

鋼道路橋の新しい防食技術

－防食材料の高耐久化と環境負荷の低減－

はじめに

わが国は、急速な少子高齢化の進展により活力が低下することが懸念されており、橋梁などの社会資本は現在あるものを今後も長期間その機能を維持することが求められるようになりつつある。このような状況で鋼道路橋などの防食技術も高耐久化（長寿命化）が求められている。また、環境問題に対する意識の向上に伴い、環境保全に関する取り組みも求められるようになってきた。このような観点から、鋼道路橋の防食に関する基準となる鋼道路橋塗装便覧（平成2年7月発刊）（以下、「塗装便覧」と言う）に替わる鋼道路橋塗装・防食便覧（仮称）（以下、「防食便覧」と言う）では、塗装以外に適用が増えつつある防食法として耐候性鋼材、溶融亜鉛めっき、および金属溶射を取り上げ、それぞれの防食方法が確実にその機能を発揮するための技術的な留意事項等をまとめている。本稿では、防食便覧で取り上げられた新しい防食技術の特徴と、鋼道路橋の長寿命化のための塗装の高耐久化と環境負荷の低減について記述する。

1. 塗料・塗装

1. 1 鋼道路橋塗装の高耐久化

塗装便覧では、鋼橋塗装は架設場所の腐食環境を一般環境、やや厳しい環境、厳しい環境と3段階に分類して、それぞれにA塗装系（鉛系さび止め／フタル酸樹脂塗料中・上）、B塗装系（鉛系さび止め／フェノールMIO／塩化ゴム系樹脂塗料中・上）、C塗装系（無機ジンクリッチペイント／エポキシ樹脂下／（エポキシ樹脂MIO）／ポリウレタン樹脂塗料中・上か、ふっ素樹脂塗料中・上）を適用していた。防食便覧では、塗装の塗替え費用が鋼道路橋の維持管理費用の大きな部分を占めていることから、本州四国連絡橋などの海洋架橋に適用されている重防食塗装系（C塗装系）を、腐食環境に係わらず全ての橋梁に適用して塗膜を長寿命化して、鋼道路橋塗装のLCCを低減することを目指している¹⁾。

このため、新設橋梁の塗装は、原則として重防食塗装系を適用することとし、その防食性能を確実に発揮させるため、従来の工場塗装で下塗りまで塗装し、現場架設後、中塗り、上塗り塗装を行う方式に替えて、上塗りまで工場塗装とし十分な管理の下で良好な塗膜を得ることを目指している。さらに、重防食塗装系の防食性能を長期間保持するため、上塗り塗料は、最も耐候性に優れているふっ素樹脂塗料を適用することとした。また、塗替え塗装は、現場塗装であるため都市部などでは橋梁周辺住民などから溶剤臭の苦情が多くあるため溶剤臭気の主な原因であるトルエンやキシレンの代わりに脂肪族炭化水素系有機溶剤を用いた弱溶剤形塗料を適用することとした。さらに、美観上の観点から自動車排ガスや砂塵などによる汚れが付きにくい、あるいは汚れが容易に除去できる防汚材料を上塗り塗料に適用することを紹介している²⁾。

1. 2 環境負荷の低減

(1) 揮発性有機溶剤量の削減

塗料から排出される溶剤などの揮発性有機化合物（以下「VOC」と略す）は、光化学スモッグや地球温暖化の原因物質の一つとしてその削減が求められている。このため、現行C塗装系に含まれているVOCを1/3以上削減した環境にやさしい塗装系を紹介している³⁾。環境にやさしい塗装系の基本は、鋼材防食を確実にを行うため防食下地の無機ジン

クリッチペイントは現行の溶剤形を用い、下塗り、中塗り、上塗り塗料を低溶剤形塗料や水性塗料に替えてVOCの削減を図ったものである。関東地方、中部地方の4橋梁で試験施工されているが10年程度経過しているが塗膜は良好な状態である。

