

# 既設コンクリート構造物に施工した 表面塗装材料の耐久性評価

守分敦郎<sup>1</sup>・三浦成夫<sup>2</sup>・長滝重義<sup>3</sup>・大即信明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京工業大学大学院博士課程(東亜建設工業勤務) (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>東京ガス(株)袖ヶ浦工場 施設部(〒299-02 千葉県袖ヶ浦市中袖1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

本研究は、塩害対策としてコンクリート表面に施工される塗膜の耐久性評価を行ったものである。検討方法は、先ず代表的な数種類の塗膜の促進試験により、耐候性、伸び性能、遮塩性、酸素透過性、水蒸気透過性等の評価を行い、最適と思われる塗膜を選定した。さらに、選定した塗膜を既設コンクリート構造物に施工し、8年経過した時点で外観調査、付着強度、ひびわれ追従性等の検討を行い、実構造物レベルにおける塗膜の耐久性評価を行った。

**Key Words:** concrete surface coating, durability, accelerated test, existing structure, marine environments

## 1. はじめに

港湾コンクリート構造物は、厳しい塩害環境に建設されるため、構造物の形式によっては激しい塩害を受けることが報告されている<sup>1),2)</sup>。塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物に対する補修工法の一つとして、コンクリート表面を樹脂で覆う「表面処理工法」があり、既に数多く施工されてきている。しかし、表面処理工法の中の表面塗装において、コンクリート表面に塗られた塗膜は、厳しい海洋環境に直接面することとなるため、その耐久性を適切に評価することは、この工法の耐用年数を評価する上で大変重要なこととなる。これまでにも、塗膜の耐久性について暴露試験等によって検討されその結果が報告されているが<sup>3)</sup>、塗膜の暴露環境は、構造物によって大きく異なり、実構造物における塗膜の耐久性が検討された例は少ないようである。

筆者らは、塩害を受けた栈橋に対して断面修復工法および表面塗装を用いた表面処理工法を適用し、塗膜の耐久性や塩化物イオン分布の変化あるいは内部鉄筋の腐食状況等の補修効果について追跡調査を実施してきた<sup>4),5)</sup>。

本文は、これら追跡調査のうち、栈橋に塗装されて8年経過した塗膜の耐久性について、促進試験結果と比較検討して評価した結果を報告するものである。

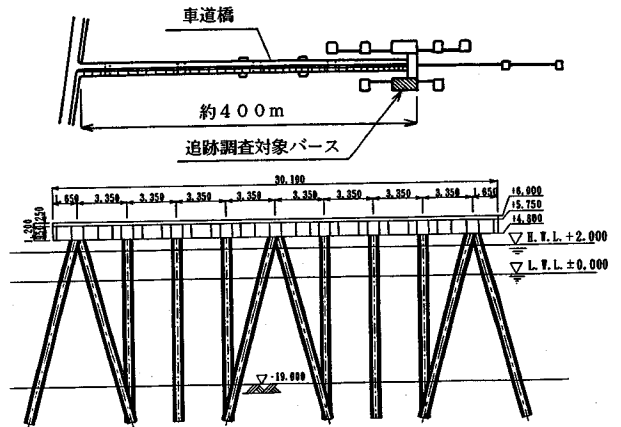


図-1 検討対象とした栈橋の概要

表-1 コンクリートの配合

G max (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					セメント	水	粗骨材	細骨材	AE減水剤
2.5	1.2	4	5.0	41.8	30.2	15.1	11.2	79.5	0.121

注) 設計標準強度  $f'_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$   
 セメント: 普通ポルトランドセメント  
 細骨材: 山砂, FM 2.62, 表乾比重 2.61  
 粗骨材: 川砂利, FM 6.98, 表乾比重 2.66

## 2. 構造条件と劣化状態および補修方法

### (1) 構造条件

検討対象とした構造物は、図-1に示すように東京湾に

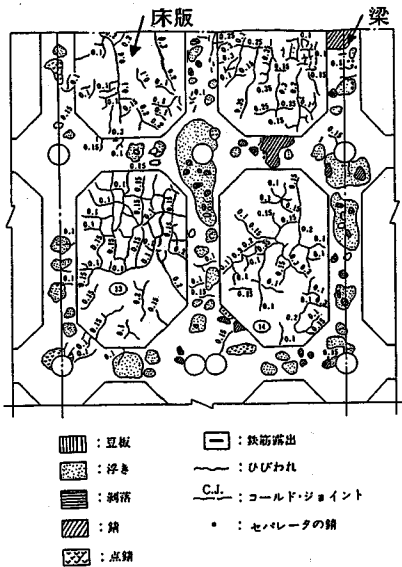


図-2 棧橋上部工下面の劣化状況

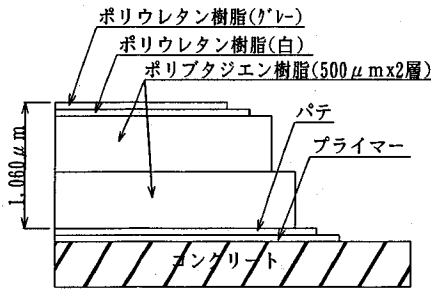


図-3 塗装仕様

約400m突出した鋼管杭式棧橋であり、上部工は鉄筋コンクリート製の梁およびスラブより構成されている。

上部工の梁底面のレベルはL.W.L.+4.80m床版底面はL.W.L.+5.75mにある。また、この構造物の建設位置は、東京湾の東側に位置し、建設地点における波浪条件は最大波高で約3.0mである。従って、海洋コンクリート構造物の防食指針(案)<sup>9)</sup>によると、棧橋上部工の環境条件は飛沫帯あるいは海上大気中に分類される。

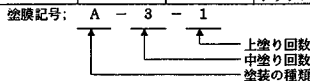
なお、施工記録より本棧橋上部工には表-1に示す配合のコンクリートが使用された。

## (2) 劣化状態と補修方法

この棧橋は、建設後約14年経過した時点において図-2に示す劣化現象が確認された。床版にはコンクリートの

表-2 検討対象とした塗装仕様

塗膜記号	前処理		中塗り		上塗り
	プライマー	パテ			
A-3-1	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂 300μm x 3層 = 900μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
B-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型エポキシ樹脂(無溶剤型) 140μm x 2層 = 280μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
B-3-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型エポキシ樹脂(無溶剤型) 140μm x 3層 = 420μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
C-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂 320μm x 2層 = 640μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
C-3-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂 320μm x 3層 = 960μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
C-4-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂 320μm x 4層 = 1280μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
C-3-0	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂 320μm x 3層 = 960μm		無し
C-3-1	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂 320μm x 3層 = 960μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
C'-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリブタジエン樹脂(厚塗り型) 500μm x 2層 = 1000μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
D-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂(溶剤型) 70μm x 2層 = 140μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
D-3-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂(溶剤型) 70μm x 3層 = 210μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
E-2	ポリウレタン樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂(柔軟型) 70μm x 2層 = 140μm		
E-3	ポリウレタン樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂(柔軟型) 70μm x 3層 = 210μm		
F-2-2	ポリウレタン樹脂	ポリウレタン樹脂	厚膜型ポリウレタン樹脂(無溶剤型) 250μm x 2層 = 500μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
F-3-2	ポリウレタン樹脂	ポリウレタン樹脂	厚膜型ポリウレタン樹脂(無溶剤型) 250μm x 3層 = 750μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
F'-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	厚膜型ポリウレタン樹脂(無溶剤型、汎用型) 270μm x 2層 = 540μm		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm
BF-2-2	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂(無溶剤型)140μm x 1層 ポリウレタン樹脂(無溶剤型)270μm x 1層		ポリウレタン樹脂 30μm x 2層 = 60μm



