

(解説)

## 橋梁向ロングライフ塗装用鋼板(エコビュー)

岡野重雄\*・川野晴弥\*・小林洋一郎\*・中山武典(工博)\*\*・湯瀬文雄\*\*・古川直宏\*\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター \*\*技術開発本部・材料研究所 \*\*\*鉄鋼部門・厚板商品技術部

### Steel Plates with Long-life for Painted Bridges (Eco-View)

Shigeo Okano・Haruya Kawano・Yoichiro Kobayashi・Dr. Takenori Nakayama・Fumio Yuse・Naohiro Furukawa

Steel plates with long-life for painted bridges were developed which can prolong the period between repainting, especially in urban areas where the view should not be disturbed or specifically in strict corrosion environments. The newly developed steel plates are expected to contribute to reduction of life cycle cost, because the anti-corrosion properties of these plates are better than normal steel plates. These new plates are also expected to have similar advantages with heavy anti-corrosion paints in high salty environments.

まえがき = 戦後、我国は社会資本整備を着実に進めてきたが、その維持管理費も増加し、2010年には公共投資額の70%を占めると試算されている<sup>1)</sup>。財政事情の悪化とともに、近年、公共工事のコスト縮減が求められ、鋼橋においても耐久年数の延長(従来60年程度のものを新しい道路橋示方書では100年へ)や、ライフサイクルコスト(LCC)の低減要望が高まっている<sup>2)</sup>。LCCは建設・維持補修・架け替えまでのすべての段階を含んだ概念であり、当社では素材としての厚鋼板の側からも、様々な提案をしている<sup>3)4)</sup>。

最近、高塩分環境でも無塗装使用が可能な新型耐候性鋼板が各社より実用化されているが、景観が重視される都市部や腐食環境の特に厳しい地域では塗装が不可欠である。当社ではこのような点を考慮し、塗装の塗替え周期の延長を可能とする橋梁向ロングライフ塗装用鋼板(エコビュー)を開発した。本報では、その開発コンセプトや開発鋼の特性、その採用によるLCCの低減効果などを紹介する。

#### 1. 塗装橋梁の実態

現状、鋼橋は国土交通省、各種高速道路公団、地方自治体、JR各社などによって建設されているが、その75%程度は塗装仕様である。その塗装費用は上部工建設費全体の5~15%にあたり、塗替え費用も初期塗装費用と同程度必要と言われており、路線の延長とともに塗替え費用も増大し、そのコストダウンが大きな課題となっている。

例えば日本道路公団(JH)では通常のA塗装系(油性錆止めペイント+フタル酸樹脂系)の場合、平均10年で塗替えが必要であり、維持管理費用に占める割合は約7%となっている<sup>5)</sup>。

このような現状を受けて、国土交通省ではC塗装系(ジンクリッチペイントを下地に塗装した重防食塗装)による塗替え周期の延長が試行され、近年C塗装系の比率が増加していることが報告されている<sup>1)</sup>。一方、JHでは薄膜重防食塗装であるI塗装系の採用や全工場塗装化などの塗装方法の改善も行われている<sup>5)6)</sup>。

塗膜の工夫によりある程度の塗装寿命の延長は可能であり、またジンクリッチペイントによる犠牲防食効果も期待できるが、塗装のキズ部やコバ部など弱点部が存在することは避けられない。従って、我々の今回のアプローチは、塗装寿命の根本的な延長を図るために、鋼材面からの改善を試みたものである。

#### 2. 開発目標

前述の各種塗装系において従来鋼板よりも優れた塗装耐食性を確保することを第一の目標とし、通常の鋼橋で使用される引張強さ400~570MPa級鋼板のすべてのメニューをそろえ、さらに予熱などの溶接施工管理が従来鋼と同等に行えること、大入熱溶接に対応できる優れた溶接熱影響部(HAZ)靱性を有することも目標とした。

#### 3. 開発コンセプト

当社では高塩分環境での無塗装使用に耐え得る海浜・海岸耐候性鋼を商品化するにあたって、Cr無添加-Cu-Ni-Ti系という独自の成分系を採用しており、今回の橋梁向塗装用鋼板の開発においても同様の技術を活用することとした。これはCrを添加しない方が腐食先端のpH緩和により腐食抑制に効果があること、さらにCu-Ni-Ti添加により生成さびが緻密化するという知見に基づいている<sup>3)</sup>。

