

1. 防食の基礎、塗装

独立行政法人 土木研究所
守 屋 進

防食の基礎、塗装の講演概要

1. 鉄の腐食

鉄の腐食反応

2. 鋼材の各種防食法

環境による各防食工法の適用範囲

3. 塗料・塗装の機能

(1) 塗料と塗膜の機能

(2) 塗料の成分

(3) 塗膜の構成

(4) 塗膜の形成

(5) 塗装系の構成

(6) 橋梁の塗装系

①橋梁塗装と他分野の塗装との塗膜構成の比較

②外面塗装系の変遷

③橋梁塗装系(外面)の変遷の比率

4. 塗膜劣化

(1) 塗膜劣化と鋼材の耐力低下

(2) 塗膜による防食

(3) 塗膜劣化と防食

(4) 塗膜下腐食の進展

5. 塗膜の鋼材防食原理

(1) 塗膜の鋼材付着理論

(2) 塗膜の鋼材付着に関与する因子

- (3) 鋼材へ良好に付着させるための条件
- (4) 防食塗料・塗装の要求性能

- 6. 鋼材の腐食要因と防食機構・評価法
 - (1) 塗膜劣化促進試験方法（耐候性）
 - (2) 各種上塗の耐候性
 - (3) 塗膜劣化促進試験方法（耐食性）

- 7. 塗膜の耐久性に及ぼす因子
 - (1) 塗装系
 - ① 塗装系による防錆性の差異(I)
 - ② 塗装系による防錆性の差異(II)
 - ③ 環境による各塗装系の期待耐用年数
写真 6 枚
 - ① 黒皮鋼板に塗装した橋梁の塗膜劣化
 - ② ハンマリング後にブラスト処理(I)
 - ③ ハンマリング後にブラスト処理(II)
 - ④ ブラスト処理前後
 - ⑤ 重防食塗装橋梁塗膜 京浜運河大橋 17 年経過
 - ⑥ 重防食塗装橋梁塗膜 八潮大橋 17 年経過
 - (2) 構造部位による塗膜劣化と腐食（一般塗装系）
 - (3) 架設環境
 - (4) 塗装前素地調整
 - ① 塗替前の素地調整程度の種類
 - ② 塗替での素地調整と塗装系の防食性

- 8. 塗装コスト
 - (1) 一般塗装系 A 1 の LCC の試算
 - (2) 重防食塗装系 C 2 の LCC の試算
 - (3) 重防食塗装系 C 5 の LCC の試算

- 9. 鋼道路橋塗装・防食便覧 塗装編

以 上

第6回基礎講座「防食基礎講座」

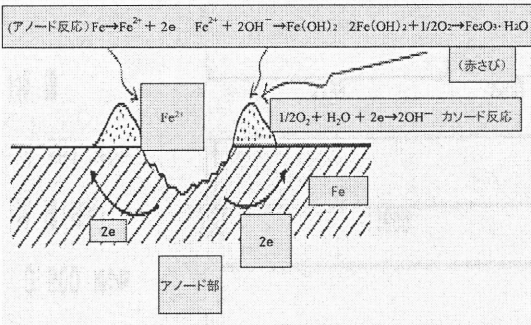
1. 防食の基礎、塗装

土木研究所
守屋 進

1. 鉄の腐食

- ・鋼材は、自然界に存在する酸化鉄をコークスで還元して酸素を取り除き製錬したもの。よって、鋼材は酸化されやすい。
- ・湿食: 大気中、水中での一般的な腐食
- ・腐食は、電気化学反応
- ・乾食(高温酸化): 鋼材表面のミルスケール(黒皮)

鉄の腐食反応



2. 鋼材の各種防食法

- 腐食因子(水と酸素)を遮断する。[塗覆装]
 - 塗装・ライニング
 - 耐食性金属被覆(ステンレス、チタン、クラッド)
- 鋼材の替わりに酸化(犠牲防食)される。
 - 溶融亜鉛めっき、金属溶射
- 電気化学的に腐食反応を抑制する。
 - 電気防食(水中部のみ)
- 腐食代
 - 耐候性鋼材

環境による各防食工法の適用範囲

防食法	環境		
	飛来塩分量が 少ない環境	やや厳しい環境	飛来塩分量が 多い環境
一般環境	田園山間地域	工業地域	海浜地域
塗装	一般塗装	A系	C系
重防食塗装			
耐候性鋼材			
溶融亜鉛めっき			
金属封孔処理			
溶射 重防食塗装			