収縮によるものと思われるひびわれが下面全体に見られ、一部の鉄筋には部分的腐食が認められた。また、梁下面には、スターラップを中心とした腐食による「浮き」や「錆汁」が確認された。このように劣化した構造物に対して、鉄筋腐食が激しい部分は鉄筋の裏側までコンクリートを取り除き、ポリマーセメントコンクリートを用いた断面修復を行い、その後下面全体にポリブタジエン樹脂を中塗りに用いた図-3に示す仕様の塗装を行った。

## 3. 促進耐候性試験による塗膜の評価

構造物の補修に先立ち、コンクリート構造物の表面塗装材料として開発され、しかも比較的施工実績の多い数種類の塗膜について促進耐候性試験を行い、構造物への適用性の評価を行った。

### (1) 検討対象とした塗装仕様

検討を行った塗装は、表-2に示す17種類の仕様である。これらの仕様は、塗装材料の種類の外に中塗りの膜厚の影響や、上塗りの有無の影響(C-3-0とC-3-1の比較)についても検討できるよう配慮した。

試験は、70×70×10(mm)のモルタル板にプライマー～

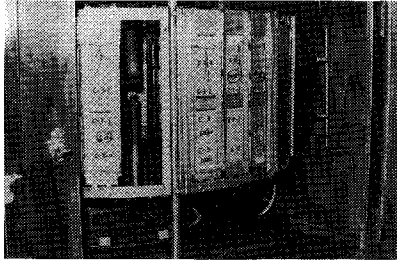


写真-1 促進試験の概要

パテ～中塗り～上塗りを施した塗膜と、ブリキ板上に中塗り～上塗りを塗布し、アマルガム法により剥離させた遊離塗膜の2種類の試料を試験項目に合わせて用いた。従って、遊離塗膜試料にはプライマーやパテが使用されていない。なお、試料の作成に当たっては、ウェットフィルムゲージを用いて膜厚を管理した。

## (2) 試験方法および試験項目

### a) 促進試験の方法

促進試験は、JIS K 5400 に従ってサンシャインカーボンアークウェザーメーターを用いて行なった。塗膜の性能試験は、サンシャインカーボンウェザーメーターを実施(300時間、600時間、1000時間)したものと、初期のものに対して、①～⑧の試験を実施した。さらに、一部の塗膜に対しては2000時間まで促進試験を実施した後、塗膜の性能を評価した。試験機の概要と供試体の暴露状況を写真-1に示す。

### b) 塗膜の性能試験項目と試験方法

#### ① 耐候性試験

モルタル試料の塗膜の表面を指頭で軽くこすることにより白亜化の程度を調べ、塗膜のわれ、はがれの程度を観察した。さらに、電子顕微鏡により塗膜の劣化状況を確認した。

#### ② 遮塩性試験

70×70 (mm)の遊離塗膜を拡散セル<sup>7)</sup>にはさみ、試験開始後60日経過した時点で蒸留水側のセルより溶液を一定量採取し、透過した塩化物イオン量を電位差滴定法により測定し、塗膜の塩化物イオン透過性を評価した。

#### ③ 耐アルカリ性試験

モルタルに塗装した供試体を、飽和水酸化カルシウム水溶液に30日間浸漬した後引き上げ、ふくれ、われ、はがれ、軟化、溶出の有無を確認した。

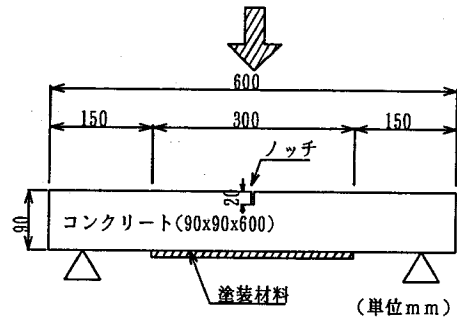


図-4 梁によるひびわれ追従性試験

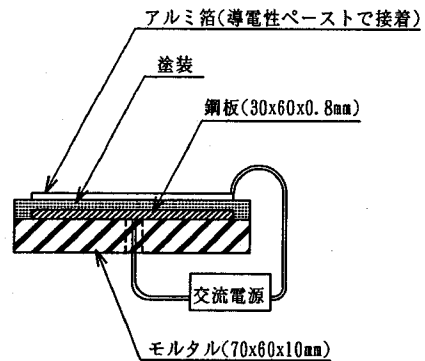


図-5 塗膜の交流抵抗測定

#### ④ モルタルとの付着性試験

モルタル供試体の塗装面に新しいカッターナイフの刃(JIS K 5400)により下地のモルタルに達するまで、3mm間隔で縦横6本づつ切傷を入れて25個のます目を作り、その上にセロハン粘着テープ(JIS Z 1522)を完全に密着させ、テープをいっきに剥がした後に残るます目の残存数を調べた。

#### ⑤ 伸び性能試験

JIS K 6301 に準拠して、遊離塗膜を25×120 (mm)のダンベル状1号試験片を作成し破断まで引張り、塗膜の伸び率を計測した。さらに一部の塗膜に対して、ひびわれ追従性試験として、図-4に示すコンクリート供試体(90×90×600(mm))の下面に塗装を施し、コンクリート供試体の引張縁側に発生する曲げひびわれに対する塗膜の追従性についても評価した。

#### ⑥ 酸素透過性試験

遊離塗膜をφ18mmに打ち抜き、塗膜を通過した酸素の還元反応によって生じる電流変化を計測する方式の、フィルム酸素透過率計を用いて、6時間の間に塗膜を透過する酸素の量を測定した。

#### ⑦ 水蒸気透過量試験

JIS Z 0208 に準拠して、遊離塗膜をφ60mmで打ち抜

表-3 試験結果(その1)

