

## 第8章 ミニマム維持管理達成のための方策

### 8.1 鋼橋の維持管理

鋼橋のロングライフ化を達成するためには、鋼橋の寿命を支配する可能性のある要因の分析とこれら要因に対する対策の検討が必要である。文献<sup>1)</sup>には鋼構造物の寿命を物理的寿命、機能的寿命、経済的寿命の三つの分類の下に、各寿命に関する要因分析が幅広く行われている。維持管理を頻繁に行うことでも物理的寿命を延長できても、維持管理費用がかかりすぎ経済的寿命として架け替えられた例もあることや、社会資本としての既存橋梁の増加に伴う維持管理費用の増大を考慮した場合、今後建設される橋梁の維持管理費用の最小化は不可欠と考えられる。

維持管理費用を直接増加させる物理的寿命に関わる要因として、いわゆる時間依存性強度と呼ばれる

- (1) 腐食
- (2) 疲労
- (3) 磨耗及び損耗
- (4) その他、特殊な要因（クリープ、リラクゼーション、遅れ破壊、等）

が挙げられる。これら時間依存性強度に対する影響因子は、設計・施工・供用中の維持管理のいずれの段階においても存在する。これらの影響因子に対する合理的な方策を検討するためには、設計耐用期間（年数）の設定が必要である。しかし、従来の設計規準には明確な耐用年数の規定は無く、「減価償却資産の耐用年数等に関する大蔵省令」における鉄道橋の耐用年数、コンクリート造で50年、鉄骨造で40年から50年程度と考えられていることが多い<sup>2)</sup>。そのため、ここで想定している目標耐用年数300年は、従来の耐用年数の概念からすれば5倍以上となるが、西川<sup>2)</sup>が指摘しているような工学的永久橋としての目標値と考えられる。

このような超長期耐用耐用（工学的永久橋）を目標とした時間依存性強度の確保の方策のうち、(1)『疲労』に関しては、第4章で示したように適切な疲労強度照査と二次応力の発生ならびに応力集中を起こしにくい構造詳細の採用により回避することが可能である。また、(3)『磨耗・損耗』に関しては舗装が最も考慮すべき要因であり、特に伸縮継手近傍での検討が必要であるが、最近ではライフタイムサイクルコストの概念が導入され各種舗装方法の選択法が示されている。一方(4)に関しては、高力ボルトやケーブル、合成構造を用いる場合配慮すべき要因であるが、関連分野での研究が別途行われており設計上はある程度確立されていることから本研究WGでは取り扱っていない。

(2)『腐食』に関しては、幾つかの調査結果<sup>1), 2), 3), 4)</sup>が指摘しているように鋼橋の耐久性を阻害している最も重要な要因である。しかし、従来は塗装の塗り替えを前提とした防食法が一般的であったことや防食システムの性能試験に極めて長期間を要すること等から、数十年のオーダーでの防食性能を確保する方策は幾つか実用に供されているものの、100年を越すような長寿命を期待した場合の方策が明確にされていないのが現状である。このような技術レベルのもとで300年の耐用を達成するためには

- (1) 300年間全く維持管理を前提としないメンテナンスフリーとするか、
- (2) 定期的な維持管理を前提とした維持管理費用最小とするか、

により設計時に於ける方策は基本的に異なってくると考えられる。しかし、周囲の環境条件の関係からメンテナンスが極めて困難であるような特殊な場合を除けば、いずれの場合

を採用するかは耐用期間中のライフサイクルコストが最小となるかどうかが判断基準となるべきであろう。

本章では、現状の防食技術をベースに鋼橋の腐食を防止し維持管理を最小化する方策について、橋梁の設置環境やメンテナンスの条件等の諸条件に応じた適切な防食システムについて紹介する。

## 8.2 鋼橋の腐食と影響因子

鋼材の腐食には、

- ① 水
- ② 帯電粒子（イオン）
- ③ 酸素

の三つの条件が必要である。これらの腐食影響因子は、一般的には「腐食環境」という漠然とした言葉で表現されることが多い。従来、腐食環境は海岸地帯・工業地帯・都市部・田園地帯などの分類で整理され、各種の腐食データーもこれらの代表的地点での暴露試験データーが用いられている。

