

第5章 腐食の検出と原因分析および損傷度評価

5.1 塗膜の点検・調査

塗装した鋼橋の腐食は塗膜の劣化から始まる。したがって、塗装の健全度を的確に把握し、適当な時期に塗替えを行うことが鋼橋を長期間にわたり使用するうえで重要なことである。しかし、数多く建設された鋼橋の中には、大気環境が予想以上に厳しく、塗装の塗替え時期が適切でなかったために構造部材に腐食による断面欠損が生じた事例もある。塗装橋梁においては、鋼材面の錆や腐食の発生は塗膜の劣化異常として現れ、比較的その確認は容易である。しかし、一つの橋梁内でも部位によって塗膜の劣化速度は異なり、一般に遠望では観察しづらい部位の方が環境が厳しく、早期に塗膜劣化が生じるケースが多い。このような部位の調査に関しては、作業足場が設置される塗装の塗替え時や他の補修・補強工事時などに塗膜の劣化状況や腐食の発生の有無について入念に調査する必要がある。

以下に既設橋における塗膜の健全性の測定手法について述べる。

5.1.1 塗膜の点検

塗膜の点検は、塗替え計画を策定するためのデータ入手を目的として1～2年に1回程度の頻度で実施される定期点検と、塗替え塗装系や素地調整方法を検討するために実施される詳細点検に大別される。定期点検では目視あるいは双眼鏡を用いて対象となる橋梁全体を調査する。一方、詳細点検では検査路、橋梁点検車、簡易足場などを用いて塗膜に接近し劣化状況を詳細に調査する。このとき、必要に応じて塗膜の付着力、光沢、チョーキング（白亜化）、付着塩分量などについて測定する。塗膜劣化度の評価方法は日本道路協会、鉄道総合技術研究所、あるいは実際に橋梁の維持管理を行う各機関において、その基準が整備されている。代表的な基準とその概要を表-5.1に示す¹⁾。

5.1.2 塗膜状況の調査

(1) 目視調査

塗膜の代表的な劣化現象として、錆、はがれ（剝離）、ふくれ、割れ、変退色、チョーキングなどがある。これらの劣化度を判定する方法としては、個々の劣化現象の標準写真見本と対比させるのが一般的で、その場合の劣化度判定ランクは通常3～5段階に区分されている。さらに、塗替え時期を判定するために、個々の劣化程度とそれ以外に塩害、大気汚染などの環境条件、対象橋梁の社会的重要度、景観、橋梁形式、部材・部位の重要度などの要因を加味し、判定ランクあるいは評価点を補正する場合がある。

(2) 計測器による塗膜調査

塗膜の劣化度を計測器などを用いて調査する方法として、基盤目（付着力）試験、光沢度測定、塗膜のインピーダンス測定などがある。その他の手法として、膜厚測定を行い、膜厚の経年変化から塗膜の健全性を評価する試みがなされている。以下に、インピーダンス測定と電磁膜厚計による膜厚測定について、その手法を概説する。

1) インピーダンス測定

塗膜の診断にインピーダンス測定が利用され始めのは1950年代に遡り、岡本らは塗装鋼板の $\tan \delta$ と耐海水性の関係を見出した²⁾。その後、この方法は測定の簡便さから「 $\tan \delta$ 法」として広く利用されるようになり、旧国鉄や日本鋼構造協会の指針などに反映された。1980年代に入り電気化学的測定技術の進歩により、より明確に塗膜劣化を評価できる指標として「 R_f インピーダンス測定」が提案された。

表-5.1 塗膜劣化度の評価基準

日本道路公団 (JH)				首都高速道路公団 (SDK)																										
評価基準				評価基準																										
2-5 塗替えの判定方法				表-4.24 塗装点検の判定																										
塗替えを実施するの可否かの判定は、さび、はがれの特定の要因によるもの、または総合評価によるものとする。																														
1. さび 部位の評点が20点程度を超える場合は、塗替えの考慮が必要である。				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;">判定ランク</th> <th style="width: 10%;">A</th> <th style="width: 10%;">B</th> <th style="width: 10%;">C</th> <th style="width: 10%;">D</th> <th style="width: 10%;">Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">項目</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">鋼桁外面・箱桁内面・橋梁外面内面</td> <td style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">塗膜の劣化状況</td> <td style="text-align: center;">—</td> <td>錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%以上の場合</td> <td>錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%~10%の場合</td> <td>小さな錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が全面に点在しており、その総面積が全体面積の10%以下の場合</td> <td>特に異常な損傷がある場合</td> </tr> </tbody> </table>							判定ランク	A	B	C	D	Q	項目							鋼桁外面・箱桁内面・橋梁外面内面	塗膜の劣化状況	—	錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%以上の場合	錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%~10%の場合	小さな錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が全面に点在しており、その総面積が全体面積の10%以下の場合	特に異常な損傷がある場合
	判定ランク	A	B							C	D	Q																		
項目																														
鋼桁外面・箱桁内面・橋梁外面内面	塗膜の劣化状況	—	錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%以上の場合	錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が塗膜全面に発生しており、その総面積が全体面積の30%~10%の場合	小さな錆あるいはフクレ、ワレ、ハガレ、変退色が全面に点在しており、その総面積が全体面積の10%以下の場合	特に異常な損傷がある場合																								
2. はがれ 現地状況等をふまえ、著しく美観が損なわれている場合は、塗替えを考慮するものとする。																														
3. 総合評価 総合評価は調査箇所毎に求められるさび、はがれ、ひびわれ、チョーキング、環境条件の合計評点の平均値を参考として定めるが、一般的に表2-7程度の状況がめやすとなる。 また総合評価は部材毎に1橋単位で求め、各部位の総合評価を行った後、これ等を総括した橋梁全体としての総合評価を行うのを原則とするが、長大橋においては施工単位を考慮のうえ求めるものとする。																														
表2-7 総合評価と合計評点																														
総合評価	状 況	合計評点の平均値(点)	塗替えを実施するの可否かの判定																											
I	塗膜面にさび、ひびわれ、はがれが発生し、塗膜効果が全く失効している。	70~100	緊急な塗替えが必要																											
II	点さびが多く発生し、ひびわれ、さび、はがれが部分的に発生しているが、一部活膜も残っている。	40~70 未満	早急な塗替えが必要																											
III	塗膜にほとんどさびはないが、光沢減退、チョーキングが著しく、上塗り塗膜が消失している部分もある。	20~40 未満	適時な塗替えが必要																											
IV	塗膜にほとんど異常がない。	20 未満	調査を継続																											

〔解 説〕

塗装の判定で、表-4.24の判定を適用する場合の率の算出は、桁については主部材（主桁横桁）を対象に行うものとする。桁は伸縮継手間隔、橋脚は、橋脚1基当りを単位として、塗装面積に対する損傷部分の面積のしめる率（錆、ハガレ、変退色等の面積は同一に評価した面積とする）を図解-11.1を参考にして、目視により判定を行うものとする。

ただし、腹板には損傷が見られないが、フランジのみ損傷がある場合がしばしばある。このような場合は、フランジの全面に損傷があり発錆のおそれがあるようなときは、構造物の耐久性を考慮して、表-4.24の判定ランクに関係なくBランクとするのがよい。

その他塗膜の状況を調べるのに、ゴバン目試験を行う場合があるがゴバン目試験は、特に必要がある場合について行うものとする。

表-5.1 (つづき)

阪神道路公団 (HDK)	(財)鉄道総合技術研究所 (JR)																																																																									
評 価 基 準	評 価 基 準																																																																									
<p>5.5.12.2 評価</p> <p>上記点検項目については、標準見本をもとに表-5.5.6 に示す状態区分に判定し、記録するものとする。</p> <p style="text-align: center;">表-5.5.6 採点外項目の評価</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">点検項目</th> <th colspan="5">塗 膜 状 態</th> </tr> <tr> <th>4</th> <th>3</th> <th>2</th> <th>1</th> <th>0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>漏水による塗膜の劣化</td> <td></td> <td>漏水により塗膜がはがれ、鋼板に著しい腐食を生じている</td> <td>漏水による変色汚れのほか塗膜にしわ、さび、われが生じ、一部ではがれも認められる</td> <td>漏水により塗膜の表面が著しく変色、あるいは汚れている</td> <td>漏水が全く発生していない</td> </tr> <tr> <td>ふくれ</td> <td></td> <td>著しいふくれが生じている (面積約25%)</td> <td>ふくれが全面にわたり生じている (面積約10%)</td> <td>ふくれが点在している (面積約2%)</td> <td>ふくれが全く発生していないか接近時肉眼で見当たらない</td> </tr> <tr> <td>われ</td> <td></td> <td>大きなわれが、全面にわたって生じている</td> <td>大きなわれが生じている</td> <td>われが点在している</td> <td>われが全く発生していないか接近時目視で見当たらない</td> </tr> <tr> <td>基盤目試験 (注1)</td> <td>基盤目塗装のはく離した数 が切線付近のはく離面積を加えて4個以上ある</td> <td>基盤目塗装のはく離した数は1個であるが、切線付近のはく離面積を加えると2個以上3個以内ある</td> <td>基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が著しい</td> <td>基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が生じている</td> <td>基盤目塗装のはく離は全くなく切線付近のはく離もない</td> </tr> <tr> <td>塗装インピーダンス試験 (注2)</td> <td></td> <td></td> <td>抵抗成分が1×10Ω未満</td> <td>抵抗成分が1×10Ω～5×10Ω</td> <td>抵抗成分が5×10Ω以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) 試験方法はカッターで素地に達するか5mm目の縦溝3個(計9個)のます目を切り、その上にセロハンテープを圧着し引きはがす。</p> <p>(注2) ① 測定面積は10×10cmとする。 ② 測定周波数は1.0kHzとする。</p> <p>[解説] 漏水による塗膜の劣化は、部分的な補修のための資料として、また、ふくれ、われ、基盤目試験および塗膜インピーダンス試験の項目は、塗装の設計・施工基準の改定のための資料として必要となるので、表-5.5.6に示す状態区分に従い判定し、記録することにした。</p>	点検項目	塗 膜 状 態					4	3	2	1	0	漏水による塗膜の劣化		漏水により塗膜がはがれ、鋼板に著しい腐食を生じている	漏水による変色汚れのほか塗膜にしわ、さび、われが生じ、一部ではがれも認められる	漏水により塗膜の表面が著しく変色、あるいは汚れている	漏水が全く発生していない	ふくれ		著しいふくれが生じている (面積約25%)	ふくれが全面にわたり生じている (面積約10%)	ふくれが点在している (面積約2%)	ふくれが全く発生していないか接近時肉眼で見当たらない	われ		大きなわれが、全面にわたって生じている	大きなわれが生じている	われが点在している	われが全く発生していないか接近時目視で見当たらない	基盤目試験 (注1)	基盤目塗装のはく離した数 が切線付近のはく離面積を加えて4個以上ある	基盤目塗装のはく離した数は1個であるが、切線付近のはく離面積を加えると2個以上3個以内ある	基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が著しい	基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が生じている	基盤目塗装のはく離は全くなく切線付近のはく離もない	塗装インピーダンス試験 (注2)			抵抗成分が1×10Ω未満	抵抗成分が1×10Ω～5×10Ω	抵抗成分が5×10Ω以上	<p>(1)判定法P 以下の手順で劣化度の判定を行なう。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>検査対象けたの構造と部材区分</p> <p>…構造種別により検査対象部材を区分する。</p> </div> <p style="text-align: center;">表 3.3.2 鉄桁の構造による評点の換算率</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>けたの構造</th> <th>検査対象部材</th> <th>換算率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>トラス、アーチ</td> <td>上・下弦材、斜材(垂直材)、縦・横けた</td> <td rowspan="2">8/5</td> </tr> <tr> <td>スルーガーダ</td> <td>上・下フランジ、腹板、縦・横けた</td> </tr> <tr> <td>Iビーム、デッキガーダ、ラーメン、トラフガーダ合けた</td> <td>上・下フランジ、腹板</td> <td>8/3</td> </tr> <tr> <td>鋼橋脚</td> <td>主構、その他</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>各部材別に塗膜劣化状態の評価</p> <p>…上記、部材区分別に表3.3.1により評点をつける。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>部材別にウェイトによる塗膜評価</p> <p>…鋼橋脚の場合のみ表3.3.3によりウェイト付けする。</p> </div> <p style="text-align: center;">表 3.3.3 鋼橋脚部材のウェイト</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>部 材</th> <th>ウェイト</th> <th>部 材</th> <th>ウェイト</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>支柱と梁</td> <td>7</td> <td>その他</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table> <p>注) 支柱と梁およびその他の部材で塗膜劣化状態を評価し、支柱と梁の評点×7+その他の部材の評点=鋼橋脚の評点になる。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>鉄けたの構造別に換算した評点</p> <p>・例えば、スルーガーダの場合 …各部材において劣化状態が、上フランジA2、下フランジA1、腹板B、縦桁B、横桁Aとすると表3.3.1より評点の総合=3+4+2+2+3=14 ・表3.3.2よりスルーガーダの換算率8/5を乗じて14×8/5=22.4</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>塗膜劣化度の評価</p> <p>…表3.3.4により劣化度をランク付けする。</p> </div> <p style="text-align: center;">表 3.3.4 塗膜劣化度</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>劣化度</th> <th>P-I</th> <th>P-II</th> <th>P-III</th> <th>P-IV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鉄桁の評点</td> <td>32以上</td> <td>31~24</td> <td>23~16</td> <td>15~8</td> </tr> </tbody> </table> <p>劣化度P-I…塗替え終期。 劣化度P-II…早急に塗替えを実施する。 劣化度P-III…塗替えの適正時期。 劣化度P-IV…必要な場合のみ塗替える。</p> <p>(2)判定法Q 前 出 (31ページ)</p>	けたの構造	検査対象部材	換算率	トラス、アーチ	上・下弦材、斜材(垂直材)、縦・横けた	8/5	スルーガーダ	上・下フランジ、腹板、縦・横けた	Iビーム、デッキガーダ、ラーメン、トラフガーダ合けた	上・下フランジ、腹板	8/3	鋼橋脚	主構、その他	1	部 材	ウェイト	部 材	ウェイト	支柱と梁	7	その他	1	劣化度	P-I	P-II	P-III	P-IV	鉄桁の評点	32以上	31~24	23~16	15~8
点検項目		塗 膜 状 態																																																																								
	4	3	2	1	0																																																																					
漏水による塗膜の劣化		漏水により塗膜がはがれ、鋼板に著しい腐食を生じている	漏水による変色汚れのほか塗膜にしわ、さび、われが生じ、一部ではがれも認められる	漏水により塗膜の表面が著しく変色、あるいは汚れている	漏水が全く発生していない																																																																					
ふくれ		著しいふくれが生じている (面積約25%)	ふくれが全面にわたり生じている (面積約10%)	ふくれが点在している (面積約2%)	ふくれが全く発生していないか接近時肉眼で見当たらない																																																																					
われ		大きなわれが、全面にわたって生じている	大きなわれが生じている	われが点在している	われが全く発生していないか接近時目視で見当たらない																																																																					
基盤目試験 (注1)	基盤目塗装のはく離した数 が切線付近のはく離面積を加えて4個以上ある	基盤目塗装のはく離した数は1個であるが、切線付近のはく離面積を加えると2個以上3個以内ある	基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が著しい	基盤目塗装のはく離はないが切線付近のはく離が生じている	基盤目塗装のはく離は全くなく切線付近のはく離もない																																																																					
塗装インピーダンス試験 (注2)			抵抗成分が1×10Ω未満	抵抗成分が1×10Ω～5×10Ω	抵抗成分が5×10Ω以上																																																																					
けたの構造	検査対象部材	換算率																																																																								
トラス、アーチ	上・下弦材、斜材(垂直材)、縦・横けた	8/5																																																																								
スルーガーダ	上・下フランジ、腹板、縦・横けた																																																																									
Iビーム、デッキガーダ、ラーメン、トラフガーダ合けた	上・下フランジ、腹板	8/3																																																																								
鋼橋脚	主構、その他	1																																																																								
部 材	ウェイト	部 材	ウェイト																																																																							
支柱と梁	7	その他	1																																																																							
劣化度	P-I	P-II	P-III	P-IV																																																																						
鉄桁の評点	32以上	31~24	23~16	15~8																																																																						