試験項目	塗膜記号 膜厚(μm) 促進時間(時)	A-3-2	B-2-2	B-3-2	C-2-2	C-3-2	C-4-2	C-3-0	C-3-1	C'-2-2
		960	340	480	700	1020	1340	960	990	1060
耐候性試験	0	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し
	300	白亜化あり 光沢低下	光沢低下	光沢低下	光沢低下	光沢低下	光沢低下	漆褐色に 変色	光沢低下	光沢低下
	600	同上	—	同上	—	同上	—	同上	—	同上
	1,000	同上	—	同上	—	同上	—	同上	—	同上
	2,000	—	—	—	—	—	—	同上	—	白亜化あり 光沢低下
塩溶性試験** (10 <sup>-2</sup> mg/cm <sup>2</sup> ・日)	0	0.0	0.0~0.15	0.0	0.10~0.20	0.0	0.0	0.0~0.15	0.0~0.15	0.0
	300	0.0~0.08	—	0.0~0.10	—	0.0~0.08	—	0.0~0.23	0.0~0.10	0.0
	600	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0~0.80	0.0	0.0
	1,000	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0~1.70	0.0	0.0
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
耐アルカリ性試験	0	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し
	300	25/25	24/25*	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25	25/25
	600	24/25*	—	23/25*	—	25/25	—	—	—	25/25
	1,000	24/25*	—	21/25*	—	25/25	—	—	—	23/25*
	2,000	24/25*	—	24/25*	—	25/25	—	—	—	25/25
伸び性能試験 (%)	0	2.4	3.8	3.5	173 (132)	186 (145)	174 (135)	858	203 (157)	195
	300	—	—	—	—	174 (155)	—	—	—	185
	600	0.7	—	1.0	217 (211)	140 (123)	233 (214)	373	254 (254)	194
	1,000	1.9	—	2.5	195 (135)	192 (142)	245 (142)	370	290 (163)	174
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	—	110
ひびわれ促進試験	0	0.08	—	0.18	—	4.61	—	—	—	2.35
	300	0.0	12.9	0.0	36.0	17.0	0.0	100	28.0	0.0
	600	0.0	—	0.0~15.0	—	17.0	—	18.0	0.0~8.0	0.0
	1,000	0.0~3.6	—	0.0	—	0.0~5.1	—	0.0~8.8	0.0~4.8	0.0
	2,000	—	—	0.0	—	0.0	—	0.0~10.8	0.0~5.8	0.0
水蒸気透過性試験 (ng/cm <sup>2</sup> ・日)	0	0.5	1.2	2.5	12.4	13.2	8.9	15.2	13.8	9.5
	300	0.8	—	0.9	—	11.6	—	19.3	16.7	8.1
	600	2.3	—	3.8	—	14.2	—	18.3	16.4	7.3
	1,000	0.3	—	1.8	—	9.5	—	21.0	14.4	8.0
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	—	9.3
交流抵抗値測定 (10 <sup>7</sup> Ω at1000Hz)	0	2.6	—	1.8	—	3.1	—	4.0	4.8	2.3
	500	1.4	—	0.79	—	1.07	—	1.8	2.7	—
	1,000	2.8	—	1.5	—	1.1	—	1.6	3.0	1.6
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	—	0.4

注)\*: 判離は、いずれもモルタル部分である。  
 \*\*: 表中の数値「0.0」は、測定限界以下を示す

き、一方の側を相対湿度90%、他の側を吸湿剤によって乾燥状態に保ち、24時間で塗膜を通過する水蒸気量を測定した。

⑧ 塗膜の交流抵抗値の測定

供試体は、図-5に示す様に70×60×10 (mm)のモルタルの表面に30×60×0.8 (mm)の鋼板を貼付け、その上にプライマー～上塗りまでの塗装を施した。試験は、NaClを3%含む水溶性高分子溶液により塗装表面にアルミニウム箔を貼り付け、60分経過後にアルミ箔と鋼板を電極として周波数1000Hzの交流電流を通电したときの交流抵抗値を測定した。

(3) 試験結果

塗膜の試験結果を一覧にしたものを、表-3、表-4に示す。以下にそれぞれの試験結果の概要を示す。

a) 耐候性

いずれの仕様の塗膜にも、光沢の低下が見られ、数種類塗装仕様においては若干の白亜化も観察された。こ

れらの塗膜のうち、白亜化が軽微であった「C'-2-2」「BF-2-2」の塗装仕様については2000時間まで促進試験を行ったが、1000時間の場合に比較して白亜化が若干進んだ程度で、顕著な劣化は確認されなかった。これら塗装の上塗り材は、非黄変性ポリウレタン樹脂であり、これらの上塗り材は十分な耐候性を示すことが確認された。この試験結果は、山口ら<sup>3)</sup>の暴露試験結果と同様である。一方、上塗り材の無い「C-3-0」においては、中塗り材のポリブタジエン樹脂の劣化が著しく、初期のグレーから褐色に変色し、上塗り材の重要性が確認された。

顕微鏡観察の結果、上塗りの無い塗膜では写真-2に示す様に幅20~50μm深さ100~150μmのひびわれの発生が確認された。一方、上塗りのある塗装仕様おける1000時間後の観察では、写真-3に見られる様に塗膜表面に幅1~3μm程度の微細なひびわれが確認されたが、深さ方向は最大5μm程度の劣化であり、上塗り材の厚さ60μmに比較すると、1000時間の促進劣化試験の範囲では、十分余裕のある膜厚であることが確認された。

表-4 試験結果(その2)

試験項目	塗膜記号 D-2-2	D-3-2	E-2	E-3	F-2-2	F-3-2	F'-2-2	BF-2-2		
膜厚(μm)	200	270	140	210	560	810	600	470		
促進時間(時)	0	300	600	1,000	2,000	0	300	600	1,000	2,000
耐 候 性 試 験	0	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し	外觀異常無し		
	300	光沢低下	光沢低下	白濁化あり 光沢低下	光沢低下	光沢低下	光沢低下	光沢低下		
	600	同上	—	—	同上	同上	—	同上		
	1,000	同上	—	—	同上	同上	—	同上		
	2,000	—	—	—	—	—	—	白濁化あり 光沢低下		
遮 塩 性 試 験 (10 <sup>-3</sup> mg/cm <sup>2</sup> ・日)	0	0.0~0.14	0.0	0.0~0.16	0.0	0.0	0.0	0.0		
	300	0.0	—	—	0.0~0.10	0.0~0.08	—	0.0		
	600	0.0~0.60	—	—	0.0~2.0	0.0~0.60	—	0.0		
	1,000	0.0	—	—	0.0	0.0~1.20	—	0.0		
	2,000	—	—	—	—	—	—	0.0		
耐アルカリ性試験	0	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し	異常無し		
	300	25/25	25/25	25/25	25/25	24/25	25/25	25/25		
	600	25/25	—	—	25/25	20/25 *	—	25/25		
	1,000	25/25	—	—	25/25	—	—	25/25		
	2,000	25/25	—	—	25/25	24/25 *	—	25/25		
伸 び 性 能 試 験 (%)	0	5.8	7.9	25.0	32.2	33.0	38.0	102	5.4 (1.9)	
	300	—	—	—	16.0	7.0	—	116	11.5 (1.9)	
	600	—	—	5.2	15.0	8.2 (3.8)	8.7 (5.2)	144	21.4 (1.6)	
	1,000	—	—	5.5	5.7	6.7	9.9	135	48.2 (1.7)	
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	52.0	
ひびわれ追従性試験	0	0.18	—	—	0.20	0.35	—	—	1.37	
	300	10.2	0.0	19.0	0.0~8.0	0.0~10.0	0.0	0.0~2.2	0.0	
	600	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	
	1,000	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.0~10.9	0.0	
	2,000	—	—	—	—	—	—	0.0	0.0	
水蒸気透過性試験 (mg/cm <sup>2</sup> ・日)	0	1.5	6.0	19.8	5.0	2.1	1.1	9.4	1.5	
	300	1.5	—	—	3.9	2.8	—	9.4	1.1	
	600	3.0	—	—	3.8	1.5	—	6.1	1.0	
	1,000	0.4	—	—	3.6	1.2	—	5.6	2.9	
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	1.8	
交 流 抵 抗 値 測 定 (10 <sup>3</sup> Ω at 1000Hz)	0	3.0	—	—	1.2	4.3	—	3.0	3.0	
	300	2.2	—	—	0.57	3.7	—	1.9	—	
	600	1.5	—	—	1.3	2.2	—	3.5	2.2	
	1,000	—	—	—	—	—	—	—	—	
	2,000	—	—	—	—	—	—	—	0.5	