本鋼板における塗装耐食性向上の想定メカニズムを図1に示す。亜鉛層のないA系の場合、あるいは亜鉛層を有するCあるいはI塗装系でも、亜鉛層が消失し犠牲防食効果がなくなった場合には、上記のメカニズムによる塗膜下腐食の抑制効果が期待できる。それに加えて、C及びI系ではこれら元素の選択の結果、亜鉛の消耗速度の低下効果も期待できる<sup>7)</sup>。

その他の元素については、溶接性やHAZ靱性に悪影響を及ぼすCを極力低減し、強度クラスや板厚に応じた強度調整は主にMn量とTMCP条件の制御によって行うこととした。

また、成分系はJIS SM規格の範囲内に収めることにより、本鋼板の実橋への採用にあたって、特別な手続きなどが不必要となるようにした。

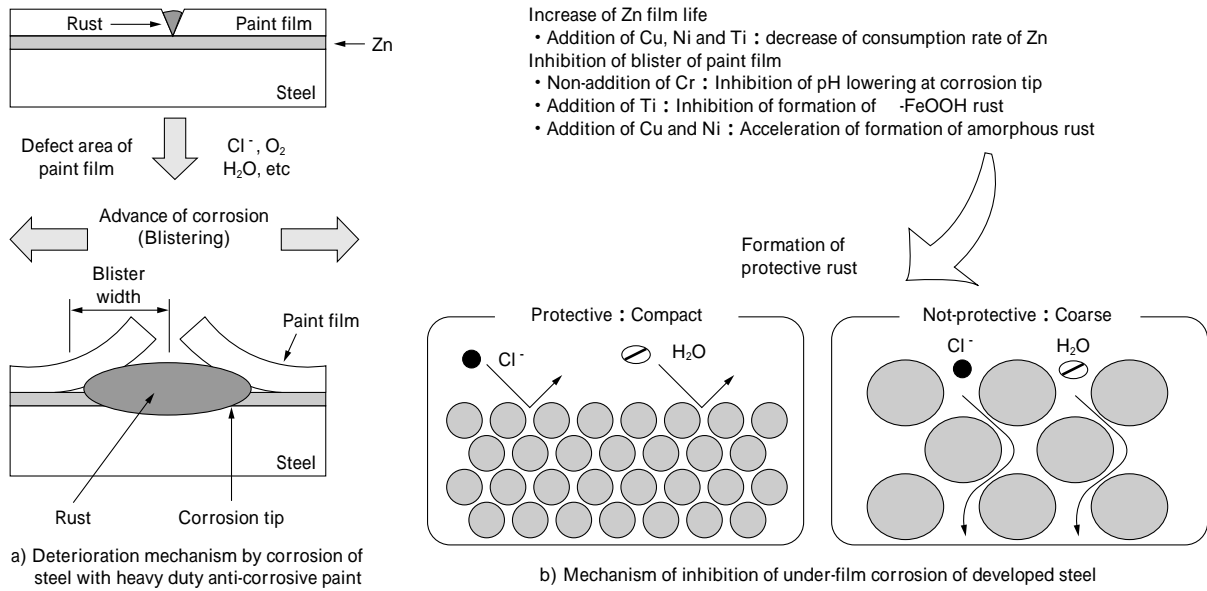


図1 重防食塗装を施した開発鋼の塗膜下腐食抑制メカニズム

Fig. 1 Mechanism of inhibition of under-film corrosion of developed steel with heavy duty anti-corrosive paint

なお、従来の JIS 耐候性鋼 (SMA) の中には塗装用として P 種が規定され、Cu-Cr を含有する成分系であったが、1990 年の道路橋示方書の改訂時に削除されている。今回開発した橋梁向ロングライフ塗装用鋼は、この JIS SMA の P 種とは異なり、Cr を添加せず Ti を添加するというコンセプトや、後述するような効果も異なるものである。

