

塗装周期延長耐食鋼 (CORSPACE®) の開発と実用化

Development and Practical Application of Corrosion Resistance Steel for Painting Cycle Extension (CORSPACE™)

菅江清信*
Kiyonobu SUGAE

上村隆之
Takayuki KAMIMURA

安藤隆一
Ryuichi ANDO

都築岳史
Takeshi TSUZUKI

抄 録

微量 Sn を添加した塗装周期延長耐食鋼, CORrosion Resistance Steel for PAinting Cycle Extension (CORSPACE®) は, 塩化物の飛来する環境における塗装欠陥部の腐食を抑制し, ライフサイクルコストの縮減可能な新たな耐食鋼である。塩化物を含む乾湿繰り返し環境における鋼の腐食に及ぼす Sn の役割, 開発した CORSPACE の塗装欠陥部における耐食改善効果ならびに鋼材の機械的特性と溶接特性, 実用実績について紹介した。

Abstract

We have developed the newly Sn-bearing steel, CORrosion Resistance Steel for PAinting Cycle Extension (CORSPACE™). CORSPACE reduces Life-Cycle Cost (LCC) of steel structures exposed to high chloride content environments, due to its superior atmospheric corrosion resistance at defect of paint film. In this report, the anti-corrosion performance at the defect of paint film of CORSPACE, and its mechanical and welding properties are mainly described for the use of steel structures.

1. 緒 言

我が国の橋梁や港湾構造物, プラント設備などの社会基盤や産業基盤を支えるインフラストラクチャー (以下, 社会インフラと称す) は, 1960年代から1970年代の高度経済成長期に一齐に整備されたものが多い。今後20年間で, 建設後50年以上経過する社会インフラの割合は加速度的に増加する見込みである。社会インフラの老朽化要因の一つとして鋼構造物の腐食があげられる。鋼構造物の多くは塗装され使用されているが, 部材鋭角部など十分な膜厚の確保が難しく, 塗膜が薄くなりやすい箇所や施工時に外表面から確認できない塗装欠陥部などでは, 腐食が発生するケースがある。とくに, 塩化物が多量に飛来する沿岸部や凍結防止剤が付着するような厳しい腐食環境において著しく腐食が進行し, 塗膜剥離や板厚の減少が懸念される。

今後, 腐食した鋼構造物の塗装塗替等を含む補修や更新に関わる経済的コストが増大し, 社会インフラの維持管理が難しくなると予想される。現在, 社会インフラのライフサイクルコスト (以下, LCCと略す) を縮減可能な新たな長寿命化技術が渴望されている。そこで我々は, 鋼材の

耐食性を向上させ, 塗装塗替周期を延長化することによるLCCの縮減を実現し, 社会の持続的な発展に貢献すべく, 新たな耐食鋼の研究開発を進めた。

我々は, 大気腐食の典型的な環境である乾湿繰り返し環境下における鋼材の腐食に及ぼす塩化物の影響について, 塩化物存在下の溶液化学的特性を含めた腐食プロセスに関する基礎研究を通じて検討し, 塩化物が存在する大気腐食環境における塗装欠陥部の腐食機構モデルを提唱した^{1,3)}。塗装欠陥部における腐食機構モデルを図1に示す⁴⁾。鋼材表面の薄膜水中での塗装欠陥が鉄の溶出する箇所 (アノード部) に, その周辺の塗膜下で酸素の還元反応が起きる箇所 (カソード部) に固定される。さらに, 塩化物イオンはアノード部に泳動して, 濃縮し, 鉄の溶解反応であるアノード反応と, 溶出した Fe²⁺ の空気酸化反応ならびに Fe³⁺ の加水分解反応に影響を及ぼし, アノード部の pH は低下すると考えられる²⁾。以上のことより, 塩化物が存在する大気腐食環境では, 塗装欠陥部 (疵部) は低 pH で, 塩化物イオンが濃縮した環境になると考えられる⁴⁾。

このような低 pH 環境において, 鋼の腐食に及ぼす Sn 添加による効果が顕著に発揮されることを見出した^{2,4)}。そこ

* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 主任研究員 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