注) \*: 剥離は、いずれもモルタル部分である。  
 \*\*: 表中の数値「0.0」は、測定限界以下を示す

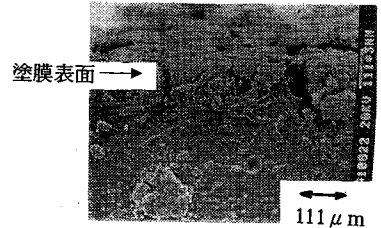


写真-2 C-3-0の顕微鏡観察  
(塗膜断面:促進1000時間)

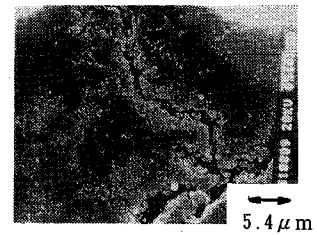


写真-3 C'-2-2の顕微鏡観察  
(塗膜表面:促進1000時間)

b) 遮塩性

遮塩性試験の結果より、同一試験条件における3個の供試体の最大値と最小値を表-3、表-4に示す。促進試験の初期においては全ての塗膜において「10<sup>-3</sup> mg/cm<sup>2</sup>・day」以下の値を示している。促進試験の影響をみると、600時間あるいは1000時間の促進で、上塗りの無い塗膜(C-3-0)や、柔軟型のポリウレタン樹脂系(E-3,F-2-2)の塩化物イオン浸透量が大きくなる傾向が確認された。しかし、他の塗装仕様においては、促進試験による遮塩性能の低下は確認されなかった。

c) 耐アルカリ性

いずれの塗膜においても塗膜のふくれやはがれなど見られず、これらの塗膜のアルカリ性に対する抵抗性の高いことが確認された。

d) モルタルとの付着性

モルタルとの付着性試験結果においては、供試体により若干ばらついた結果となった。しかし、塗膜が剥離した供試体においては、剥離はいずれもモルタル部分であり、境界面での剥離は確認されなかった。また、促進試

験が塗膜の付着強度に与える影響についても、明確な傾向は見られなかった。

e) 伸び性能

促進試験前と促進1000時間後の、塗膜の伸び率の変化を図-6に示す。測定値は、塗膜によってばらつきが大きく、従って各塗装仕様毎に平均値の変化を直線で示した。上塗りにポリウレタン樹脂、中塗りに厚膜型ポリブタジエン樹脂を用いた「塗装仕様-C」は、他の塗膜に比較して伸び率が大きく、促進試験の後においても伸び率の顕著な低下は確認されなかった。

しかし、2000時間の促進では、伸び率が大幅に低下しており、顕著な劣化傾向が認められた。

この塗装仕様において、上塗りにひびわれが入るまでの伸び率を見ると(表-3に示した「C-2-2」「C-3-2」「C-4-2」「C-3-1」の括弧内の値)、促進試験の前後で大きな違いは見られず、その値は「140%」程度(全伸び率に対して6~8割程度)であった。

試験した塗膜の中には、促進試験後の方が、伸び率が大きくなっているものがあった。これは、促進試験に

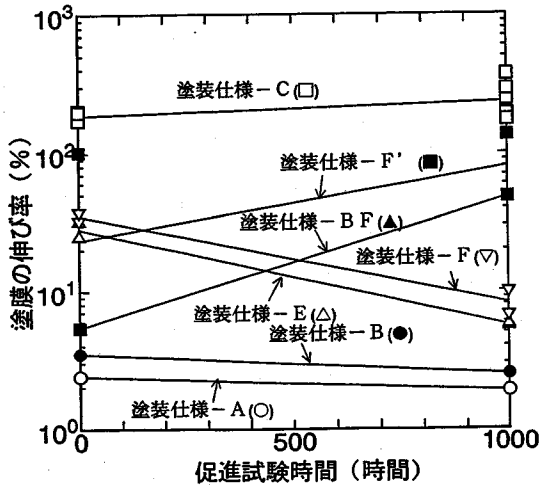


図-6 促進試験による伸び性能の変化

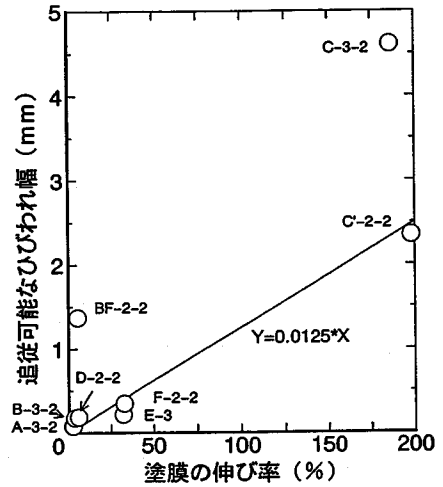


図-8 伸び性能とひびわれ追従性の関係

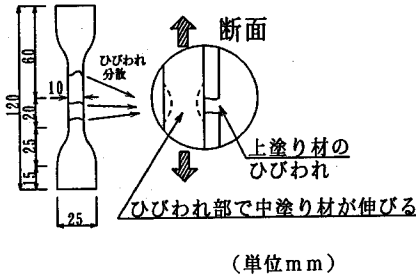


図-7 上塗りにひびわれが入った後の塗膜の伸び性状

よって上塗りのポリウレタン樹脂にひびわれが入りやすくなり、ひびわれが分散したことによって、図-7に示す様に中塗りの伸びる箇所が増加したためと判断された。具体的には、促進試験によって伸び率が最も増加した「BF-2-2」の塗膜においては、初期の伸び率試験では、破断時の供試体にはひびわれが1本しか見られなかったにもかかわらず、1000時間の促進試験後においては、最終的には21本のひびわれが確認され、上記の傾向が推測された。

