

第1章 概要

(1) 桁端の腐食の特徴

塗装は、塗膜により鋼材を被覆し、腐食因子の水と酸素から遮断することにより、腐食を防止する防食法であるものの、塗膜は、紫外線や塩分、水分などの劣化因子の働きにより時間の経過とともに劣化するため、適切な時期に塗装の塗り替えを行わないと、やがては防食機能が低下し、鋼材は腐食してしまう。

桁の端部は、床版、橋台、支承や落橋防止装置に囲まれた狭隘な空間となっており、桁の支間中央部と比べて風通しが悪く湿気がこもりやすい条件である上、伸縮装置の排水機能や排水施設の不具合による漏水、滞水、土砂堆積の発生事例が多く、厳しい腐食環境に置かれており、地域や時期によっては漏水に劣化促進因子の塩分を含む凍結防止剤が多量に含まれる更に厳しい腐食環境におかれることもある。このようなことから、道路橋では、一般に桁の端部において、塗膜が局所的に劣化して著しい腐食に至るものと考えられてきた。図-1.1 に桁端の腐食事例を、図-1.2 に国土技術政策総合研究所で行った部位別の腐食発生状況の調査結果を示す。この調査¹⁾¹⁾は、直轄国道の定期点検結果を用いて、鋼I桁橋を対象として橋梁の部位と腐食発生状況の相関関係について、統計的に処理する方法で分析を行うとともに、桁端部における腐食事例を収集し、支点部の鋼桁を領域ごとに分割して腐食形態の傾向分析を行い、支点部の代表的な腐食形態を対象とした数値解析による耐荷力の影響を検討したものである。桁端部における腐食形態は、表-1.1 に示す3つの代表的なパターンで全体の65%を占めている状況であった。

また、橋梁の部位と腐食発生状況の相関関係は、橋軸方向の位置を、両端支点部、1/4支間及び3/4支間、支間中央の5領域を分けて無次元化し、各領域に該当する垂直補剛材で区切られる各要素に発生した腐食を損傷程度で点数化して腐食発生状況を集計している。端支点部は、1要素のみが対象であるにも拘わらず、分析対象橋梁(587橋)のうち端支点以外のみ腐食を生じていたものは7.07%(40橋)に過ぎず、図-1.2 に示す鋼単純鉸桁の腐食の部位別損傷点数からは、端支点の腐食頻度が支間中央よりも突出する傾向がみられた。損傷程度別に分けた腐食発生状況を図-1.3 に示す。表面的なさびが発生している損傷程度b及び損傷程度cでは、桁端とその他の部位との損傷点数の比率は1.25倍程度で大きな差がない状況である。一方、板厚減少を伴う損傷程度dでは約2.0倍、損傷程度eでは約1.6倍もの差があり、桁端での腐食発生が多い状況にあることがわかる。

更に、過去2回の点検データによる5年間の腐食の進行状況の例を図-1.4 に示す。5年以内遷移確率を見ると、表面的なさびが発生する損傷程度b及びcへの進行は1~3割程度の確率で遷移しているものの、板厚減少を伴う損傷程度d及びeへの進行は、損傷程度a~cに損傷程度によらず、5%程度の割合で、遷移している状況にある。鋼I桁橋主桁の桁端部と支間中央部を分けた腐食の遷移状況を図-1.5 に示す。桁端部は支間中央部と比較すると、板厚減少を伴う損傷程度d及びeへ進行する割合が大きい状況にある。

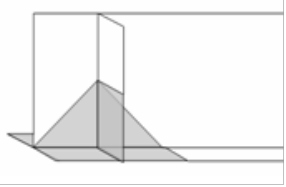
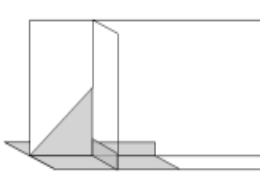
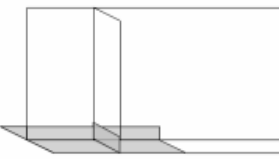
なお、腐食が橋梁の耐荷力に及ぼす影響を試算した数値解析結果¹⁾¹⁾によると、腐食による板厚減少やそれに伴う応力集中による亀裂の発生が耐荷力に大きな影響を及ぼすことがわかった。