各強度クラスに対応する開発鋼板の化学成分を表 1 に示すが、低 C (0.05%) としたことにより、Cu, Ni などが添加されているにもかかわらず、溶接低温割れの指標である  $P_{CM}$  はいずれの強度クラスでも 0.19% 以下であり、予熱軽減の目安である 0.21% を下回っている。また、母材特性を表 2 に示すが、各強度クラスの鋼板とも十分な強度・靱性を有している。

溶接継手特性を表 3 に示す。道路橋示方書に規定された溶接入熱の上限 7kJ/mm のサブマージアーク溶接 (SAW) はもちろん、現場溶接を想定したウェブの立向

#### 4. 開発鋼板の特性

##### 4.1 機械的特性

表 1 開発鋼板の化学成分  
 Table 1 Chemical compositions of developed steel plates

Steel class	Thickness (mm)	Chemical compositions (%)							$C_{eq}^{(1)}$ (%)	$P_{CM}^{(2)}$ (%)
		C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Ti		
400MPa	25	0.05	0.30	0.65	0.78	0.41	0.01	0.045	0.24	0.14
	50	0.06	0.30	1.24	0.74	0.38	0.01	0.042	0.35	0.18
490MPa	25	0.05	0.32	1.56	0.79	0.41	0.02	0.046	0.40	0.19
	50	0.05	0.30	1.54	0.77	0.39	0.02	0.041	0.39	0.19

Note) 1)  $C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + (Cu/13)$

(Cu : applied when Cu 0.50%)

2)  $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

表 2 開発鋼板の母材特性及び溶接性  
 Table 2 Base metal properties and weldability of developed steel plates

Steel class	Thickness (mm)	Tensile properties			Impact properties		y-Groove cracking test Cracking ratio at 25
		YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)	
400MPa	25	389	449	30	0	314	0
	50	487	532	25	0	339	0
490MPa	25	501	561	29	0	358	0
	50	557	626	30	-5	291	0

表 3 開発鋼板の溶接継手特性  
 Table 3 Properties of welded joints of developed steel plates

Steel class	Thickness (mm)	Groove preparation	Welding method	Heat-input (kJ/mm)	Tensile properties		Impact properties		
					TS (MPa)	Fracture position	Notch location	Test temp.	Absorbed energy (J)
490MPa	25	X	SAW	6.0	522	BM	WM FL + 1mm	0	72
							FL + 1mm	0	147
	50	V	EGW	11.4	547	WM	WM FL + 1mm	0	60
							FL + 1mm	0	88
570MPa	50	V	CO <sub>2</sub>	1.8	535	BM	WM FL + 1mm	0	67
							FL + 1mm	0	292
570MPa	50	V	SAW	7	603	BM	WM FL + 1mm	0	95
							FL + 1mm	0	125
570MPa	50	V	CO <sub>2</sub>	1.8	631	BM	WM FL + 1mm	-5	75
							FL + 1mm	-5	230

溶接である大入熱エレクトロガスアーク溶接(EGW, 入熱 11kJ/mm) においても十分な HAZ 靱性が確保されている。

#### 4.2 塗装耐食性

JIS SM 材を比較鋼として,各種条件で本開発鋼板の塗装耐食性を評価した。表 4 に示すように実験に用いた塗装系としては,従来から鋼橋に広く適用されている前述の一般環境用の A 系に加えて,海岸近くの厳しい環境用の C 系(重防食塗装系),さらに JH で採用されている I 系(薄膜形重防食塗装系),の計 3 種類である。試験片にこれらの塗装を施し,養生後に塗装キズ部やさびの広がりやすいコバ部を模擬して,カッタナイフにて人工塗膜欠陥を付与した。塗装耐食性試験は,実環境での屋外曝露試験との相関が公表されている促進試験として JHS403-1997<sup>6)</sup> に準拠した複合サイクル(CCT)試験(試

験)を,720 サイクル(6 カ月)行った。

また,さらに長期間での腐食データを採取するために,試験後に兵庫県内の田園地区にて週 1 回 3%食塩水を散布する促進曝露試験を行った(試験)。

このほかに,試験後に一部の試験片には新たな人工塗膜欠陥を付与し,週 1 回 3%食塩水を散布する促進試験(試験)も行っている。試験とについては,現状 18 カ月までのデータが得られている。これらの評価試験の内容を図 2 に示す。