表-5.1 (つづき)

鋼 道 路 橋 塗 装 便 覧

評 価 基 準

・塗替え時期の判定

定期点検の結果のうち、さびとはがれの4段階に基づいて

- ①当面塗替えの必要性はない。
- ②数年後に塗替えを計画する。
- ③早い時期の塗替えを検討する。

の3段階に塗替え時期を判断する。塗替え時期や塗替え順序は、塗装後の経過年数や橋梁の架設環境等を考慮して決定する。ただし、美観上の配慮を必要とする場合には、変退色や汚れについての調査結果を考慮して塗替え時期を決定する。

塗替え時期の判定の例を表8-2に示す。

表8-2 塗替え時期の判定

		は が れ			
		1	2	3	4
さ	1	①		②	
	2	①		②	
び	3	②		③	
	4	②		③	

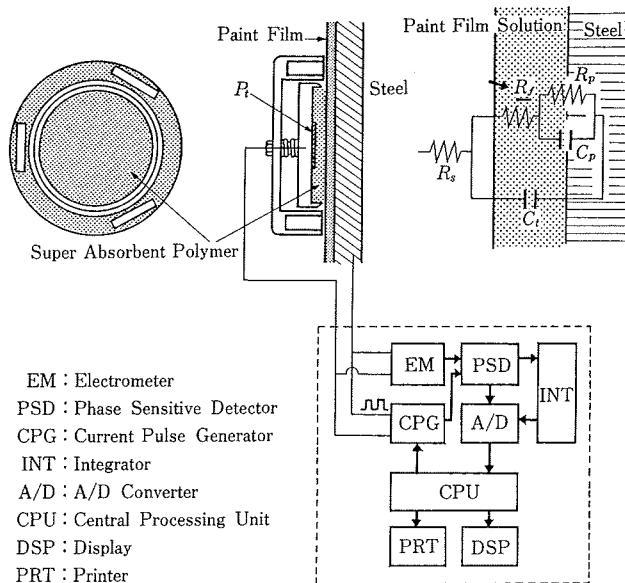


図-5.1 塗装鋼板劣化評価センサの構成図

「 R_f インピーダンス測定」は電気化学的手法の一つで、図-5.1に示す電気的等価回路における塗膜部のイオン透過抵抗値 R_f を交流インピーダンス法により検知する方法である³⁾。イオン透過抵抗値は塗膜劣化および塗膜下の鋼材の腐食と高い相関があり、塗装直後における目視では検出困難な段階から塗装劣化を検出することができる。この方法の最大の特徴は、錆、ふくれ、はがれ、割れなどの肉眼で確認することができる劣化現象が生じる前に塗膜の劣化度を推定することが可能な点である。測定上の注意点としては、塗膜表面に水滴が存在する場合には電流の漏洩の

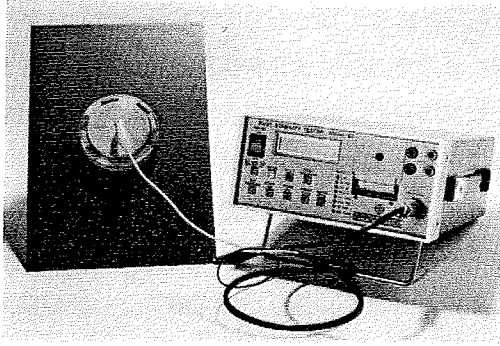


写真-5.1 塗装鋼板劣化評価センサ

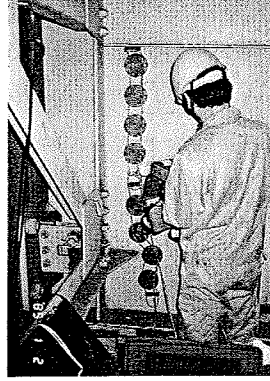


写真-5.2 腹板の塗膜劣化度測定状況

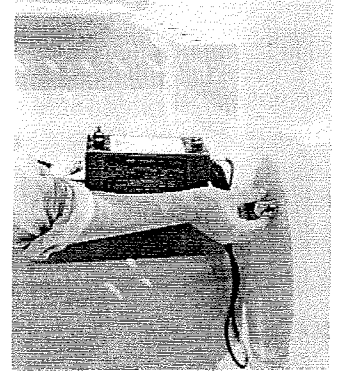


写真-5.3 電磁膜厚計による測定状況

恐れがあるため、雨天日や極度に湿度が高い日の測定は避けなければならないことである。また、センサは現場での適用性を考慮して、写真-5.1に示すようにハンディー（外径60mm、高さ20mm）なものとなっており、測定装置部分も軽量のショルダー式である。写真-5.2に8個のセンサを縦につないで腹板の塗膜劣化度を測定している状況を示す。このセンサを用いることにより、従来では目視判定していた塗膜劣化度を定量化することができ、塗替え時期の設定や塗替え効果の評価、さらに塗装系の選定にも活用できることが期待されている。

2) 膜厚測定

乾燥塗膜厚の測定法には、マイクロメータ、永久磁石式、光学式、渦電流式、静電容量式などがある。鋼橋塗装での膜厚測定には、電磁式の2点調整形電磁膜厚計が一般的に用いられている。写真-5.3に塗膜厚の測定状況を示す⁴⁾。使用にあたっての注意事項としては、次のことがあげられる⁵⁾。

- ・厚さ6mm以上で表面粗さ $6\mu\text{m}R_z$ 以下の同種の鋼板上でゼロ点の調整を正確に行うこと。
- ・コーナー部の突起部周辺などでは測定できない。
- ・測定面に錆が存在している場合は、測定値に信頼性がない。
- ・塗装が十分に乾燥していない場合には、測定値が小さい値を示す。

塗替えの場合は活膜再利用というケースが多く、ケレンなどの素地調整をした面は活膜残存状態にばらつきがある。したがって、塗替え塗膜の膜厚測定精度は著しく悪くなる。完全ケレンに近いか、活膜残存が一様でない限り電磁膜厚計による測定は困難である。

5.2 腐食の検出・調査

5.2.1 腐食の検出

塗装仕様橋梁では、塗膜下でのミクロ的な錆の発生は別として、著しい発錆あるいは腐食の進行は、塗膜に何らかの異常をきたしていることから、目視点検において、外観上、その確認を行うのは比較的容易である。塗膜に何らかの異常が確認された場合には、それが、塗膜のみの異常であるのか、塗膜下において錆の発生を伴ったものであるのかを明らかにすることが重要であり、その後の対処方法も異なったものとなる。したがって、目視点検においては、できる限り部材に接近しての観察が有効であるが、部材への接近手段が十分でない場合には、双眼鏡を用いたりして詳細に点検するのが望ましい。

目視点検において塗膜の異常や腐食の発生の確認が困難な部位として、閉断面部材内部や作業空間的な制約から点検ができない部位、あるいはコンクリートやアスファルトに覆われた部材表面などがある。トラス橋の弦材やアーチ

橋のアーチリブなどの比較的の小型の閉断面部材においては、点検者が部材内部に出入りすることが不可能である。一般部については部材内部を密閉化していることから、特別な事情がない限り腐食に対する配慮は必要としないが、高力ボルト継手部においては部材間の隙間が存在し、防錆に対する適切な維持管理を怠った場合には腐食が生じることがある。ハンドホール部からの錆汁の流出や雨水の漏水などが確認された場合には、内部の状況について観察することが必要であり、直接的に目視観察が不可能な場合には、工業用内視鏡（ファイバースコープ）や小型カメラを利用して内部の状況を観察することも考えられる。なお、箱桁橋のような比較的大きな断面の部材内部に関しては、マンホールを利用して、箱内部への出入りが可能である。したがって、基本的には、外部と同様に定期的な点検を実施し腐食の有無を確認することが必要であるが、最近、箱外部から内部における滞水の有無を推定することで詳細点検の必要性を判断する方法が検討されている。図-5.2 にその方法を示す⁹⁾。箱桁の外側から赤外線センサにより鋼材表面の温度分布を計測し、滞水の有無による温度分布の違いから内部の滞水状況を推定する方法である。高力ボルト継手部や開断面箱桁における床版損傷部などでは、雨水の滞水による腐食が確認された事例があり、このような方法を用いることにより効率的な維持管理が期待できる。また、鋼床版構造において舗装表面に常にひび割れが確認されるような場合にはデッキプレート表面での腐食の発生が懸念される。このような場合には、図-5.3 に示すようにデッキプレート裏面側から超音波探傷により腐食減厚の有無について調査することも必要である。鋼製橋脚基部のコンクリート巻き立て部に関しても同様であり、コンクリートと脚との接触面から雨水の侵入が予想されるような場合には、脚内部から超音波探傷を実施することも必要である¹⁰⁾。なお、下路形式のトラス橋やアーチ橋においては、図-5.4 に示すように斜材や吊り材が歩道床版部を貫通している構造があるが、このような場合には、床版下面からの点検により貫通部からの錆汁の有無を観察し、埋込み内部での腐食の発生を推定することも必要である。