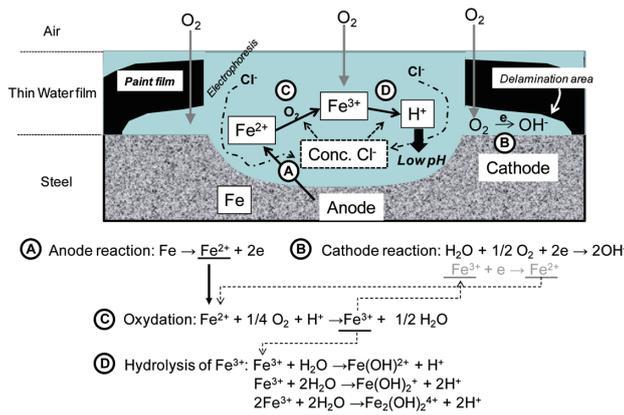


図1 塩化物環境における大気腐食メカニズムの概念図⁴⁾
 Schematic model of atmospheric corrosion of steel in presence of Cl^- ⁴⁾

で我々は、鋼材に微量 Sn を添加した、塗装欠陥部の耐食性に優れ、塗装塗替周期を延長化可能な新たな耐食鋼、すなわち塗装周期延長耐食鋼、CORSPACE® と称すの開発に至った。本報告では、塩化物を含む大気腐食環境における塗装欠陥部の耐食性に及ぼす Sn の効果と、開発した CORSPACE の塗装欠陥部における耐食改善効果^{3,5)} ならびに鋼材の機械的特性と溶接特性^{6,8)}、実用実績について紹介する。

2. 塩化物を含む大気腐食環境における Sn の効果

2.1 塗装欠陥部の耐食性に及ぼす Sn の効果

Fe-0.05C (以下、Fe と略す) をベース鋼として、0.1% の Sn を添加した鋼を実験的に溶解して供試材とし、機械加工により試験片を採取し、ブラスト処理後、変性エポキシ樹脂塗料 (中国塗料(株)製バンノー 200) を膜厚が約 180 μm になるようにスプレー塗装した。塗装欠陥部を模擬するために、得られた塗装鋼材に予め塗膜下の鋼材に達し、鋼材が露出するまでプラスチックカッターを用いてスクラッチ疵を付与した。耐食性の評価は、加速試験として SAE J2334 試験⁹⁾ を用いた。SAE J2334 試験は飛来塩分が多い環境を模擬するとされており¹⁰⁾、大気腐食再現試験の一つとして用いられる¹¹⁾。

その詳細な試験サイクル過程を図2に示す⁹⁾。塩分付着過程で使用する水溶液は CaCl_2 を含むため、乾燥過程においても鋼材表面は完全に乾燥することはない、鋼材表面の薄膜水では、局所的に塩化物イオンが濃縮し、かつ低 pH 環境になると考えられる。所定サイクル試験後、腐食により塗膜が剥離している部分を除去し、腐食剥離面積率と腐食深さを求めた。その結果を図3に示す^{3,5)}。鋼材への Sn 添加により、塗装欠陥部からの剥離および最大腐食深さが著しく抑制された。また、Sn の添加により、さびと塩化物が残存した鋼材面に塗装するという補修後の再塗装を模擬した場合においても効果を発揮することが確認されている⁹⁾。

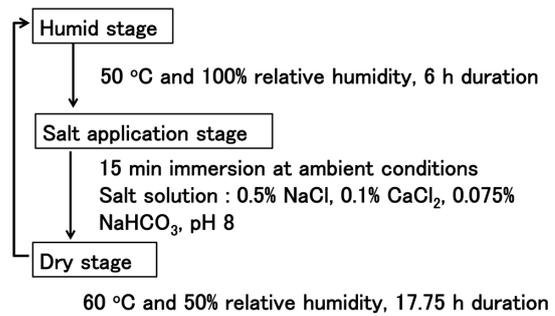


図2 SAE J 2334 試験サイクル⁹⁾
 Test cycle condition of SAE J 2334⁹⁾

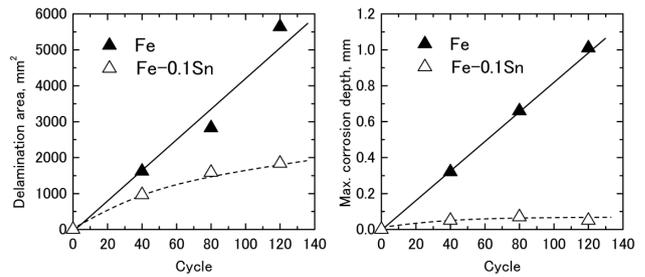


図3 エポキシ樹脂塗装鋼板の塗装欠陥部における剥離(左)と腐食深さ(右)に及ぼす Sn の効果^{3,5)}
 Effect of Sn on changes in delamination area (left) and corrosion depth (right) as function of test cycles for epoxy resin coated steel^{3,5)}