(2) 有害物質の排除

一般環境に架設される道路橋では、特にLCCを考慮する必要がない場合や、20年以内に架け替えが予定されている場合には従来の一般塗装系を適用できる。このとき、鉛系さび止めペイントには、防錆顔料として有害な鉛やクロムが含まれているので、これらを排除した鉛・クロムフリーさび止めペイントを適用した一般塗装系を適用する。また、すでにA、a塗装系が塗装されている道路橋で、十分な塗膜寿命を有しており、適切な維持管理体制がある場合や橋の残存寿命が20年程度の場合には、鉛・クロムフリーさび止めペイントを用いた塗替え塗装系が適用できる。

なお、鉛、クロムは、防錆顔料だけでなく、着色顔料にも含まれているので、これらも排除するため鉛、クロムを含む色相を示してこれらの使用を避けることを提案している。

その他、箱桁内面や鋼製橋脚などの内面に用いられているタールエポキシ樹脂塗料は、発がん性を有するタールを含むので塗装作業者の安全衛生のため廃止された。

1. 3 その他の新規塗料

現場での実績はほとんどないが、今後試験塗装などを行いその性能を明確にしたうえで適用されることが望まれる新規塗料3種類が紹介されている。

(1) 省検査形膜厚制御塗料

この塗料は、塗装時に規定された塗膜厚に達していない箇所が色調の違いで目視確認できるため、確実に膜厚が確保できるとともに、膜厚測定を省くことも可能である。

(2) 寒冷地用塗料

この塗料は、冬期に塗替え塗装を行う場合、5℃以下でも塗装が可能である。

(3) 中上兼用塗料

重防食塗装系は、防食下地、下塗り塗料、中塗り塗料、上塗り塗料で構成されている。防食下地は、鋼材の腐食を防ぐ機能を有している。下塗り塗料は、腐食因子を遮断して防食下地を保護する機能を有しているが、エポキシ樹脂塗料は耐候性に劣る。上塗り塗料は、耐候性に優れており下塗り塗料を保護している。中塗り塗料は、下塗り塗料と上塗り塗料を良好に付着させる機能を有している。この塗料は、中塗り塗料と上塗り塗料を兼用しており塗装工程を一つ省くことができる。

(4) その他

ここ数年来、無機系塗料またはセラミック塗料と呼ばれる無溶剤塗料が試験的に適用されている。この塗料は無溶剤でありVOCが大幅に削減される。また、有機高分子が少ないため紫外線劣化が少なく耐候性に優れている。しかしながら、写真-1に示すように塗装後数ヶ月頃から大規模なはく離が生じた例がある。これは、塗膜が非常に硬いため、鋼材の変形や部材の振動に追従できずに塗膜がわれ、はがれたものと考えられる。また、写真-2に示すように部材端部に塗料が付かないため2～3ヶ月で発さびし、3年後には塗膜が大きくわれた例もある。すなわち、無機系塗料は、まだまだ開発段階であり、その塗膜性能（防食性、耐候性、塗装作業性、造膜性など）が明らかとなっていないのが現状であり、防食便覧にはとりあげられなかった。

2. 耐候性鋼材

耐候性鋼材は、普通鋼材に微量の銅、リン、クロムなどを添加した低合金鋼であり、適度な湿気と乾燥を繰り返すことで鋼材表面に緻密な保護性さび層（かつては安定さびと呼ばれていた）を形成して、それ以後の腐食の進行を抑制する機能を有するとされている。しかしながら、橋梁などの大きな部材では、風雨に曝されるが直射日光も受け適度な乾湿を繰り返す箇所と、風雨に曝されることはほとんどないが湿気がこもり易く乾燥しにくい部位（橋梁端部、内桁や下フランジ下面など）もあるなど、ミクロな環境条件が異なっているため、鋼材全面に均一に保護性さびが生成することは難しい。また、耐候性鋼材は塩化物があると保護性さびは生成せずに層状はく離さびとなる。また、一度生成した保護性さびも塩化物を受けると容易に層状はく離さびになる。層状はくり錆を生じると鋼材は局部的に板厚減少する。たとえば、海浜地区に適用された耐候性橋梁の腹板下部に腐食のため穴が空いて腹板が座屈した例を写真－3に示す。この道路橋は、1981年に架設された、当時耐候性鋼材は海浜部で効果がありメンテナンスフリーであるとされていた。この橋梁はさらに安定さびの形成を促進する効果があるとされた表面処理が施されていた。このため、桁外面は比較的良好な状態で推移しているように見えていたが、比較的早い時期から桁内面は層状さびが生成し始めていた。