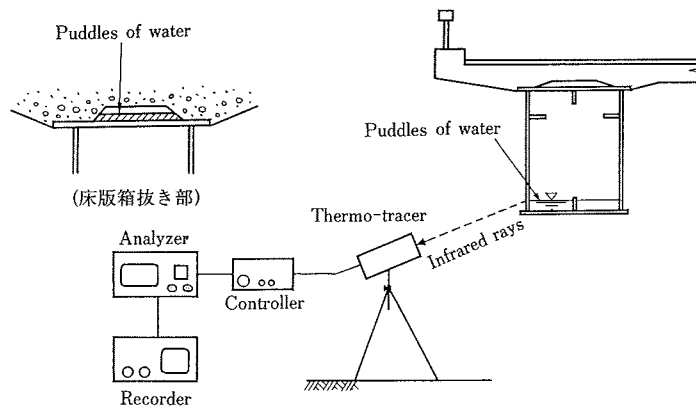


図-5.2 赤外線センサを用いた箱内部における滞水の検知方法

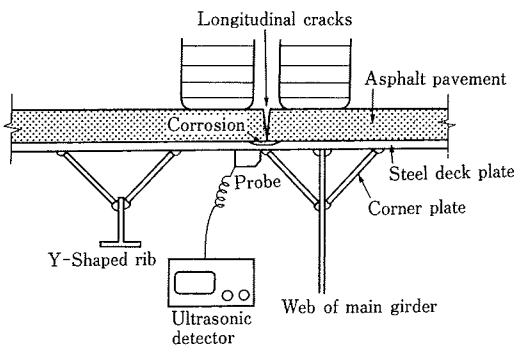


図-5.3 超音波探傷による裏面側の腐食の検知

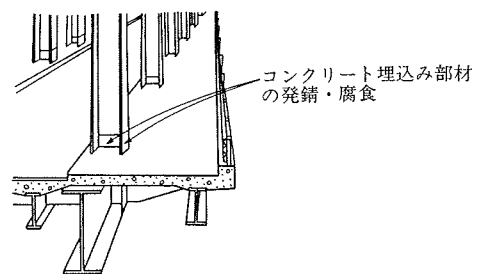


図-5.4 コンクリート内部での鋼部材の腐食

5.2.2 腐食状況の調査

構造部材が腐食により断面減少をきたし、部材の耐荷性能を評価する必要がある場合、または余寿命を予測する場合には、腐食状況を定量的に把握することが必要となってくる。

腐食状況を表す因子としては、残存板厚およびその分布性状、腐食面の凹凸性状、腐食速度などが考えられる。実橋調査により明らかにしなければならない因子は、腐食の発生によりどのような強度に問題が生じてくるのかにより異なる。例えば、部材の引張耐力を問題とするような場合には、抵抗断面の減少程度を把握することが必要であろうし、疲労強度が問題となるような場合には、断面の平均的な減少程度のみではなく、腐食表面の局所的な応力の集中程度についても把握することが必要となってくる。圧縮部材や曲げ部材では、部材を構成するパネル面のどの範囲がどの程度に減厚しているのかを知ることが重要であるし、また、中立軸の移動により耐荷性能が変化するため、各要素の減厚状況ばかりでなく部材断面形状の測定も必要である。

このように腐食部材の実橋調査における調査項目は多種考えられるが、ここでは最も基本となる残存板厚（腐食量）の調査について述べる。

一般に、腐食による板厚の減少は1つの部材（例えば、I断面縦桁）に着目したときに各構成板要素において一定の傾向が見られる場合が多い。定期点検の結果を利用してこのような予備知識を持ったうえで、現地での調査を行う。腐食量（残存板厚）の測定では、以下に示すように予備調査と本調査に分けて行うのが効率的である⁷⁾。

予備調査では、部材の種類をあらかじめ分類、整理しておき、各部材種類ごとに代表的な部材を1~3本選定する。この選定した部材について、部材の軸方向で外観において腐食が最も進行していると考えられる断面を数箇所抽出する。次に抽出した各断面において、図-5.5に示すように断面を見回しながら適当な間隔で板厚の計測を行い、断面減少が最も著しいポイントを抽出する。このようにして、各部材種類ごとの残存板厚の傾向を把握したうえで、本調査にて行う測定点を決定する。この場合、1構成板において残存板厚がほぼ均一な分布と思われるようであれば、測定点は最終的に各構成要素につき2~4点に絞り込むのが適当である。

断面減少が最も著しいポイントを抽出する。

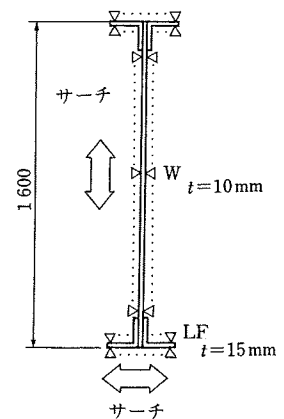


図-5.5 予備調査における板厚測定

5.2.3 残存板厚の計測方法

残存板厚の計測方法について以下に示す。

(1) 直接測定する方法

板厚を直接測定する用具には、ノギス、マイクロメータ、キャリパー（図-5.6参照）などがある。これらによる測定は、特殊な技量を必要とせず、用具自体も小型で携帯性があり、直接的に板厚を確認する最も簡易な方法である。しかし、橋梁部材は広がりを持った平面的な板パネルで構成されており、部材の形状や寸法によっては測定が不可能な場合がある。したがって、むしろこのような用具により測定できる部位は限られていると言える。測定が可能な部位が全体の腐食状況を代表しているような場合には、局所的な測定データから全体の平均的な腐食状況を推定することは可能であるが、このような場合でも、測定の密度（点数）の設定に関しては、腐食表面の凹凸程度を考慮したうえで決定することが重要である⁸⁾。

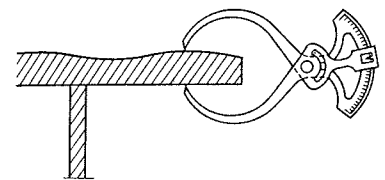


図-5.6 キャリパーを用いた板厚測定方法

(2) 超音波探傷法

板厚測定として最も一般的に用いられている方法は超音波厚さ計による方法である。一般にはパルス反射式垂直探

傷法により材片の外部から非破壊測定するもので、比較的容易に厚さ測定が可能である。一般的な厚さ計に関しては、ハンディタイプであり携帯性に優れており実橋の測定に適している。使用される超音波の周波数は1 MHz～10 MHzの範囲であり、また、探触子には接触型の10 mmφ程度の大きさのものが使用されている。

この接触法では、超音波を被検体中に伝達させるために、探触子と被検体表面との空気層を排除する必要があり、接触媒質と呼ばれる油やグリセリンなどの液体を塗布して探傷が行われる。ところで、腐食部材の表面には劣化した塗膜、錆が付着しており、また、鋼材表面には多少なりとも腐食に伴う凹凸が発生している。このような要因は、探触子と被検体との接触を不十分なものとし、超音波の伝播を阻害する。また、探傷面あるいは探傷裏面の凹凸部では超音波の散乱が生じ探傷感度に影響を及ぼすこととなる。したがって、超音波探傷法による腐食材の測定に際しては、少なくとも塗膜、錆層の除去は必要であり、あまり激しい凹凸面を対象とした場合には測定精度が低下するので、その評価に際しては注意が必要である⁹⁾。

接触法におけるこのような問題点を極力除外するために、水浸法（ポイントフォーカス型探触子を使用）により探傷を行う方法がある。この方法は図-5.7に示すように被検体全体を水中に浸漬し、探触子から放射された超音波をある程度長い距離の水中を伝播させたのちに被検体に入射させる方法である。水浸法では探触子と被検体が直接接触しないので、超音波の送受が安定的に行える。もちろん被検体表面に凹凸がある場合にはその影響は受けるが、探触子と凹凸面との非接触性の問題は解決される。しかし、実橋への適用に際しては、このような環境をどのようにして作るかが問題となる。その例として図-5.7に局部水浸法、流水水浸法を併記したが、実橋のあらゆる方向の面に対し適用可能である装置はなく、現状では実橋への適用は難しい。

その他の超音波探傷法として、非接触法で電磁力を利用する電磁超音波探傷法がある。図-5.8に電磁超音波の発生原理を示す。電磁的に金属表面に発生させた渦電流と磁力線との間に働くローレンツ力により、電気・機械エネルギーの変換を行い超音波を送受する方法である。非接触法であるため接触媒質が不要であることや、塗膜の影響を受けにくいなどの利点を有するが、現状では計測装置を小型化することが困難なため一般への普及が遅れている。

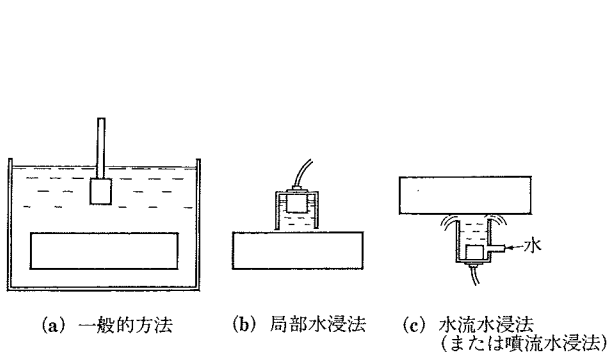


図-5.7 水浸探傷法の種類

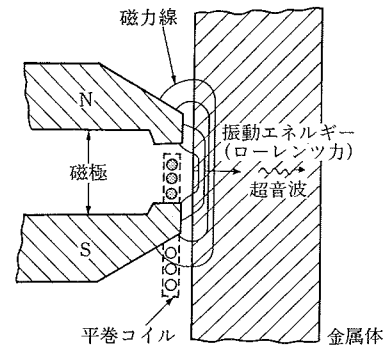


図-5.8 電磁超音波の発生原理

(3) その他の方法

その他の方法として放射線透過試験による測定およびレーザーを用いた測定がある。

放射線透過試験による方法は、放射線が材片を透過する際に、材片の厚さにより吸収率が異なることを利用するものである。腐食材の板厚分布をフィルム上の濃淡として出力し、この濃淡を画像処理により定量化することで、腐食減厚状況を把握する方法である。しかし、放射線透過試験の問題点は人体に有害であることであり、供用中の実橋への適用に際しては制限が多い。また、装置が大型であり、適用可能な部位が限られること、材片の向きによっては装置の設置に設備が必要となることなどの問題点もある。このようなことから、実橋への適用性は劣る方法と言える。

レーザーを用いた測定方法は、化学プラントの配管材の板厚を測定するために開発されたものである。この方法の

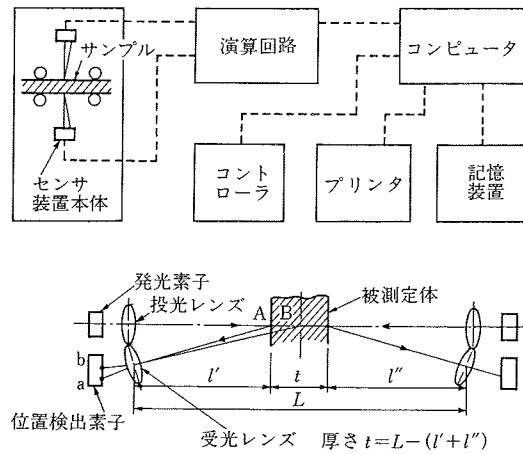


図-5.9 レーザー光を用いた板厚測定方法

測定原理とシステム構成を図-5.9に示す。測定原理は、光源に半導体レーザーを用い、投光レンズで小さなスポットに絞られたレーザー光を被測定体（腐食材）に照射し、その反射散乱光を利用して厚さを測定するというものである。現状では、測定物の採取を前提としており、実橋への適用に際しては装置の改良、小型化などが必要である。