しかし、これらの分類はあくまで純粋な環境要素であり、橋梁の腐食に関わる広義の腐食環境には、さらに「橋梁の構造要素」と「維持管理要素」をも加えて検討する必要がある<sup>2,1)</sup>。「橋梁の構造要素」とは、橋梁の構造形式や排水に関する構造詳細等を示し、「維持管理要素」とは、維持管理の可否やレベル、頻度等を示す。図8.2-1に鋼橋の腐食に関連する考慮すべき因子を示す。特に最近では、『水』に対する設計、施工上の配慮が大きく腐食に影響を与えることから、「橋梁の構造要素」に留意すべきであることが指摘されている<sup>2,3)</sup>。

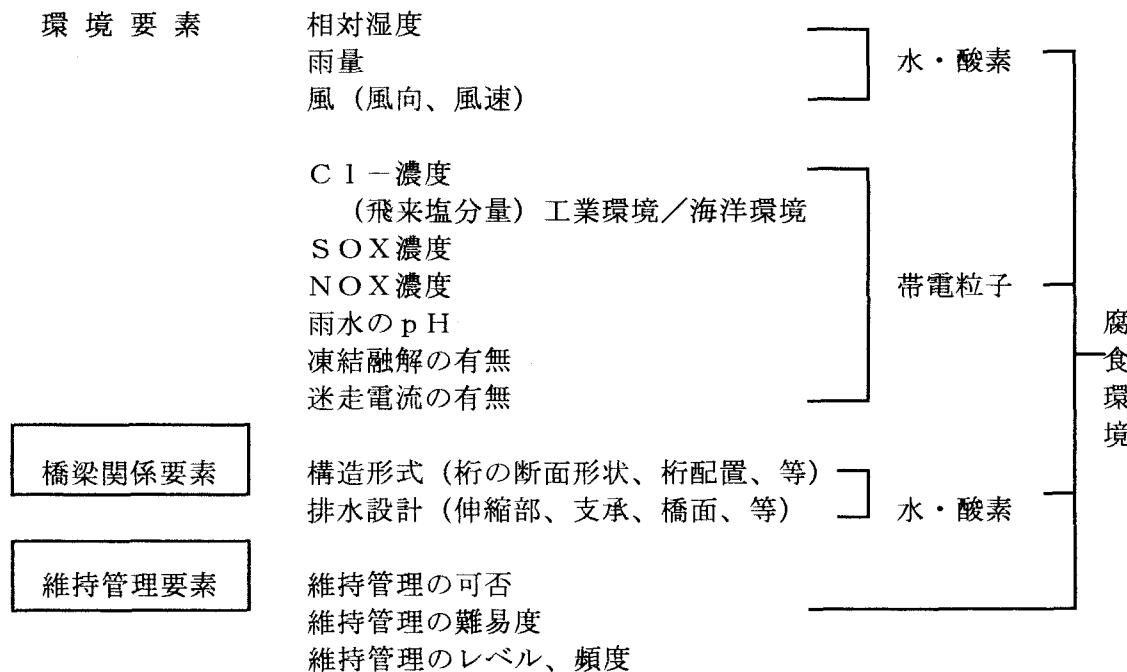


図 8.2-1 鋼橋の腐食環境因子

## 8.3 鋼橋の防食システムと防食メカニズム

### 8.3.1 耐候性鋼材

耐候性に効果のあるCu、Ni、P等を少量ずつ含む低合金鋼で、初期には普通鋼と同様に錆が発生するが数年後には合金成分の効果により緻密な安定錆が生成され、腐食を防止する(図8.3-1)。鋼材の表面が大気中に曝され、適度な湿潤・乾燥の繰返しを受けるほど安定錆が生じやすい。鋼橋への使用方法としては無塗装使用(裸使用)、安定化処理使用がある。錆安定化処理は特殊な処理液を塗布することにより初期錆の流出を防止するとともに、均一な安定錆を早期に生成させることができる。耐候性鋼の無塗装使用の成否は架設地点の環境条件によるところが大きい。特に安定錆の生成を最も阻害する因子が鋼材の表面に付着する塩分量であることが長期間の研究成果から明らかにされていることから、架設地点付近の大気中に含まれる塩分量(C1-)には配慮することが不可欠である。具体的な判定基準については、文献8)を参考にされたい。しかし、この判定基準に示された最大塩分量を越える場合でも、図8.3-2に示された知多2号橋<sup>23)</sup>(昭和42年に架設)の如く良好な安定錆の状況を示す例がある。この例の場合、陸側からの風が卓越し比較的鋼材の表面が風雨に曝されやすい等、安定錆が生成しやすい特殊な条件であることが報告されている。適用の判定時に疑問があれば、土木研究所や鋼材メーカーの担当者に相談することが望ましい。

