

4. 鋼・コンクリート合成床版の環境耐久性向上対策

－ 促進腐食試験による塗装仕様の検討 －

技術委員会 床版小委員会

春日井俊博、入部孝夫

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版¹⁾（以下、合成床版という）は、床版内部に水が浸入した場合に底鋼板上に滞水しやすく、かつ床版下面から蒸発しにくい構造的な特徴を有している。また、寒冷地では冬期に凍結防止剤を路面に散布するが、塩化物を含んだ水が床版内部に浸入、滞水すると鋼材の腐食が促進される。これらの腐食環境に対して、合成床版の耐久性は次の点で基本的に確保されていると考えられている。すなわち、合成床版は、RC床版に比べて疲労耐久性が高くひび割れが発生しにくいこと、防水層により水の浸入が防止されていること、使用するコンクリートの水セメント比が低く中性化が遅いことである。しかし、防水層は完全ではなく、コンクリートのひび割れも皆無ではないことから、水の浸入を完全に防止することは不可能であり、コンクリートも施工の良否によっては強度が弱い部分が含まれる可能性がある。したがって、凍結防止剤が使用される寒冷地において長期の耐久性を保証するためには塩化物の浸入を想定した検討が必要となるが、きびしい腐食環境における合成床版の防食性能については従来明らかにされていない。

コンクリート中の鋼材腐食に関する研究例の多くは鉄筋に関するもの^{2)~4)}である。武若ら²⁾のオートクレーブを用いた促進腐食試験は、高温、高圧下の環境により鋼材の腐食を促進して短期間に相对比较ができる手法であり、鉄筋コンクリート用防錆剤の試験方法としてJIS A 6205にも取り入れられているものである。鋼板に関するものでは、波形鋼板ウェブ橋の鋼板ウェブの下床版との境界部の腐食に関する小野らの研究⁵⁾があり、また、鋼トラスの斜材などがコンクリートに埋め込まれる境界部近傍の腐食に関する貝沼らの研究⁶⁾があるが、ここで検討対象とするコンクリート中の鋼板に関するものはほとんど見当たらない。

本研究では、凍結防止剤等の散布による塩化物イオンが床版内部に侵入した場合に、塩化物が鋼材腐食に与える影響を調べ、適切な防食方法を提案することを目的とした。検討方法は、2段階の試験とした。第1段階の試験は、合成床版をモデル化した試験体を対象

にして、既往の研究²⁾を参考としたオートクレーブを用いた促進腐食試験⁷⁾を行い、コンクリート接触面の鋼材の腐食状況を調べ、塗装により防食した試験体と無塗装の試験体とを比較することで防食方法を評価検討した。第2段階の試験は、塗装そのものの耐久性を調べる目的で実施した、複合サイクル試験とアルカリ浸漬試験である。第2段階の試験以降の研究は、製作小委員会の協力を得て、床版小委員会と共同で行った。

本報告では、以上の試験結果から得られた知見を基にして、鋼・コンクリート合成床版の環境耐久性を向上させる対策として塗装が有効であることを示す。なお、ここでいう環境耐久性とは、腐食環境に対する防食方法の耐久性のことである。

2. オートクレーブを用いた促進腐食試験

2. 1 考慮したパラメータ

オートクレーブは、コンクリート製品の蒸気養生に使う装置であるが、若武らの研究²⁾で塩分を含んだコンクリート中の鉄筋の促進腐食試験として有効であることが示されている。そこで、床版小委員会では、オートクレーブを合成床版の鋼材の促進腐食試験へ応用することを考えて、以下の試験を行った。

コンクリート中の鋼材の腐食に影響を与える主なパラメータとして考慮したものは、初期ひび割れの有無、鋼材の表面処理方法、コンクリートの配合（塩化物の有無）である。試験体名とパラメータを表-1に示す。試験は3種類の試験体で実施した。ひとつは、円柱試験体で、コンクリート中の鋼材の促進腐食試験にオートクレーブが有効であるかどうかを確認するものである。もうひとつは梁試験体で、合成床版で発生する初期ひび割れと滞水を再現しようとしたものである。残りのひとつは鋼材試験体で、円柱試験体に用いた鋼部材をコンクリートに埋め込まないで鋼部材のまま試験を行ったものである。塗装は、次の3種類とした。ひとつは鋼橋で製作時の鋼板防錆としてよく用いられている原板プライマー（無機ジンクリッチプライマー）、ひとつは鋼板とコンクリートとの接触面に用いられることが多い無機ジンクリッチペイント、残りのひとつ

表-1 考慮したパラメータ

試験体種別	試験体名	試験体数	初期ひび割れ		鋼材の表面処理方法 (注)			塩化物		オートクレーブ回数		
			あり	なし	無塗装	塗装1	塗装2	塗装3	あり	なし	2回	4回
			円柱試験体	N1	3	○	○				○	○
	N2	3	○	○				○	○			
	P1	3	○					○		○		
	P2	3	○					○		○		
	NA	3		○	○			○			○	
	NN	3		○	○			○			○	
梁試験体	A-1	1	○					○			○	
	A-2	1	○		○			○			○	
	A-3	1	○			○		○			○	
	A-4	1	○				○	○			○	
鋼材試験体	SN	3	-	-	○			-	-	-	○	
	SP	3	-	-				○	-	-	○	

(注)鋼材の表面処理方法は下記の4種類で、塗装の目標膜厚は、塗装1が15μm、塗装2, 3が75μmである。
 無塗装：プラスト (ISO Sa2 1/2) のみ行う
 塗装1：原板プライマーと部分的な補修塗装
 塗装2：プラスト後に有機ジンクリッチペイント
 塗装3：プラスト後に無機ジンクリッチペイント

は前者に比べて下地処理や温度および湿度に関する施工条件の少ない有機ジンクリッチペイントである。塩化物ありの場合は、練り混ぜ水の塩分濃度が3%となるように塩化ナトリウムを加えた。オートクレーブ回数は、はじめに実施した円柱試験体で2回 (N1、P1) と4回 (P1、P2) の2種類を検討し、2回では鋼材の腐食が十分ではなかったため、他の試験体ではオートクレーブ回数を4回とした。

2. 2 使用材料と材料試験結果

2. 2. 1 使用材料

使用したコンクリートの配合条件を表-2に示す。コンクリートは合成床版で用いられる標準的なものとした。圧縮強度は35N/mm²と30N/mm²とした。円柱試験

表-2 コンクリートの配合条件

試験体名	コンクリートの種類	呼び強度	スランブ [cm]	粗骨材の最大寸法 [mm]	セメントの種類	混和材	水結合材比 [%]	練り混ぜ水の塩分濃度 [%]
N1,N2,P1,P2	普通	35	8cm	20	N	膨張材	50以下	3.0
NA,A-1,A-2,A-3,A-4	普通	30	8cm	20	N	膨張材	55以下	3.0
NN	普通	30	8cm	20	N	膨張材	55以下	0.0

表-3 コンクリートの配合

試験体名	W/C [%]	スランブ [cm]	空気量 [%]	s/a [%]	練り量	水 W	セメント C	細骨材 S1	粗骨材		混和材	混和剤	
									G1	G2	膨張材 (H-EX)	高性能AE減水剤 (SP8SV) (C+E)×1.2%	空気量調整剤 (404) C×0.24%=1T
N1,N2, P1,P2	50.0	8	5.5	46.4	kg/m ³	150	280	836	497	497	20	3.600	11.2
					30L	4.5	8.4	25.07	14.90	14.90	0.6	0.108	0.336
NA, A-1,A-2, A-3,A-4	55.0	8	5.5	48.0	kg/m ³	165	280	845	472	472	20	0.450	-
					80L	13.2	22.4	67.61	37.76	37.76	1.6	0.036	-
NN	55.0	8	5.5	48.0	kg/m ³	165	280	845	472	472	20	0.450	-
					10L	1.65	2.8	8.45	4.72	4.72	0.2	0.000	-

体 NN だけが塩分を含まないコンクリートである。

コンクリートの配合を表-3に示す。練り混ぜ水に外割りで加えた塩化ナトリウム量は、単位水量150kg/m³では4.5kg/m³、単位水量165kg/m³では5.0kg/m³である。使用骨材は、細骨材が静岡県掛川産の山砂、粗骨材が茨城県桜川産の硬質砂岩砕石である。