塗装は他の防食工法に比べ歴史も古く実績も多く、またC系は環境に対する適用範囲も広い。

3. 塗料・塗装の機能

(1) 塗料と塗膜の機能

塗料とは

塗料とはどのような形状、大きさの物体をも比較的容易な塗装という手段によって被覆し、物体に機能を与える材料

塗膜の機能

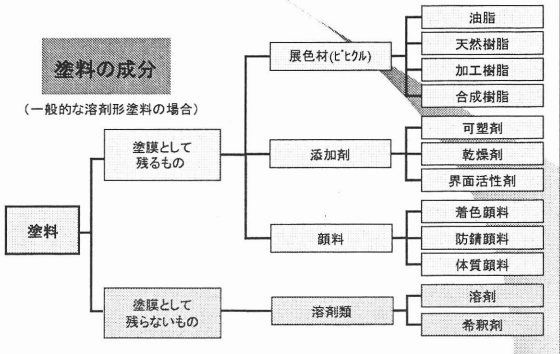
保護 ; 防食性・耐候性

美粧 ; 色彩付与・意匠性・耐候性

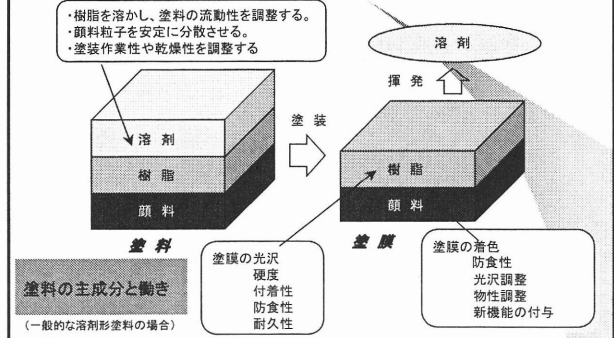
特殊機能 ; 電波吸収・防汚・導電等

耐久性

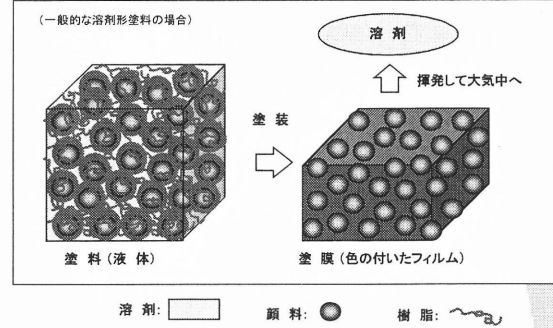
(2) 塗料の成分



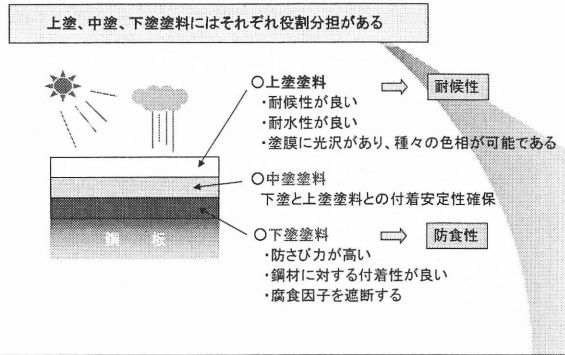
(3) 塗膜の構成



(4) 塗膜の形成(イメージ図)

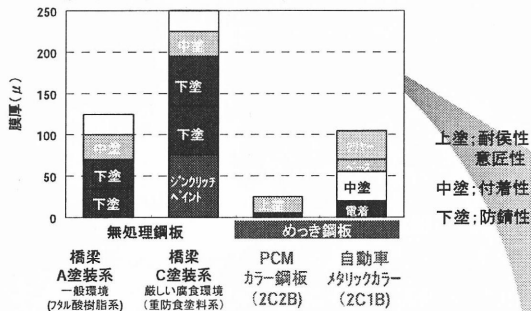


(5) 塗装系の構成



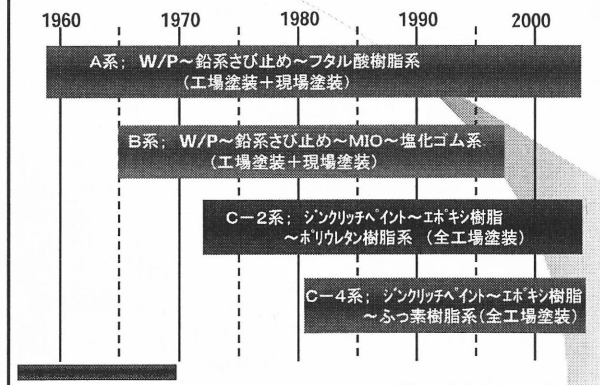
(6) 橋梁の塗装系

① 橋梁塗装と他分野の塗装との塗膜構成の比較



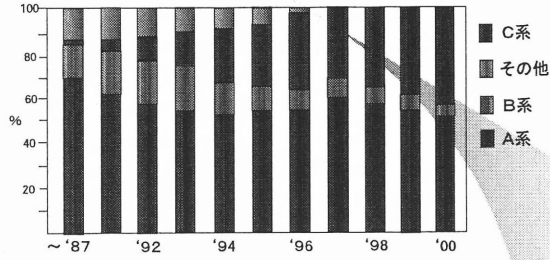
橋梁塗装は他分野の塗装と同様に下塗・中塗・上塗の塗装系であるが、膜厚が大きい。特に防錆を司る下塗の膜厚が大きい。⇒耐用年数