図 3 に各試験後の試料外観写真と人工塗膜欠陥部のふくれ幅測定結果を示す。図 4 に試験のふくれ幅の経時変化を示す。これらの結果から,A 塗装系においてはいずれの試験においても,JIS SM 材に比べて本開発鋼のふくれ幅は小さく,塗装耐食性向上効果が認められる。写真 1 に試験の人工塗膜欠陥部の断面写真を示すが,本

表 4 塗装系の比較  
Table 4 Comparison of painting system

	A-paint system	I-paint system	C-paint system																										
Number of painting process	4	3	6																										
Film thickness	125 μm	130 μm	250 μm																										
Cost	¥4 000/m <sup>2</sup>	¥4 000/m <sup>2</sup>	¥7 500/m <sup>2</sup>																										
Applicable regions	Not-corrosive regions	Urban regions	Coastal regions																										
Details of paint films	<table border="1"> <tr><td>Phthalic resin</td><td>Top-coat (55 μm)</td></tr> <tr><td>Rust preventive Pb pigment</td><td>Under-coat (70 μm)</td></tr> <tr><td>Primer</td><td></td></tr> <tr><td>Steel</td><td></td></tr> </table>	Phthalic resin	Top-coat (55 μm)	Rust preventive Pb pigment	Under-coat (70 μm)	Primer		Steel		<table border="1"> <tr><td>Polyurethane resin</td><td>Top-coat (55 μm)</td></tr> <tr><td>Organic Zn</td><td>Under-coat (75 μm)</td></tr> <tr><td>Primer</td><td></td></tr> <tr><td>Steel</td><td></td></tr> </table>	Polyurethane resin	Top-coat (55 μm)	Organic Zn	Under-coat (75 μm)	Primer		Steel		<table border="1"> <tr><td>Polyurethane resin</td><td>Top-coat (55 μm)</td></tr> <tr><td>Epoxy resin</td><td>Intermediate-coat (120 μm)</td></tr> <tr><td>Inorganic Zn</td><td>Under-coat (75 μm)</td></tr> <tr><td>Primer</td><td></td></tr> <tr><td>Steel</td><td></td></tr> </table>	Polyurethane resin	Top-coat (55 μm)	Epoxy resin	Intermediate-coat (120 μm)	Inorganic Zn	Under-coat (75 μm)	Primer		Steel	
Phthalic resin	Top-coat (55 μm)																												
Rust preventive Pb pigment	Under-coat (70 μm)																												
Primer																													
Steel																													
Polyurethane resin	Top-coat (55 μm)																												
Organic Zn	Under-coat (75 μm)																												
Primer																													
Steel																													
Polyurethane resin	Top-coat (55 μm)																												
Epoxy resin	Intermediate-coat (120 μm)																												
Inorganic Zn	Under-coat (75 μm)																												
Primer																													
Steel																													

- Test : Cyclic corrosion test (JHS403-1997)\* for 6 months using samples with artificial film defects (scratch)
- Test : Outdoor exposure test with 3%NaCl spray once a week at rural regions for 18 months after test using the same sample of test
- Test : Test using the samples with new artificial film defects (scratch) after test using the same sample of test

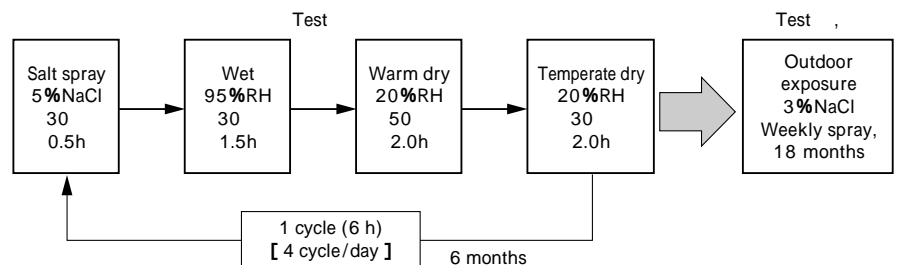
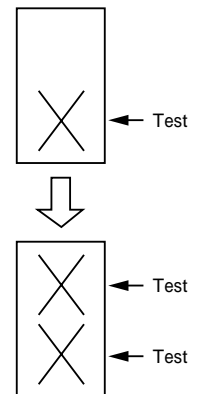


図 2 塗装鋼の耐食性評価試験条件  
Fig. 2 Test conditions for evaluation of corrosion resistance of painted steels

\* Equivalent to outdoor exposure conditions for 6 years at Hokuriku regions, for 11 years at Tokyo regions, and 4 years at sea-water spray regions, respectively.