耐候性鋼材の適用に関する共同研究が行われ、耐候性鋼材の適用環境は海からの飛来塩分量が $0.05\text{ m d d (mg/dm}^2\text{/day)}$ 以下とされた⁴⁾。しかしながら、1991年以降、スパイクタイヤの使用が禁止されたため、冬期の交通安全を確保するため全国的に凍結防止剤として岩塩や塩化カルシウムなどの塩化物の散布量が増えている。このため、飛来塩分量にかかわらず、排水枡や管周囲や桁端部やジョイントからの漏水部周辺には保護性さびは生成せず、層状はくりさびを生じ板厚が局部的に減少することが多い。このような全面さびの状態の道路橋を塗装で補修する場合の素地調整程度や塗装系、塗装範囲について技術的に明らかとなっていない。一方、近年従来の耐候性鋼材にニッケルなどを添加したニッケル系高耐候性鋼材（当初、海岸・海浜耐候性鋼材と呼ばれていた）が開発された。従来の耐候性鋼材より厳しい飛来塩分環境で保護性さびを生成するといわれているが、ミクロ環境条件や長期的な耐食性については明らかとなっていない。

3. 溶融亜鉛めっき

溶融亜鉛めっきは、鋼材を亜鉛浴槽に浸漬して、鋼素地表面に鉄と亜鉛の合金層、亜鉛層を層状に形成させ、亜鉛層が大気中で緻密な不動態皮膜を形成して亜鉛の消耗を抑制することによって、鋼材を防食する方法である。また、亜鉛層は鉄に対して犠牲防食効果を発揮するため、めっき層に傷が付いた場合には、亜鉛が鉄より先に溶出してその腐食生成物が傷を覆い鉄の腐食を防ぐ効果があるとされている。しかしながら、塩分のある環境では不動態皮膜は容易に破壊され亜鉛は急速に溶出し、ついには鉄が腐食し始める（写真－4）。このため、塩分を受けるような厳しい腐食環境に用いる鋼材には、耐食性を向上させた5%アルミニウム－亜鉛合金めっきが行われるようになった。

溶融めっきは、めっき金属を溶かした浴槽に鋼材を浸けてめっきするため、浴槽の大きさによる部材寸法に制限がある。また、高温の浴槽に浸けるため鋼材は熱ひずみを受けるので、その対策が必要である。さらに、めっき層が局部的に損傷した場合やめっき層が消耗した場合には、再度めっきで補修することはできないので、塗装などで補修する必要がある。