2. 2. 2 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

試験体名	スランブ [cm]	空気量 [%]	コンクリート温度 [°C]
N1,N2,P1,P2	8.0	4.4	23.1
NA,A-1,A-2	8.0	2.5	14.0
NN	5.5	2.1	13.9
A-3,A-4	8.0	3.7	21.7

2. 2. 3 硬化したコンクリートの試験結果

硬化したコンクリートの試験結果を表-5に示す。

テストピースの養生は温度20°Cで封かん養生とした。はじめに試験を実施した円柱試験体のN1、N2、P1、P2に使用したコンクリートでは、オートクレーブ後に圧縮強度が低下した。材令14日でオートクレーブを実施したため、膨張材の未反応分がオートクレーブにより急速に反応し、内部に微細なひび割れを発生させたことが強度低下の主な原因と考えられる。その他の試験では、膨張材の未反応分が少なくなるようにオートクレーブを開始する材令を28日としたが、圧縮強度はいずれの試験体のテストピースでもオートクレーブ前に比べてオートクレーブ後は低下した。オートクレーブ試験の温度180°C、圧力1.0MPaの蒸気の影響下で硬化

したコンクリートの強度低下があったことは、膨張材以外にも骨材とモルタルマトリックスの線膨張係数の差や内部余剰水が蒸気に変化する体積膨張により発生する微細なひび割れが原因と考えられるが、今回の試験の範囲ではこれらの個々の影響は明らかにできていない。

表-5 硬化したコンクリートの試験結果

試験体名	テストピースの養生方法	オートクレーブ前		オートクレーブ後	
		材令	圧縮強度 [N/mm ²]	材令	圧縮強度 [N/mm ²]
NI,N2, P1,P2	封かん 10日	14日	46.2	24日	35.3
NA, A-1,A-2	封かん 28日	28日	33.4	42日	30.5
NN	〃	28日	46.2	42日	34.4
A-3,A-4	〃	28日	44.8	42日	26.7

2. 3 試験体と試験条件

2. 3. 1 試験体

円柱試験体 (図-1) は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱形で、コンクリート内部に合成床版の鋼部材を埋め込んだものである。鋼部材 (写真-1) は底鋼板、孔あき鋼板リブと、配力鉄筋で構成したものである。なお、鋼材試験体は、この鋼部材をコンクリートに埋め込まないでオートクレーブを行ったものである。

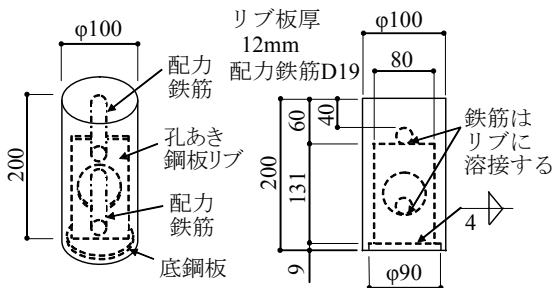


図-1 円柱試験体の寸法



(a) 無塗装

(b) 塗装

写真-1 鋼部材 (円柱試験体)

梁試験体 (図-2) は、幅 200mm、床版厚さ 200mm、長さ 1600mm とした。長さ方向は、合成床版の橋軸方向に合わせた。配力鉄筋は、ひび割れ制御ができるようにリブ上に 2 本配置した。

養生は、いずれの試験体も温度 20℃ で封かんとした。

2. 3. 2 試験条件

(1) 初期ひび割れ幅

円柱試験体は、割裂試験の要領 (図-3) で鋼材のリブに沿ったひび割れを導入した。円柱試験体に導入したひび割れ幅を表-6 に示す。円柱試験体のひび割れ幅の計測位置は上面の 2 点と上面から約 60mm 下の側面の 2 点である。クラックスケールを用いて計測したひび割れ幅を上面の 2 点と側面の 2 点でそれぞれ平均した。ひび割れ幅は、上面で 1.1~2.6mm、側面で 0.1~0.3mm となった。

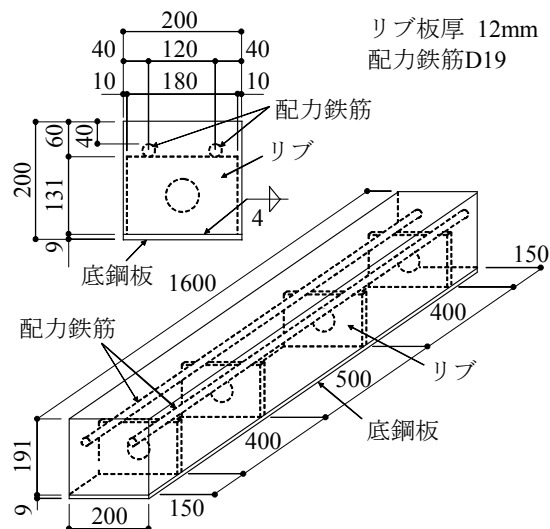


図-2 梁試験体の寸法

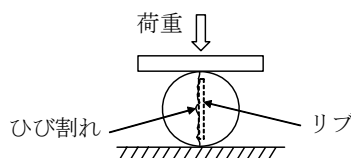


図-3 ひび割れ導入 (円柱試験体)

表-6 除荷時の残留ひび割れ幅 (円柱試験体)

試験体名	No.	残留ひび割れ幅 [mm]	
		上面	側面
N1	No.1	2.6	0.3
	No.2	1.2	0.1
	No.3	1.6	0.2
N2	No.1	2.3	0.2
	No.2	2.5	0.3
	No.3	1.8	0.1
P1	No.1	2.3	0.2
	No.2	1.1	0.2
	No.3	2.0	0.1
P2	No.1	2.5	0.1
	No.2	1.6	0.1
	No.3	1.1	0.1

梁試験体で導入したひび割れ幅を表-7 に示す。梁試験体では、試験体の上下を反転し、4点曲げ荷重によりリブ位置にひび割れが発生するようにした。合成床版では、リブ位置でひび割れが発生しやすいためこ

表-7 除荷時の残留ひび割れ幅 (梁試験体)

試験体名	残留ひび割れ幅 [mm]			
	測点1	測点2	測点3	測点4
A-1	0.07	0.19	0.05	0.14
A-2	0.30	0.15	0.11	0.25
A-3	0.12	0.10	0.10	0.10
A-4	0.10	0.09	0.17	0.18

のようなひび割れ導入を行った。ひび割れ幅は、パイ型変位計を用いて計測した。載荷荷重の最大値は A-1 で決定した 152kN を他の試験体でも同じとした。最大ひび割れ幅は A-1 が 0.19mm、A-2 が 0.3mm、A-3 が 0.12mm、A-4 が 0.18mm となった。

梁試験体では、側面のひび割れは補修用モルタルを塗布してさらにその上からアルミテープを貼りつけて塞いだ。この処理で、側面のひび割れから試験体内部の水分が流出しないようにして、実物の腐食環境になるべく近くなるように配慮した。

(2) オートクレーブ試験

オートクレーブの条件は図-4 に示すように 5 時間を温度 180°C、圧力約 1.0MPa の蒸気環境とするのは共通とし、高温、高圧とする回数を円柱試験体 N1、P1 では 2 回 (試験時間 72 時間) とし、円柱試験体 N2、P2、NA、NN、鋼材試験体および梁試験体では 4 回 (試験時間 168 時間) とした。試験サイクルは、装置内で温度および圧力を昇降させる負荷を与えた後で、装置から試験体を取り出し、常温で 24 時間の養生を行うことを繰り返す方法とした。養生は円柱試験体が水中浸せき、梁試験体は湿布養生とした。常温は 20°C である。オートクレーブに用いた装置と試験体の設置状況を写真-2 に示す。

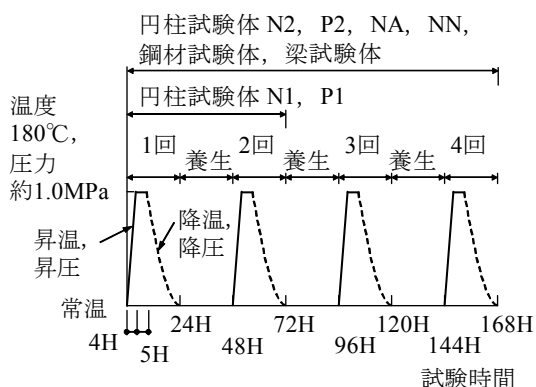


図-4 オートクレーブの条件



(a) 装置 (b) 試験体設置例

写真-2 オートクレーブ装置

2. 4 試験結果

2. 4. 1 中性化確認

鋼材の腐食原因がオートクレーブによるコンクリートの中性化でないことを調べるため、オートクレーブ後に、はつりとしたコンクリートの鋼材接触面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化を確認した (写真-3)。塗装のあり、なし、塩分のあり、なしにかかわらずいずれの試験体も鋼材接触面でアルカリ性が保たれていた。無塗装の試験体では、塩分があるとひび割れの有無に関係なくアルカリ性が保たれていても錆が発生していた。