2.2 鉄の溶解反応に及ぼす Sn の影響

塩化物が存在する乾湿繰り返し環境における塗装欠陥部は、図1に示すようにアノード部となると考えられる⁴⁾。塗装欠陥部のアノード部では塩化物イオンが泳動し、濃縮するとともに、塩化物イオンによりアノード反応と、溶出した Fe^{2+} の空気酸化反応ならびに Fe^{3+} の加水分解反応が促進され、局所的に pH が低下すると考えられる。この低 pH で塩化物イオンが濃縮した環境における Sn による鋼の耐食性向上効果について検証した。上述の供試材に加え、0.5% の Sn を添加した鋼を実験的に溶解して供試材とし、機械加工により試験片を採取し、電気化学的分極測定を実施した。分極測定の結果を図4に示す²⁾。-0.45V vs SCE の電位で比較すると、Fe に比べて Sn 添加鋼のアノード電流密度は著しく小さい。母材の Fe とともに溶出した微量の Sn イオンが鋼材のアノード反応を抑制したと考えられる。乾湿繰り返し環境における薄膜水中の塗装欠陥部のような低 pH で塩化物イオンが濃縮した環境は、比流量が小さく、溶出した微量の Sn イオンによるアノード反応の抑制が顕著になると考えられる。そこで、Sn イオンの効果を明確化するために、電解水溶液中に 0.1 mM SnCl_2 を添加し微量の Sn イオン水溶液中における Fe の分極測定を実施した。その結果を図5に示す²⁾。電解水溶液中への Sn イオンの添加により、Fe のアノードとカソードの電流密度が著しく抑制された。カソード反応においては、電解水溶液中の Sn イオンが鋼表面に析出し、酸性水溶液中のカソード反応

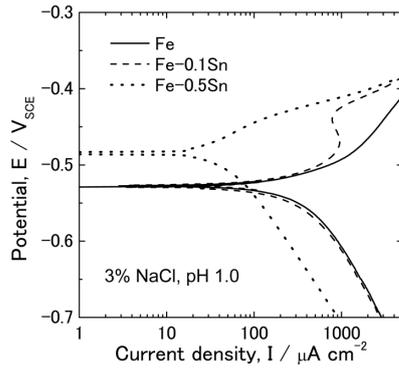


図4 酸性水溶液中のSn添加鋼分極曲線²⁾
Polarization curve of Sn-bearing steel in acidic solution²⁾

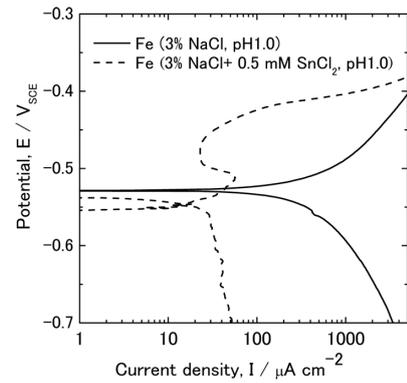


図5 酸性水溶液中のFeの分極挙動に及ぼすSnイオンの影響²⁾
Effect of Sn²⁺ on polarization behavior of Fe in acidic solution²⁾

表1 実機製造した開発鋼 (CORSPACE) の化学成分³⁾
Chemical compositions of developed steel (CORSPACE) produced at commercial plant (mass %)³⁾

Mark	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Sn
Developed steel (CORSPACE)	SM490YB-Z35S 9, 20, 50	0.16	0.35	1.42	0.010	0.002	Add*
Standard steel	SM490YB-Z35S ≤ 100	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.006	-

* Target mass% > 0.1 %

表2 実機製造した開発鋼 (CORSPACE) の引張り試験結果³⁾
Tensile test results of developed steel (CORSPACE) produced at commercial plant³⁾