る。この際、塗装下地の素地調整程度などが明確になっていない。

4. 金属溶射

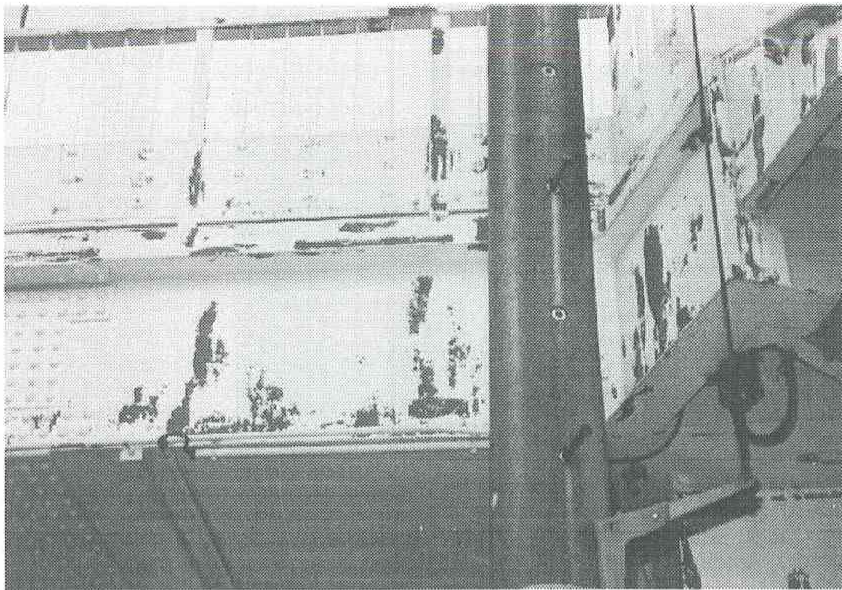
金属溶射は、亜鉛やアルミニウムまたは、その合金などを溶融して鋼材表面に吹き付けて鋼材表面とこれら金属が物理的に付着して皮膜を形成するものであり、金属皮膜の環境遮断効果と犠牲防食効果によって鋼材を防食するものである。溶射された直後の皮膜は多孔質であるが、亜鉛系の場合は、酸化された亜鉛の酸化物がこの孔を充填し、アルミニウム系の場合は、表面に酸化皮膜が形成され、これらの効果で環境遮断性が得られる。このため、亜鉛系溶射の場合、亜鉛酸化物が生成するまでの間、孔を封鎖するために封孔処理剤を塗付する必要がある。溶射皮膜も溶融めっき皮膜を同様に徐々に消耗するので、厳しい腐食環境では、溶射皮膜を防食下地とした重防食塗装を行うことが不可欠である。また、金属溶射は、溶射された金属が鋼材と物理的に密着するためには、鋼材に適当な凹凸が必要である。このため、鋼材の素地調整はISO Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上で表面粗さをRz 50 μ m以上とすることが必要であるが、一般にこの基準を達成するためには、ブラストを2度打ちする必要がある。