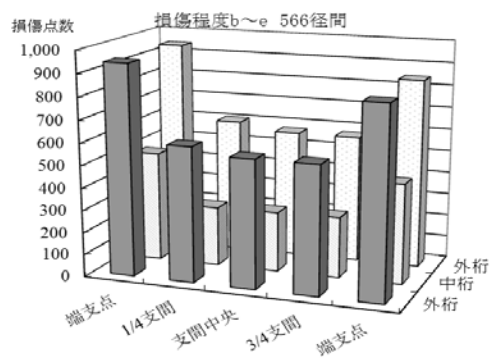
以上から、板厚減少を伴う腐食の発生は、部位によって一様でなく、とりわけ狭隘な空間で漏水や土砂堆積等の影響を受ける機会が多い桁端部において多く発生する傾向にあり、それらの局所的な腐食は、全体的に塗膜劣化に伴う表面的なさびが発生している場合と比べて腐食の進行が早く、橋梁の耐荷力に大きな影響を及ぼすため、局所的な腐食に対処できる方策を導入し、予防保全することが重要である。



図-1.1 桁端における腐食事例^{1.1)}

表-1.1 桁端の腐食形態^{1.1)}

主な腐食パターン				
腐食形態		事例数 3/20 (15%)		事例数 4/20 (20%)
		事例数 6/20 (30%)	その他	事例数 7/20 (35%)



錆の有無	錆の深さ	錆の広がり	損傷程度	損傷点数
なし	-	-	a	0
あり	表面のみ	局部的	b	1
		広域的	c	2
	板厚減少、鋼材表面の著しい膨張	局部的	d	3
		広域的	e	4

図-1.2 部位別の腐食発生状況（鋼単純鈑桁）^{1.2)}

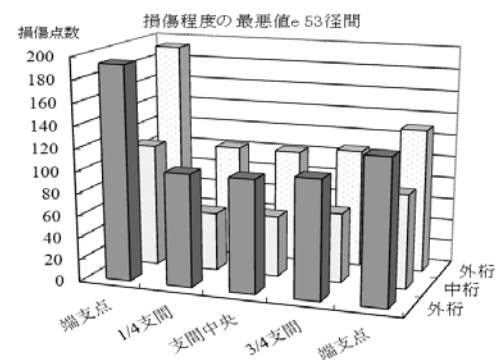
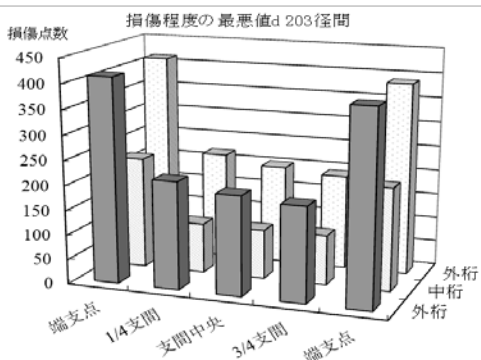
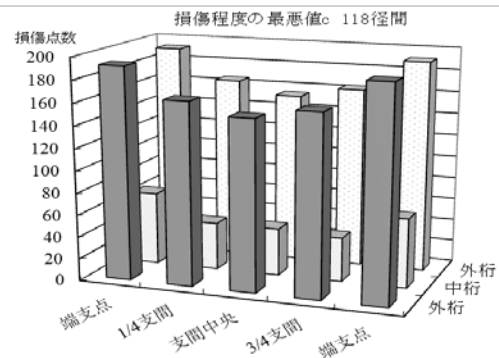
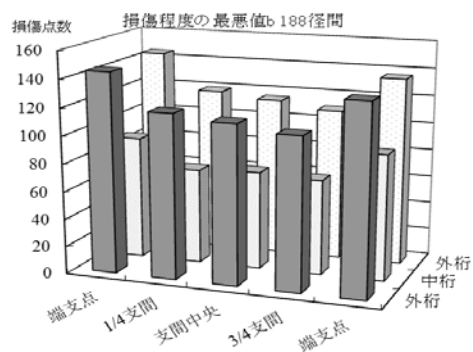