(a) 円柱試験体 NA (b) 梁試験体 A-1

写真-3 中性化確認例

2. 4. 2 塗装の膜厚測定

(1) 鋼材試験体

鋼材試験体 SP で、塗装の膜厚を測定した。リップの表裏それぞれ 2 点ずつ計測し、3 体の平均値を計算した (表-8)。試験前の塗装膜厚は、106 μm であったがオートクレーブにより膜厚が減耗し、オートクレーブ 4 回後にはほぼ塗装がなくなり、塗装膜厚の測定値は 0 であった。

オートクレーブ試験後の試験体 SP の塗膜の状態を写真-4 に示す。オートクレーブ 1 回後には、部分的に白色に変色している箇所があり、水酸化亜鉛と考えられる。オートクレーブと湿潤養生を繰り返すと、塗

膜は粉状に剥離することで減耗して錆が発生した。無機ジンクリッチペイントが減耗した原因としては、温度 180℃ で 1.0MPa の圧力の蒸気の影響と、オートクレーブ間の湿潤養生（水中浸せき）時に円柱試験体と同じ水中にあったことから、アルカリ性の塩水の影響が考えられる。オートクレーブ 4 回で塗膜がほぼなくなっているが、すべてが亜鉛の腐食反応であるか塗膜破壊が複合しているかは明らかにはできていない。

表-8 塗装膜厚（鋼材試験体 SP）

試験体名	塗装膜厚 [μm]		
	試験前	オートクレーブ2回後	オートクレーブ4回後
SP	106	21	0



(a) 1 回後 (b) 2 回後 (c) 3 回後

写真-4 オートクレーブ後の塗膜（試験体 SP）

(2) 梁試験体

塗装した試験体 A-2、A-3、A-4 で、塗装の膜厚を測定した。測定位置は、初期ひび割れ導入時の載荷位置のリップの 2 面と、リップ近傍の底鋼板である。リップ、底鋼板ともそれぞれ 8 点測定し、平均値を表-9 に示す。A-2 は原板プライマーの厚さが試験前は、リップで 21 μm、底鋼板で 32 μm であったが、オートクレーブ試験後はリップで 8 μm、底鋼板で 13 μm になり塗膜厚が減少した。A-3 は有機ジンクリッチペイントを塗装したが、試験前の塗装膜厚はリップで 90 μm、底鋼板で 111 μm であった。オートクレーブ試験後は、リップで 165 μm、底鋼板で 195 μm であり測定値が試験前に比べて増大している。塗膜は鋼板から剥離している部分では一部でしわになっているところもあり、測定値は塗膜の剥離部分の空隙を含んでいる可能性がある。A-4 は無機ジンクリッチペイントを塗装したが、試験前の塗装膜厚はリップで 159 μm、底鋼板で 136 μm であった。オートクレーブ試験後は、塗装膜厚は小さくなり、リップで 72 μm、

底鋼板で 68 μm であった。塗装の表面は、濃い灰色の細かい粉末状であり塗装の表面はもろくなった状態であった。

鋼材試験体 SP と梁試験体 A-4 は同じ無機ジンクリッチペイントであるが、塗装膜厚の減耗量が異なった結果となった。SP では塗装が高温・高圧の蒸気に直接さらされるため、コンクリートに埋め込まれた A-4 に比べて厳しい条件となり、さらに、もろくなった塗膜表面が洗い流されることで減耗が早く進んだものと考えられる。

2. 4. 3 発錆状況

(1) 円柱試験体と鋼材試験体

円柱試験体の試験後の状況例を写真-5 に示す。無塗装で塩分を含んだコンクリート中にあった試験体 N1、N2 では錆が発生し、オートクレーブ回数が多いほど錆は増加した。塗装して塩分を含んだコンクリート中にあった試験体 P1、P2 では錆は発生しなかった。ただし、無機ジンクリッチペイントの塗装膜厚はオートクレーブにより減耗しており、手でこすると表面が粉

表-9 塗装膜厚（梁試験体）

試験体名		塗装膜厚 [μm] ※1		(測定位置) リップ測定面 (合計 8 点測定)
		試験前	試験後	
A-2	リップ	21	8	▽ : 底鋼板測定位置 (合計 8 点測定)
	底鋼板	32	13	
A-3	リップ	90	165 ※2	
	底鋼板	111	195 ※2	
A-4	リップ	159	72	
	底鋼板	136	68	

(注) ※1 塗装膜厚は測定した 8 点の平均値
 ※2 有機ジンクリッチペイント(試験体 A-3)は、剥離部分の空隙を含む値の可能性あり

状になり剥離している状態は鋼材試験体 SP と同様であった。試験体 P2 のオートクレーブ 4 回後の残存膜厚は 20 μm 程度であった。

リップ表面の錆をトレーシングペーパーに写しとって発錆面積を求め、リップの表面積に対する割合を発錆面積率とした。リップのコバ面と底鋼板は集計の対象外とした。リップの両面で平均した発錆面積率を表-10 に示す。無塗装で塩分を含んだコンクリート中にあった試験体では、オートクレーブ 2 回で発錆面積率は 2% (N1)、オートクレーブ 4 回では同じく 22% (N2) であった。塗装して塩分を含んだコンクリート中にあった試験体 (P1、P2) では錆は発生しなかった。ひび割れがない

試験体では、塩分を含むNAがオートクレーブ4回で発錆率は19%、塩分を含まないNNでは錆は発生しなかった。鋼材試験体では、無塗装のもの(SN)はオートクレーブ2回で発錆面積率は100%であった。また、鋼材試験体で塗装したもの(SP)はオートクレーブ2回では錆は発生しなかったが、オートクレーブ4回で錆が発生し、発錆面積率は40%であった。オートクレーブ試験により、塩分を含むコンクリートでは錆を発生させることがわかった。



(a) N2

(b) P2

写真-5 発錆状況例(円柱試験体)

表-10 発錆面積率(円柱試験体)

試験体名	発錆面積率[%]※		(錆の例)
	オートクレーブ2回後	オートクレーブ4回後	
N1	2	—	
N2	—	22	
P1	0	—	
P2	—	0	
NA	—	19	
NN	—	0	
SN	100	100	
SP	0	40	

(注) ※錆面積のリブの表面積に対する割合

(2) 梁試験体

梁試験体の発錆状況を写真-6に示す。無塗装のA-1では、リブとリブ近傍の底鋼板で錆が発生している。原板プライマーと補修塗装のA-2は、リブ近傍の底鋼板の錆はA-1に比べれば少なく、錆は補修塗装を行った孔の周りとの溶接部に部分的に発生している。原板プライマーに比べて補修塗装の部分の劣化が早かったことがわかった。有機ジンクリッチペイントのA-3では、塗膜は部分的に膨れがあり変質しているが錆は発生していない。塗膜がはがれている箇所は、コンクリートのはつり作業時に損傷したものである。無機ジンクリッチペイントのA-4では、塗膜の表面が

粉状にもろくなっており膜厚は減耗しているが、全体に塗膜が残っており、錆は発生していない。

発生面積率を表-11に示す。リブと底鋼板それぞれで発錆面積率を算出した。無塗装のA-1では、平均値でリブが78%、底鋼板が54%でリブの発錆面積率が高い。原板プライマーのA-2では、平均値でリブが20%、底鋼板が17%でリブの発錆面積率が高いが、両者の差はA-1に比べて小さい。A-2試験体では大部分は塗膜が残っており、発錆面積率は無塗装のA-1の半分以下となった。



(a) A-1

(b) A-2



(c) A-3

(d) A-4

写真-6 発錆状況(梁試験体)

表-11 発錆面積率(梁試験体)

試験体名		発錆面積率[%]						平均
		a	b	c	d	e	f	
A-1	リブ	78	85	83	73	74	78	78
	底鋼板	58	43	56	54	49	65	54
A-2	リブ	14	18	22	24	28	16	20
	底鋼板	19	13	25	22	11	11	17

(区画記号)