素地調整費用の低減するためブラストを2打ちする代わりに、動力工具で素地調整して表面粗さを得る方法として、無機質粒子をエポキシ樹脂で固めた粗面形成材を塗布して必要な表面粗さを得る方法が開発された。しかしながら、鋼材と溶射金属皮膜という金属の間に有機高分子樹脂という熱膨張係数など物性値の異なる材料が挟まれた状態で長期の密着性が保持されるのか検証されていない(写真—5)。このほか溶射ガンが入らない溶射が不可能な部位の対応や、金属皮膜が部分的にはく離した場合や消耗した際の補修方法が確立されていない。

おわりに

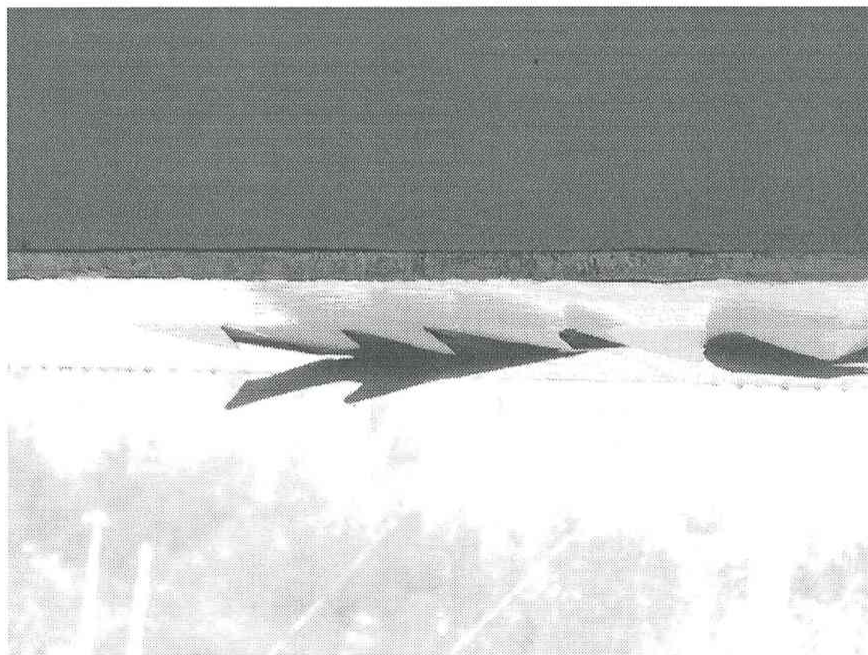
鋼道路橋の長寿命化のために新しい防食法を取り入れた鋼道路橋塗装・防食便覧は、近々発刊される予定である。しかしながら、これらの防食法は、その適用を誤るとかえって補修などに大きな費用を要することが懸念される。そのため、これら新しい防食法の適用にあたっては、本便覧を参考に、適用しようとする防食法の原理を十分に理解して、確実にその性能を発揮させるように計画、設計、施工、維持管理の全ての工程で十分に留意することが重要である。これらの防食法は、決してメンテナンスフリーではなく、従来の一般塗装系のメンテナンスとは点検方法や頻度はまったく異なるが、メンテナンスは必ず必要であることを理解することが重要である。