耐候性鋼材の表面に安定錆が生成されやすいようにするために構造細目に配慮することが必要である<sup>8), 9)</sup>。特に、飛来塩分量の多い海岸部での使用にあたっては設計・施工に十分配慮する必要がある<sup>8)</sup>。参考のため、文献8)に記載されている推奨構造細目の一例を図8.3-3に示す。なお、構造細目に関しては、現在も暴露試験等を通じてその良否を追跡調査中のものもあり、必ずしもこれを遵守すれば良いとは断言できない面もあることに留意する必要がある。

最近の耐候性鋼材の研究では、30年程度経過した長期の暴露試験データを用いた腐食メカニズムの解明が活発に進められている<sup>24), 25), 26)</sup>。また、耐食性をさらに向上させるためにCaを添加した耐候性鋼の使用例や現耐候性鋼の適用限界を越えた高飛来海塩粒子環境での使用を目指した5%Ni鋼の開発も報告されている<sup>27), 28)</sup>。

### 8.3.2 塗装系

塗装系は最も一般的に用いられ実績も多い防食システムである。塗装は一般に、プライマー、下塗り、中塗り、上塗りで構成されており、金属との付着性、防水遮断性、耐候性(外観保持)の機能を分担している。腐食の原因となる水、酸素、帶電粒子(C1-イオン等)を塗膜が遮断することにより防食性能が発揮され、塗料の塗り重ねにより塗膜全体としての発錆防止、着色、長期間の性能維持の機能が確保される。塗装はイニシャルコストが低く、色彩を自由に選択できることから、一般的な防食システムとして幅広く適用されている。現状の塗装システムでは腐食物質(水、酸素)の遮断性能の限界からメンテナンスフリーを実現することは難しいが、使用環境に合った適切な塗装仕様の選択と周期的な塗り替えにより長期的な防食性能の維持が可能となる。最近では、高耐久性材料として防水遮断性に優れた超厚膜エポキシやガラスフレーク入りあるいはステンレスフレーク入り塗料、耐候性に優れたフッ素樹脂系、シリコン系の塗料が開発されており、腐食環境が厳しい海峡連絡橋等に適用され