5.3 腐食の原因分析手法

塗装の劣化や鋼部材の腐食を引き起こす要因としては、飛来塩分など橋梁の架設位置に伴う大気環境の要因、漏水・滞水など腐食環境を助長する構造的な要因、および塗装仕様の不適合など腐食上の要因などが考えられる。一般にはこれら要因が競合しあって損傷を招いており、橋梁の架設位置や各部位によってそれぞれの要因の影響度に差異が生じる。特に、予期しない腐食が発生した橋梁については、これらの要因の中でその影響度が大きいものを探り出すこと、すなわち原因分析を行うことが適切な補修対策を選定するために必要不可欠である。

原因分析の実施にあたっては、気象条件や飛来塩分量に関する既往の調査データ、対象橋梁の設計図書に基づき滞水や水みちとなりやすい構造ディテールを調査分析することが効率的な現地調査を行うための事前検討として必要である。

5.3.1 大気環境調査

鋼橋の腐食の原因として大気環境による影響度が大きい。そのため、橋梁架設地点における気象条件の調査と、特に大気中の主な腐食因子である飛来塩分量と亜硫酸ガス濃度の調査を行う。

一般的な気象条件である気温、相対湿度、降水量、日照時間、風速、風向などは気象庁の観測データが有用である。本データには全国各地の気象観測地点における過去30年間の月ごとの統計値が記載されている。本データの調査対象橋梁への適用性については、最寄りの観測地点との距離や地域、地理的条件を考慮する必要があるものの、マクロ的な把握をするうえでは十分な情報であると考えられる。

飛来塩分量については、これまで全国各地で測定されたデータ（5.4.1項参照）があり、条件に応じてこれらを活用することが考えられる。しかしながら、既往のデータが適用できないと判断される場合や、周辺環境の変化により建設当初と条件が異なるため改めて調査を行う必要がある場合には現地において大気中汚染物質の測定を行う。

飛来塩分量の調査方法としては、①JISに規定されているガーゼ法¹⁰⁾、②付着塩分拭き取り法、③土研式タンク法があり¹¹⁾、それぞれ長短の特徴を有している。①ガーゼ法は内法が10×10cmの捕集窓にガーゼを取り付けた器具

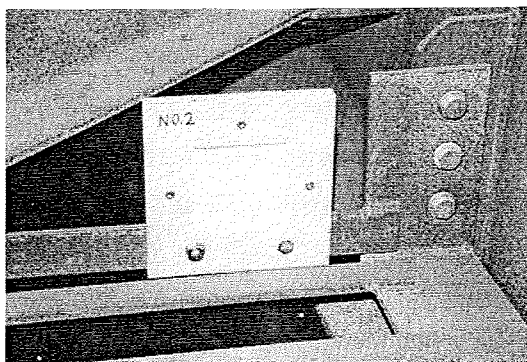
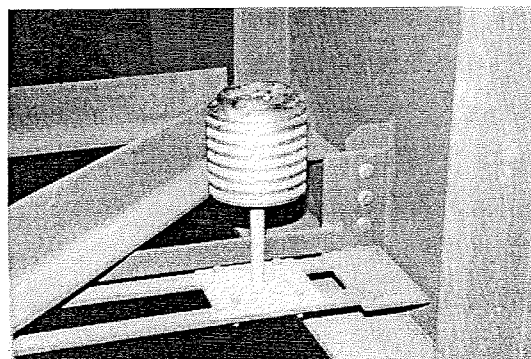


写真-5.4 飛来塩分捕集器具の設置状況

写真-5.5 SO_x 捕集器具の設置状況

を用いて、これを直接雨の当たらない風通しのよい所に鉛直に設置し、ガーゼに付着する塩分を捕集する方法である。捕集器具の設置状況を写真-5.4に示す。通常1か月を単位としてガーゼを回収して塩分を計量する。本法では降雨中にまぎれ込んだ飛来塩分は採取できない。②付着塩分拭き取り法は、部材の塗装面に付着した塩分を濡れたガーゼなどで拭き取って採取する方法である。一般に現場塗装前の付着塩分の調査方法として広く採用されている。手法は簡単であるが、構造物の形状の影響を受ける。③土研式タンク法は、建設省土木研究所が全国の塩害調査のために実施した方法であり、飛来塩分の捕集容量を大きくすることが特徴である。方向が一方に限定されるため設置方法に検討が必要である。

また、亜硫酸ガス濃度についてもJISに規定された調査方法が用いられる。二酸化鉛を塗布したブロード布を取り付けた陶器製円筒（外周10cm、長さ15cm）の捕集器具を直接雨の当たらない風通しのよい所に鉛直に設置する。捕集器具の設置状況を写真-5.5に示す。これを1か月間放置し、その後回収して以降の化学分析を行う。

これらの大気汚染物質は季節により変動することも多いため、1年間の測定期間を設けるのがよい。

5.3.2 付着物および錆の分析¹²⁾

大気中に長期間さらされる鋼橋の部材表面には、塗膜の劣化や鋼材の腐食を促進する物質が付着したり、鉄と化合して沈着している。これらの付着物や錆を採取、分析することにより、橋梁架設位置の大気に含まれる腐食因子を知ることができ、腐食の原因推定や補修塗装を行う際の塗装系の選定に有効な情報となる。

(1) 付着物の採取・分析

① 試料の採取

採取位置は主桁ウェブの外側、内側、下フランジ下面、湿気のこもりやすい部位など、橋梁全体を眺めて代表的な位置を選定する。それぞれの採取位置において、50cm×50cmの正方形の面積を正確に測って線引きする。次に、よく煮沸したガーゼ（15cm×15cm）を蒸留水で湿らし、採取面積内の表面を丁寧に拭き取って付着物をガーゼ内に取り込む。

② 分析方法

採取試料の分析フローを図-5.10に示す。分析測定的项目としてpH、導電率、懸濁物質、全固形分、塩素イオン、硝酸イオン、硫酸イオン、溶解性固形分がある。

(2) 付着塩分の採取・分析^{12),13)}

① 試料の採取

付着物の採取方法と同じである。測定箇所面積を0.25m²とし、マスキングテープなどで仕切る。採取作業では、図-5.11に示すように精製水で十分に洗浄したビニール手袋あるいはポリエチレン手袋を用いる。

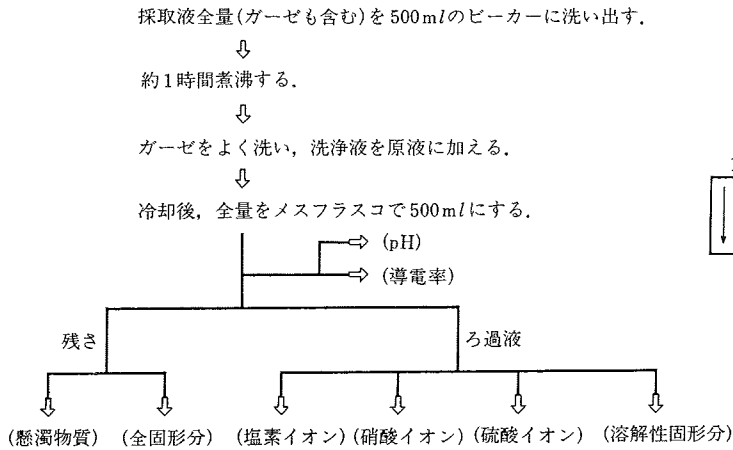


図-5.10 付着物の分析フロー

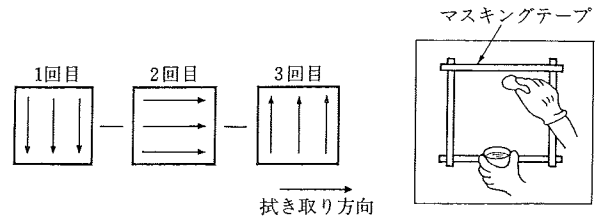


図-5.11 拭き取り法による塩分採取方法

② 分析方法

採取液の調整：精製水で十分に洗浄したビーカーに精製水 100 ml を入れる。拭き取ったガーゼを精製水の入ったビーカーに入れる。ビニール手袋を 50 ml の精製水でよく洗い、ビーカーの 100 ml に加えて検液量を 150 ml とする。

分析操作：塩素イオン検知管の両端をヤスリで切り、検知管に付いている目盛り数値の小さい方を下にして検液に浸す。検液が検知管の上端に達するまで待つて検知管を引き上げ、変色層（塩素イオンがあれば白色の変色層ができる）の先端の目盛りを読み取り塩素イオン濃度（ppm）を測定する。

測定断面積（m²）、検液量（ml）、塩素イオン濃度（Cl, ppm=mg/m³）から付着塩分量（NaCl, mg/m²）を算出する。測定箇所面積が 0.25 m²、検液量が 150 ml、塩素イオン濃度を ppm で表示すると、付着塩分量は塩素イオン濃度と同じ値となる。付着塩分量は次式で計算される。

$$\text{付着塩分量 (mg/m}^2\text{)} = (2.4A \times 10^{-2}) \times B \times C$$

A：読み取った塩素イオン濃度（ppm=mg/m³）

B：検液量（ml）

C：測定断面（m²）

なお、塗装面に付着する塩分量の許容値として 100 mg/m² 以下を目安としている場合が多いが、できる限り少なくすべきである。

(3) 錆の採取・分析

① 試料の採取

浮き錆のように錆が露出している場合は、錆層にナイフを入れて錆を削り取る。また、塗膜下の錆を採取する場合は、塗膜をナイフで切り取り塗膜ごと採取する。浮き錆や塗膜を剥がした後に残存する錆はステンレス製のスパチュラなどを用いて掻き取り、採取した錆を薬包紙に包みポリ袋などに入れて密封する。

② 分析方法

代表的な錆の分析方法を表-5.2 に示す。採取した錆については分析の目的、対象に応じた化学成分、機器分析、顕微鏡観察を行う。

③ 分析評価の例

錆の化学分析によって塩素イオンが検出され、あるいは錆の X 線回折で β-FeOOH が検出されれば、海塩粒子など塩分によって鋼材の腐食が促進されることが推定できる。また、錆の化学分析において硫酸イオンが検出される場合、あるいは腐食鋼材表面の X 線マイクロアナライザによって鋼材表面に硫黄が検出される場合には、亜硫酸ガス

表-5.2 錆の分析法

方 法	対象深さ (μm)	特 徴	対 象
肉眼による全体観察	表面外観	肉眼やルーペによる色や形から大略の腐食形態の判定	腐食部, 正常部の外観
光学顕微鏡, 偏光顕微鏡, 実体顕微鏡	$10^2 \sim 10^4$	腐食形態の観察	金属組織, 錆層, 局部腐食
蛍光X線分析	$10 \sim 10^2$	軽元素を除く全元素分析, 非破壊	サーベイテスト, 特異元素
発光X線分析	10^2	放電による破壊を伴う	母材分析
X線回折	$10 \sim 10^2$	結晶構造による同定, 少量でもよい	腐食生成物同定
X線マイクロアナライザ (EPMA)	$10^{-1} \sim 1$	微小部定量分析, 元素の分布像	生成物, 母材ともに有効
走査型電子顕微鏡 (SEM)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	表面凹凸, EPMA と兼用型増加	破面形態, 表面状態の観察
電子顕微鏡 (電子回折)	10^{-1}	制限視野回折による粒子の同定	腐食生成物, 析出物の同定
X線光電子分光 (ESCA, XPS)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	化学結合状態の決定, 表面情報	腐食生成物の決定
オージェ電子分光 (AES)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	微小部表面分析, SEM 機能あり	粒界, 破面, 表面分析に有効
イオンマイクロアナライザ (IMA)	10^{-2}	高感度微小部分析, 三次元分析	腐食表面, 生成物の元素分布
赤外分光 (IR)	10^3	有機物の分類, 無機物分析	有機物, 無機物, 生成物の同定
メスバウアー分光	$10^{-2} \sim 10$	化学結合状態, Fe の原子価の決定	Fe および Sn の化合物, 鉄錆