図-1.3 部位別・損傷程度別の腐食発生状況（鋼単純鈑桁）^{1.2)}

板厚減少を伴う腐食へ遷移

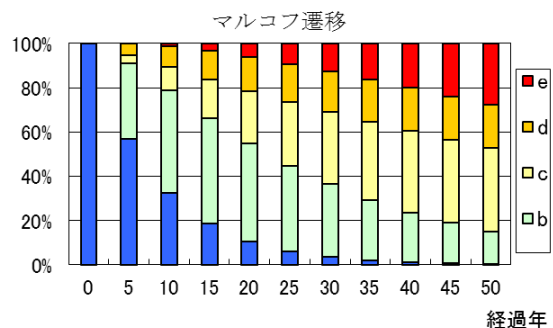
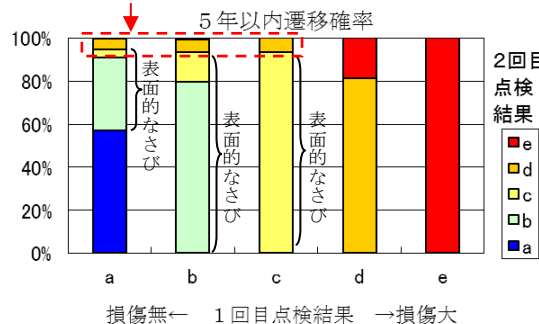
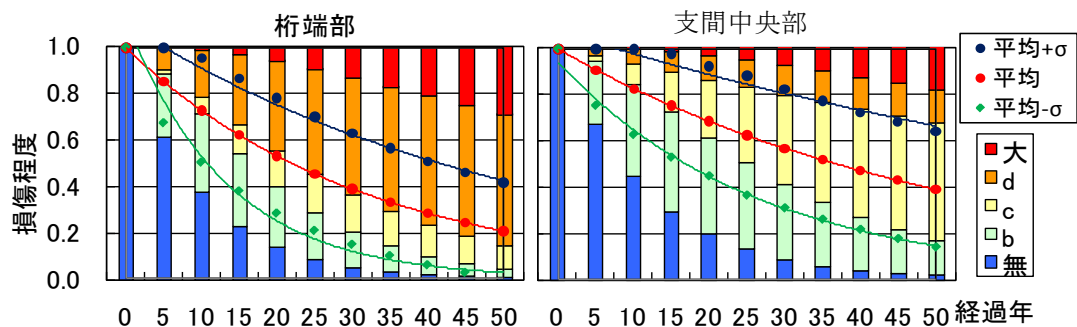


図-1.4 鋼橋主桁の腐食（一般塗装系）の劣化予測式算出過程の例^{1.3)}



2回の点検結果の推移からマルコフ遷移確率を求め、損傷程度に重み付けを行い（無=1.0～大=0.0）、経過年毎に平均及び標準偏差を算出（損傷部位別の暫定値）。

図-1.5 鋼I桁橋主桁の腐食の劣化曲線の例^{1.4)}

（２）塗り替え後の劣化状況

板厚減少を伴う腐食は、桁端部などにおいて局所的に発生する傾向にあることを前に述べた。これに対して従来は、劣化や腐食がある程度進行してから橋全体の塗装を一般塗装系で全面塗り替えする対応が行われていた。ここでは、全面塗り替え後の劣化状況に着目して、全面塗り替えにおける劣化状況と課題を整理する。

A塗装系やB塗装系の既設橋を機械工具等による３種ケレンにより塗り替える場合、さびやさび内部に付着した塩化物イオンを完全に除去することは困難であること^{1.5)}から、腐食のあった部位の塗膜の耐久性は、新設時と比較して大きく劣っており、図-1.6の事例に示すように、比較的早期に塗膜の再劣化が局部的に始まることがある。この様な過去に腐食のあった部位では、塗膜の劣化と腐食の進行により、比較的短い間隔で何度も塗装塗り替えが行われている。一方、健全な塗膜の部分では、図-1.7に示す既設橋の塗膜の断面の事例のとおり、過去の塗装塗り替えにおいて健全な塗膜の上に何度も塗り重ねられ、何層もの厚い塗膜厚になっており、防食機能の信頼性の面からも、経済性の観点からも、合理的とはいえない状態になっている。

直轄管理橋梁の点検において評価される対策区分の判定結果を、鋼橋主桁の腐食について集計したものを、図-1.8に示す。橋年齢の古い橋ほど緊急対策を要する判定「E」あるいは速やかに補修すべき状態である判定「C」が多くなる傾向が見られ、経年によって腐食が進行し、橋の状態は悪化する傾向にある。適切な時期に塗装塗り替えを行うことで状態の深刻化が防止できる可能性があると考えられるものの、従来の一般塗装系による全面塗り替えでは再劣化が避けられない現状にある。

以上からは、橋梁に発生する全ての腐食に対して、さびや塩化物イオンを完全に除去するとともに、防食性能の高い重防食塗装で塗装塗り替えし、短期間での再塗装の繰り返しを避ける対応策が望まれる。