仕様の異なる塗膜について、伸び率と追従可能なひびわれ幅の関係を図-8に示す。試験結果にばらつきは見られるものの、伸び率とひびわれ追従性には相関関係のあることが推測される。単一の塗膜においては、膜厚と伸び率をかけ合わせた値と追従可能なひびわれ幅と相関のあることが指摘されているが<sup>9)</sup>、中塗り材と上塗り材が異なった伸び性能を有する複合塗膜においては、その挙動は複雑な様である。

適用対象の栈橋は、設計時の鉄筋の発生応力、配筋

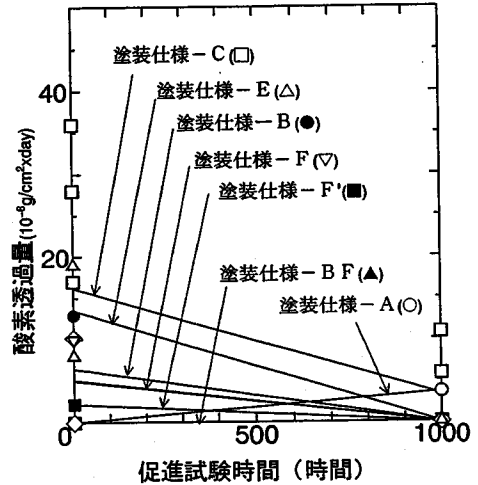


図-9 促進試験による酸素透過性の変化

およびかぶりから、活荷重作用時に拡大するひびわれ幅をコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>の式によって計算すると、0.45mm程度であった。従って、繰返し荷重を受けた場合、塗膜のひびわれ追従性が低下すること<sup>10),11)</sup>を考慮に入れると、塗膜には十分余裕のあるひびわれ追従性が求められ、ポリブタジエン樹脂を中塗り材とした「塗装仕様-C」の有効性が評価された。

#### f) 酸素透過性試験

酸素透過性試験の結果を図-9に示す。試験の結果、大部分の塗膜において、促進試験1000時間後の方が酸素透過性が低下する傾向が認められた。これは促進試験の過

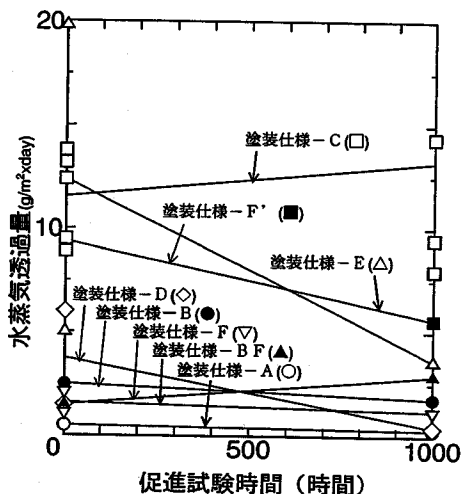


図-10 促進試験による水蒸気透過性の変化

程で、カーボンアークランプの熱等によって架橋密度が増加して、塗膜の硬化が進んだことが原因のひとつ推測される。

#### g) 水蒸気透過性

水蒸気の透過性に関する試験結果を図-10に示す。水蒸気の透過性は、仕様-C(ポリブタジエン樹脂系)、EおよびF'(ポリウレタン樹脂系)など柔軟性を有する塗膜が比較的大きい値を示している。しかし、いずれの塗装仕様においても、水蒸気の透過が確認されており、塗装をしても水分あるいはそれに溶け込んだ酸素は内部に供給されることが推測される。

これは、樹脂類の平均分子間隔が数 $10^{-10}$ m以上と大きいため、分子径の小さい水蒸気や酸素は透過されやすいためと考えられる<sup>12)</sup>。一方、これらに比較して大きい分子径を持つ、水和した塩化物イオンは、塗膜を通り抜けることが難しく、塗膜の遮塩性が確保されているものと推測される。

#### h) 交流抵抗値

コンクリート表面に塗られる塗膜は、鋼材表面に塗られる場合と異なり、塗膜自体の抵抗がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響は少ないが、抵抗値は塗膜の劣化状態を評価する上で重要な情報となる。

1000Hzで測定した交流抵抗値を促進試験の前後で比較して見ると、表-3および表-4に示す様に、促進1000時間までの範囲では、測定値に顕著な変化は見られなかった。しかし、2000時間の促進後では、抵抗値の低下が顕著となった。

表-5 塗膜の調査項目

試験項目	試験方法の概要
外観目視調査	目視により塗膜の変状を記録
付着強度試験	建研式引張付着試験(4.0cm x 4.0cm)
ひびわれ追従性試験	採取したコアによるゼロスパンデーション試験
交流抵抗測定	周波数200Hz, 1000Hzの交流電流により測定
酸素透過性試験	酸素の拡散係数試験方法(案)、JCI規準案

表-6 外観調査結果

部位	変状	浮き(m <sup>2</sup> )	ひびわれ(m)	塗膜のはがれ(m <sup>2</sup> )	塗膜のちぢみ(m <sup>2</sup> )	塗膜のふくれ(m <sup>2</sup> )	錆汁(箇所)
床版		5.72	1.80	-----	0.40	-----	12
梁		1.09	4.20	0.003	-----	0.013	3
杭頭		0.46	1.70	-----	-----	0.005	3
側面		-----	6.50	-----	-----	0.020	8
計		7.26	14.20	0.003	0.40	0.038	26

以上、a)~h)までの試験の結果以下のことが確認された。

- ① 上塗り材には非黄変性ポリウレタン樹脂を選定したが、いずれも耐候性に優れることが確認された。塗装の厚さについては、上塗り材の重要性や1000時間の促進試験における劣化深さが5 $\mu$ m程度であることを考慮に入れると、数十 $\mu$ m程度の膜厚を確保することが適切と判断される。
- ② ポリブタジエン樹脂を中塗りとした塗膜は、ひびわれ追従性に優れており、1000時間の促進試験の範囲では、伸び性能に顕著な低下は見られなかった。
- ③ 塩化物イオンの浸透性については、上塗りを行っていない「C-3-0」を除き、いずれの塗装仕様においても小さいことが確認された。

以上の検討の結果より、「ひびわれ追従性」「塩化物イオン透過性」に重点をおいた評価より、ポリブタジエン樹脂を中塗りにし、非黄変性ポリウレタン樹脂を上塗りに用いた、「C'-2-2」の塗装仕様を実構造物に採用した(図-3参照)。

