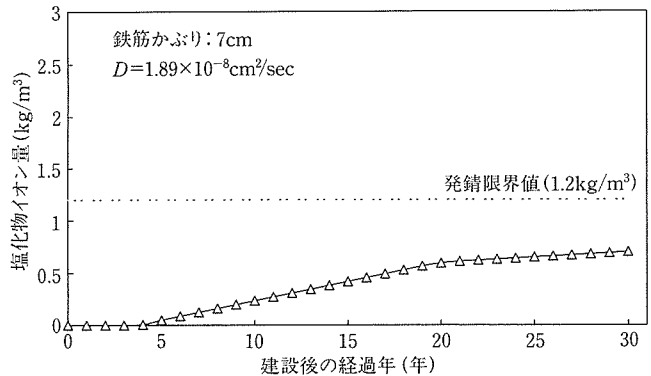


図-7 塗装後の鉄筋位置における塩化物イオンの経時変化の推定値

なお、防食対象箇所は上部構造とし、下部構造については鉄筋のかぶりを大きくしていること、コンクリートが海水中に浸漬されていること(酸素溶解度が小さく拡散速度も非常に遅いため鉄筋は腐食し難い)から塗装しないことにした。

5. 塗装材料の選定

コンクリートの塗装材料としては、一般的に反応硬化型の樹脂系とセメントを混和したポリマーセメント系が多く用いられている。塩害対策では、プライマー、パテ、中塗り、上塗りの組み合わせから成る樹脂系塗料が多く用いられている。このうち、プライマー、パテについてはエポキシ樹脂系が、中塗りについてはエポキシ樹脂系、ポリウレタン樹脂系、ポリブタジエン樹脂系等がそれぞれ使われている。また、上塗りについては、ポリウレタン樹脂系が多く使われているが、最近では耐候性に優れているふっ素樹脂系やアクリルシリコン樹脂系等も使われはじめている。

本橋では、各公的機関で定めている指針や便覧、各塗料メーカーの資料、施工実績等に基づき、塗装仕様を3種類選定し、各種試験を行った。試験は各公的機関で定められている規格項目⁷⁾を参考に、耐候性、しゃ塩性、耐アルカリ性、コンクリートとの付着性、ひび割れ追従性等について行った。また、本橋の立地条件を考慮し、耐凍害性、耐摩耗性についても試験を行った。

その結果、選定した塗装仕様および性能を表-3、表-4にそれぞれ示す。

表-3 塗装仕様

工程	使用材料	目標膜厚 (μm)	標準使用量 (kg/m^2)	塗装方法
プライマー	エポキシ樹脂プライマー	—	0.10	はけ、ローラー
パテ	エポキシ樹脂パテ	—	0.30	へら、こて
中塗り	厚膜型エポキシ樹脂塗料中塗り	140	0.38	はけ、ローラー
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	25×2	0.12×2	はけ、ローラー

表-4 選定した塗装仕様の性能

試験項目	公的機関の規格 (最小～最大)	選定した塗装 仕様の性能	試験方法
塗膜の外観	均一性・流れ・むら・割れ・はがれを認めない	同 左	JIS K 5400 7.1
耐候性	白亜化はなく、塗膜の割れ、はがれを認めない	同 左	JIS K 5400 9.8.1
しゃ塩性 ($\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{日}$)	10^{-2} ～ 10^{-4}	0.34×10^{-3} 以下 (分析限界値)	道路橋の塩害対策指針(案)・同解説
耐アルカリ性	ふくれ・割れ・はがれ・軟化・溶出を認めない	同 左	JIS K 5400 8.21
コンクリートとの付着性 (kg/cm^2)	10以上または界面破壊がないこと	27.3 (母材破壊)	JIS A 6909 5.8
ひび割れ追従性(mm)	0.09 ～1.41	1.60	梁供試体の曲げ載荷試験
耐摩耗性 (g)	—	+0.07	JIS A 5209 7.7
耐凍害性 (耐久性指数)	—	102.9	JIS原案「コンクリートの凍結融解試験法」