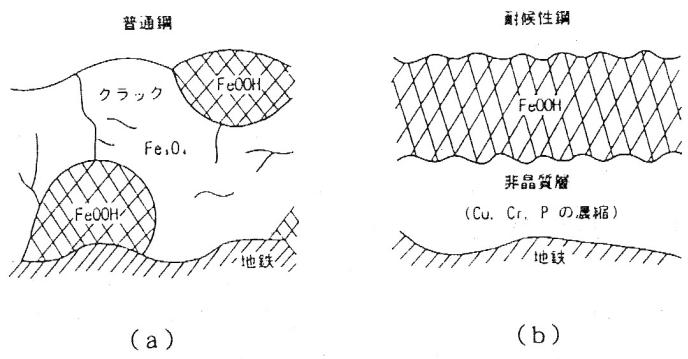


図 8.3-1 普通鋼と耐候性鋼の錆の構造の相違<sup>4)</sup>

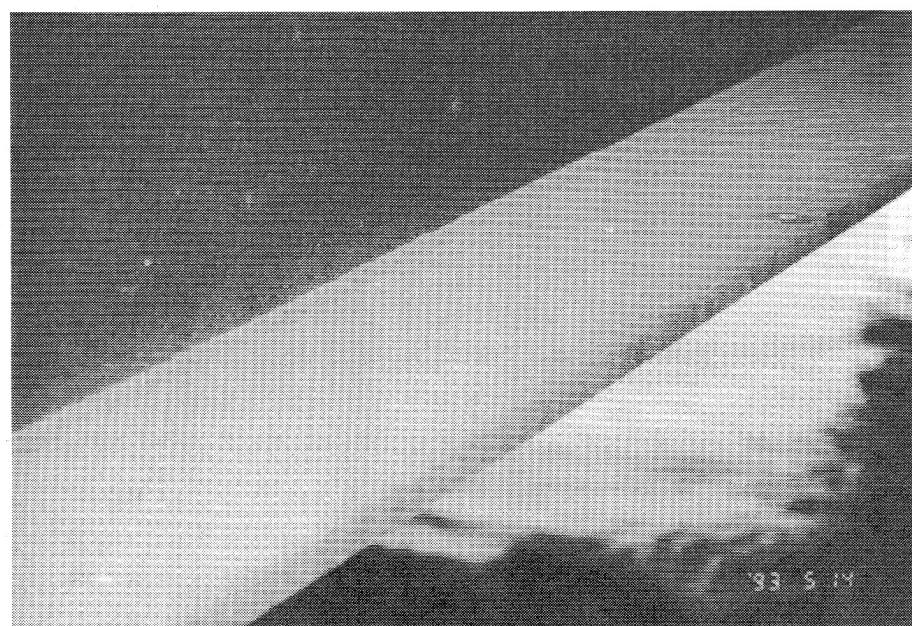
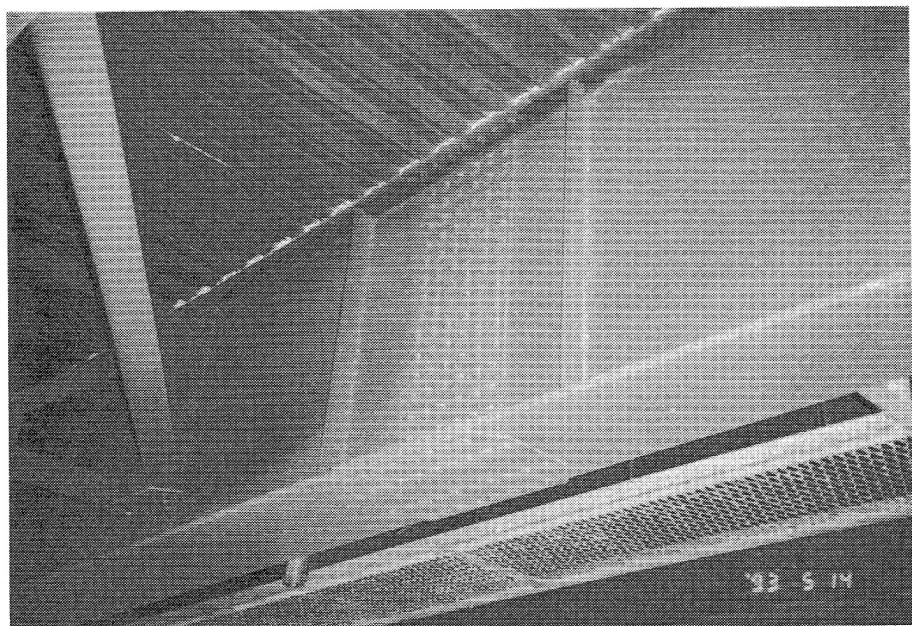


図 8.3-2 安定錆の発生状況（知多 2 号橋）

ている<sup>5)、14)、16)、29)</sup>。長期間防錆効果を期待した塗装系は、鋼道路橋塗装便覧にも規定されている<sup>30)</sup>。

塗替えの周期は、これまでの実績から通常7～10年程度であるが、重防食塗装の採用により塗替えの周期は15～20年以上が期待される。塗替えにかかる費用の大部分は、塗作業、素地調整、足場工などの人件費で占められていることや、再塗装後の塗膜の耐久性が初期の塗膜の耐久性に比べ劣ること等から、ライフサイクルコストという観点から考えると、イニシャルコストは多少高くとも耐久性の優れた塗料を選択することが有利であるといえる。現実に、日本道路公団などでは初期塗装レベルを上げることがライフタイムコストを下げると考え、良質の塗装を採用する方向に変わってきている。

また、使用する塗料の他、十分な施工管理が可能で品質の優れた塗膜が得られる全工場塗装を採用することも長期間の防錆効果を期待でき、工費の低減、現場工期の短縮などのメリットを有する。加えて、橋梁の部位により塗膜劣化の進行に差があることも指摘されており<sup>12)</sup>、今後は部位毎に最適な塗装システムあるいは防食システムを選択することも必要と考えられる。