## 4. 8年経過した既設構造物の塗膜の耐久性評価

### (1) 評価項目

3章での促進試験結果より最適と評価された塗装仕様を用いて、栈橋の下面約12,000m<sup>2</sup>を塗装し、その後の追跡調査を実施してきた。これまでに8年経過しており、この時点で表-5に示す項目の調査を実施し、塗膜の耐久性評価を行った。

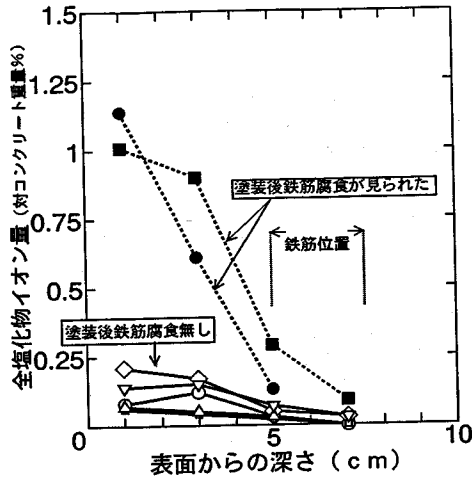


図-11 補修前のコンクリート中の塩化物イオン濃度

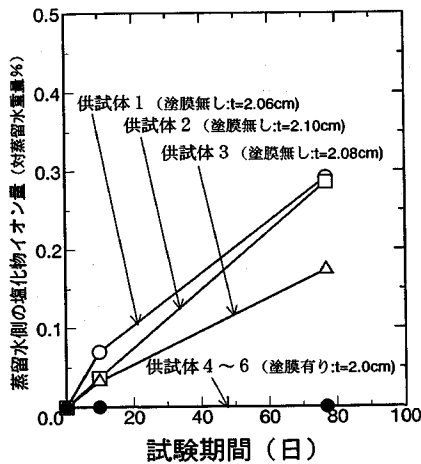


図-12 拡散セルによる塩化物イオン浸透性試験結果

## (2) 評価方法と評価結果

### a) 外観目視調査

8年経過した塗膜の外観調査結果より、塗膜に見られた損傷の数量を表-6に示す。今回の調査対象面積は約500m<sup>2</sup>であったが、塗膜自体の欠陥としての「浮き」「はがれ」「ちぢみ」「ふくれ」の発生面積は小さく、例えば「浮き」の発生率を見ると、調査面積の「1.4%」に過ぎなかった。また、塗膜自体の変色や顕微鏡観察による塗膜表面の劣化は見られず、健全な状態を保っていた。

一方この調査の結果、「塗膜のひびわれ」や「錆汁」が確認されたが、これは内部鉄筋の腐食により生じたものであった。補修前の塩化物イオン濃度分布を図-11に

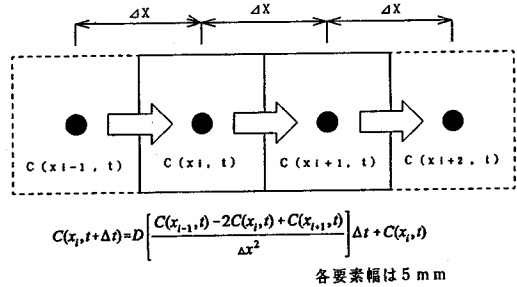


図-13 差分法による拡散モデル

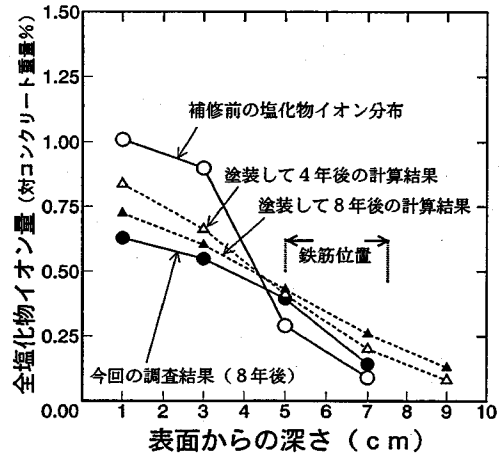


図-14 表面塗装によるコンクリート中の塩化物イオン分布の変化

示す。本調査において劣化の見られた箇所は、補修時点においてコンクリート中の塩化物イオン量の高い部分であった。従って、既にコンクリート中に多量の塩化物イオンが浸透している場合には、表面処理工法により鉄筋腐食を抑えることは難しいものと判断される。

### b) 塩化物イオンの浸透性

塗膜の塩化物イオン浸透性に関する評価は、構造物からφ50mmのコア供試体を採用し、塗装面を傷つけないようにして表層20mmをスライスカットした試料により行った。試料は、塗膜面が蒸留水側となるように拡散セルに挟み、NaClの3%溶液側から蒸留水側に浸透する塩化物イオン量を電位差滴定法により測定した。測定結果を図-12に示す。同図には、塗装の無いコンクリートの試験結果(厚さ20mm)も合わせて示してある。試験実施後77日までの測定の結果、塗膜を施した試料には塩化物イオンが検出されず、塗膜として十分な遮塩性能を有することが確認された。



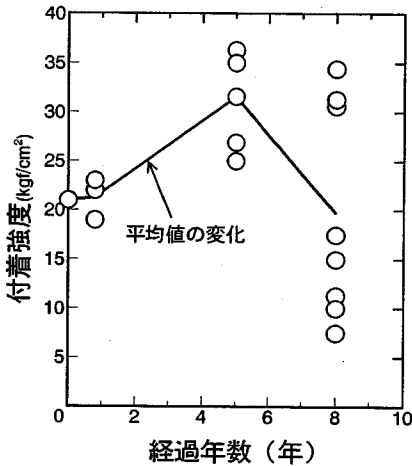


図-15 塗膜の付着強度の経年変化

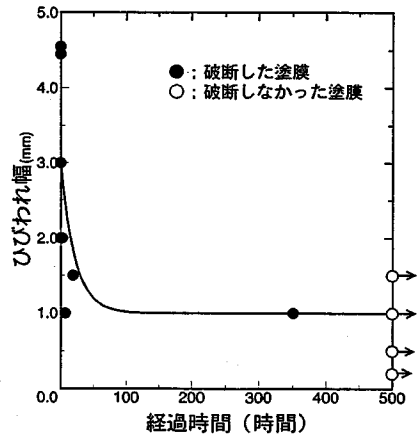


図-17 ひびわれ追従性試験結果

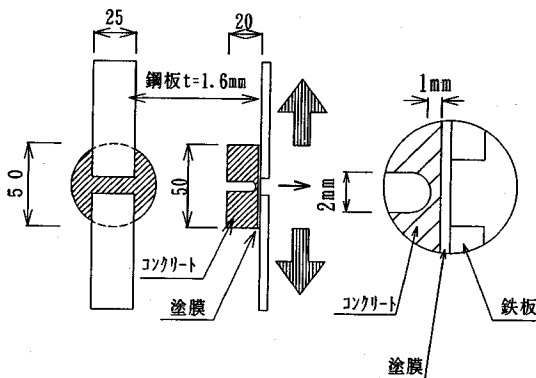


図-16 コア供試体によるひびわれ追従性試験

塗膜の遮塩性を実構造物レベルで評価するために、塗装後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を、ほぼ同位置の塗装前に実施された調査結果と比較した。

