

論文 鋼・コンクリート合成床版の鋼材防食に関する研究

春日井 俊博^{*1}・入部 孝夫^{*2}・竹下 永造^{*3}・三浦 尚^{*4}

要旨：寒冷地に建設された道路橋の床版では、冬期に散布される凍結防止剤がコンクリート内部の鋼材腐食を促進する要因となる可能性がある。本研究は、このような腐食環境において供用される鋼・コンクリート合成床版のコンクリート内部の鋼材を対象として、その防食方法を検討したものである。コンクリートに塩化物を加えて製作した合成床版の試験体を用いて、高温、高圧の蒸気養生の装置であるオートクレーブにより促進腐食試験を実施した。試験により、鋼材表面に無機ジンクリッチペイントまたは有機ジンクリッチペイントなどを塗装することは防食方法として一定の効果があることを確認した。

キーワード：塩化物, 鋼材腐食, オートクレーブ, 塗装, 促進腐食試験

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、コンクリートは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はされていない。

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。小林ら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対比較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研究⁵⁾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、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。

2. 考慮したパラメータ

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、円柱試験体を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

*1 (社)日本橋梁建設協会 博士(工学) (正会員)

*2 (社)日本橋梁建設協会 工修

*3 太平洋マテリアル(株)開発研究所 高機能建材グループ 工修 (正会員)

*4 東北大学名誉教授 工博 (正会員)

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

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。

3.使用材料と材料試験結果

3.1 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。

3.2 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

3.3 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-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%
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	-

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]
N1,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

4. 試験体と試験条件

4.1 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。

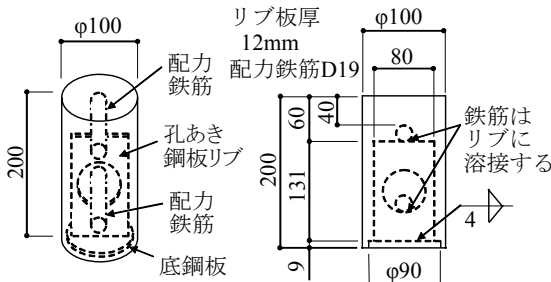
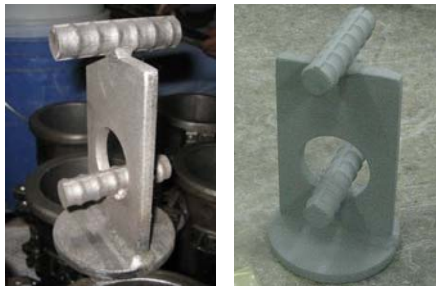


図-1 円柱試験体の寸法



(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。

4.2 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

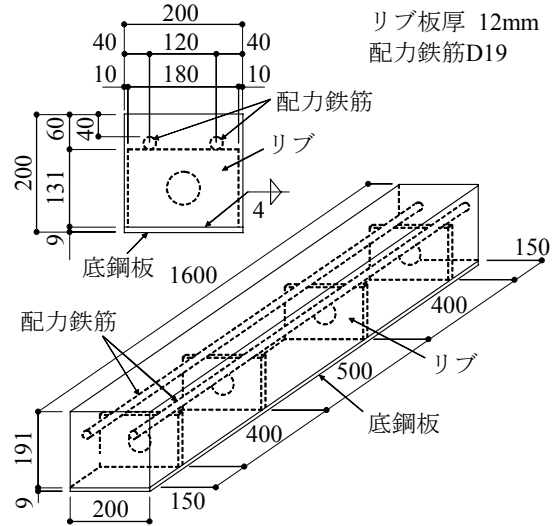


図-2 梁試験体の寸法

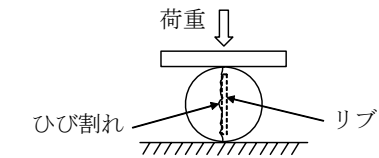


図-3 ひび割れ導入(円柱試験体)

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]		(計測位置)
		上面	側面	
N1	No.1	2.6	0.3	計測位置(上面) 計測位置(側面)
	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	

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。

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

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

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℃、圧力約1.0MPaの蒸気環境とするのは共通とし、高温、高压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℃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。

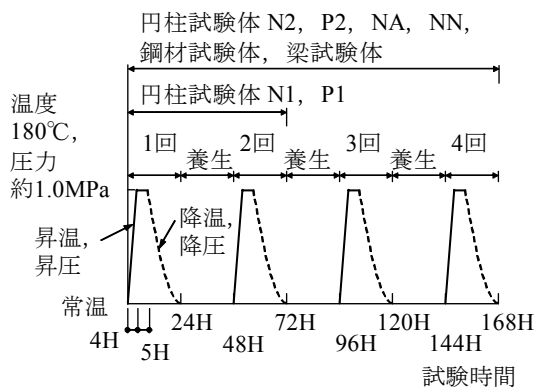


図-4 オートクレーブの条件



(a) 装置 (b) 試験体設置例

写真-2 オートクレーブ装置

5. 試験結果

5.1 中性化確認

鋼材の腐食原因が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

5.2 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。リブの表裏それぞれ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、106μm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

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)

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。

(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荷重位置のリップの 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。

5.3 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られることがわかった。



写真-5 発錆状況例 (円柱試験体)

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	
	底鋼板	32	
A-3	リップ	90	
	底鋼板	111	
A-4	リップ	159	
	底鋼板	136	
(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			

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) ※錆面積のリップ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底鋼板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

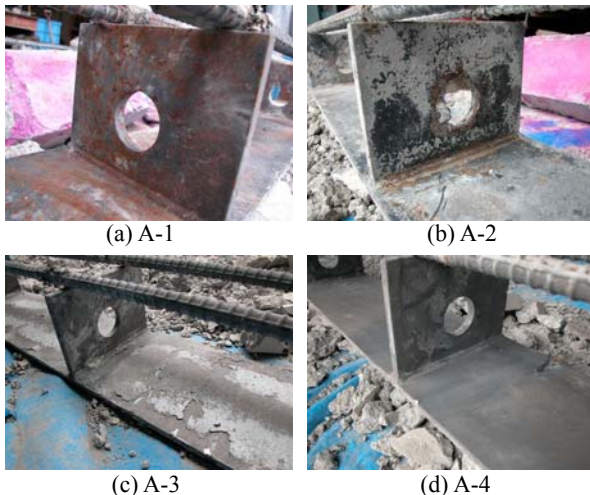


写真-6 発錆状況 (梁試験体)

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)

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。

6. まとめ

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。

7. 今後の課題

塗装による防食方法の耐久性を明らかにするためには、アルカリ性と塩分の影響下での塗装の耐用年数を調べる必要がある。今後は、今回用いた塗装仕様とこれ以外の仕様も検討対象に追加して、複合サイクル試験や実環境での暴露試験などを行い、塗装の適用性を明らかにするとともに、耐久性と経済性に優れた防食方法を検討する予定である。

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：波形鋼板ウエ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