図-1.6 ３種ケレンによる塗替
(Rc-Ⅲ，約１年４ヶ月経過)



図-1.7 既設橋の健全な塗膜の断面
(A 塗装系)

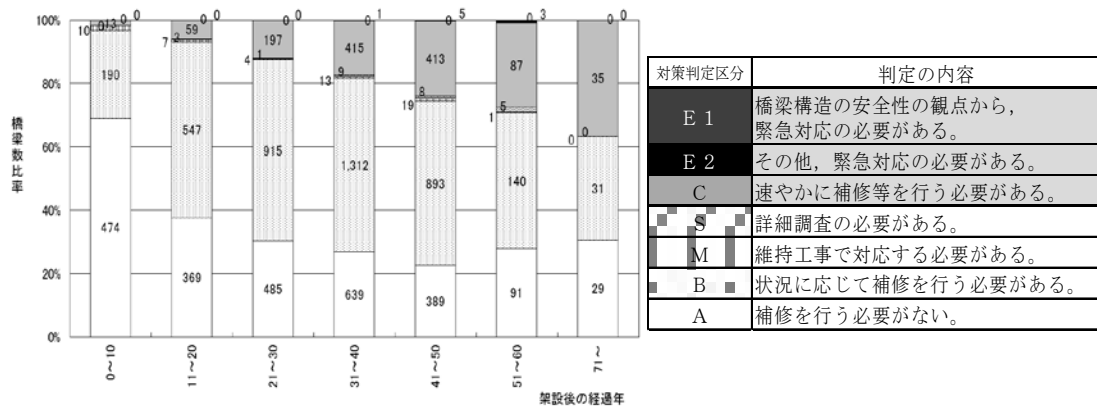


図-1.8 鋼橋主桁の腐食判定区分別の橋梁数比率（架設後の経過年）^{1.6)}

（３）部分塗り替え塗装に関する技術資料

従来の塗装塗り替えにおいて、部分塗り替え塗装はほとんど行われていない状況であるので、技術資料等における部分塗り替え塗装に関する経緯と課題を整理する。

鋼道路橋塗装便覧（昭和 54 年 12 月）^{1.7)}の塗り替え塗装の項目において、「塗装の劣化は、橋りょう全体に一樣に進行することは少なく、フランジ下面や部材突縁部、現場継手部、雨水や土砂のたまりやすい箇所など、さびやすい部分とその他の部分とでは、劣化程度に差が生ずる。伸縮継手や排水ますの周辺、あるいはコンクリート床版からの漏水が流下する箇所など、特殊な原因により著しい劣化を生じている箇所に対しては、部分塗り替え塗装を行うこともある。」と、部分塗り替え塗装が紹介されていた。

鋼道路橋塗装便覧（平成 2 年 6 月）^{1.8)}の部分塗り替えの項目において、「著しい漏水や滞水等の原因により早期に劣化した部分に対しては、原因を排除できない場合は、より防せい機能に優れた塗装系を適用することが必要である。」とされており、A系・B系塗装から、重防食塗装である有機ジンクリッチペイントとポリウレタン樹脂塗料（c-1）又はフッ素樹脂塗料（c-3）等への塗り替えが示された。

鋼道路橋塗装・防食便覧（平成 17 年 12 月）^{1.9)}では、新設塗装において、ジンクリッチペイントとフッ素樹脂塗料を用いた高耐久性の重防食塗装を基本的に使用することとなった。塗り替え塗装においても、1 種ケレンを行った上で、重防食塗装を行う Rc-I 塗装系（表-1.2）を基本とするのがよいと推奨している。部分塗り替えの項目において、桁端部などの塗膜の劣化が著しくなる特定の部位を適切に維持管理することにより、全面塗り替え時期を延ばすことが可能であり、一般部の塗膜が健全でも、塗膜の劣化が著しい特定の部位を部分塗り替えすることもあると、紹介されている。

以上のとおり、部分塗装は技術資料で一般的な留意事項が紹介されていたものの、塗装系を部分的に変更する場合の知見が無いことから、従来は全面塗り替えが行われることが多い状況にあった。そのため、部分塗装の新旧塗膜の境界部の仕様を検討する必要がある。

表-1.2 Rc-I 塗装系（スプレー）^{1.9)}

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m ²)	塗装間隔
素地調整	1 種		4 時間以内
下塗	有機ジンクリッチペイント	600	1～10 日
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	1～10 日
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	1～10 日
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170	1～10 日
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	170	1～10 日