Mark	Thickness (mm)	Yield point or proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
Developed steel (CORSPACE)	SM490YB-Z35S 9	450	580	No.1A test specimen 20
	SM490YB-Z35S 20	428	564	No.1A test specimen 27
	SM490YB-Z35S 50	393	546	No.4 test specimen 37
Standard steel	SM490YB-Z35S 5 < ≤ 16	365 ≤	490-610	No.1A test specimen 15 ≤
	SM490YB-Z35S 16 < ≤ 40	355 ≤		No.1A test specimen 19 ≤
	SM490YB-Z35S 40 < ≤ 75	335 ≤		No.4 test specimen 21 ≤

である水素発生反応を抑制したと考えられる。一方、アノード反応においては、Snイオンがアノード溶解反応機構にインヒビターとして作用し、アノード溶解反応を抑制したと考えられる¹²⁾。以上の結果より、乾湿繰り返し環境における薄膜水中の塗装欠陥部のような低pHで塩化物イオンが濃縮した環境において、Sn添加鋼は母材のFeとともに溶出した微量のSnイオンがアノード反応のインヒビターとして働き、腐食を抑制するものと考えられる^{2, 12-14)}。

3. CORSPACEの特性

3.1 実機による製造と機械的特性

鋼構造物に多く用いられるSM490YB (JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材) を評価対象として板厚方向特性を^{15, 16)}

考慮し250ton転炉で溶製した(化学成分を表1に示す)³⁾。従来、Snによる熱間延性の低下¹⁷⁾やCu赤熱脆化の助長¹⁸⁾などの悪影響が指摘され、スラブ表面割れの発生も懸念されていた。しかし、化学成分の調整などにより表面割れを防止した結果、CORSPACEは通常の構造用鋼と同様に問題なく製造可能であった¹⁹⁾。CORSPACEの機械的性質を表2、表3に示す³⁾。CORSPACEは、良好な特性が得られ、JIS鋼材の特性を十分満たし^{15, 16)}JIS規格材として供給できることを確認した。

3.2 溶接施工性と溶接部機械特性

製造した厚鋼板のうち、20mmと50mmのものについて、開先溶接試験を行った。開先形状を図6と表4に示す⁶⁾。

日鐵住金溶接工業(株)製の溶接材料を用いて、表5に示すガスメタルアーク溶接 (GMAW) とサブマージアーク溶接 (SAW) の溶接条件で溶接を実施した⁶⁾。CORSPACEの溶接施工性は、いずれの溶接方法でも普通鋼と同等であった。溶接継手試験結果を表6に示す⁶⁾。CORSPACEは、GMAWとSAWともに良好な特性が得られ、JIS溶接継手の特性を十分に満たし^{6,15)}、JIS規格材として供給できることを確認した。

3.3 CORSPACEの塗装欠陥部耐食性

2. で述べたように、Snを添加することにより塗装欠陥部の耐食性が著しく改善されることが明らかになった。しかし、橋梁などでは無機ジンクリッチペイントあるいは有機ジンクリッチペイントの防食下地を有する重防食塗装の塗装仕様が施されることが一般的である^{20,21)}。そこで、実機製造したCORSPACEとSM490鋼(以下、SM鋼と略す)を機械加工し、ブラスト処理後、表7に示す塗装を施した³⁾。通常、防食下地としてジンクリッチペイントは75μmの膜

表3 実機製造した開発鋼 (CORSPACE) のシャルピー衝撃試験結果³⁾ および板厚方向の引張試験結果
Charpy impact test and tensile test results of developed steel (CORSPACE) produced by commercial plant³⁾

Mark	Thickness (mm)	Charpy absorbed energy (0°C) J	Thickness (mm)	Reduction along the thickness direction (%)
Developed steel (CORSPACE)	20	165	20	53, 64, 53 Average 57
	50	210	50	63, 64, 70 Average 66
Standard steel	12 <	27 ≤ Average	15 ≤	25 ≤ Individual 35 ≤ Average