### 8.3.3 亜鉛メッキ

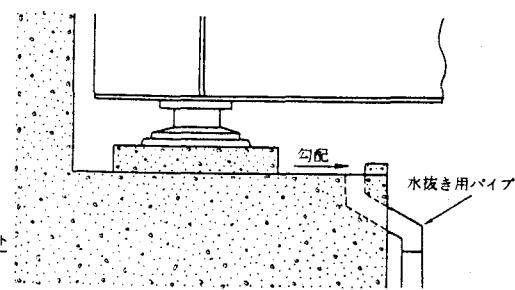
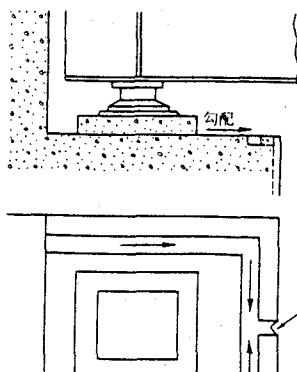
鋼材表面に鉄と亜鉛の合金層と純亜鉛層からなる被膜を形成し錆の発生を防ぐ。腐食環境中では表面に緻密な酸化被膜を生成し、保護被膜となってその後の腐食を抑制する（保護被膜作用（図8.3-4））。また、被膜に傷を生じた場合でも傷の周囲の亜鉛が陽イオンになり、鋼材の腐食を抑制し電気化学的に保護する（犠牲防食作用（図8.3-5））。使用環境による亜鉛の腐食速度と亜鉛の付着量から耐用年数の推定が可能である。耐久性に関しては文献31)に報告されており、環境が比較的良好な地域においては橋梁の耐用年数の目安とされる50年をはるかに上回るものであることが確認されている。溶融亜鉛めっき橋の設計・施工方法に関しては、文献31)に指針として示されているので参照されたい。

### 8.3.4 クラッド鋼

クラッド鋼としては、ステンレスクラッド、チタンクラッド等が使用できる。

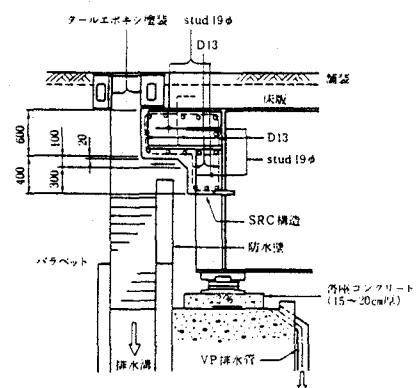
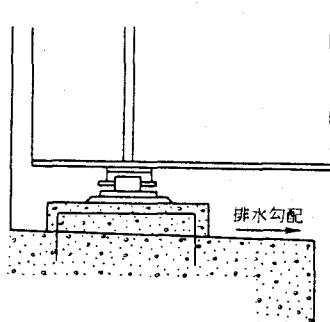
ステンレスクラッドは通常の自然環境ではステンレス表面にCr、酸素、水などのイオン結合によるガラス状の薄い不動態皮膜を生成し錆の発生を防ぐ。不動態皮膜は通常の環境では表面傷などの物理的損傷を受けても、酸素、水が十分供給されれば短期間で修復される。Cl<sup>-</sup>の存在により不動態皮膜が破壊されて発生する局部的な腐食や構造物の狭い空間で起こる隙間腐食、施工時のもらい錆に注意が必要である。

チタンクラッドはチタン表面の安定な酸化皮膜（不動態皮膜）の存在により半永久的な耐食性を発揮する。使用例としては、東京湾横断道路橋脚の飛沫・干満帯の防食法が挙げられる<sup>32)</sup>。クラッド鋼の使用にあたっては、スチールを表面に出さないよう端面処理に留意する必要がある。橋桁部は板の組合せであるため、クラッド鋼の適用は必ずしも容易ではない。クラッド鋼を適用する場合には桁の構造自体から考える必要がある。



付図-2.1 Vカット

付図-2.2 水抜きパイプ



付図-2.3 排水勾配のみ

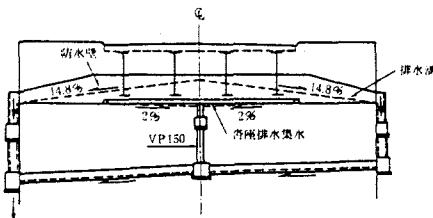


図 8.3-3 耐候性鋼を使用した道路橋の構造詳細<sup>8)</sup>

	亜鉛の場合	鉄の場合
さびの生成後	さび $[ZnO + Zn(OH)_2]$ Zn 緻密なさびの薄膜が保護被膜となる	さび $[Fe_2O_3 \cdot nH_2O]$ Fe 粗なさびが進行する