の影響を受けて腐食が進んでいることがわかる。いずれにおいても、寿命延長のためには補修において塩分あるいは亜硫酸ガスに対して耐久性の高い塗装仕様の選定が必要である。

一方、ボルト添接部など鋼材同士の重ね部、塗装が不均一となりやすい隅角部、溶接部近傍においては局部腐食が生じることがある。この場合、腐食鋼材の一部を採取し、断面を光学顕微鏡で観察することにより、隙間腐食や異種金属接触腐食などの腐食形態を確認することができるとともに、腐食深さから腐食量、腐食速度の推定が可能である。

5.4 無塗装耐候性鋼橋梁の錆の評価手法

耐候性鋼は自ら生じる錆膜によりその後の腐食を防止する機能を有する鋼材であり、腐食に対するメンテナンスフリーを期待して鋼橋にも多く使用されている。この耐腐食性を発揮する安定錆は、大気環境に応じて一定期間の後に初めて生成してくる。ところが、飛来塩分が多い沿岸地域などの橋梁に同鋼材を用いた場合には、安定錆が形成されず思わぬ腐食に至ることもある。したがって、耐候性鋼を使用した鋼橋を管理するうえでは、鋼材表面に生成した錆が、安定錆であるか、進行性錆であるかの判定と、進行性の錆であると判断された場合には、その進行度合いを調査する。耐候性鋼の許容腐食量は、50年後の腐食量が0.3 mm/片面が一応の目安とされており¹³⁾、下記調査に基づき予想される腐食量がこれを越える場合には進行性の錆であると判断し、当該部材に対して、所定の時期に塗装などの防食対策を講じる必要がある。

鋼橋に適用した耐候性鋼の錆の状態について、これまでに実橋梁における追跡調査や各種環境における暴露試験片による調査が行われてきた。その結果、現時点では錆の安定性については飛来塩分量との相関である程度判断できること、また、錆の状態の良否は層状剝離錆の有無で判定できることなどの評価判定法が提案されている¹⁴⁾。

5.4.1 飛来塩分量と錆安定性の評価手法

各種腐食因子のうち、耐候性鋼の錆の生成には飛来塩分が最も相関性が高いことが知られている。そのため、調査対象の橋梁に生成した錆が安定錆か否かの判定、ならびに錆の進行性の評価を行うにあたり、まずは既往の調査データを利用して当該橋梁の架設地点における耐候性鋼の適用性を調査することが大きな手掛かりとなる。既往の調査データとしては、建設省土木研究所、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会の3者による「耐候性鋼の橋梁への適用に関する

共同研究委員会」にて作成された耐候性鋼橋の適用範囲¹¹⁾ (図-5.12), およびその基礎資料となった全国41橋の暴露調査の結果¹⁵⁾ (図-5.13) が判定の指標となる。この調査においては図-5.14 に示す飛来塩分量(ガーゼ法による測定)と板厚減少量との相関も得られている。

飛来塩分量の調査データについては, 前記以外にも図-5.15 (土研式タンク法による調査¹⁶⁾) に示すものなどがあり, これらのデータを活用するのが有効である。ただし, このようなデータを使用するにあたっては, 架設地点の局地的な環境条件も考慮する必要がある。

調査対象の橋梁にこれらの既存のデータが適用できないと判断される場合には, 前項に示した要領で現地において飛来塩分量を調査する。

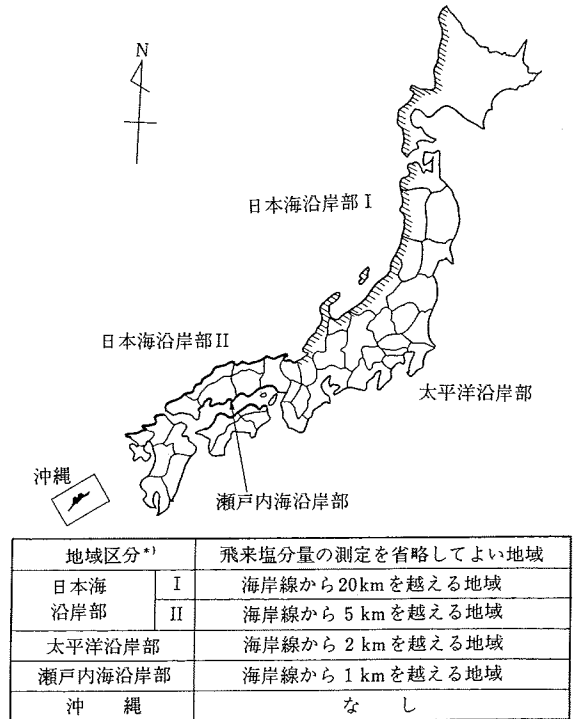


図-5.12 無塗装耐候性橋梁の適用範囲

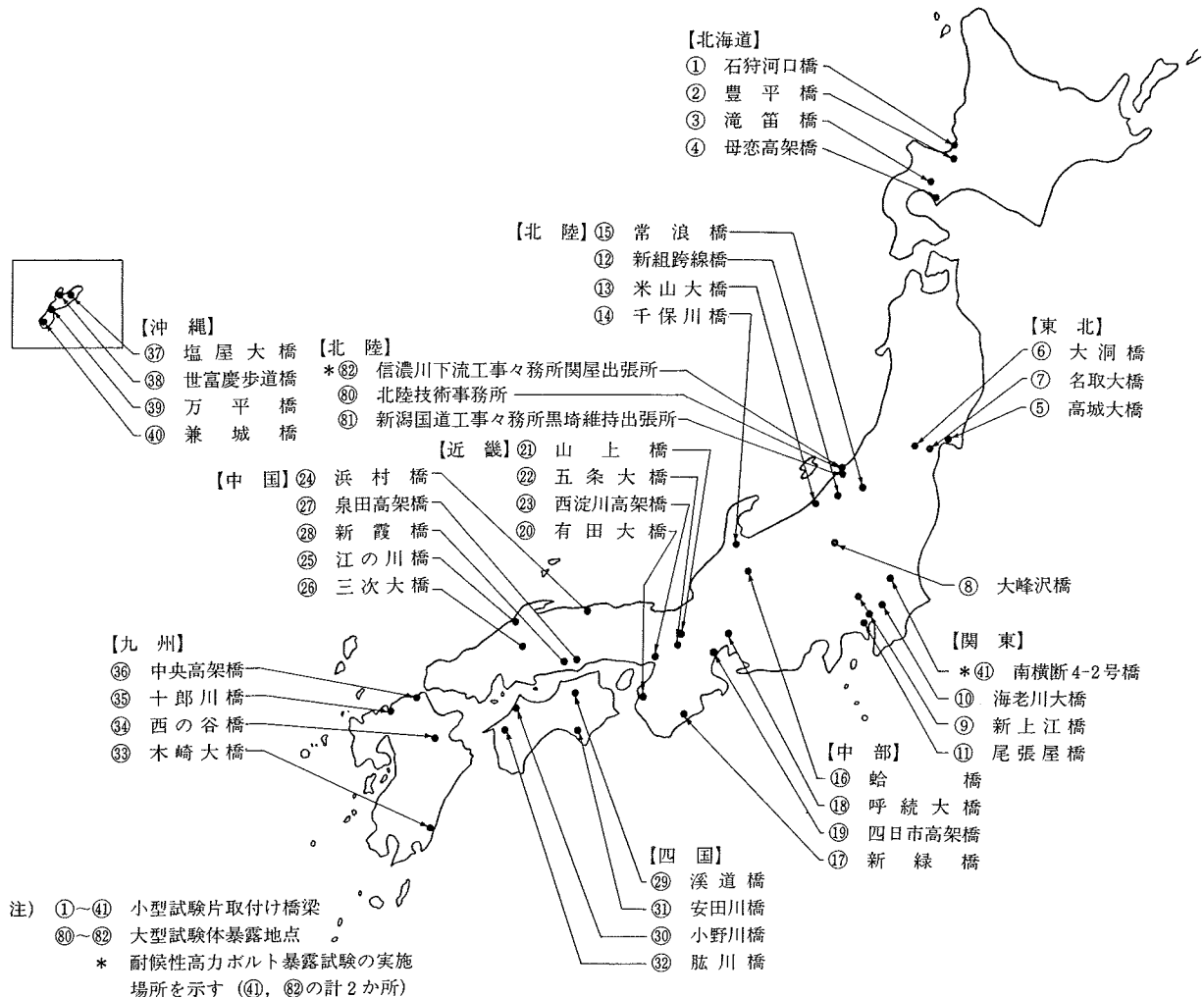


図-5.13 無塗装耐候性橋梁の暴露調査 (41橋)

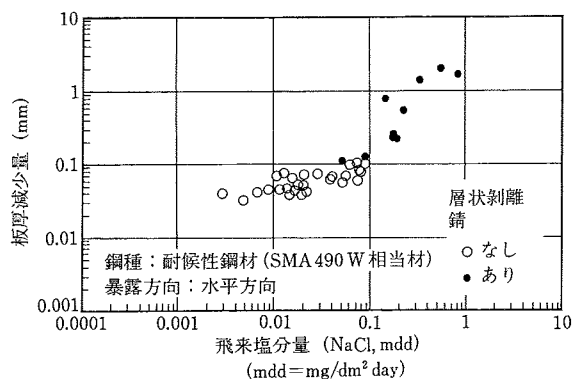


図-5.14 暴露9年目の飛来塩分量と板厚減少量との相関

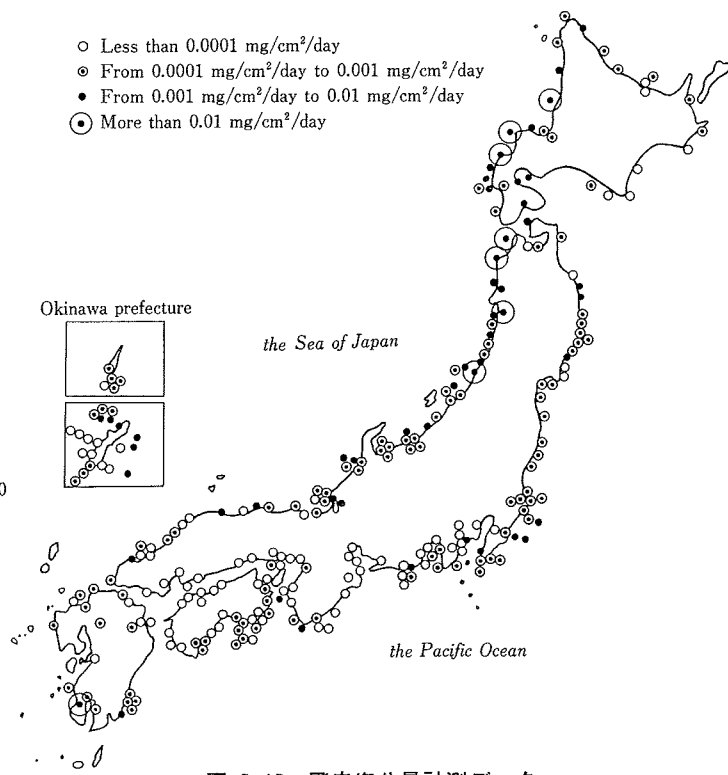


図-5.15 飛来塩分量計測データ

5.4.2 現地調査による錆安定性の評価手法

耐候性鋼材の錆の安定性は層状剝離錆の有無で判定できる。したがって、現地調査では目視観察および布きれなどで鋼材表面を擦ることによって錆の状態を調査する。層状剝離錆が観察され、錆の進行が著しい場合には、普通鋼板と同様の扱いが必要であり前掲の調査分析を行う。

一方、錆の経年変化を調査する場合などに用いられる現地調査方法としては、フェロキシル試験がある。フェロキシル試験は、錆層のピンホールを通して試験液が素地鉄と反応し、青色班点を呈するのを利用したものであり、この班点の数や大きさをチェックし、鋼材表面の錆層の安定度を評価する方法である。