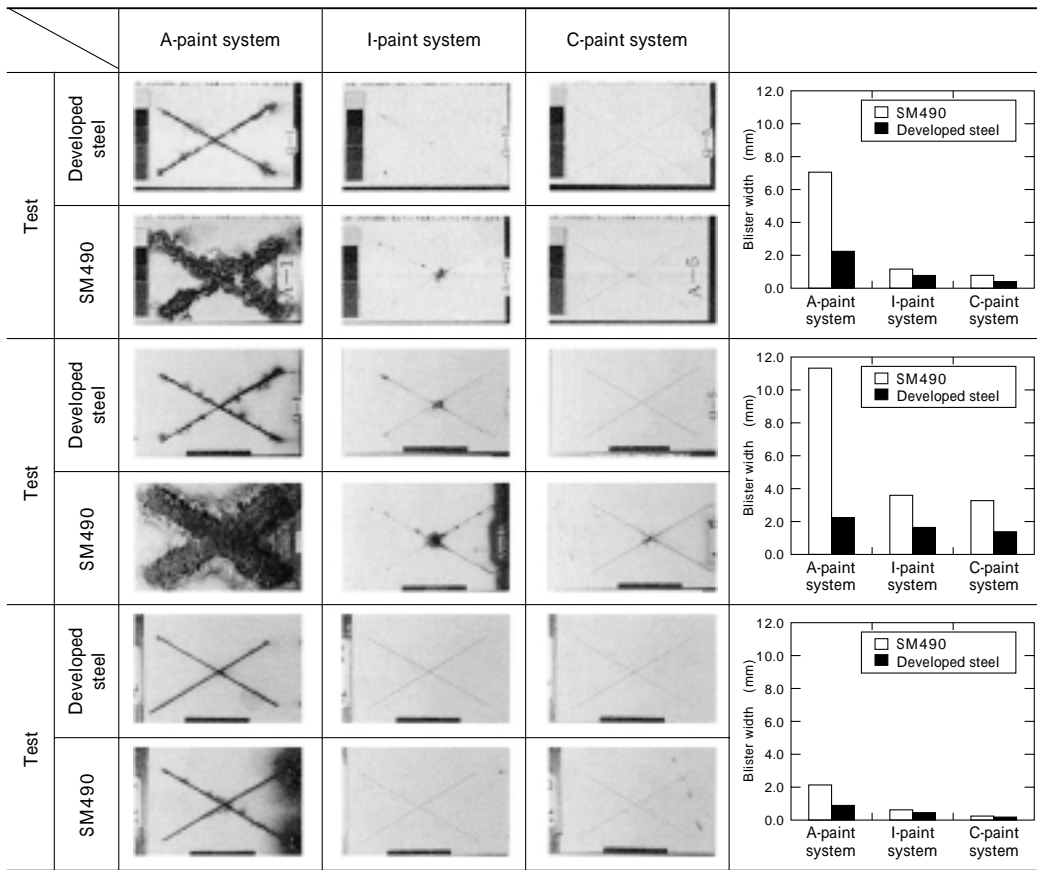


図3 試験後の試料外観状況例とふくれ幅  
 Fig. 3 Appearance and blister width of painted steels after test