図 8.3-4 亜鉛めっきの保護被膜作用<sup>4)</sup>

	亜鉛めっき	塗装
キズの発生		
腐食の進行	 亜鉛の犠牲防食作用により鉄は腐食されない	 粗い鉄さびにより塗膜が大きく破れ腐食が進行する

図 8.3-5 亜鉛めっきの犠牲防食作用<sup>4)</sup>

## 8.4 鋼橋の防食システム選択とライフタイムコスト

### 8.4.1 ライフタイムコスト試算に於ける維持管理費用

8.3で述べた各種防食システムのいずれを用いるかは、図8.2-1で示した広義の腐食環境因子のレベルと防食システムの性能との比較から最も経済性の高いシステムは何かを評価して決定されるのが一般的である。ただし、この場合にも維持管理を前提としない（メンテナンスフリー）か、維持管理を前提とするかで基本的に選択できる防食システムは決まってくることになる。一方、維持管理費用最小の条件で工学的永久橋を建設するためには、初期建設コスト最小ではなくライフタイムコスト最小の評価方法を導入する必要が生じる。

ライフタイムコスト（LCC）は、将来発生する可能性のある防食システムの維持管理費ならびに更新費用を現在価値に置き換え初期建設コストに加算して、年間次式で求められる<sup>3)</sup>。

$$LCC = \{ I + \sum M(t) + \sum R \}$$

ここに、 I : 初期投資費用

$\sum M(T)$  : 毎年の維持管理費用の総和（現在価値）

$\sum R$  : 更新費用の総和（現在価値）

上式で防食システムのライフサイクルコストを評価する際、 $\sum M(T)$ を算出するため各防食システムの耐久年数の評価技術が必要である。最近では、塗装や亜鉛めっきなどの劣化予測技術についての研究が進み、各種環境条件をパラメータとしてある程度の耐久年数の評価が行うことが可能である<sup>17, 19, 20)</sup>。図8.4-1には耐候性鋼材を用いた橋梁の塗装橋梁とのライフサイクルコスト比較例を示す。

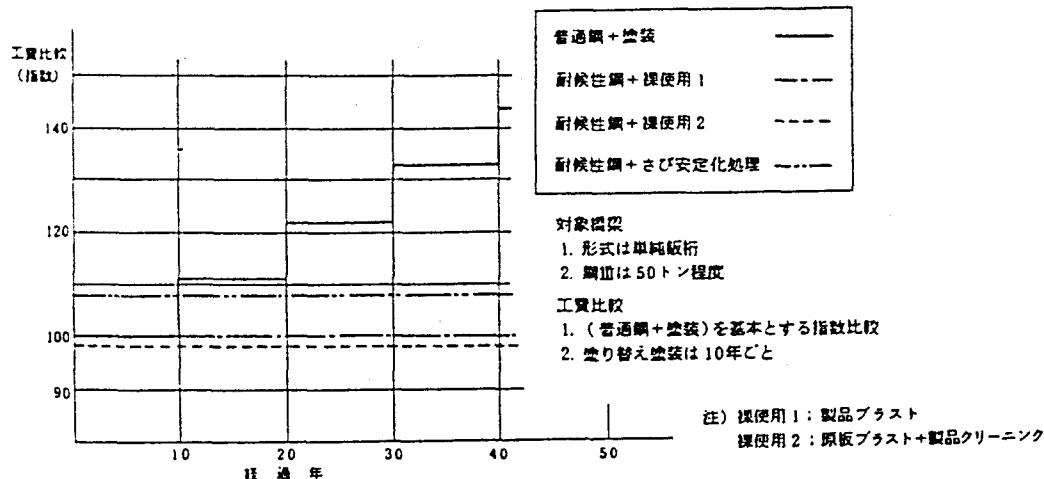


図8.4-1 耐候性鋼材を用いた橋梁と塗装橋梁のLCC比較例

### 8.4.2 防食システムの選択

最適な防食システムの選定は前述した如く、架橋地点の環境要素、橋梁の構造関係要素、維持管理要素の条件の組合せと経済性とで評価する必要がある。図8.4-3にはこれらの選択上の考慮事項と各種防食システムとの関係を模式的に示した。この他、橋梁の景観上の観点から、色彩に対する条件が加わる場合もあり、この場合には塗装系の防食システムにならざるを得ないことが多い。