② 外面塗装系の変遷



(6) 橋梁の塗装系

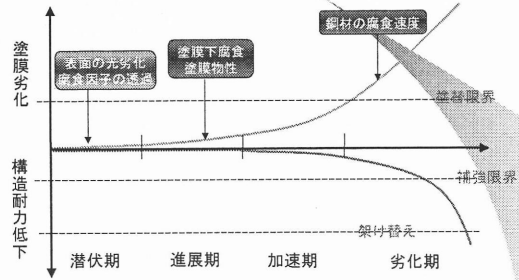
③ 橋梁塗装系(外面)変遷の比率



耐久性が短いA系、B系の橋梁が約50%あり、LCCの観点からもC系への移行が必要である。⇒現場でのプラストによる旧塗膜の除去が課題

4. 塗膜劣化

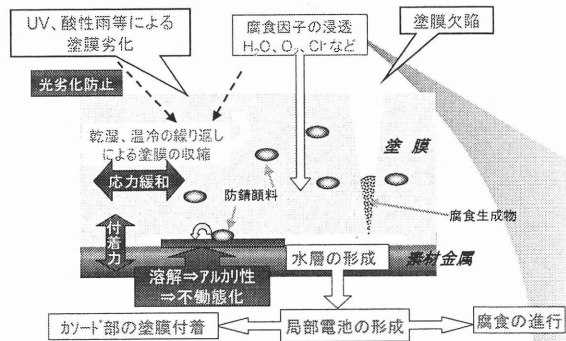
(1) 塗膜劣化と鋼材の耐力低下(概念図)



(2) 塗膜による防食

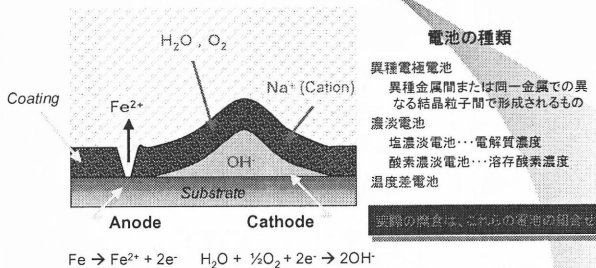
- 電気化学的作用** 亜鉛による犠牲防食効果 ⇒ ジンクリッチペイント
防錆顔料による不動態化作用 ⇒ 鉛系さび止め
 - 腐食因子の遮断性** 吸着～拡散理論による透過性
⇒ 塗膜への酸素・水蒸気・塩素イオン等透過性
 - 素地/塗膜界面の相互作用** 各種付着理論による付着性
⇒ 樹脂の極性・界面張力・分子間力 等
 - 塗膜の力学的性質** 塗膜形成時及び劣化過程での物性
⇒ T_g ・硬化収縮歪・内部応力・応力緩和 等
- 電気化学的作用を除く、これらの作用や性質を主として左右するのは樹脂(T_g ・分子量・極性・硬化機構等)である。

(3) 塗膜劣化と防食



(4) 塗膜下腐食の進展

塗膜欠陥部・細孔部や塗膜劣化(塗膜界面への腐食因子透過)によって金属界面に局部電池が形成され腐食劣化する。

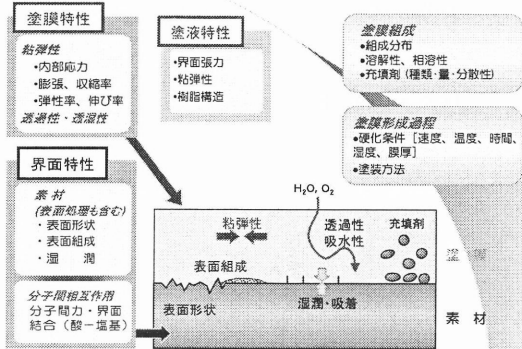


5. 塗膜の鋼材防食原理

(1) 塗膜の鋼材付着理論

- 界面化学理論**
 - 塗料と被塗物の表面張力が等しいとき接着強さが最大
 - 溶解性パラメータ(SP)理論**
 - 塗料と被塗物のSPが等しいとき接着強さが最大
 - 投錨理論**
 - 被塗物表面の細隙への塗料の浸入によるアンカー効果
 - 拡散理論**
 - 塗料と被塗物との間で界面を超えた相互拡散
 - 静電気理論**
 - 界面に形成される電気二重層の正負の静電的引力
 - レオロジー理論**
 - 接着強さの粘弾性効果
 - 弱境界層(WBL*)理論**
 - 接着結合の破壊はWBLで起こる
- *weak boundary layer
- それぞれ付着の一面をとらえているものであり、どれか一つで説明することは困難