(錆の例)

(A-1) (A-2)

2.5 第1段階のまとめ

第1段階の検討結果をまとめる。オートクレーブを用いた促進腐食試験により、合成床版の鋼材防食方法を検討した。得られた知見は以下である。

- ・オートクレーブ試験によって、鋼材の腐食と亜鉛を含む塗装の犠牲防食による劣化を促進させ、塗装の有無や塗装の劣化が鋼材の腐食発生に及ぼす影響を明らかにすることができた。ただし、本試験で用いた高温・高圧と供用環境の常温とにおける塗装の劣化進行度の比較については今後明らかにする必要がある。
- ・梁試験体では、実構造物で想定するひび割れからの浸水とコンクリート中の滞水状態を再現でき、塩分を含む腐食環境における塗装による鋼材の防食効果を比較することができた。
- ・鋼板の下地処理をブラストとし、有機ジンクリッチペイントまたは無機ジンクリッチペイントを用いた塗装は、塗装が健全な間は十分な防食効果が認められた。

3. 塗装の耐久性確認試験

塗装による防食方法の耐久性を明らかにするために、コンクリートのアルカリ性と塩分の影響下での塗装の耐久性を検討した。ここで報告する塗装の耐久性試験方法は2つあり、ひとつは JIS の複合サイクル試験（JIS K 5600-7-9 サイクル腐食試験方法—塩水噴霧／乾燥／湿潤）に飽和水酸化カルシウム溶液への浸漬を組み合わせた新しい複合サイクル試験（以下、複合サイクル試験という）である。別のひとつは、飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬しつづける試験（以下、アルカリ浸漬試験という）である。

3. 1 複合サイクル試験

3. 1. 1 試験方法

複合サイクル試験の内容を表-12に示す。JISのサイクル腐食試験は、表中のステップ1から4に相当（以下、サイクルDという）し、これを3回繰り返した後で、飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬する。なお、飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬するのは、気中環境用のサイクルDにコンクリート中のアルカリの影響を付加して、コンクリート中にある合成床版の鋼材の腐食環境を模擬するためである。

サイクルDの試験機から飽和水酸化カルシウム溶液浸漬への切り替えは、手動により試験体を移動させることで行った。試験体の移動作業が昼間に行えるように、サイクルDの3回繰り返しは、夜間（17:00から

翌日の11:00まで）に行い、昼間（11:00から17:00までの6時間の内、最低4時間は、飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬することとした。塩水噴霧に使用する塩化ナトリウム濃度は $50 \pm 10 \text{g/l}$ とした。試験回数は、サイクルDの回数で表す。すなわち複合サイクル試験の24時間の試験回数は、3サイクルとなる。

表-12 複合サイクル試験

ステップ	時間[h]	温度[°C]	条件
1	0.5	30±2	塩水噴霧
2	1.5	30±2	湿潤 (95±3) %RH
3	2.0	50±2	熱風乾燥
4	2.0	30±2	温風乾燥
1~4	ステップ1~4を3回繰り返す		ステップ1~4のサイクルDの6時間を3回行う
5	4.0	23±2	飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬
(備考) 移行時間は、各条件に移行後、その条件の規定の温度および相対湿度に達するまでの時間をいう。 塩水噴霧から湿潤：10分間以内 湿潤から熱風乾燥：15分間以内 熱風乾燥から温風乾燥：30分間以内 温風乾燥から塩水噴霧：瞬時に 温風乾燥から浸漬：60分以内に（水洗いは行わない） 浸漬から塩水噴霧：60分以内に（水洗いは行わない）			

3. 1. 2 試験体

複合サイクル試験の試験体を表-13に示す。No.1の無機ジンクリッチペイントとNo.2の有機ジンクリッチペイントは、前章の検討で防食効果が認められた塗装仕様と同じものである。No.3の厚膜形変性エポキシ樹脂塗料とNo.4の変性エポキシ樹脂塗料は、同じエポキシ系で膜厚が異なるものである。No.5の無機ジンクリッチペイント+ミストコートは、No.1の上にミストコートを重ねたもので、ミストコートに防食下地を

表-13 試験体（複合サイクル試験）

試験体No.	塗装仕様	膜厚 [μm]	試験体数		サイクル数
			きず無し	きず有り	
1	無機ジンクリッチペイント	75	3	3	603
2	有機ジンクリッチペイント	75	3	3	603
3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	240	3	3	240
4	変性エポキシ樹脂塗料	60	3	3	240
5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート	75+30	3	3	603
6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料	75+30+60	3	3	240
7	エポキシ粉体塗装	220±40※	3	3	240
8	無塗装	—	9	-	240
9	溶融亜鉛めっき(550g/m ²)	76	3	-	324
合計			54		—

(注)※エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格(JSCE-E 102-2003)

保護する防水効果を期待したものである。No. 6 の無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料は、No. 5 の上に変性エポキシ樹脂塗料を重ねたもので、No. 5 よりもさらに防水性能を高くしたものである。No. 7 のエポキシ粉体塗装は、エポキシ樹脂塗装鉄筋と同様の塗装仕様である。No. 7 は、合成床版の鋼板寸法がエポキシ粉体塗装用の塗装装置の許容寸法を超えるため実際には適用できないが、他の塗装仕様との比較のために用意したものである。No. 8 は無塗装のものであり、腐食減厚量から複合サイクル試験の負荷を評価する目的のものである。No. 9 の溶融亜鉛めっきは、合成床版で実績があり塗装仕様との比較として用意したが、試験の途中で追加したため試験のサイクル数は他と異なっている。

試験体の製作は、次のように行った。試験体は、サンドブラスト板で、寸法 150×70×3.2 mm とし、材質は SS400 とした。塗装の施工方法は、スプレーとした。きずは P カッターを用いて幅約 1mm、長さ 80mm、深さは鋼板面に達するまでとした。観察面以外から錆びないように、試験体の裏面、コバ面および表面の縁部分は、厚膜変性エポキシ樹脂塗料（試験体 No. 3 と同じもの）を試験体の塗膜の上に塗り重ねた。複合サイクル試験の前に、紫外線による劣化促進のためにキセノンランプ法（JIS K 5600-7-7：2008 促進耐候性）により 60 時間キセノンランプを塗膜試験面に照射した。

試験体の状態変化の確認は次の時期に行った。すなわち、きず無し試験体 No. 1~8 ときず有り試験体の No. 3、4、6、7 については確認時期を 80 サイクル、160 サイクル、240 サイクルの 3 回とした。240 サイクルまでの試験で、きず有り試験体の中で結果の良かった試験体 No. 1、2、5 については、複合サイクル試験を延長したため、確認時期は前記に加えて 375 サイクル、459 サイクル、540 サイクル、603 サイクルの合計 7 回とした。試験体の状態変化の確認の内容は、塗膜外観および腐食状況とした。塗膜外観のさび、ふくれ、われ、および塗膜厚の測定および判定は、JIS K 5600-2~4 に準じた。塗膜厚の測定は 5 点とした。無塗装試験体の腐食減厚量の評価は、重量測定により行った。きず有り試験体のきず位置および塗膜のふくれ幅、さび幅の計測位置を図-5 に示す。きず長さを 4 等分した計測点（5 点×きずの左右=10 点）を定点とし、別途、最大値と最小値も測定した。試験体の周辺約 10mm 以内