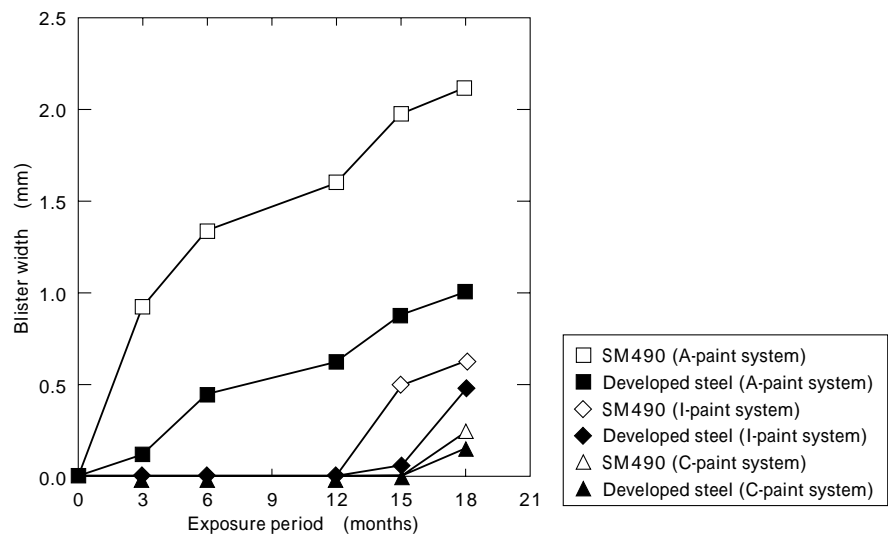


図4 試験の塗装耐食性経時変化  
 Fig. 4 Change with time of corrosion resistance of painted steels of test

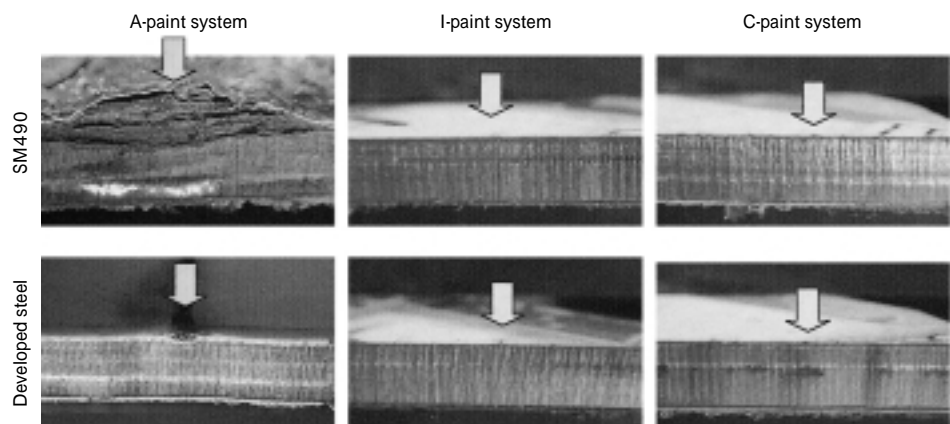


写真1 試験18カ月後の各試料断面写真  
 Photo 1 Cross-section photographs of each sample after test for 18 months

塗装用鋼板による塗膜下腐食の防止効果ははっきりと表れている。

一方、I系、C系ではA系に比べてふくれ幅が著しく

表5 LCCの計算に用いた橋梁形式  
Table 5 Type of bridge used for calculating LCC

Main structure	4-I girder
Type of bridge	3-span continuous steel plate girder bridge
Length of bridge span	120m = 3@40m
Road width	11.5m
Effective road width	10.5m
Deck	RC slab
Slab thickness	240mm