参考文献

- 1) 鋼橋塗装のLCC低減のために；テクニカルレポート No. 55、(社)日本鋼構造協会、2002.8
- 2) 構造物の防汚技術の開発に関する共同研究報告書(その1～7)、建設省土木研究所共同研究報告書第189号、190号、197号～201号、1997.6～1998.3
- 3) 守屋進：環境にやさしい塗料の耐久性および施工性試験、防錆管理、Vol. 42. No. 9、1998.9
- 4) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)、建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会、1993.3



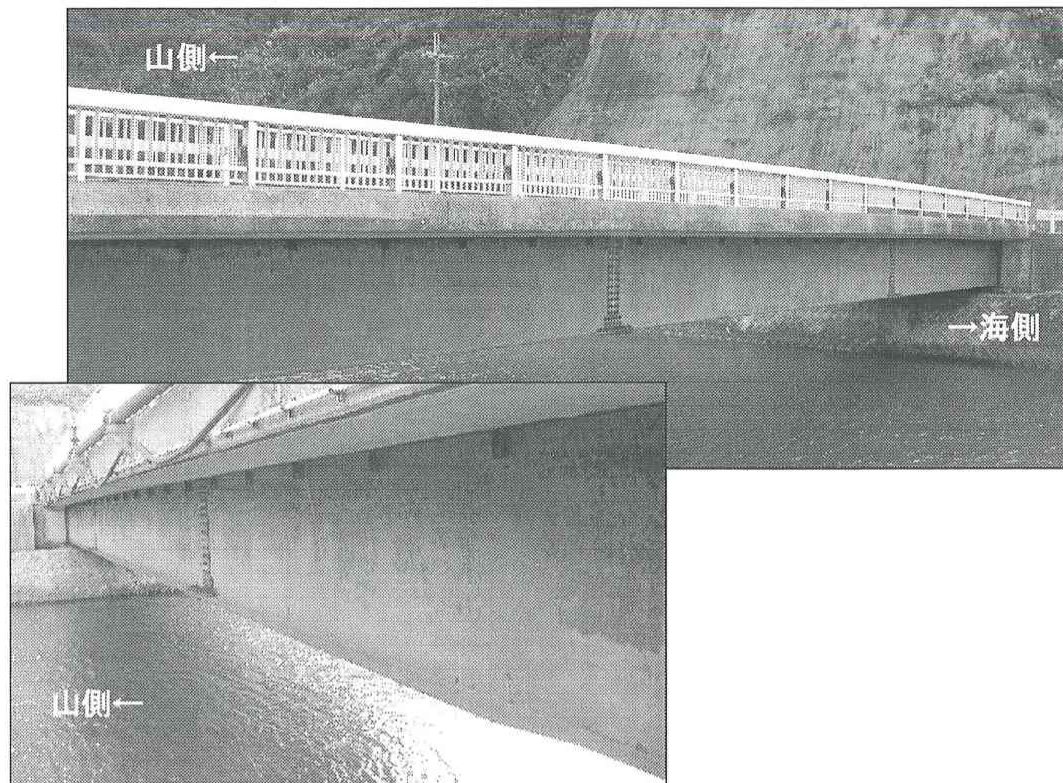
写真－１（１） 無機系塗料を塗装後数ヶ月で塗膜がはく離した歩道橋
（関東地方）



写真－１（２） 無機系塗料を塗装後３年で塗膜が大きくわれた跨線橋
（東北地方）

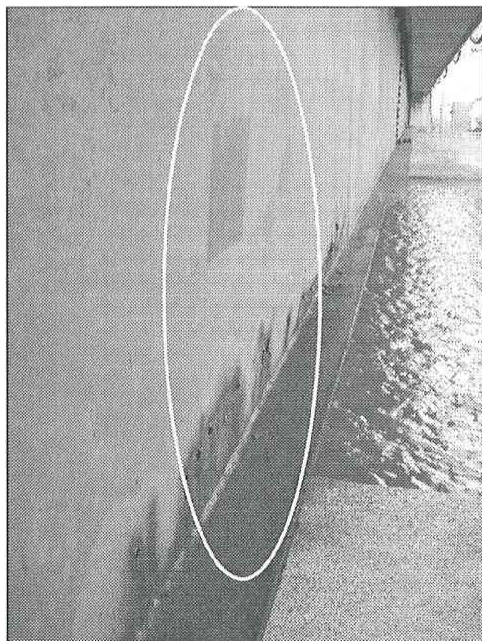


写真－２ 無機系塗料を塗装後数年で部材端部が発錆した側道橋
(東北地方)

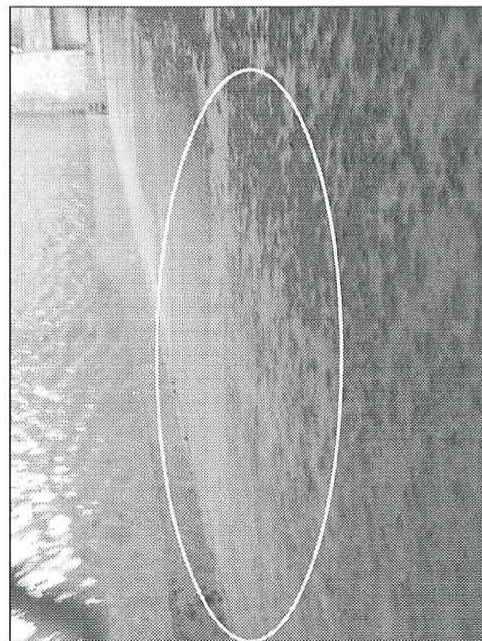


山側の桁の方が痛みが激しい

写真一3 (1) 海浜部の耐候性橋梁の腐食状況(桁外面)