及びきず下端より下方部分は外観評価の対象から外し、錆汁による汚れも評価の対象外とした。

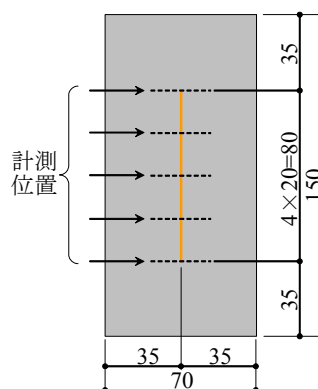


図-5 きず位置と計測位置

3. 1. 3 試験装置

試験装置は、一般財団法人日本塗料検査協会所有の複合サイクル試験機（写真-7）を使用した。



(a) 試験機外観



(b) 塩水噴霧中

写真-7 複合サイクル試験機

3. 1. 4 複合サイクル試験結果

(1) サイクル数と腐食減厚量の関係

無塗装試験体 No. 8 の 160 サイクル後の外観を写真-8 に示す。鋼板表面は全面が一様に腐食している。



写真-8 無塗装試験体 No. 8 の外観（160 サイクル）

無塗装試験体 No. 8 で計測した、腐食減厚量を図-6 に示す。複合サイクル試験の 80、160、240 サイクルで試験体表面のさびを落として重量測定し、表面が一様に減厚すると仮定して腐食減厚量を計算した。腐食減厚量はサイクル数に比例して増加し、240 サイクルで 0.28mm であった。実環境下との相関が無塗装鋼板の腐食減厚量のみで判断できると仮定して、複合サイクル試験の負荷を自然環境と比較すると、文献 3) に示された沖縄のルカン礁海水中の約 4 年に相当する。240 サイクル以降は、無塗装試験体の腐食減厚量が計測できていないので、腐食量がサイクル数に比例して線形で増加すると仮定して推定すると、試験を実施した最大の 603 サイクルでは、腐食減厚量は 0.71mm となる。これは文献 3) に示されたルカン礁海水中の数十年前から 100 年に匹敵する。塩分を含んだ水の浸入があった場合の合成床版内部の鋼材の腐食環境が海水中に近いと考えれば、複合サイクル試験 603 サイクルで防食効果が保持された試験体 No. 1、No. 5 は、長期の耐久性が期待できるといえる。

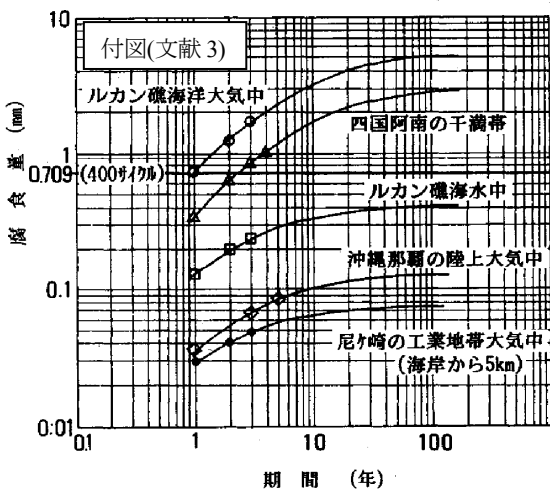
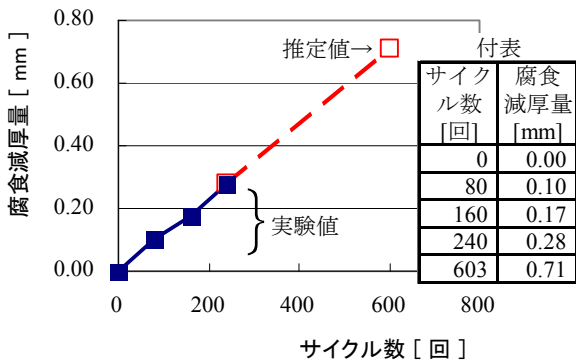


図-6 各地の現場における腐食量と期間との関係

図-6 腐食減厚量

(2) サイクル数と膜厚の関係

サイクル数と各塗装の塗膜厚の関係を図-7 に示す。無機ジンクリッチペイントと有機ジンクリッチペイントは初期の段階で白錆 (塩基性水酸化亜鉛) が表面に形成されたため塗膜厚が増加しているが、80 サイクル以降は大きく変化していない。他の塗膜は、サイクル数が増えても、大きく変化していない。

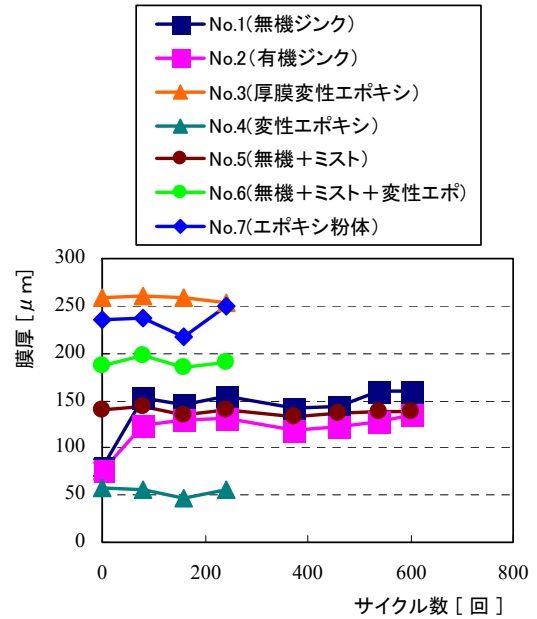


図-7 膜厚変化

(3) 外観観察結果

きず有り試験体の外観を写真-9 に示す。きず部の膨れ幅と赤錆幅は写真-9 中の付表に示す。表中の値は 3 試験体の内の最大値である。エポキシ系 (No. 3、No. 4、No. 7) は、きず位置の変状が大きく、きずに対して劣化しやすいと判断できる。また、有機ジンクリッチペイントは、回数が 240 サイクルを超えるときず部に赤錆が発生した。きず有りでも No. 1 (無機ジンクリッチペイント) は変状がなく、犠牲防食効果が高いことがわかった。なお No. 1 の下方の着色は、さび汁による汚れで外観の評価対象外とした。防食下地が無機ジンクリッチペイントである No. 5、No. 6 ではきず部の防食効果は No. 1 と同様であり変状はなかった。

きず無し試験体の外観を写真-10 に示す。無機ジンクリッチペイントと有機ジンクリッチペイントは白錆 (塩基性水酸化亜鉛) が全面に生じている。エポキシ系 (No. 3、No. 4、No. 7) はきずが無ければ耐久性が高いことがわかった。

付表 きず部の変状（複合サイクル試験）

試験体No.	塗装仕様	評価項目	サイクル数 [回]						
			80	160	240	375	459	540	603
No.1	無機ジンクリッチペイント	膨れ幅	0	0	0	0	0	0	0
		赤錆幅	0	0	0	0	0	0	0
No.2	有機ジンクリッチペイント	膨れ幅	0	0	0	1	1	1	1
		赤錆幅	0	0	0.5	1	4	4	4
No.3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	膨れ幅	5	7	10	/	/	/	/
		赤錆幅	0	0	7	/	/	/	/
No.4	変性エポキシ樹脂塗料	膨れ幅	2	5	1	/	/	/	/
		赤錆幅	3	5	8	/	/	/	/
No.5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート	膨れ幅	0	0	0	0	0	0	0
		赤錆幅	0	0	0	0	0	0	0
No.6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料	膨れ幅	0	0	0	/	/	/	/
		赤錆幅	0	0	0	/	/	/	/
No.7	エポキシ粉体塗装	膨れ幅	6	11	20	/	/	/	/
		赤錆幅	0	2	1	/	/	/	/

(注)膨れ幅、赤錆幅とも単位は[mm]

試験体No.	塗装の仕様	サイクル数 [回]			
		80	160	240	603
No.1	無機ジンクリッチペイント				
No.2	有機ジンクリッチペイント				
No.3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料				/
No.4	変性エポキシ樹脂塗料				/
No.5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート				
No.6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料				/
No.7	エポキシ粉体塗装				/

写真-9 きず有り試験体の外観（複合サイクル試験、240サイクルまで）

付表 外観観察結果（複合サイクル試験、きず無し試験体）

試験体No.	塗装仕様	サイクル数 [回]		
		80	160	240
No.1	無機ジンクリッチペイント	白錆100%	白錆100%	白錆100%
No.2	有機ジンクリッチペイント	白錆100%	白錆100%	白錆100%
No.3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	異常なし	異常なし	異常なし
No.4	変性エポキシ樹脂塗料	膨れあり	膨れあり	赤錆 膨れあり
No.5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート	異常なし	膨れあり	膨れあり
No.6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料	異常なし	異常なし	異常なし
No.7	エポキシ粉体塗装	異常なし	異常なし	異常なし
No.8	無塗装	赤錆100%	赤錆100%	赤錆100%






