5.5 腐食部材の損傷度評価

部材に全面腐食が生じると、断面がほぼ均等に減少し、部材耐力、剛性が低下する。一方、局部腐食が生じると、腐食箇所には応力集中が起り、やはり強度低下を招く。また、腐食環境中で繰返し応力を受ける場合には、腐食と疲労との相乗効果により、大気中の疲労と異なり疲労限がはっきり現れず、一般にその疲労強度は大気中における疲労強度に比べて低下する。このように全面腐食、局部腐食あるいは腐食疲労は部材の耐荷性能に重大な影響を及ぼし、その影響度は腐食の進行に伴い変化する。したがって、腐食による損傷度を定量的に評価し、部材の余寿命評価を行うことは、既設橋の維持管理および将来における架替えを検討するうえで重要なことである。

腐食部材の余寿命評価において、必要となる項目は腐食進行に関する将来予測と腐食進行に伴う耐荷性能低下の評価および限界とする耐荷性能の設定である。つまり、現状の腐食状況から将来における腐食進行程度を定量的に予測し、その腐食程度に応じた耐荷性能の推移を推定することにより、ある限界耐荷性能に達するまでの期間を算出することとなる。以下、腐食進行程度の予測、腐食部材の耐荷性能評価および余寿命評価に関する考え方について述べるが、局部腐食現象に関しては、腐食部位の部分的な補修・補強でその部材の延命化を計ることが可能であることから、ここ

では全面腐食に対する評価について考えることとする。また、腐食材の疲労については、第4章で述べていることからここでは取り扱わないこととする。

5.5.1 腐食進行の予測

腐食進行の程度は経年と腐食量との関連を示す腐食速度で代表できる。鋼素材における腐食速度は指数関数モデルで表すことができ、その場合の関数モデルにおける係数も提案されている¹⁷⁾。表-5.3は、普通鋼材、耐候性鋼材について3種類の環境条件における平均的な係数を示したものである¹⁸⁾。しかし、鋼橋においては防錆対策として一般的に塗装が実施されることから、塗膜の劣化と発錆程度、および塗装の塗替え周期などの影響をも考慮した腐食速度の評価が必要である。また、同一の橋梁内においても橋梁各部において腐食環境が異なることから、ウェブ部と下フランジ部、内桁部と外桁部、支間中央部と桁端部、あるいは高力ボルト継手部と一般部とで塗膜の劣化程度、発錆程度に相違が生じる傾向にあり、部位別の評価も必要となる。これら要因を考慮した腐食量の予測方法を提案している事例^{19),20)}もあるが、その適用に関してはさらに多くのデータの蓄積が必要と考えられる。したがって、現状において腐食量の将来予測を行う手法としては、対象橋梁の腐食量に関する経年データがある場合には、そのデータを用いて将来予測を行うか、あるいは、既存の鋼素材に対する腐食速度データを対象橋梁の実態腐食量をもとに修正し将来予測を行うこととなる。以下に、測定データを統計的に処理し腐食速度を分析する手法について実橋での分析例²¹⁾により示す。

調査対象橋梁を図-5.16に示す。この橋は5径間連続の鋼ゲルバートラス橋で、外洋に近い河口に位置するため海からの強い潮風を受け、鋼部材に著しい腐食損傷が発生した。架橋から24年間経過した時点で第1・第2径間を対象に、主要部材（上弦材・下弦材・斜材・縦桁・横桁・下横構）の各構成板の残存板厚が測定された。この橋梁の腐食状況については、局所的な状況ではなく、各構成板内においてほぼ均一に腐食減厚が発生していることから、各主要部材の板厚測定は図-5.17に示すとおり各構成板について3~4点、1断面当り6~16点測定している。測定点数の内訳を表-5.4に示す。

表-5.3 腐食速度における係数

Environment (1)	Carbon Steel		Weathering Steel	
	A	B	A	B
	(2)	(3)	(4)	(5)
Rural	34.0	0.65	33.3	0.50
Urban	80.2	0.59	50.7	0.57
Marine	70.6	0.79	40.2	0.56

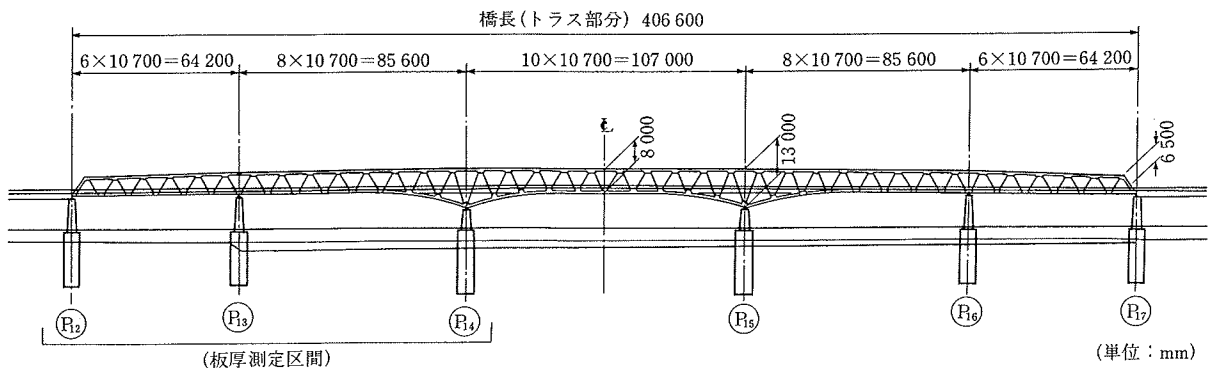


図-5.16 腐食調査対象橋梁（鋼ゲルバートラス橋）

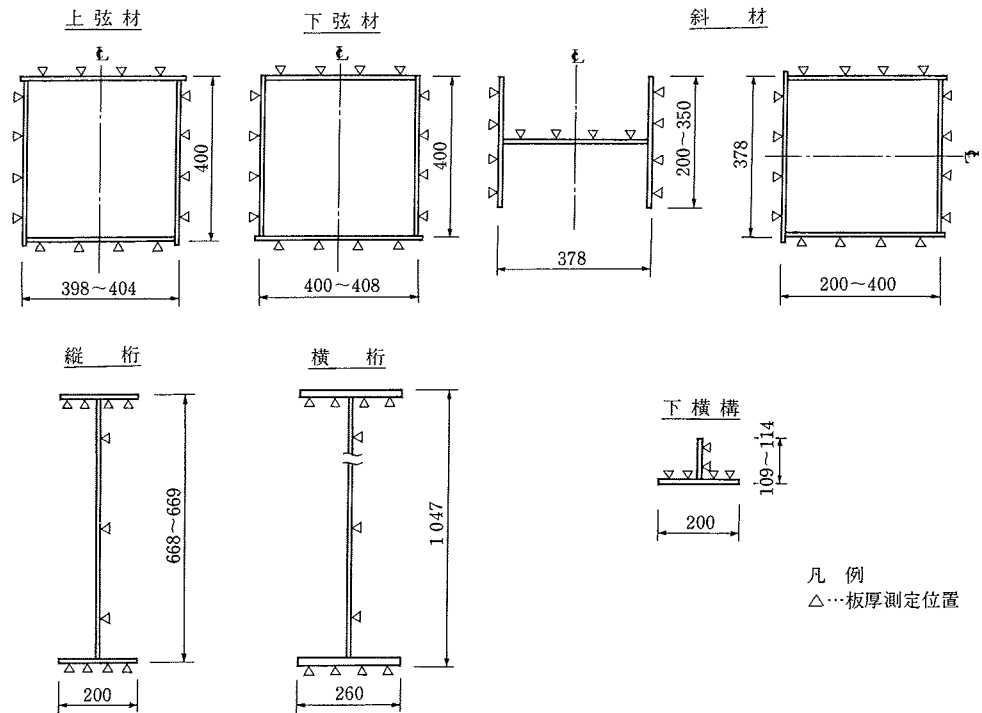


図-5.17 主要部材の板厚測定位置

表-5.4 測定点数の内訳

項目 部材名	部材数	1部材当り 実測断面	実測断面数	1断面当り 測点数	実測点数	
床版センターラインより河口側	上弦材	14	2	27	16	432
	下弦材	14	2	28	16	448
	斜材	28	2	H 20	12	220
				□ 36	16	576
	外側縦桁	14	3	42	11	462
	内側縦桁	14		43	11	473
	横桁	14	2	28	11	308
	下横構	28	1~2	40	6	240
	小計	126		264		3159
	その他 (上横構, 上下支材, 補剛材, 下横構用ガセット)					848
合計					4007	

各測定点で得られたデータ〔測定板厚(残存板厚)〕をもとに、次式を用いて構成板要素単位、部材単位あるいは部材種類単位での〔平均残存板厚〕、〔平均腐食量〕、〔平均腐食速度〕を計算している。

$$[\text{平均残存板厚}] = \sum [\text{測定板厚(残存板厚)}] / n \quad (1)$$

$$[\text{平均腐食量}] = [\text{初期板厚}] - [\text{平均残存板厚}] \quad (2)$$

$$[\text{平均腐食速度}] = [\text{平均腐食量}] / [\text{経過年数}] \quad (3)$$

表-5.5 に各部材の平均腐食量、腐食速度の計算結果を示す。この例では各構成板について整理しており、同類の部材の板要素(例えば、外側縦桁の下フランジ:測定データ数42)について、前式を用いて計算したものである。

表-5.5 平均腐食量と腐食速度

部 材	項 目	平 均 腐 食 代			平均腐食量 (mm)	腐 食 率 (%)	腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{年}$)
		データ数	最大値 (mm)	最小値 (mm)			
上 弦 材		27×4面=108	0.5	-0.9	-0.3		
下 弦 材		28×4面=112	1.3	-1.0	-0.1		
斜 材	鉛直板	20×2面= 40	1.1	-0.7	-0.2		
	水平板	20×1面= 20	0.8	-0.7	0.0		
	□	36×4面=144	3.4	-1.0	-0.1		
外側縦桁	上フランジ	42	1.2	-1.0	-0.4		
	腹 板	42	0.6	-0.4	0.1	1.1	4.2
	下フランジ	42	4.9	-0.2	2.1	23.3	87.5
内側縦桁	上フランジ	43	4.9	-1.0	-0.2		
	腹 板	43	0.3	-1.0	-0.1		
	下フランジ	43	5.0	-0.2	1.9	21.1	79.2
横 桁	上フランジ	28	4.2	-0.8	1.1	4.4	45.8
	腹 板	28	0.5	-0.6	-0.2		
	下フランジ	28	11.5	0.25	3.3	15.0	137.5
下 横 構	鉛直板	40	7.0	-0.5	1.3	14.4	54.2
	水平板	40	9.8	-0.1	3.6	40.0	150.0

板厚減少が著しい部材については、その応力状態を実測や解析から把握して対策を考える必要がある。なお、供用後において初めて腐食調査を行う場合には、式(3)の腐食速度には塗装が健全で鋼材の腐食が進行しない年数も計上され、照査時点での腐食速度より緩やかとなり、この腐食速度を用いて将来予測を行う場合には危険側の評価を与える場合もあるので注意することが必要である。

5.5.2 腐食部材の耐荷性能評価

部材の耐荷性能に及ぼす腐食の影響として2つのことが考えられる。一つは腐食が部材の強度特性値に及ぼす影響であり、もう一つは、腐食減厚に伴う断面性能の低下としての影響である。前者の問題については、船舶分野において腐食材を用いた静的強度試験が実施されている²²⁾。図-5.18は海水腐食材の機械的性質（降伏点、引張強さおよび伸び）を腐食のない母材の場合（サフィックス0を付加したもの）に対する比として示したものである。横軸の平均板厚は標点間の任意の10点について測定した板厚の平均値である。この結果によると延性の指標である伸び比はすべて1以下となっており、腐食材においては延性の低下をきたしており、その程度は孔食の密集度に大きく依存することが確認されている。しかし、引張強度、降伏点に関しては腐食材と母材との間に大きな変化は認められない。腐食減厚に伴う部材引張耐力の変化については、いくつかの実験が行われており^{23),24)}、腐食部材の引張耐荷性能の評価について