(4) 既設橋の塗装系

既設橋の塗装には、様々な種類の塗料が使用されており、塗り替えを検討する上で、既設橋に適用されている塗料の種類を把握することが重要であるため、過去の技術資料から主な外面用塗装系を整理する。

外面用塗装系の経緯を表-1.3 に示す。一般塗装系では、長油系フタル酸樹脂塗料を上塗りに使用した塗装系が一般環境で広く使用されており、外観の色調を長期間保持する必要がある場合にはシリコンアルキド樹脂塗料が上塗りに使用される。また、腐食環境が厳しい海岸付近等の場所や塗り替えの困難な場所では、塩化ゴム系の塗料を上塗りに使用した塗装系やポリウレタン樹脂塗料、ふっ素樹脂塗料を上塗りに使用した塗装系が選択される。平成 17 年 12 月の塗装・防食便覧改訂後は、ジンクリッチペイントの防食下地とふっ素樹脂塗料を上塗りに使用した重防食塗装系が、原則的に全ての道路橋に適用されている。

表-1.3 主な外面用塗装系

		一般塗装系				重防食塗装系		
主な塗料	上塗り	長油性フタル酸樹脂塗料上塗り	シリコンアルキド樹脂塗料上塗り	塩化ゴム系上塗り塗料			ポリウレタン樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り
	中塗り	長油性フタル酸樹脂塗料中塗り	シリコンアルキド樹脂塗料用中塗り	塩化ゴム系中塗り塗料			ポリウレタン樹脂塗料用中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗り
	下塗り	鉛丹さび止めペイント1種(1979.12以降) 鉛系さび止めペイント1種(1990.6以降) 鉛・クロムフリーさび止めペイント(2005.12以降)	フェノール樹脂 MIO塗料	HB 塩化ゴム系プライマー(1971.12以降) 塩化ゴム系下塗り塗料(1979.12以降)	ポリウレタン樹脂系プライマー(1971.12以降) エポキシ樹脂塗料下塗り(1979.12以降)			
				鉛系さび止めペイント1種	ジンクリッチプライマー	無機ジンクリッチペイント		
1971.12 以降 ^{1.10)}		A-1				C-1	C-3	
1979.12 以降 ^{1.7)}		A-1		B-1	B-2	C-1	C-2	
1990. 6 以降 ^{1.8)}		A-1	A-3	B-1			C-1	C-3
2005.12 以降 ^{1.9)}		A-5						C-5

（５）塗装系による腐食発生状況の違い

桁端部において、損傷程度 d 及び e の腐食が多く発生していることは前に述べた。前項で紹介した塗装系によって、腐食の発生状況にどのような違いがあるのか確認するため、直轄道路橋の定期点検結果から、主桁に損傷程度 d または e の腐食が発生している事例を 10 橋程度抽出して腐食発生状況を確認した。

1) 長油性フタル酸樹脂塗料を上塗りに使用した塗装系

長油性フタル酸樹脂塗料を上塗りに使用した非合成単純Ⅰ桁橋における損傷程度 d または e の腐食の発生事例を表-1.4 に示す。10 橋のうち、5 橋は桁端の 1 パネルのみ腐食が発生しており、他の 5 橋のうち、1 橋は桁端と同条件と考えられる桁が地山に接する部位の腐食、1 橋は床版のひびわれからの漏水による桁全体の腐食、残りの 3 橋は桁端から 1/4 支間のパネルの腐食であった。

2) 塩化ゴム系塗料を上塗りに使用した塗装系

塩化ゴム系塗料を上塗りに使用した鋼橋における損傷程度 d または e の腐食の発生事例を表-1.5 に示す。10 橋のうち、5 橋は桁端の 1 パネルのみ腐食が発生しており、他の 5 橋は桁端も含めた桁の全体に渡って下フランジ等に腐食が発生していた。

3) ポリウレタン樹脂塗料を上塗りに使用した塗装系

ポリウレタン樹脂塗料を上塗りに使用した鋼橋における損傷程度 d または e の腐食の発生事例を表-1.6 に示す。11 橋のうち、8 橋は桁端の 1 パネルのみ腐食が発生しており、残り 3 橋のうち 2 橋は桁端も含めた桁の全体に渡って下フランジ等に腐食が発生していた。残り 1 橋はボルト継手におけるボルトの頭の腐食であった。