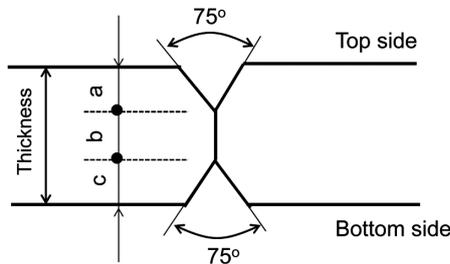


図6 開先形状⁶⁾
Shape of groove⁶⁾

表4 開先形状⁶⁾
Shape of groove⁶⁾

	Thickness (mm)	GMAW			SAW		
		a	b	c	a	b	c
20	10	3	7	6	7	7	
50	25	3	22	23	7	20	

表5 溶接条件 (下向き, 予熱無し)⁶⁾
Welding methods, materials and conditions (flat position welding without preheating)⁶⁾

Welding methods	GMAW	SAW
Welding materials	NSSW FCM-1F (1.2mm) CO ₂ × 100% Standard: JIS Z 3313 YFW-C50DM	NSSW NF-100 (20 × D) × T-DS (4.8mm) Standard: JIS Z 3183 S502-H
Thickness	20	Top side: 650A 38V 400mm/min 3.7kJ/mm Bottom side: 750A 38V 400mm/min 4.9kJ/mm
	50	Top and bottom side: 700A 38V 350mm/min 4.6kJ/mm

表6 溶接施工試験結果⁶⁾
Results of welding certification tests⁶⁾

Mark	Thickness (mm)	Welding methods	Tensile testing of welded joint		Charpy impact test JIS Z 3122 (0 °C)		
			Tensile strength (N/mm ²)	Face bend test	Side bend test	Charpy absorbed energy (J)	
						Middle of welding material	HAZ 1 mm
Developed steel (CORSPACE)	20	GMAW	616, 626 Average 621	N.C	N.C	58, 76, 65 Average 66	127, 146, 107 Average 127
		SAW	614, 620 Average 617	N.C	N.C	46, 48, 45 Average 46	93, 75, 56 Average 75
	50	GMAW	601, 605 Average 603	N.C	N.C	99, 113, 116 Average 109	133, 174, 102 Average 136
		SAW	610, 604 Average 607	N.C	N.C	119, 132, 119 Average 123	144, 153, 164 Average 154
Standard	SM490YB-Z35S	-	490 ≤	Do not crack		27 ≤ Avrage	

N.C means "No Crack"

厚で塗装されるが防食性能が高く、加速試験においても長期間腐食や剥離が観察されない。そこで、防食下地として無機ジンクリッチプライマー（以下、防食下地のジンクリッチペイントおよびプライマーについてはZPと略す）を15 μm の膜厚とした塗装試験片を作製し、SAE J2334試験にて評価した。

試験後の外観を図7に示す³⁾。40サイクルではZPの防錆効果のために、外観上発錆も剥離も観察されなかった。80サイクルでは、SM鋼の塗装欠陥部の一部に腐食と軽微な剥離が観察された。一方、CORSPACEでは発錆も剥離も観察されなかった。120サイクルでは、SM鋼では塗装欠陥部の腐食範囲の増大が顕著になり、CORSPACEでも一

部に腐食が発生した。腐食剥離面積と腐食深さを図8に示す³⁾。SM鋼の場合には、ZPの防食下地により、腐食による塗膜剥離面積は抑制されるものの、腐食深さは外観から想定される以上に深い結果となった。これは、厳しい腐食環境の橋梁で見られる孔食型の腐食^{22,23)}と類似している。

一方、CORSPACEの場合、防食下地による腐食発生までの期間の延長と、腐食による塗膜剥離と腐食深さが抑制されることが明らかとなった。また、SAE J2334試験とは異なる加速試験として塩水噴霧と乾湿繰り返し戻しの腐食環境であるS6サイクルで評価した結果、防食下地を施した重防食塗装仕様の場合、普通鋼に比べてCORSPACEは腐食による塗膜部の劣化に至る期間が約1.8倍になることが報告されている²⁴⁾。さらに、阪神高速道路の東神戸大橋および本州四国連絡高速道路の大鳴門橋における曝露試験の結果においても、CORSPACEは普通鋼の約2倍腐食を抑制することが報告されている^{25,26)}。東神戸大橋における曝露試験結果と同じ塗装仕様でのSAE J2334試験結果をそれぞれ図9に示す²⁵⁾。これらの結果から、塩化物が存在する乾湿繰り返し戻しの厳しい腐食環境において、我々が想定した通り塗装欠陥部のアノード部が低pHで塩化物イオンが濃縮した環境になり、母材のFeとともに溶出した微量のSnイオンがアノード反応のインヒビターとして作用し、通常の塗装系のみならず、ZP系の防食下地を施した重防食塗