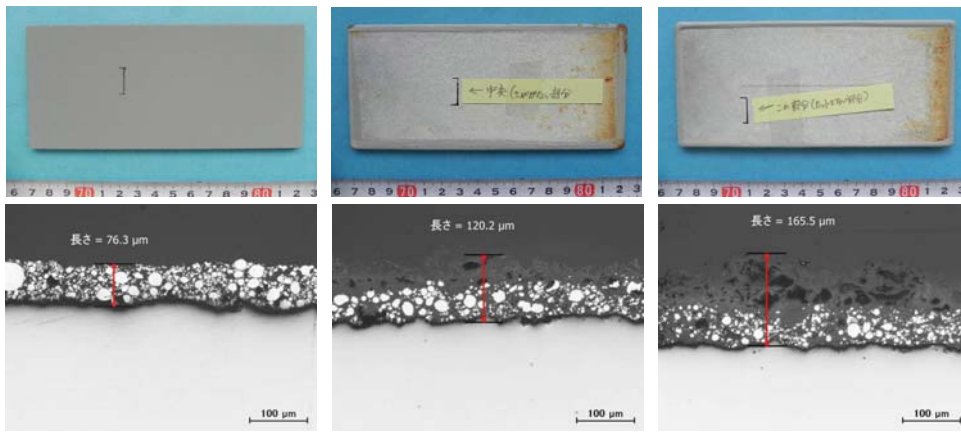
試験体No.	塗装仕様	サイクル数 [回]		
		80	160	240
No.1	無機ジンクリッチペイント			
No.2	有機ジンクリッチペイント			
No.3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料			
No.4	変性エポキシ樹脂塗料			
No.5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート			
No.6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料			
No.7	エポキシ粉体塗装			

写真-10 きず無し試験体の外観（複合サイクル試験、240サイクルまで）

(4) 断面観察結果

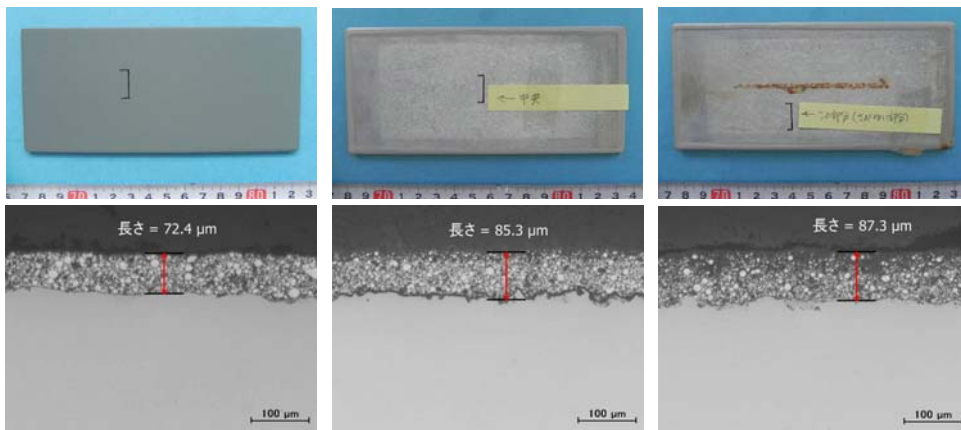
試験体 No. 1、No. 2、No. 5 の 3 種類で、試験前、240 サイクル、603 サイクルの断面を観察した。外観と断面を写真-11~13 に示す。なお、試験前の断面観察用試験体は、複合サイクル試験の試験体とは別に用意したため、No. 5 のミストコートの色が異なっているが塗料は同じものである。全厚は、塗膜厚測定結果とほぼ一致しており、塗料そのものの厚さは、初期値からほ

とんど変化していない。No. 1、No. 2 では、白錆の分だけ全厚が厚くなっている。断面内の亜鉛粒子は、無機ジンクリッチペイント、有機ジンクリッチペイントではサイクル数が増えるとともに消耗するが 603 サイクルでも残っており防食効果は維持されている。No. 5 は試験終了時でも試験前と同様の亜鉛粒子が残っており、ミストコートによる防水効果が発揮されて No. 1、No. 2 に比べて腐食進行は遅いと考えられる。



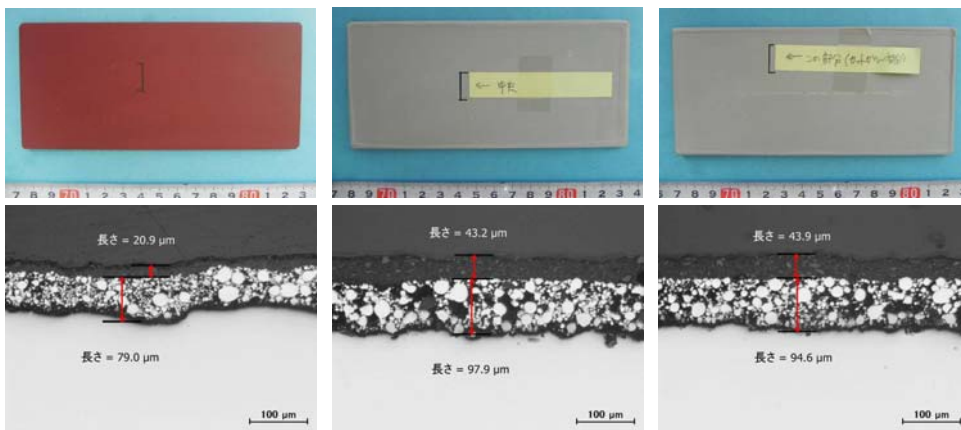
(a) 試験前 (b) 240 サイクル (c) 603 サイクル

写真-11 断面観察 (複合サイクル試験、No. 1 無機ジンクリッチペイント)



(a) 試験前 (b) 240 サイクル (c) 603 サイクル

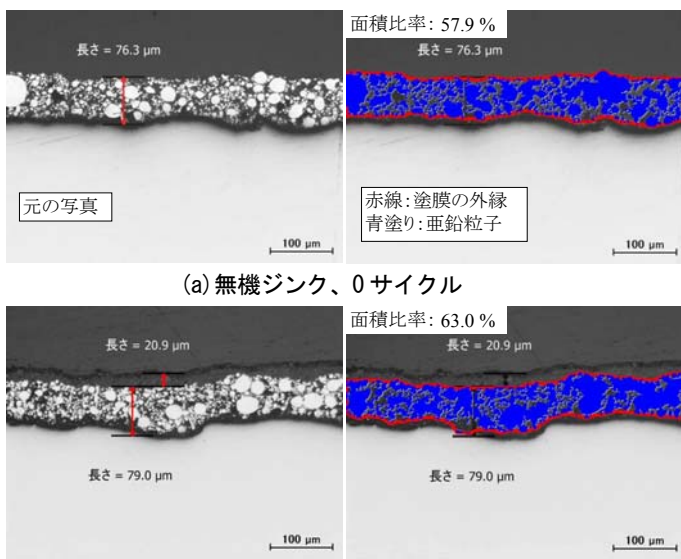
写真-12 断面観察 (複合サイクル試験、No. 2 有機ジンクリッチペイント)



(a) 試験前 (b) 240 サイクル (c) 603 サイクル

写真-13 断面観察 (複合サイクル試験、No. 5 無機ジンクリッチペイント+ミストコート)

塗膜中の亜鉛粒子の量を断面写真の画像解析から求めた例を図-8 に示す。白色円形の部分が亜鉛粒子として、その面積を求め、塗膜の範囲の面積で割って亜鉛粒子の面積比率を算出した。同じサイクル数でそれぞれ断面写真9枚から平均値を求め、その変化をまとめて図-9 に示す。無機ジンクリッチペイントは0サイクルで56.4%、240サイクルで44.0%、603サイクルで40.0%となった。サイクル数が増加するにつれて無機ジンクリッチペイント中の亜鉛粒子は、犠牲防食作用により減耗していくことがわかる。240サイクルまでに比べて240サイクル以降603サイクルでは、亜鉛粒子の面積の低下割合は減少するが、これは腐食生成物によって、無機ジンクリッチペイント中の空隙が充填され水の浸入が抑えられたためと考えられる。無機ジンクリッチペイント+ミストコートでも同様に亜鉛粒子の面積比率を求めたが、亜鉛粒子の面積変化は、無機ジンクリッチペイントに比べると小さく、亜鉛粒子の減耗はほとんどないことがわかった。