評価方法は、8年前の測定値を初期値として図-13に示すように要素間隔を5mmとした1次元差分法により、表面からの塩化物イオンの浸透がないものとして8年後を計算し、今回の調査結果とどの程度一致するか検討した。

先の鉄筋腐食が確認された部分における、計算結果と調査結果を比較したものを図-14に示す。塗膜を施すことにより、表面付近の高い塩化物イオンが内部に拡散していく様子が理解される。この傾向は他の箇所においても同様であった。さらに、8年経過後の測定結果は、表面から塩化物イオンの浸透がないものと仮定した計算結果と比較的良く合っており、ここで用いた塗膜の塩化物

イオン浸透性は、実用上無視できるものと考えられる。

表面処理工法では、既にコンクリート中に塩化物イオンが浸透している場合、補修効果が発揮されないことが指摘されてきているが<sup>(13),(14)</sup>、表面処理後の塩化物イオンの再拡散も含めて、この工法の適用性を検討する必要があることが確認された。

#### c) コンクリートとの付着特性

コンクリートとの付着特性を、建研式引張り付着試験器により調査した結果を図-15に示す。同図には、補修後これまで実施してきた引張り付着強度試験結果も示し、これらの平均値を直線で示した。この図より、付着強度の平均値には顕著な低下は見られないが、経過年数の増加に伴って、付着強度のばらつきが大きくなっている。本構造物の場合、8年後の付着強度は平均値で約20kgf/cm<sup>2</sup>であるが、10kgf/cm<sup>2</sup>以下の値も見られた。しかし、この程度の付着強度があれば、本構造物の暴露環境では「はがれ」等の顕著な劣化現象は発生していないことが確認された(表-6参照)。しかし、今後の付着強度の低下によっては、劣化発生の可能性も有り、今後の調査の必要性も認められた。

#### d) ひびわれ追従性試験

ひびわれ追従性試験は、φ50mmのコア供試体の表面20mmをスライスカットし、図-16に示す様に供試体を整形した後、両側から引張り塗膜が破断したときのひびわれ幅を計測した。さらに、コンクリート中に塩化物イオンを残したまま表面を覆う「表面処理工法」では、内部鉄筋の腐食が進行することも考えられる。従って、内部鉄筋の腐食による「鉄筋に沿うひびわれ」など持続して開くひびわれに対しても、塗膜はある程度の追従性を保有す

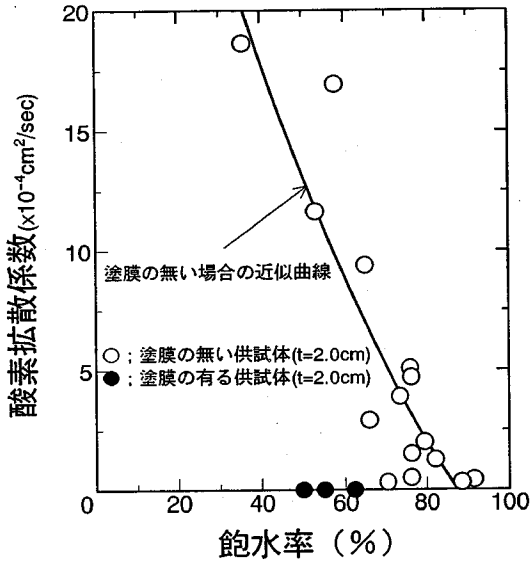


図-18 酸素拡散係数測定結果

る必要がある。ここでは、ひびわれ幅を持続させて塗膜が破壊するまでの時間を計測した。

試験の結果を図-17に示す。塗装して8年経過した塗膜は、クリープの影響が無い場合には3個の供試体のいずれも3mm以上のひびわれ幅に追従できることが確認された。このときの塗膜の破壊過程は、先ず上塗り材に亀裂が発生し、ほぼ同時に塗膜全体が破断した。事前に実施した梁によるひびわれ追従試験の結果(表-3の「C-2-2」)と比較しても、ひびわれ追従性の低下は見られなかった。

一方、クリープによる影響については、「20℃,60%」の恒温室内においてひびわれ幅を保持した場合、1mm程度のひびわれ幅でも破断する場合が確認され、塗膜のクリープ破壊の傾向が確認された。実際の構造物においても、鉄筋に沿うひびわれの幅が1mm程度まで、塗膜は追従できていることが確認された。塗膜がこの程度のひびわれ追従性を保有していたことにより、本構造物において見られた内部鉄筋の腐食によるひびわれは、その後の維持管理において順次補修していくことができた。

#### e) 酸素透過性

酸素透過性試験は、φ50mmのコア供試体の表面20mmをスライスカットし、JCI規標準案<sup>15)</sup>に従って酸素透過性を評価した。比較のために、塗膜の無い同様なコンクリート供試体についても実験した。実験結果を図-18に示す。コンクリートの飽水率を小さくすると、拡散係数が大きくなることが確認された。しかし、塗装を施した供試体

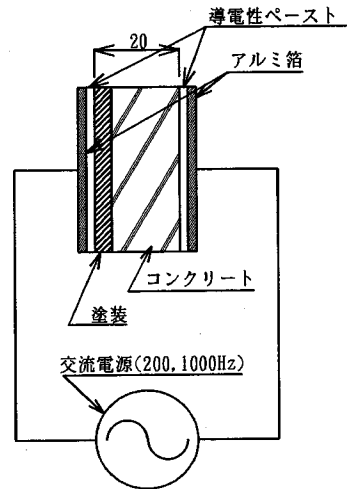


図-19 コア供試体による塗膜の交流抵抗測定方法

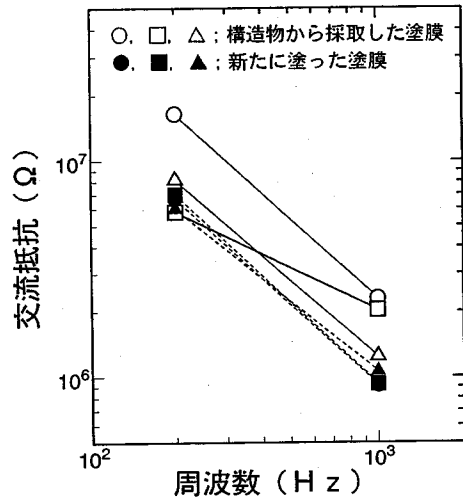


図-20 交流抵抗測定結果

においては酸素の透過が計測されなかった。これは、下地処理にエポキシ樹脂のプライマーやパテが用いられており、事前の評価試験で用いた遊離塗膜と比較して酸素遮断性能が向上したことが原因の一つと考えられる。従って、下地にひびわれが発生している部分では、先の実験と同様に塗膜を通して酸素の供給が考えられる。