表7 塗装仕様³⁾
Coating specification³⁾

	Painting process	Brand of paint	Thickness
First layer	Prime coat	Inorganic zinc rich primer	15 μm
Second layer	Under coat	Epoxy resin	60 μm
Third layer	Under coat	Epoxy resin	60 μm
Forth layer	Intermediate coat	Epoxy resin for fluorine contained resin	30 μm
Fifth layer	Top coat	Fluorine contained resin	25 μm

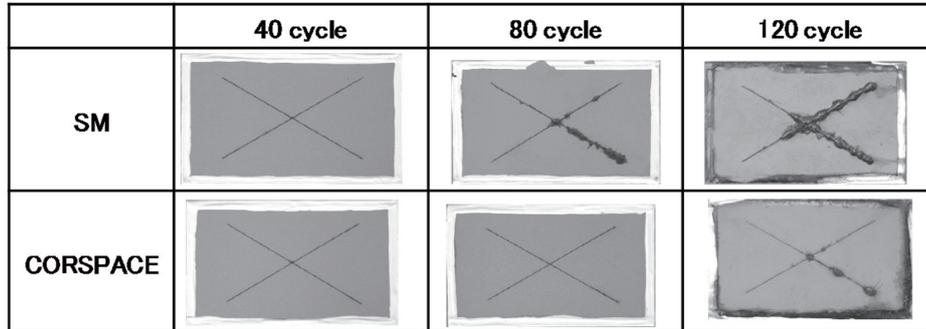


図7 試験後の塗装欠陥部の外観³⁾

Appearance of sample after removing the delaminated paint after SAE J2334 test³⁾

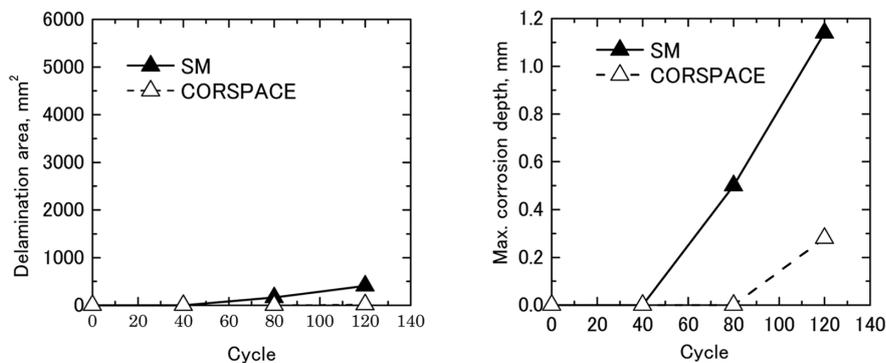


図8 防食下地を有する塗装欠陥部の剥離と腐食深さ³⁾

左：塗装欠陥部の剥離面積，右：腐食深さ

Changes in delamination area and corrosion depth as function of test cycles for zinc primer painted steel³⁾

Left: Delamination area, Right: Corrosion depth

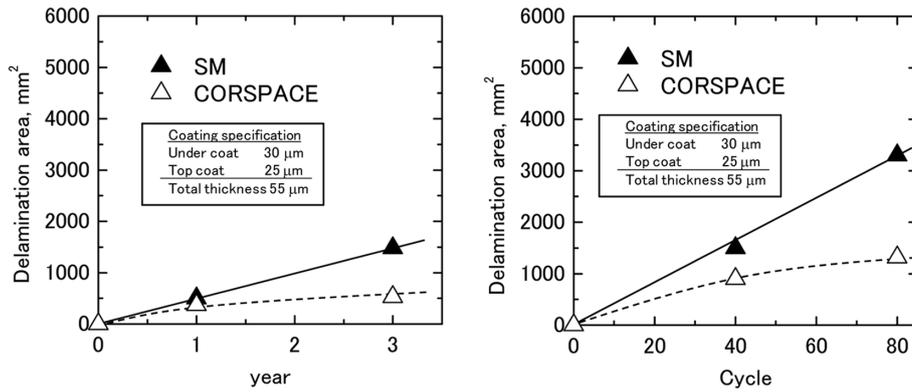


図9 防食下地を有する塗装欠陥部の剥離面積
 左：東神戸大橋における暴露試験²⁵⁾，右：SAE J 2334 試験
 Change in delamination area as function of exposed time for painted steel
 Left: Exposed test at Higashi Kobe bridge²⁵⁾, Right: SAE J 2334 test