なお、上塗りについては、塗りむらによる膜厚のバラツキやピンホール等の塗膜欠陥が生じる可能性を考慮し、2回塗りとした。

6. 塗装工事

塗装工事は、AI橋台とPI橋脚との間に塗装ヤードを設置し、主げた製作と平行して行った。

また、塗装にあたっては、温度、湿度、コンクリートの表面含水率、付着塩分量、塗膜厚等、塗膜の良否に影響を及ぼすと思われるこれらの項目を重点的に管理した。

6.1 塗装工程

(1) 下地処理

本作業は、コンクリート表面に付着している塩分、油脂類、ゴミ、ホコリ等を除去することにより、コンクリート下地と塗膜との付着性を良好に保つために行ったものである。除去作業は、通常サンドブラストによって行われることが多いが、本橋梁の場合、環境汚染を考慮し、ディスク

サンダーを用いて行った。

なお、本作業の処理時間は既往の報告⁸⁾を参考にして、 1m^2 あたり3分間のペースで行った。

(2) 前処理

本作業は、中塗り塗装のために平滑な下地を作るもので、プライマーおよびパテ処理からなる。プライマーの塗布はローラー塗りで行ったが、コンクリートの巣穴など部分的にはけを用いた。エポキシ樹脂パテは2液性で粘度が高いため、混合攪拌は十分気を付けて行った。塗布作業はゴムへらやゴムこてを用い、コンクリート下地にすり込むように行った。巣穴に押し込んだパテ材のたれやへこみについては、再度こて仕上げを行い、平坦になるよう努めた。

(3) 中塗り

中塗りは防食の主体となるもので、塗膜に肉厚を与え、塩分、水分、酸素等の浸透をしゃ断し、鋼材の腐食防止やコンクリートの劣化を防止することを目的としている。

塗布作業はローラーを用いて、目標とする膜厚が均一に確保できるように注意深く行った。膜厚が薄くなりがちなコーナー部についてははけを併用し、入念に塗布した。

(4) 上塗り

中塗りを保護する上塗りは、外界に接する最上層の塗膜で、耐候性、耐久性に優れ、かつ美観を保つ工程である。

本作業で用いたふっ素樹脂塗料は粘度が低いためローラーで効率よく塗布作業を行うことができた。上塗り塗装後の仕上がり状態も良好で、周辺環境とも調和がとれているものと確信している(写真-2)。



写真-2 主げた塗装後の岩城アイランドブリッジ

6.2 施工管理

本塗装工事における施工管理は、表-5に示す管理項目を設定して行った。結果の概要は以下の通りであった。

(1) 温度および湿度

温度および湿度については、自記温湿度計を用いて管理した。塗装工事は、平成8年6月～11月、平成9年3月末～11月と冬期を避けて行ったため、施工時の温度は 5°C を下回ることにはなかった。また、夏期においても、風通しが良いため極端な温度上昇は見られなかった。湿度も、雨の日を除き全く問題なく、結露も生じなかった。

表-5 施工管理基準と管理結果

管理項目	管理基準	管理方法	管理頻度	管理結果*
温度	5℃～40℃	自記温湿度計	毎 日	5℃～32℃
湿度	85%以下	自記温湿度計	毎 日	25～85%
結露	ないこと	目視による	塗 装 日	なし
表面含水率	10%以下	モルタル水分計	プライマー塗装日	3.9～5.5%
付着塩分量	100mg/m ² 以下	ガーゼ拭き取り法	プライマー塗装日	5～45mg/m ²
材料使用量	標準使用量	空缶検査による	各材料ごと	標準使用量異常
付着強さ	20kg/cm ² 以上	簡易式垂直引張試験機	300m ² に1回	22.3～36.9kg/cm ²
塗膜の厚さ	190μm以上	顕微鏡による実測	300m ² に1回	195～438μm
仕上げ状態	異常がないこと	目視による	上塗り塗装後	異常なし