(a) 無機ジンク、0サイクル
 (b) 無機ジンク+ミスト、0サイクル
 図-8 画像解析結果の例

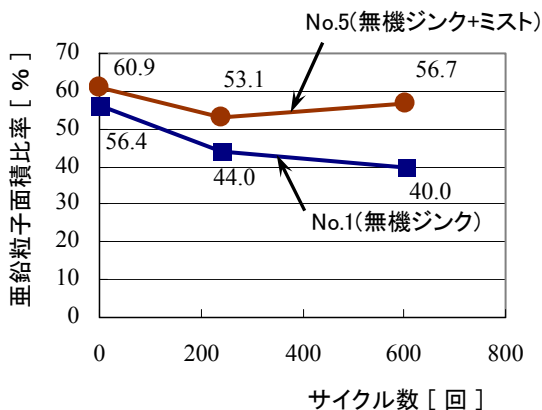
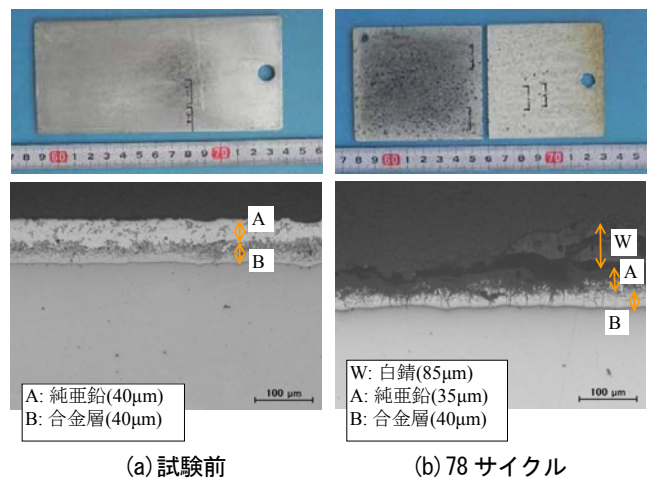


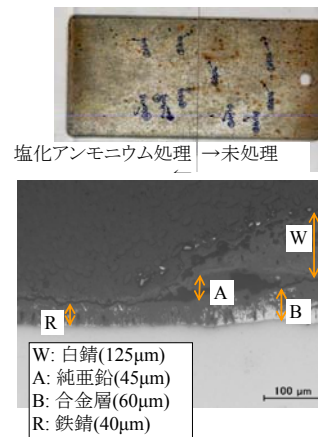
図-9 亜鉛粒子の面積比率 (複合サイクル試験)

(5) 溶融亜鉛めっきの結果

溶融亜鉛めっきについては、78サイクル後の観察で全体的な白錆と黒点が認められたため、この段階で断面観察を行った。外観と断面を写真-14 に示す。78サイクルでは、亜鉛層が腐食減耗しているが、合金層の腐食に至っていないことがわかった。そこで ASTM規格の判定で、塗装の機能的な塗替え判断目安とされる腐食程度の錆面積 0.3%になるまで試験を継続した。錆面積 0.3%の判定は(財)日本塗料検査協会の「塗膜の評価基準 2003」の平面部からのさびRN2 (0.28%)を見本として行った。324サイクルで錆面積が0.3%になり断面観察を実施した。78サイクルの断面観察時には、白錆、純亜鉛、合金層であったが、324サイクルでは、白錆、純亜鉛、合金層に加えて鉄錆が確認された。溶融亜鉛めっきの耐久性は、複合サイクル試験の条件では無機ジンクリッチペイントよりも低い結果となった。



(a) 試験前 (b) 78サイクル



(c) 324サイクル

写真-14 断面観察 (複合サイクル試験、溶融亜鉛めっき)

3. 2. アルカリ浸漬試験

3. 2. 1 浸漬試験方法

アルカリ浸漬試験は飽和水酸化カルシウム溶液に試験体を浸漬し続けるもので、その目的は、コンクリート中のアルカリ環境が塗膜の劣化に与える影響を調べることである。試験は JIS K 5600-6-1 の浸漬法に準じ、浸漬液には、コンクリートの主成分である水酸化カルシウムを飽和するまで溶かした水溶液を用いた。浸漬時の溶液 pH は 12~11、溶液温度は 23±2℃とした。浸漬期間の単位は日数である。

3. 2. 2 試験体（アルカリ浸漬試験）

アルカリ浸漬試験の試験体を表-14 に示す。試験体の製作方法は、複合サイクル試験のものと同じ（3. 1. 2 参照）とした。なお浸漬試験では、塗膜にきずは付与していない。

試験体の状態変化の確認時期は、試験体 No. 3、4、6、7、8 がいずれも 30 日、87 日、120 日の 3 回とした。複合サイクル試験で結果の良かった試験体 No. 1、2、5 については、アルカリ浸漬試験も延長したため、前記に加えて 218 日、263 日、323 日、360 日の合計 7 回とした。

試験体の状態確認の内容は、塗膜外観、塗膜厚とした。塗膜外観のさび、ふくれ、われ、および塗膜厚の測定および判定は、JIS K 5600-2~4 に準じた。塗膜厚の測定は 5 点とした。

表-14 試験体（アルカリ浸漬試験）

試験体No.	塗装仕様	膜厚 [μm]	試験体数	日数
			きず無し	
1	無機ジンクリッチペイント	75	3	360
2	有機ジンクリッチペイント	75	3	360
3	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	240	3	120
4	変性エポキシ樹脂塗料	60	3	120
5	無機ジンクリッチペイント+ミストコート	75+30	3	360
6	無機ジンクリッチペイント+ミストコート+変性エポキシ樹脂塗料	75+30+60	3	120
7	エポキシ粉体塗装	220±40※	3	120
8	無塗装	—	3	120
9	溶融亜鉛めっき(550g/m ²)	76	3	120
合計			27	—

(注)※エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質規格(JSCE-E 102-2003)

3. 2. 3 アルカリ浸漬試験結果

(1) 浸漬日数と膜厚の関係

浸漬日数と各塗装の塗膜厚の関係を図-10 に示す。無機ジンクと有機ジンクについては、水酸化カルシウムと考えられる白い固形物が表面に付着した分の塗膜厚増加が認められる。

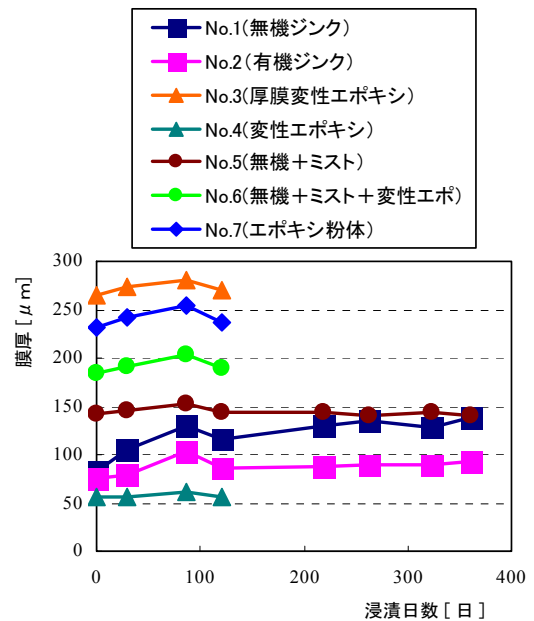


図-10 膜厚変化

(2) 外観観察結果

試験体の外観を写真-15 に示す。無機ジンクリッチペイントと有機ジンクリッチペイントについては、水酸化カルシウムと考えられる白い固形物が全面に付着した。その他の試験体は変状なしであった。

付表 外観観察結果

試験 体No.	浸漬日数 [日]							
	30	60	87	120	218	263	323	360
No.1	白い固形物付着	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
No.2	白い固形物付着	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
No.3	異常なし	同左	同左	同左				
No.4	異常なし	同左	同左	同左				
No.5	異常なし	同左	同左	同左	同左	同左	同左	同左
No.6	異常なし	同左	同左	同左				
No.7	異常なし	同左	同左	同左				
No.8	異常なし	同左	同左	同左				

試験 体No.	塗装仕様	浸漬日数 [日]			
		30	87	120	360
No.1	無機ジंक クリッチ ペイント				
No.2	有機ジंक リッチ ペイント				
No.3	厚膜形変性 エポキシ 樹脂塗料				
No.4	変性エポキシ 樹脂塗料				
No.5	無機ジंकリッ チ ペイント + ミストコート				
No.6	無機ジंकリッ チ ペイント + ミストコート + 変性エポキシ 樹脂塗料				
No.7	エポキシ 粉体塗装				
No.8	無塗装				

写真-15 きず無し試験体の外観（アルカリ浸漬試験、120日まで）

(4) 断面観察結果

試験体 No. 1、No. 5 の浸漬 360 日の外観と断面を写真-16、17 に示す。無機ジンクリッチペイントは亜鉛粒子が若干消耗しているように見え、水酸化カルシウムと考えられる層が付着している。無機ジンクリッチペイント+ミストコートでは、亜鉛粒子の消耗はほとんど無いように見える。