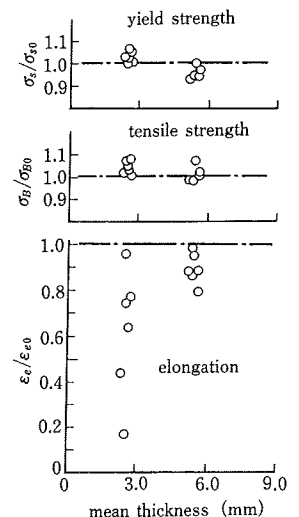


図-5.18 海水腐食材の機械的性質

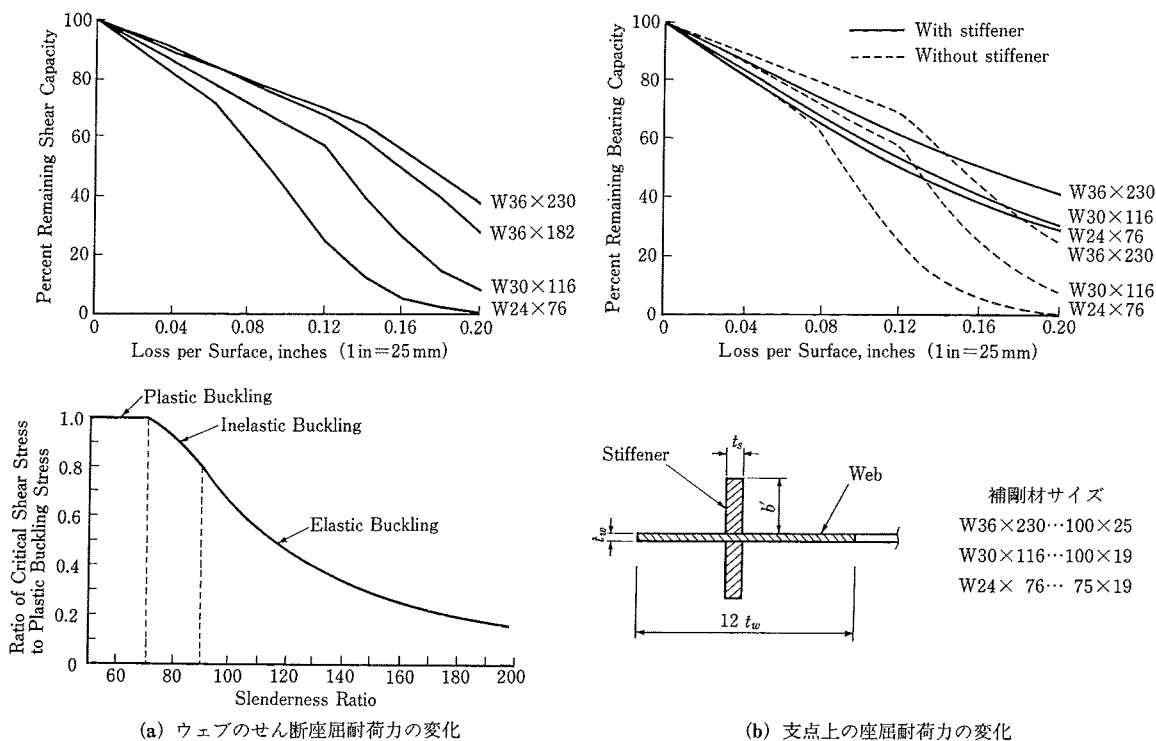


図-5.19 腐食の座屈耐力への影響

は、残存断面性能による評価が可能であることが示されている。

圧縮部材に関しては、座屈強度の面からの耐荷性能の評価が必要である^{25)~27)}。この場合、断面減少に伴う耐荷性能の低下と幾何形状（細長比、幅厚比）の変化に伴う座屈耐力の低下の双方について検討する必要がある。また、せん断部材に関しても同様に座屈強度の面からの検討が必要である。図-5.19は単純合成鋼桁橋における支点上荷重集中点および支点近傍腹板の座屈耐力に関して腐食減厚の影響を検討したものである²⁸⁾。腐食の初期段階においては、断面減少に伴い線形的に耐荷性能が低下しているが、座屈強度に達した後は急速に耐荷性能が減少している。

なお、腐食の進行形態は構成板の全域において均一に進行することは少なく、むしろ構成板内の各部位において減厚状況が異なる性状を示す場合が多い。このような不均一板厚材における座屈強度に関しては不明な点があり、平均板厚を用いた強度評価が可能であるかどうか今後の検討課題と言える。

その他の特殊部位として、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力について、ボルトの腐食による影響を検討した事例がある²⁹⁾。ボルトが腐食により、その肉厚が減少することによるボルト締付け軸力の変化について検討したもので、図-5.20に示すように減肉量が大きいほど軸力が減少しており、その分、継手のすべり耐力が低下することとなる。

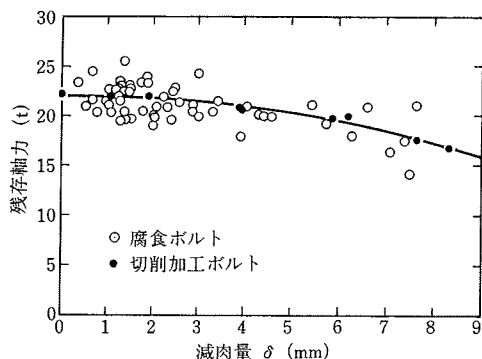


図-5.20 高力ボルトの腐食に伴う締付け軸力の変化

5.5.3 腐食部材の余寿命評価

腐食の将来予測と腐食部材の耐荷性能評価により図-5.21に示すような経年に対する耐荷性能の減少予測が可能となる。ここで余寿命は図中に示すように現時点から設定される限界耐荷性能までの時間として評価することができる。また、引張耐荷性能および座屈耐荷性能を板厚の関数として評価した場合、限界耐荷性能に対する板厚（限界板厚）

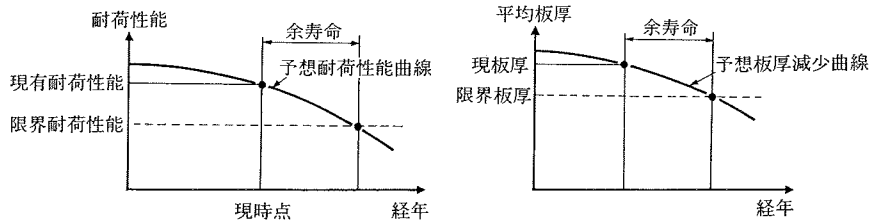


図-5.21 耐荷性能の経年変化模式図

を算出することにより腐食速度の想定曲線から余寿命を推定することが可能となる。さらに、簡易的な手法としては平均的な腐食速度を想定することにより次式により余寿命を算出することができる。

$$\text{余寿命} = [(\text{現状における板厚}) - (\text{限界板厚})] / (\text{平均的腐食速度})$$

ここで、限界値の設定に際しては、計算解析値と部材に生じる実応力度との相違や交通の実態などを考慮して設定することが重要である。以下に、鋼鉄道橋における腐食を対象とした限界値の考え方について示す³⁰⁾。

鋼鉄道橋においては、腐食による耐荷力の低下に対し、限界値として保守限応力度と呼ばれる値を設定している。この値は腐食などにより断面が減少した橋梁の発生応力度の限界値、すなわち既存桁の安全性の照査に用いる許容応力度であり、降伏、座屈および疲労を考慮して定められている。

引張部材の保守限応力度 σ_m は、静的耐力と疲労の両方を考慮して定められており、静的耐力には今までの実績や米国の AREA における既存桁の評価³¹⁾ に用いる応力度をもとにして、以下の値が用いられている。

$$\sigma_m = 0.8 \sigma_y \text{ (非溶接桁)}$$

$$\sigma_m = 0.7 \sigma_y \text{ (溶接桁)}$$

ここに、 σ_y ：鋼材の降伏点

疲労については、国鉄建造物設計標準（鋼鉄道橋，昭和 58 年）³²⁾ の疲労条項に準拠し、非溶接桁ではリベット継手（B 等級）、溶接桁では縦ビード継手（A 等級）の基本許容応力範囲（ σ_{f0} ）を基本としている。また、スパンおよび通過トン数の影響についてそれぞれ γ_1 、 γ_2 の係数を導入し、以下の式により疲労を考慮した保守限応力度 σ_m を算出することとしている。

$$\sigma_m = \sigma_{f0} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 / \alpha$$

ここに、係数 α は計算作用応力度に対する実応力度の比であり、これまでの実橋測定結果（図-5.22 参照）をもとにスパン 10 m 以下の部材については 0.65、スパン 10 m 以上の部材については 0.75 としている。

このように、引張部材の保守限応力度は表-5.6 に示す 2 通りがあり、通常の場合は疲労を考慮した値（通常入線）を用いることになるが、特別な重量列車の一時的な運行に対する安全性を照査する場合などでは静的耐力のみを考慮した値（一時入線）を用いればよい。

圧縮部材については疲労は考慮せず、座屈のみを考慮している（表-5.7，表-5.8）。この場合、耐荷力曲線は図-5.23 に示すようにリベット桁と溶接桁で異なるものを用いている。設計曲線に対し短柱域ではある程度の緩和を許容するものとしたが、長柱域では老朽化などによる部材の不整に対する安全性も考慮して緩和を小さくし、Euler の座屈域では設計許容応力度の耐荷力曲線にすりつけている。

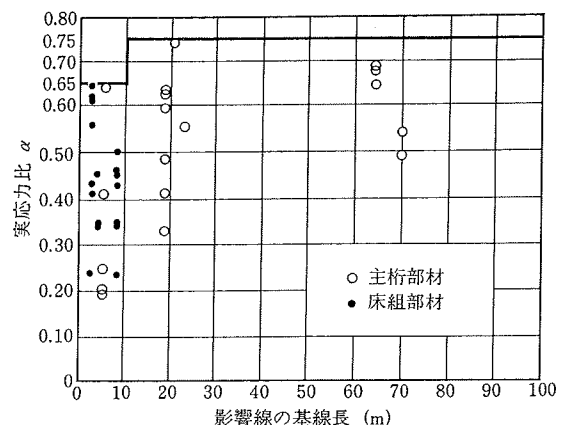


図-5.22 実応力比の調査結果

表-5.6 保守限度力度 (引張応力度)

(単位: kgf/cm²)

通トン	スパン 影響線長 (m)	錬鉄 ベッセマー鋼	SS 41 SM 41 SMA 41										高張力鋼						
			昭和3年(1928年) 以前		昭和4年(1929年) 昭和25年(1950年)		昭和26年(1951年)~ 昭和44年(1969年)				昭和45年(1970年) 以降		SM 50		SM 50Y SM 53 SMA 50		SM 58 SMA 58		
			定常 入線	一時 入線	定常 入線	一時 入線	リベット桁		溶接桁		定常 入線	一時 入線	定常 入線	一時 入線	定常 入線	一時 入線	定常 入線	一時 入線	
2000万t 以上	<10	1150	1400		1500		1500							1800		1800		1800	
	10 ≤ L < 20																		
	≥20		1590		1700		1700							2000		2000		2000	
1000万t 以上 2000万t 未満	<10			1650		1760		1800		1840	1610	1610	1680	1680	2200		2200		2200
	10 ≤ L < 20																		
	≥20		1650		1760											2400		2400	
1000万t 未満	<10						1840								2240				2500
	10 ≤ L < 20															2520			2600
	≥20																		2900

注) 無規格鋼材や大正時代以前の鋼材で材質が不明の鋼材については引張試験等で材料強度の確認をする必要がある。

表-5.7 保守限度力度 (圧縮応力度: 昭和44年以前の鋼材)

(単位: kgf/cm²)

鋼材		SS 41	
組み合わせるリベット		SV 34	
圧縮応力度 (総断面につき)	軸方向応力度	ア $0 < l/r \leq 110$ のとき $1380 - 0.065(l/r)^2$ イ $l/r > 110$ のとき $7200000(l/r)^2$	①
	曲げ応力度	$l/r \leq 30$ のとき $1380 - 0.7(l/b)^2$ ただし、圧縮縁にバックル プレートのあるときおよびダ ブルウェーブ断面のときは $1380 - 0.4(l/b)^2$	②

備考(1) ①における l は、部材の骨組長さ (cm) を、 r は部材の総断面の断面二次半径 (cm) を示す。ただし、 l は、リベットで連結される腹材の構面内の座屈を考慮する場合には、その 0.9 倍とする。