*雨天の日は塗装を中止した。したがって温度、湿度、結露については雨天日を除いた結果を示す。

(2) 表面含水率

高周波を応用したモルタル水分計を用いて管理したが、雨天の日を除き10%を超えることはなかった。コンクリートが十分養生されていたこと、風通しが良いことなどのためと思われる。

(3) 付着塩分量

付着塩分は、50×50cmの測定箇所をガーゼで拭き、あらかじめビーカーに入れていた精製水で洗って採取した。

測定は北川式塩素イオン検知管を用いて行ったが、100mg/m²を超えることはなかった。

(4) 付着強さ

サンドペーパーで目荒らした塗膜の表面に4×4cmの鋼製付着子をエポキシ樹脂接着剤で取り付けた後、簡易式垂直引張試験機にて付着試験を行った。付着強度はいずれも20kgf/cm²以上を示し、破壊場所もコンクリート破壊、もしくはコンクリートを伴う破壊であり、付着力は良好と思われる。

(5) 塗膜の厚さ

コンクリートに塗装した塗膜の厚さは、一般的に、①ウエットゲージで未乾燥の膜厚を測定し、乾燥膜厚に換算する②コンクリートに埋め込んだ金属板上の膜厚を膜厚計で測定する、等の方法が採用されている。しかし、これらの方法は意図的な要素が入り込みやすいため、信頼性に欠けることが難点である。

したがって、本工事では付着強さを測定した個所の塗膜が付いたコンクリート片を採取し、塗膜断面を平滑に研磨した後、顕微鏡で観察して実測した(写真-3)。

その結果、中塗りと上塗りを加えた総合膜厚で195～438μmと、測定したいずれの個所においても目標膜厚(総合膜厚で190μm)を確保していた。なお、バラツキが大きいのは下地の凹凸によるもので、凸な下地では膜厚が小さく、

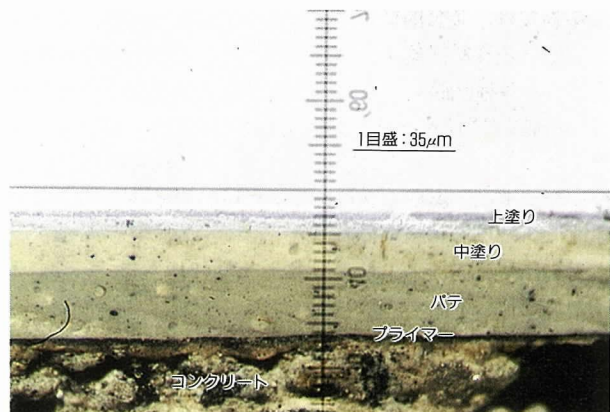


写真-3 塗膜断面の一例(総合膜厚:約245μm)

凹な下地では大きくなっていた。

7. おわりに

本橋は海上橋であり非常に過酷な環境であるため、塗装による塩害対策のほか、構造的に断面形状を箱げたにしたこと、架設工法として押出し工法を採用したこと、等による対策も講じている。また、施工後は塗装した構造物の状態を的確に把握するため、定期的に追跡点検を行う必要がある。本橋では、塗装による防食効果を確認するため、現在、「モニター供試体による塗装後の追跡調査について」の検討を行っている。本報告が、コンクリート塗装工事の発展に向けての一助となれば幸いである。

最後に、本塗装工事の設計・施工にあたり、ご指導、ご助言をいただいた関係各位に心から厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、1984.2
- 2) 佐々木慎一ほか：コンクリート中への飛来塩分の浸透、第35回北海道開発局技術研究発表会、pp141～146、1991
- 3) (株)セメント協会/耐久性専門委員会報告D-3「耐久性を阻害する要因マップ」その3、pp25～27、1988.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」、1987.4
- 5) 岸谷孝一、西澤紀昭ほか編：コンクリートの耐久性シリーズ 塩害(I)、技報堂出版、1986.5
- 6) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)、1983.2
- 7) 例えば阪神高速道路公団、日本材料学会：コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説、1989.3
- 8) 大庭光商ほか：コンクリート塗装の施工について、土木学会東北支部技術研究発表会、pp500～501、1991

【1998年2月24日受付】