#### 8.4.2 防食システムの選択

最適な防食システムの選定は前述した如く、架橋地点の環境要素、橋梁の構造関係要素、維持管理要素の条件の組合わせと経済性とで評価する必要がある。図 8.4-3 にはこれらの選択上の考慮事項と各種防食システムとの関係を模式的に示した。この他、橋梁の景観上の観点から、色彩に対する条件が加わる場合もあり、この場合には塗装系の防食システムにならざるを得ないことが多い。

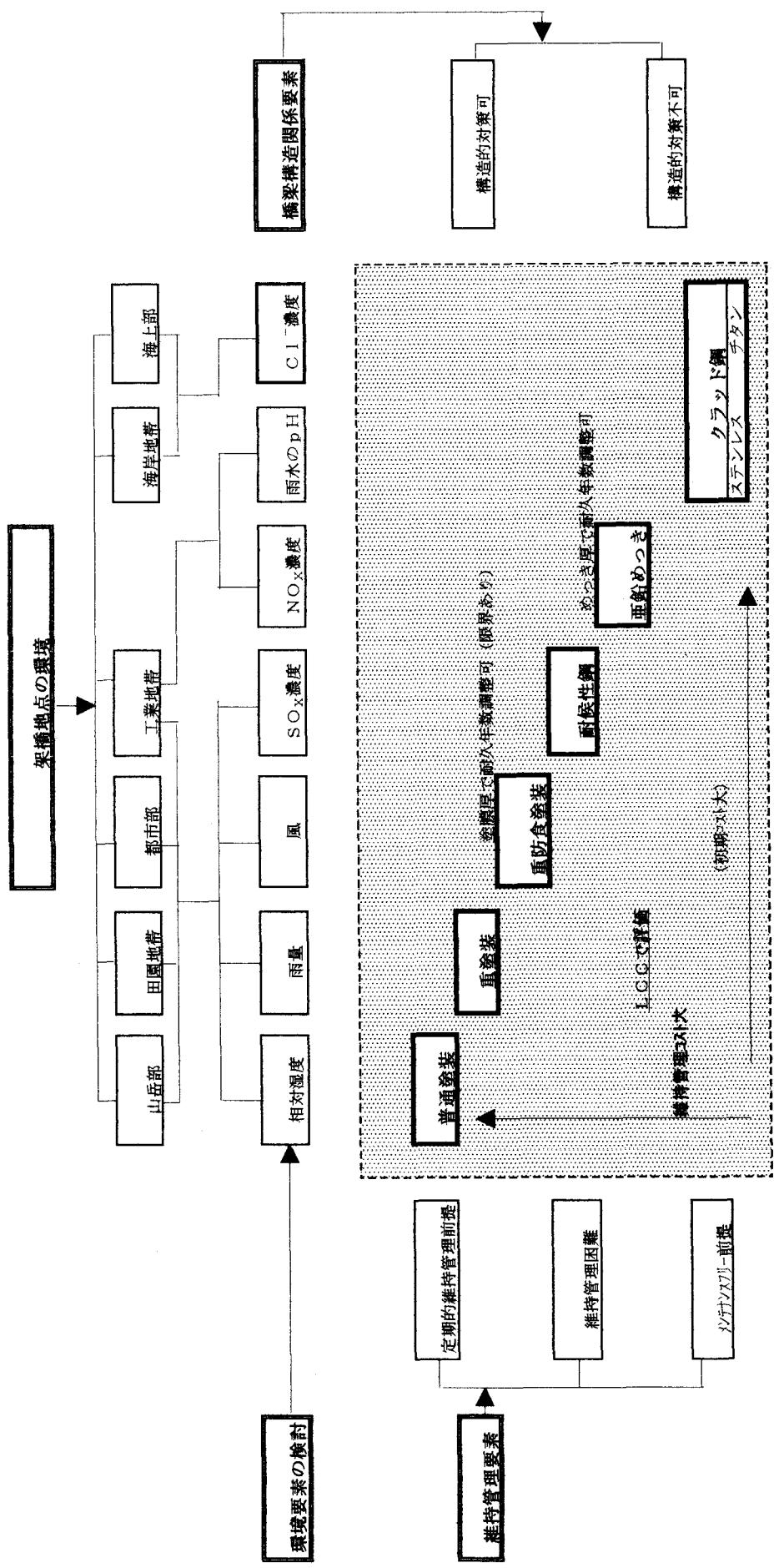


図8.4-3 最適防食システム選定のために考慮すべき要素と防食システム

## 【第8章 参考文献】

- 1) 鋼構造物の寿命検討小委員会：鋼構造物の寿命に関する調査，JSSCレポート No. 19, 1991. 8
- 2) 藤原 稔：耐久性のある橋づくり、土木研究所講演会講演集, p.p. 108-119, 1992
- 3) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集, No. 501, I-29, p.p. 1-10, 1994. 10
- 4) (社) 鋼材倶楽部：土木構造物の腐食・防食Q&A、1992. 12
- 5) 村越、名取：講座－防錆防食技術、橋梁と基礎、1993. 4-1994. 3
- 6) (社) 日本橋梁建設協会：鋼橋防食のQ&A、1994. 4
- 7) 深沢誠、大田孝二：講座－鋼材⑥、⑦ 錆びない鋼、橋梁と基礎、1995. 10-1995. 11
- 8) 建設省土木研究所、(社) 鋼材クラブ、(社) 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
- 9) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：耐候性鋼無塗装橋梁に関する調査研究報告書、1993. 11
- 10) 松本勝、白石成人、ソムキャット ルントバイスリー、岡村敬：鋼橋の腐食に関する研究、構造工学論文集、Vol. 36A、1990. 3
- 11) 紀平 寛：腐食計測法による耐候性さび安定度診断、溶接学会誌、第63巻、第6号, p.p. 19-24, 1994
- 12) 松田哲夫、藤原 博、佐久間 智：鋼橋塗装の実態調査 -全国の塗膜劣化データの統計処理の評価-, 日本道路公団試験所報告, Vol. 28, p.p. 97-106, 1991
- 13) 松田哲夫、藤原 博：鋼橋塗装の実態調査(第二報), 鋼橋塗装, Vol. 20, p.p. 36-40, 1993