(2) ②における l は、フランジの固定点間距離 (cm) を、 b はフランジの幅 (cm) を示す。

(3) 錬鉄、ベッセマー鋼についてはリベット桁としてこの表を適用するが、最大値は 1050 kgf/cm² とする。

表-5.8 保守限応力度 (圧縮応力度：昭和45年以降の鋼材)

(単位：kgf/cm²)

鋼種		SS 41 SM 41 SMA 41	SM 50	SM 50 Y SM 53 SMA 50	SM 58 SMA 58
構造用鋼材	軸方向応力度	0 < l/r ≤ 9 のとき 1 510	0 < l/r ≤ 8 のとき 2 015	0 < l/r ≤ 8 のとき 2 270	0 < l/r ≤ 10 のとき 2 900
		0 < l/r ≤ 130 のとき 1 510 - 8.86(l/r - 9)	9 < l/r ≤ 115 のとき 2 015 - 13.73(l/r - 8)	9 < l/r ≤ 105 のとき 2 270 - 16.48(l/r - 8)	9 < l/r ≤ 95 のとき 2 900 - 24.47(l/r - 10)
		130 < l/r のとき 7 400 000(r/l) ²	115 < l/r のとき 7 400 000(r/l) ²	105 < l/r のとき 7 400 000(r/l) ²	95 < l/r のとき 7 400 000(r/l) ²
圧縮応力度 (総断面につき)	(1) 強軸まわりの曲げに対し l/r の代わりに次の式で示す等価細長比 (l/r) _e を用いる。 $(l/r)_e = F \frac{l}{b^2}$ ここで、I 形断面の場合 $F = \sqrt{12 + 2\beta/\alpha}$ 箱形断面の場合 $\beta < \beta_0 : F = 0$ $\beta_0 \leq \beta < 1 : F = \frac{1.05(\beta - \beta_0)}{1 - \beta} \sqrt{3\alpha + 1} \sqrt{b/l}$ $1 \leq \beta < 2 : F = 0.74\sqrt{(3\alpha + \beta)(\beta + 1)} \sqrt{b/l}$ $\beta \geq 2 : F = 1.28\sqrt{3\alpha + \beta} \sqrt{b/l}$ $\beta_0 = \frac{14 + 12\alpha}{5 + 21\alpha}$ U形断面の場合 $F = 1.1\sqrt{12 + 2\beta/\alpha}$				

備考 (1) ①における l は部材の座屈長さ (cm) を、また、r は考える軸についての総断面の断面二次半径 (cm) を示す。なお、トラスの腹板(構面内)の l は骨組長さの 0.9 とする。
(2) ②における l はフランジの固定点間距離 (cm) を、また、b はフランジの幅 (cm) を示す。ただし、*印の b は箱形断面および U 形断面の場合、腹板中心間隔 (cm) を下路プレートガーダーの場合、主桁中心間隔 (cm) を示す。α はフランジの厚さ (t_f) 腹板の厚さ (t_w) の比 (t_f/t_w) を、また、β は腹板高さ (h) とフランジ幅 (b) との比 (h/b) である。

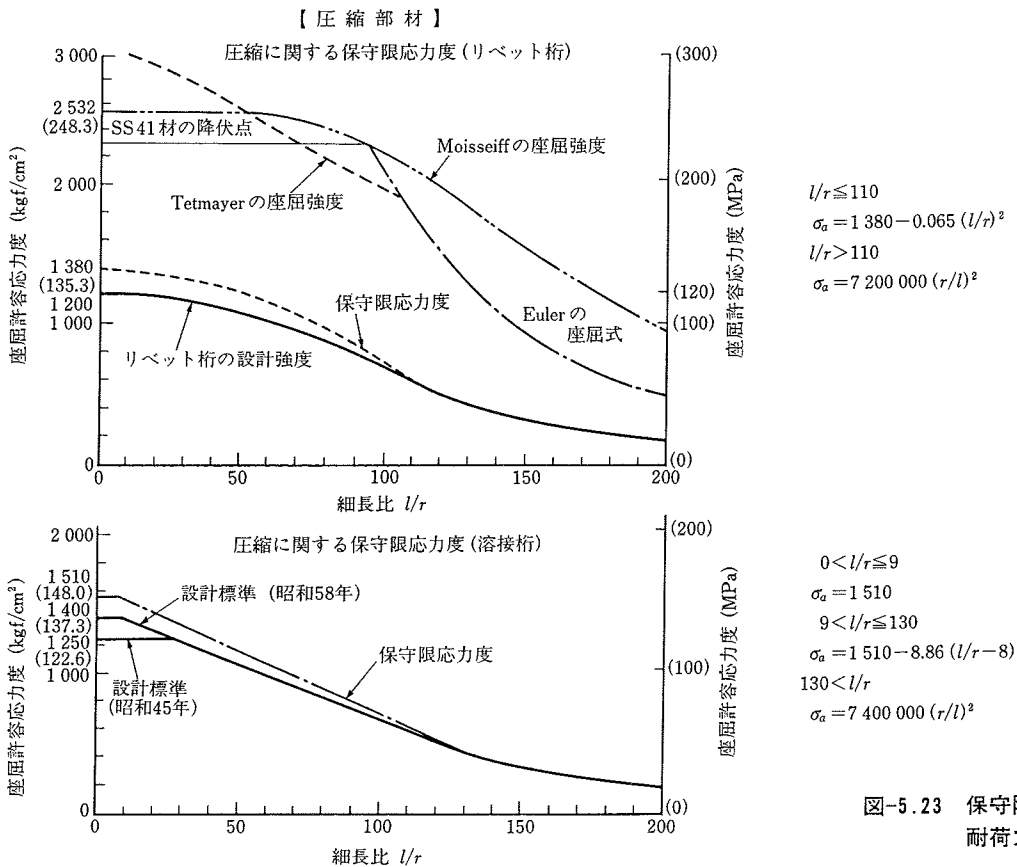


図-5.23 保守限応力の算定に用いた耐荷力の曲線

ただし、頭打ちは設計標準における従来からの習慣に従い引張の保守限応力度の90%以内に押さえている。

せん断や支圧に対する保守限応力度は、材料の保有強度（降伏点や硬度など）をもとに引張と同様の扱いで定められている。

なお、錬鉄およびペッセマー鋼に対する引張とせん断の保守限応力度は、当時の材料規格などが明確でないこともあり、実績を重視し従来から用いてきた規格材に対して保守限応力度の強度比率を同程度に保つこと、現存している鉄道橋でこのような材料を使用しているものは非常に少なく、また、使用部位もほぼ特定できるため、通トン、スパン等に関係なく一律に引張1150 kgf/cm²、せん断700 kgf/cm²としている。

支圧についても同様の考え方で整理している。

また、圧縮材については、リベット桁の耐荷力曲線をそのまま用いることとしている。ただし、材質に左右される短柱域の部材については、保守限応力度の頭打ちを引張の90%程度として1050 kgf/cm²にしている。

既存桁の耐力の評価は上記の保守限応力度を用いて以下に示す現有応力比率 S_R を算出することとしている。

$$S_R = \sigma_m / \sigma$$

ここに、 σ は当該線区の最高速度で列車が入線したときに部材に発生する最大応力度であり腐食などを考慮した残存断面で計算する。

なお、 S_R 値が100%以下となると補強や徐行等の措置が必要となるが、対策が困難であったり、長期間徐行ができない場合は、寿命の想定を短くして保守限応力度を設定し直すか、実橋測定などによる詳細な検討を行って健全度を把握し、対処する必要がある。

なお、鋼橋は各部材が立体的に変形して外力に抵抗しており、ある部材の板厚が減少すると周辺の部材が補うように力を受け持つため、板厚の減少分がそのままその部材の耐荷性能の減少とならない場合が多い。また、損傷部材を補強した場合などでは、その部材に生じる断面力も大きくなる。したがって、部材間の力の流れを考慮した評価手法が求められている。

参考文献（第5章）

- 1) (社)日本橋梁建設協会：鋼橋塗膜の評価技術（その1. 塗膜劣化の判断基準の検討）、平成7年9月
- 2) 岡本ほか：塗装鋼板の $\tan \delta$ と耐海水性、工業化学雑誌、61-3, p.291, 1958
- 3) 本間宏二：交流インピーダンス法を応用した塗装鋼板劣化評価センサーについて、防錆管理、Vol.35, No.1, 1991
- 4) 村越 潤・名取 暢：講座・防錆防食技術⑥塗装の品質と塗膜欠陥、橋梁と基礎、pp.37~41, 1993.10
- 5) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、pp.93~97, 1990.6
- 6) Nishikawa, K. and Natori, T.: An Attempt on Evaluation of Corroded Steel Bridge Members, Review of Progress in QNE, Vol.13, 1994
- 7) 建設省・国土開発技術研究センター：平成3年度秋田大橋管理検討業務報告書、1992
- 8) 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準(案)同解説、鋼構造、1987.3
- 9) 大野 崇・名取 暢：腐食材の板厚評価に関する基礎的研究、土木学会第48回年次学術講演会概要集、I-214, 1993.9
- 10) JIS Z 2381「屋外暴露試験方法通則」
- 11) 建設省土木研究所、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会：「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改訂案)」, 1993.3
- 12) 日本鋼構造協会：指針－鋼橋塗膜調査、JSSC IV-03, pp.14~17, 1982.11
- 13) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、p.143, 1990
- 14) 西川和廣・片脇 清・村越 潤・寺田 剛・田中良樹：無塗装耐候性橋梁の点検要領(案)について、第19回日本道路会議論文集、pp.882~883, 1991
- 15) 建設省土木研究所、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会：「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(VIII)無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(案)」, 1986.3
- 16) Fujiwara, M. and Minosaku, K.: Measures against Deterioration of Concrete Bridges due to Chloride Ions, IABSE
- 17) 鋼材倶楽部：鋼材の腐食防食に関する資料、鋼材防食調査委員会報告書、1973.8
- 18) 堀川一男・滝口周一朗・石津喜雄・金指元計：各種金属材料および防錆被覆の大気腐食に関する研究（第5報）、防錆技術、16, pp.153~158, 1967

- 19) Matsumoto, M., Shiraishi, N., Rungthongbaisuree, S. and Kikuta, T.: Corrosion of Steel Bridges—Its Long-Term Prediction and Effect on the Safety, Proc. of JSCE, No.410/I-12, October 1989
- 20) 松本 勝・白石成人・ソムキヤット ルントンパーイスリー・岡村 敬：鋼橋の腐食に関する研究，構造工学論文集，Vol.36 A，1990.3
- 21) 佐藤恒明・須賀政彦：鋼トラス橋の腐食状況に関する一考察，木更津工業高等専門学校紀要，第25号，1992
- 22) 岡 実・北田博重・渡辺富雄：腐食材の静的強度に関する実験的考察，日本造船学会論文集，第167号
- 23) 松本 勝・白井義郎・中村幾雄：腐食鋼材の有効板厚評価の一提案，橋梁と基礎，pp.19～25，1989.12
- 24) 西川・村越・松本・名取ほか：腐食部材の板厚測定方法と静的強度の評価に関する検討，土木学会第49回年次学術講演会概要集，I-262，1994.9
- 25) 村上茂之・西村宣男・亀井義典：腐食被害を受けた周辺支持板および自由突出板の圧縮強度特性，土木学会第47回年次学術講演会概要集，1992.9
- 26) 村上茂之・西村宣男・亀井義典：腐食鋼板の等価板厚算定に関する一考察，土木学会第48回年次学術講演会概要集，I-36，1993.9
- 27) 羽島克利・藤井 堅：腐食した鋼材の残存耐荷力評価，土木学会第49回年次学術講演会概要集，I-263，1994.9
- 28) Jack R. Kayser and Andrzej S. Nowak: Capacity Loss to Corrosion in Steel-Girder Bridges
- 29) 大野 崇・名取 暢・村越 潤：腐食減肉した高力ボルトの残存軸力測定，土木学会第49回年次学術講演会概要集，I-260，1994.9
- 30) (財)鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準・同解説（鋼構造物），昭和62年
- 31) American Railway Engineering Association, Chapter 15, Steel structure, 1981
- 32) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋），昭和58年4月