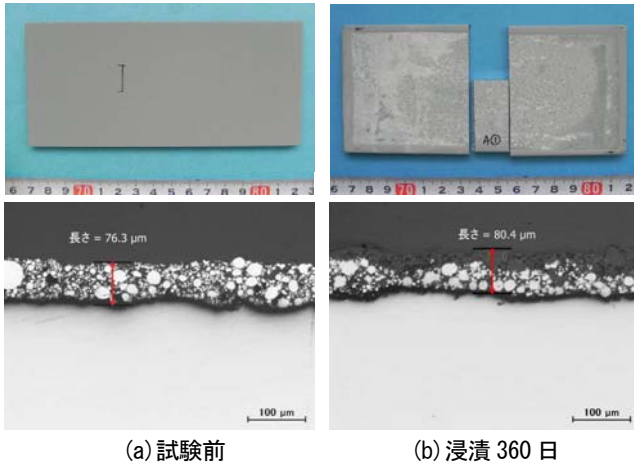


写真-16 断面観察（アルカリ浸漬試験、No. 1 無機ジンクリッチペイント）

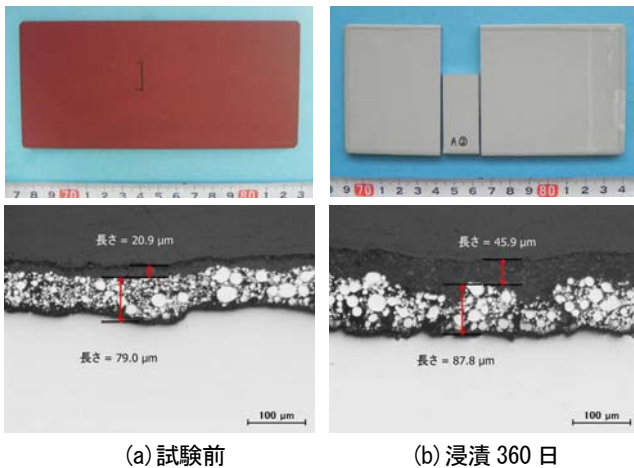


写真-17 断面観察（アルカリ浸漬試験、No. 5 無機ジンクリッチペイント+ミストコート）

画像解析から亜鉛粒子の面積比率を求めた結果を図-11 に示す。無機ジンクリッチペイント、無機ジンクリッチペイント+ミストコートのいずれも亜鉛面積の減少は 5% 程度であり、アルカリ浸漬試験 360 日では亜鉛粒子の減耗は、複合サイクル試験の 603 サイクルに比べて小さいことがわかった。

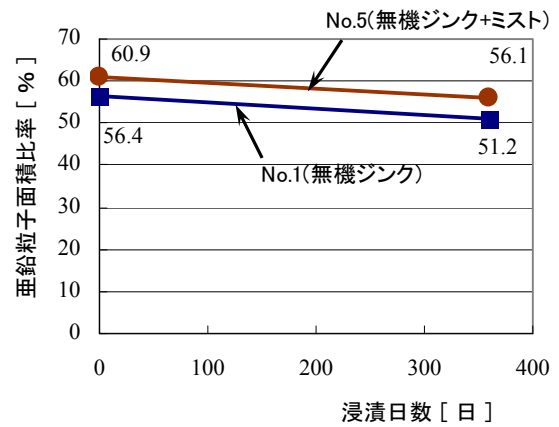


図-11 亜鉛粒子の面積比率（アルカリ浸漬試験）

(3) めっき鋼板の結果

めっき鋼板については、浸漬 51 日後の観察で全体的に黒く変色する表面の変状が認められたため、この段階で 1 試験体の断面観察を行った。外観と断面観察結果を写真-18 に示す。断面観察結果より、亜鉛層の溶出は少なく、問題ないことがわかった。その後の試験でも変化はなく、亜鉛層および合金層はアルカリ浸漬試験で劣化しないことがわかった。

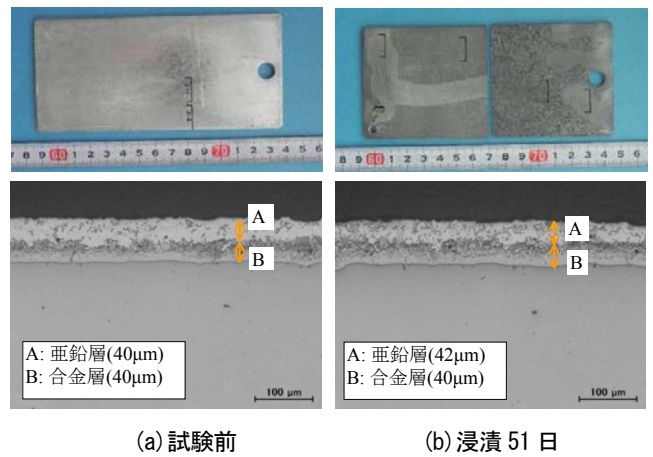


写真-18 断面観察（アルカリ浸漬試験、溶融亜鉛めっき）

3. 4 塗装の耐久性試験のまとめ

第 2 段階の検討結果をまとめる。複合サイクル試験とアルカリ浸漬試験により、塗装の耐久性を検討した。得られた知見は以下である。

- ・複合サイクル試験の負荷年数を、無塗装試験体の腐食減厚量から推定した。240 サイクルで腐食減厚量は 0.28mm であり、沖縄のルカン礁海水中の約 4 年に相当する。603 サイクルでは、同じく数十年から 100

年に匹敵する。

- 複合サイクル試験結果から、試験体 No. 1（無機ジンクリッチペイント）および試験体 No. 5（無機ジンクリッチペイント+ミストコート）の耐久性が高いことがわかった。経済性では、無機ジンクリッチペイントが勝るが、より長期の耐久性が必要な場合は、無機ジンクリッチペイントにミストコートを塗布することが有効である。
- 複合サイクル試験結果から、めっき鋼板は無機ジンクリッチペイントよりも発錆が早かった。
- アルカリ浸漬試験結果から、浸漬期間 360 日間では、塗装、めっきとも明確な劣化は認められなかった。

4. まとめ

合成床版のコンクリート接触面の防食方法として塗装仕様を検討した。得られた知見は以下である。

- 塗装による防錆は、一定の効果があり、ブラストして無機ジンクリッチペイントを 75 μ m の厚さで塗装する仕様が長期の耐久性が期待でき、経済性を考えると最も良いといえる。
- 無機ジンクリッチペイントを防食下地として、その上にミストコートを施工する塗装仕様は、無機ジンクリッチペイント単体よりもさらに長期の耐久性が得られる。

合成床版の今後の展望については、次のように考える。腐食環境における劣化因子の浸入に対して、ここで提案した対策をとれば、環境耐久性を高めることができ、活荷重に対する疲労耐久性の高さと合わせてより長期に供用できる合成床版の実現が期待できる。

[謝辞]

最後に、本研究に共同でご参加いただき多くのご助言をいただいた東北大学名誉教授の三浦尚先生に深く感謝の意を表します。また、太平洋マテリアルの竹下永造氏、関西ペイントの中野正氏、大日本塗料の宮下剛氏、日本ペイントの新谷憲生氏には、本研究において多大なご協力をいただきました、ここに記して深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 日本橋梁建設協会：合成床版設計・施工の手引き、2008.10
- 2) 武若耕司、小林一輔：オートクレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.161-164、1981
- 3) 三浦尚、板橋洋房、新井哲三：エポキシ樹脂塗装鉄筋の許容塗膜損傷度に関する研究、土木学会論文集 No. 451/V-17、pp.79-88、1992.8
- 4) 魚本健人、星野富夫、小林一輔：エポキシ樹脂塗装鉄筋および亜鉛メッキ鉄筋を用いたコンクリート梁の15年間海洋暴露実験結果、生産研究 48 巻 8 号、pp.31-34、1996.8
- 5) 小野聖久、長田光司、桜田道博、大浦隆：波形鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の腐食特性、第6回複合構造の活用に関するシンポジウム、pp.29-1~29-6、2005
- 6) 貝沼重信、細見直史、金仁泰、伊藤義人：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究、土木学会論文集 No. 780/I-70、pp.97-114、2005.1
- 7) 春日井俊博、入部孝夫、竹下永造、三浦尚：鋼・コンクリート合成床版の鋼材防食に関する研究、日本コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1109-1114、2010