試験の結果、コンクリートの酸素拡散係数は飽水率に大きな影響を受けており、本構造物から採取したコア供試体での測定では、部位の違いによる値の変化は小さく、平均76.5%程度であった。

#### f) 塗膜の電気抵抗性

塗膜の電気抵抗は、図-19に示す様に、塗装面とコン

クリート面にNaClの3%濃度の水溶性高分子溶液でアルミ箔を貼り付け、60分経過後に1000Hzの交流を流して塗膜とコンクリートの抵抗を測定した。

試験の結果を図-20に示す。新たに塗装した塗膜と8年経過した塗膜を比較すると、顕著な違いは見られなかった。先の促進試験においても、測定値に劣化の影響が見られておらず、同様な傾向を示した。

## 5. 結論

以上の結果より、以下の結論を得る事が出来た。

- (1) サンシャインカーボンアークウエザーメーターを用いた促進試験の結果、耐候性を確保するためには、上塗り材には非黄変性ポリウレタン樹脂を数十 $\mu$ m程度塗布する必要があることが確認された。また、塗装仕様としては、「ひびわれ追従性」「塩化物イオン透過性」に重点をおくと、ポリブタジエン樹脂を中塗り材とした厚膜型の塗装「仕様-C」が有効であることが確認された。
- (2) 促進試験で選定された塗膜は、棧橋の上部工の下面に塗られて8年経過しても顕著な劣化は見られなかった。
- (3) 塗膜とコンクリートの付着強度は、8年経過した後において、平均値に大きな低下は見られなかったが、測定値のばらつきが大きくなることが確認された。従って、波力等の外力が直接塗装面に作用する部材に対しては、付着強度のばらつきが塗膜のはがれの原因となるものと考えられるため、事前に十分な検討が必要と思われる。
- (4) 表面処理工法を行う時点において、コンクリート中の塩化物イオン量が多い場合、表面処理による補修効果は低いことが確認された。従って、表面処理工法により補修効果を得るためには、補修時におけるコンクリート中の塩化物イオン量分布や、塗装後の再拡散現象を検討する必要があるものと推測される。
- (5) 塗装して8年経過したコンクリート中の塩化物イオン量分布より、塗装による塩化物イオンの遮断性能は大変高いことが確認された。
- (6) 塗膜は、内部鉄筋の腐食の進行によるひびわれ発生も予想されるため、持続して開くひびわれに対しても追従できなければならない。本棧橋においては、クリープの影響を考慮に入れても「1.0mm程度」のひびわれ追従性を持つ塗膜を採用することにより、十分な効果を得ることが出来た<sup>4)</sup>。

謝辞：本研究を実施するに当たり、東京ガス(株)高岸泰弘氏、市川廣氏には実験当初から多大なご協力を頂いた。

さらに工藤文弘氏、広谷亮氏、小笠原健氏には、棧橋の追跡調査において大変お世話になった。また、室内試験やデータ整理に際して、東亜建設工業(株)田淵博氏、徳富進氏、秋山優樹氏、福田和男氏、西川正夫氏、羽瀨貴士氏、秋葉泰男氏、ショーボンド建設(株)山本幹雄氏、化工建設(株)原清氏に御助力を頂いた。ここに、本研究に御協力頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 大即信明, 原茂雅光, 濱田秀則: 棧橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技研資料No.617, 運輸省港湾技術研究所, pp.3-29, June 1988.
- 2) 市川公一, 浅野泰史, 守分敦郎, 飯田薫: 8年経過したコンクリート製港湾構造物の耐久性について, 第12回コンクリート工学年次論文報告集12-2, pp.639-644, 1990.
- 3) たとえば山田甚郎, 小林茂敏: コンクリート塗装の耐久性に関する8年暴露試験結果, セメント・コンクリートNo.514, pp.28-35, Dec.1989.
- 4) 工藤文弘, 広谷亮, 守分敦郎, 安田正樹: 補修された棧橋の耐久性について, 第13回コンクリート工学年次論文報告集13-2, pp.899-904, 1991.
- 5) Kudoh, F., Hirotoni, A., Moriwake, A. and Yasuda, M.: Study on durability of a repaired concrete structure in Tokyo bay, *Proceedings ACI International Conference in Hongkong, Volume II*, pp.1293-1307, 1991.
- 6) 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)-改訂版-, (社)日本コンクリート工学協会, p.3, 1983.2.
- 7) (社)日本道路協会:道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, pp.61-62, 1984.2.
- 8) 藤井学, 宮川豊章, 井上晋, 合川聖二郎, 小林和夫, Azevedo, L.G.: 樹脂の伸び性能と膜厚がライニングのひびわれ追従性に及ぼす影響, 第44回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.660-661, 1989.
- 9) 土木学会:平成3年度版コンクリート標準示方書 設計編, pp.85-88, 1991.
- 10) 山住克巳, 鳥取誠一: 動的荷重を受けるコンクリート表面樹脂ライニングのひびわれ追従性, 第44回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.664-665, 1989.
- 11) 井上正一, 西林新藏, 松下幸義, 伊南仁樹: 繰り返し荷重下における樹脂ライニングのひびわれ追従性, 第46回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.390-391, 1989.
- 12) 奥田聰: プラスチックによる防食技術, 日刊工業新聞社, p.49, 1982.
- 13) 浜田秀則, 福手勤, 阿部正美, 山本邦夫: コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について, 港湾技研資料No.706, 運輸省港湾技術研究所, pp.18-29, June 1991.

- 14) 片脇清士, 西崎到, 若菜和之: 表面被覆の施工時期とその効果に関する二、三の考察, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム, コンクリート工学協会, pp.7-10, 1992.12.
- 15) 耐久性診断研究委員会: コンクリート構造物の耐久性診断・評価手法に関する J C I 規準案(その4) 酸素の拡散係数試験方法(案), コンクリート工学Vol27, No.2, pp.5-8, Feb. 1989.

(1994.6.6受付)

## STUDY ON DURABILITY OF SURFACE COATINGS PERFORMED ON A EXISTING CONCRETE STRUCTURE

Atsuro MORIWAKE, Nario MIURA, Shigeyoshi NAGATAKI and  
Nobuaki OTSUKI

The durability of surface coatings is evaluated through the accelerated tests and the examination of a existing concrete structure. In the accelerated tests, weatherability, elasticity, and permeability of chloride, oxygen and vapor were tested.

The selected surface coatings through the accelerated test are painted on the existing concrete structure and have been exposed to the marine environment for 8 years. The surface coatings were sampled from the structure and external appearance, crack-bridging ability and bond strength of coatings were examined.