装系においても CORSPACE は塗装欠陥部の腐食を抑制し、塗装塗替周期の延長化が期待できるものと考えられる。

4. CORSPACEによるLCC縮減効果

CORSPACE の LCC 縮減効果を算出するための前提条件を下記の (1)～(4) とした。

- (1) 塩化物が多く飛来する厳しい腐食環境
- (2) 鋼材の塗替基準は、鋼構造物の全体の平均と塗膜劣化面積率が 5% に達する時点で塗替とする²⁷⁾
- (3) 重防食塗装を施した普通鋼の部材鋭角部で、ZP を含む塗装の有効期間が 32 年とする
- (4) 重防食塗装便覧に示す新設費用と塗替費用を基に、新設後の 100 年間に於けるコストを LCC として計算する

3. で述べたように CORSPACE は、普通鋼に比べ防食下地の ZP の有効期間を約 2 倍程度延長し、さらに実環境における暴露試験や S6 サイクル試験結果でも、普通鋼に比べて塗装劣化期間を約 2 倍にする^{24,26)}。これらの結果と前提条件 (1)～(4) より CORSPACE の LCC を算出した。実橋梁で適用される重防食塗装仕様では、防食下地に 75 μ m の ZP が施されるが、一般に重防食塗装系の耐久期間は、20 年を超える程度とされる²⁸⁾。しかし、部材鋭角部では十分な膜厚が得られないと考えられるため、普通鋼における ZP の有効期間を 20 年未満とし、塗装の劣化に至る期間を 32 年間とした。

重防食塗装を施した場合の普通鋼と CORSPACE の塗装塗替コストの経年変化を図 10 に示す。普通鋼は、新設後 100 年間で約 30 年毎に 3 回塗装塗替が実施される。一方、CORSPACE は ZP の有効期間と塗装劣化期間を普通鋼の約 2 倍程度延長化するため、新設 64 年後の 1 回だけの塗装塗替となる。以上より、重防食塗装仕様でも CORSPACE は、普通鋼に比べて LCC を半分程度に縮減できると考えられる。

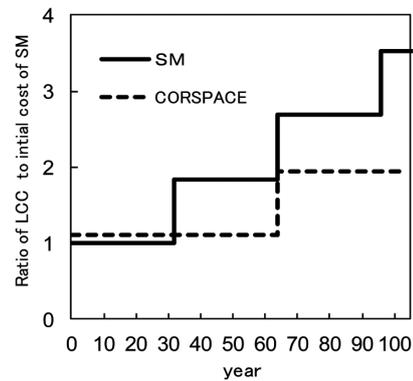


図 10 CORSPACE の LCC 縮減概念図
 Result of life cycle cost analysis of CORSPACE

5. 適用実績

CORSPACE は、2012 年の兵庫県加古川市の東播磨南北道“水足新辻第 5 高架橋”への初適用に続き、2013 年の大阪府堺市の阪神高速 4 号湾岸線三宝ジャンクション橋梁に適用されている。東播磨南北道における CORSPACE の適用箇所を図 11 に示す。実橋梁に小型暴露試験を設置し CORSPACE の塗装周期延長化効果と LCC 縮減効果を実証中である。また、橋梁以外の鋼構造物への適用も順次拡大している所である。

6. 結 言

高飛来塩化物環境における鋼の腐食機構を検討し、塗装疵部において優れた耐食性を有し、塗装塗替周期を延長化可能な CORSPACE を開発した。CORSPACE は厚鋼板に求められる機械的特性、溶接特性を満足し、JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材に適合することを確認した。本開発鋼材である CORSPACE が、橋梁を含めた鋼構造物のライフサイクルコストの縮減と社会の持続的発展に貢献できるものと期待する。