- 14) 風間 徹：鋼橋の長期防錆法の展望, 鋼橋塗装, Vol. 19, No. 4, p.p. 27-31, 1992
- 15) 松本雅治、江原 武、上田芳夫、斎藤博行：阪神高速道路 湾岸線の鋼橋塗装, Vol. 19, No. 4, p.p. 3-19, 1992
- 16) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説(案)、平成6年10月
- 17) (社) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術(その1. 塗膜劣化の判断基準の検討)、JSSCテクニカルレポートNo. 31、1995
- 18) 西川和寛、河野巖、池田一男、村井教夫：20年を経過した溶融亜鉛めっき橋梁の現況、橋梁と基礎, p.p. 31-40, 1988
- 19) 玉川克軌：亜鉛-アルミニウムめっき鋼板の特性、鉛と亜鉛、第165号、p. 45-52, 1992. 1
- 20) J.W. Spence, F.H. Haynie, F.W. Lipfert, S.D. Cramer and L.G. McDonald: Atmospheric Corrosion Model for Galvanized Steel Structures, Corrosion, Vol. 48, No. 12, p. 1009-1019, 1992
- 21) (社) 日本鋼構造物協会：溶融亜鉛めっき橋の設計・施工指針、平成8年1月
- 22) 保田雅彦、鈴木周一、木村一也：吊り橋ケーブルの防食法の検討、本四技報、Vol. 16、No. 61、1992. 1
- 23) 鋼材倶楽部：土木構造物の腐食・防食Q&A、1992.12
- 24) 川鉄の耐候性鋼を用いた橋梁 知多2号橋に関する調査、川崎製鉄技術資料、1990. 2
- 25) 高橋、志村、木村、小西：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の現場施工、橋梁と基礎、1996. 3

- 26) (社)日本道路協会:鋼道路橋塗装便覧、1990
- 27) 西川、阿部:ライフサイクルコストの最小化を実現する溶融亜鉛めっき－溶融亜鉛めっき橋の設計・施工指針－、橋梁と基礎、1996.1
- 28) 寺田、西崎、片脇:高耐久性鋼被覆材料の利用技術の開発、土木技術資料36-8、1994
- 29) 香川祐次、中村俊一、樋山好幸:多径間連続橋梁の計画と下部工の設計(下)  
－東京湾横断道路冲合部橋梁－、橋梁と基礎、91-2、p33-40