(a) 海側の腹板

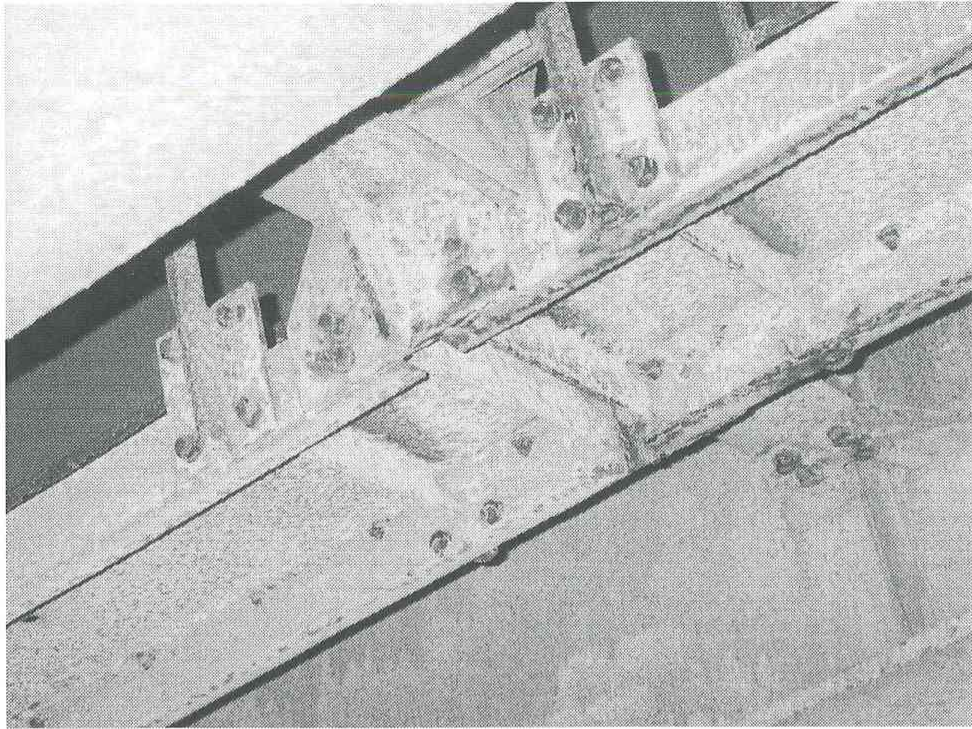


(b) 山側の腹板

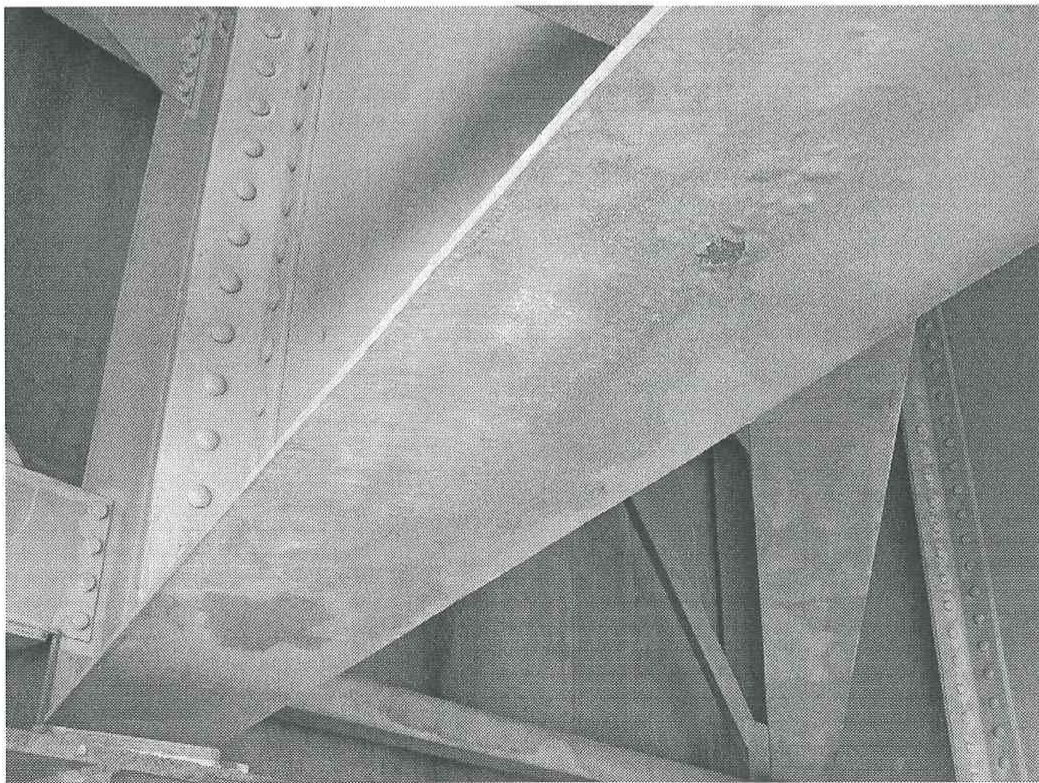
写真一3 (2) 腹板下部の腐食による座屈(白丸部分が座屈している)



写真一3 (3) 桁内面の腹板（山側）の腐食



写真—4 溶融亜鉛めっき橋の桁内側の腐食状況



写真—5 桁内側の金属溶射皮膜のふくれとはがれ