以上のように、損傷程度 d 以上の腐食が桁端のみで発生するという特徴には、塗装系の違いは支配的な要因にはならないものと考えられる。

表-1.4 長油性フタル酸樹脂塗料を使用した塗装系における腐食発生事例

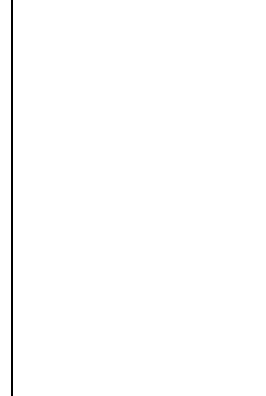
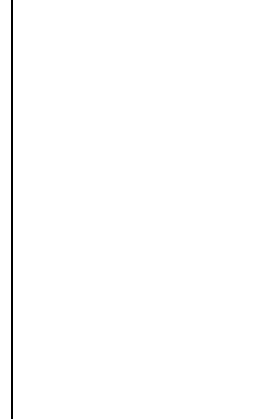
桁端 1 パネルのみ腐食	桁の全体で腐食発生等
 設置後 24 年経過	 設置後 51 年経過 塗替後 10 年経過
 設置後 33 年経過	 設置後 33 年経過 塗替後 14 年経過
 設置後 47 年経過	 設置後 51 年経過 塗替後 24 年経過
 設置後 68 年経過	 設置後 23 年経過 塗替後 12 年経過

表-1.5 塩化ゴム系塗料を使用した塗装系における腐食発生事例

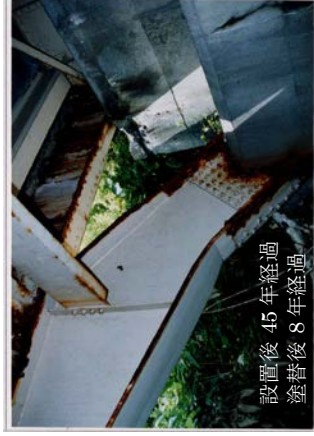
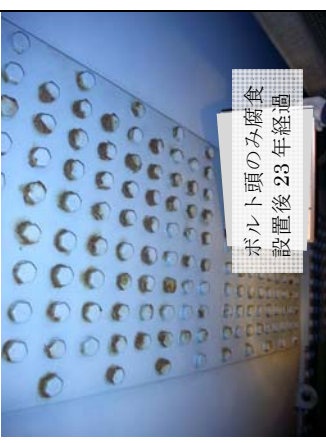
桁端 1 パネルのみ腐食	桁の全体で腐食発生等
 設置後 44 年経過	 設置後 45 年経過 塗替後 8 年経過
 設置後 37 年経過	 設置後 38 年経過 塗替後 10 年経過
 設置後 39 年経過 塗替後 4 年経過	 設置後 37 年経過 塗替後 17 年経過

表-1.6 ポリウレタン樹脂塗料を使用した塗装系における腐食発生事例

桁端 1 パネルのみ腐食	桁の全体で腐食発生等
 設置後 31 年経過  設置後 29 年経過 塗替後 3 年経過  設置後 41 年経過 塗替後 2 年経過	 設置後 38 年経過 補修塗装後 7 年経過  設置後 39 年経過 塗替後 10 年経過  ボルト頭のみ腐食 設置後 23 年経過
 設置後 35 年経過 塗替後 12 年経過  設置後 34 年経過  設置後 31 年経過  設置後 33 年経過	

(6) 部分塗り替え塗装導入に向けた課題の抽出

橋梁において発生する全ての腐食に対して、全面塗り替え塗装のみで対応することは、予算等の制約がある中では難しい場合がある。板厚減少を伴う腐食は、桁端で発生することが多いことから、桁端などを良好な品質の重防食塗装により塗り替える部分塗り替え塗装を導入する方策により、全ての腐食に対して迅速に対応することが考えられる。

そのため、本研究では、部分塗り替え塗装を導入するために必要な検討課題として、次の2点に着目して検討を行った。なお、桁端部以外での腐食も発生しているため、全面塗り替えと部分塗り替えの選定は、経済性や施工性、維持管理性を含めた比較検討を行い選定する必要があると考えられる。

- 1) 桁端の狭隘な部位において良好な施工品質を確保するため、狭隘な部位における素地調整や塗装の施工性や施工品質の評価。
- 2) 塗装系の異なる新旧塗膜の塗り重ね部において、塗膜に欠陥が発生せず、塗膜は十分な付着力を有し、耐久性があることの確認。