図 11 CORSPACE の適用橋梁 (東播磨南北道路)
Example of the application of CORSPACE (Higashiharimamboku Road)

参照文献

- 1) Kamimura, T., Kashima, K., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Proc. JSCE Materials and Environments 2008. 2008, p. 335
- 2) Kamimura, T., Kashima, K., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Corros. Sci. 62, 34 (2012)
- 3) 上村隆之, 西尾大, 前田隆雄, 吉田直嗣, 鹿島和幸, 菅江清信, 幸英昭, 工藤赳夫: 材料と環境. 62, 187 (2013)
- 4) 上村隆之, 鹿島和幸, 菅江清信, 幸英昭, 工藤赳夫: 材料. 62 (3), 207 (2013)
- 5) Kamimura, T., Kashima, K., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Proc. JSCE Materials and Environments 2010. JSCE, 2010, p. 481
- 6) 西尾大, 中村宏, 上村隆之: 第65回土木学会年次学術講演会講演概要集. V-205, 2010, p. 409
- 7) 西尾大, 上村隆之, 米村英男, 岡部健: 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集. I-593, 2011, p. 1185
- 8) Kamimura, T., Nishio, M., Kashima, K., Miyuki, H., Nakamura, H.: CAMP-ISIJ. 24, 352 (2011)
- 9) SAE J2334: Cosmetic Corrosion Lab Test. June 1998, SAE International, Warrendale, PA.
- 10) 長野博夫, 内田仁, 山下正人: 環境材料学 - 地球環境保全にかかわる腐食・防食工学. 共立出版, 2004, p. 74
- 11) 例えば, Damgaard, N., Walbridge, S., Hansson, C., Yeung, J.: J. Const. Steel Res. 66, 1174 (2010)
- 12) Kashima, K., Kamimura, T., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Proc. 58th Japan Conf. Materials and Environments. JSCE, 2011, p. 101
- 13) Kashima, K., Kamimura, T., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Proc. 57th Japan Conf. Materials and Environments. JSCE, 2010, p. 284
- 14) Kashima, K., Kamimura, T., Sugae, K., Miyuki, H., Kudo, T.: Proc. 56th Japan Conf. Materials and Environments. JSCE, 2009, p. 317
- 15) JIS G 3106: 溶接構造用圧延鋼材. 日本工業規格, 2008
- 16) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説. 2002
- 17) Song, S. H., Yuan, Z.-X., Jia, J., Guo, A.-M., Shen, D.-D.: Metall. Mater. Trans. A. 34A, 1611 (2003)
- 18) 例えば, Imai, N., Komatsubara, N., Kunishige, K.: ISIJ Int. 37, 217 (1997)
- 19) Yoshida, N., Taguchi, K.: CAMP-ISIJ. 24, 868 (2011)
- 20) 日本鋼構造協会: 重防食塗装 - 防食原理から設計・施工・維持管理まで -. 技報堂出版, 2012, p. 33
- 21) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧資料集. II-32, 丸善, 2005
- 22) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧資料集. II-24, 丸善, 2010
- 23) Tanaka, M.: Structure Painting. 38, 18 (2010)
- 24) 奥野貴文, 廣畑幹人, 上村隆之, 伊藤義人: 土木学会中部支部研究発表会. I-003, 2014
- 25) 閑上直浩, 飛ヶ谷明人, 前田隆雄, 上村隆之, 西尾大: 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集. I-595, 2011, p. 1189
- 26) 田畑晶子, 飛ヶ谷明人, 角和夫, 上村隆之, 前田隆雄, 西尾大: 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集. I-144, 2012, p. 287
- 27) 細井章浩, 伊藤義人, 金子恵介, 杉浦友樹: 構造工学論文集. 57A. 2011, p. 669
- 28) 日本鋼構造協会: 重防食塗装 - 防食原理から設計・施工・維持管理まで -. 技報堂出版, 2012, p. 68



菅江清信 Kiyonobu SUGAE
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 主任研究員
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



上村隆之 Takayuki KAMIMURA
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部長
博士(工学)



安藤隆一 Ryuichi ANDO
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室
主幹



都築岳史 Takeshi TSUZUKI
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室
主幹