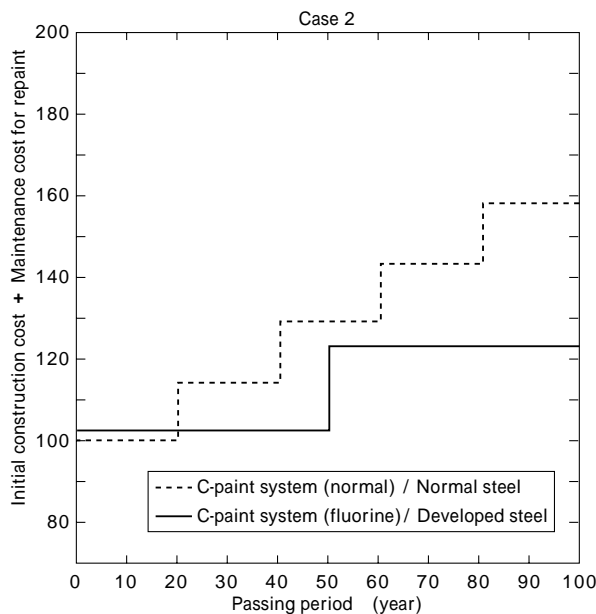
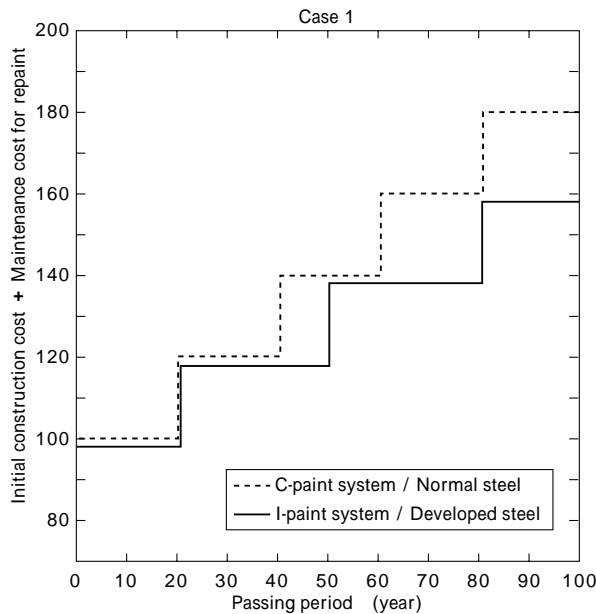


図5 LCCの計算例  
Fig. 5 Examples of calculating LCC

小さく、亜鉛による犠牲防食効果が認められるが、試験においては本鋼板の効果が現れ始めている。

このようにまだ期間が限られたデータではあるが、塗替え周期は本開発鋼板の採用により、少なく見積もってもJIS SM材の1.5倍程度には延長可能と思われる。

## 5. 考察

上記の試験結果に基づき、LCC低減効果を試算した。具体的には表5に示す橋梁に対して、二つのケースで試算した。ケース1ではLCC低減に加えて初期コストの低減も目標として、従来鋼にC塗装系を施していた場合を基準とし、これを本塗装用鋼の採用により塗装を簡略型のI塗装系に変えた場合である。この場合には塗替え周期を従来鋼の1.5倍の30年と仮定した。

一方、ケース2では塗替え周期の徹底的な延長を目標として、従来鋼にC塗装系を施した場合を基準とし、これを本塗装用鋼の採用とC塗装系の中でも塗膜の延長効果の大きいふっ素を上塗りに用いた場合である。この場合には100年間に塗替えが1回だけ必要と仮定した。

具体的試算においては、鋼材費用は従来鋼の1.2倍とし、また、ボルトや溶接材料についても専用品を開発済みであり、それらを使用するものとした。算出方法は文献2)に基づいた。

その試算結果を図5に示す。縦軸は従来鋼板を使用した場合の初期建設費用を100として求めた百分率で表している。ケース1では、初期建設コストが1.7%減少し、50年後のLCCは13.6%減少する。一方、ケース2では初期建設コストが2.4%増加するものの、100年後のLCCは35%減少することがわかる。

むすび=橋梁向けロングライフ塗装用鋼(エコビュー)は、A塗装系において普通鋼に比べて優れた塗装耐食性を有しており、重防食系のC及びI塗装系においても同様の効果が示唆された。これらのことから、本開発鋼板は塗替え周期延長を可能とし、鋼橋のライフサイクルコスト低減効果が期待される。今後、さらに腐食データを積み重ねていく所存である。

## 参考文献

- 1) 守屋 進: 第123回腐食防食シンポジウム資料(1999) p.11.
- 2) (社)日本橋梁建設協会: 鋼橋のライフサイクルコスト(2000)
- 3) 菅 俊明ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.2 (1999) p.31.
- 4) 中山武典ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.1 (1999) p.29.
- 5) 藤原 博: 材料と環境, Vol.45, No.7 (1996) p.439.
- 6) 藤原 博: 土木学会論文集, No.570 (1997) p.129.
- 7) 湯瀬文雄ほか: 土木学会第56回(2001)年次学術講演会講演概要集(-A234)