(2) 塗膜の鋼材付着に関する因子



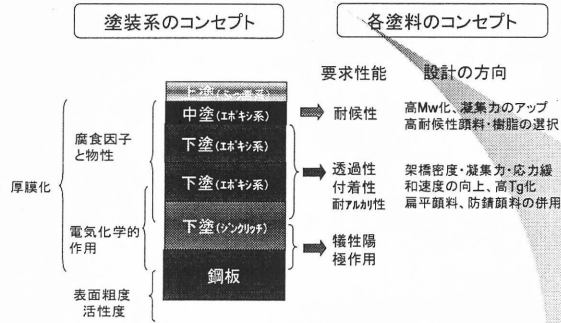
(3) 鋼材へ良好に付着させるための条件

- 被塗物表面に塗料が良くぬれて、その界面に十分な分子相互作用が働くこと
- 固化した塗膜の凝集力はできるだけ大きいこと
- 塗膜形成時の収縮に伴って発生する内部応力が小さいこと
- 塗膜/被塗物界面に弱境界層(WBL)が存在しないこと

水、光、熱等の二次因子に対し

- 界面での付着活性点を減少させないこと
- 塗膜の凝集力を低下させないこと
- 塗膜の内部応力を増加させないこと
- 弱境界層(WBL)を生じないこと

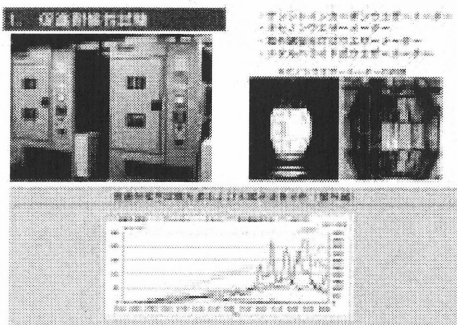
(4) 防食塗料・塗装の要求機能



6. 鋼材の腐食要因と防食機構・評価法

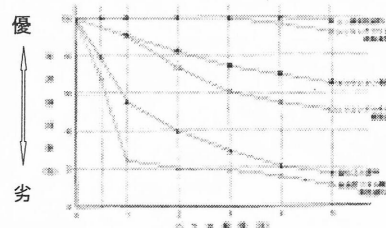
	防食特性・機能	評価手法
局部電池形成	塗膜下腐食の抑制 防食剤による電気化学的抑制効果	直流分極測定 電気化学的インピーダンススペクトル法 (EIS) 定電流自動電極法 (SVET)
腐食因子の浸透	物理的バリアー性 腐食因子(塩素)トラップ	酸素透過 (乾燥・湿潤) 吸水率 塩素イオン透過率・吸着量 架橋開分子量 (動的粘弾性)
塗膜劣化	(基体樹脂組成・添加剤)	EIS ESR IR, SEM, XMA, ESCA
塗膜欠陥	熱フロー性	FDOM 動的スパンジ法 (DSA)
塗膜収縮	弾性粘弾性	SVET 応力緩和測定 収縮能力測定 残置内部応力測定
付着	一次付着性 配水性 (二次付着性)	サイナス 引張試験 耐水付着試験

(1) 塗膜劣化促進試験方法 (耐候性)



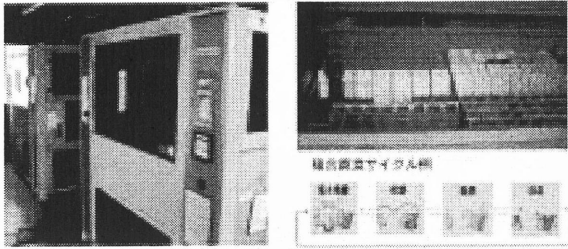
XWOMが暴露試験との相関が最も高く、ISO、JISで規格となっている。

(2) 各種上塗の耐候性



C系の上塗であるふっ素やポリウレタン塗料はA系のフタル酸塗料に比べ耐候性(光沢低下・塗膜消耗)が優れる。
⇒樹脂の結合エネルギー、極性等に起因

(3) 塗膜劣化促進試験方法 (耐食性)



複合腐食サイクルが暴露試験との相関が最も高く、JISなどの品質認定試験となっている。

7. 塗膜の耐久性に及ぼす因子

- (1) 塗装系(塗料)
- (2) 構造部位
- (3) 架設環境
- (4) 塗装前素地調整
- (5) 施工管理
- (6) その他
 - ・ 塗装履歴など

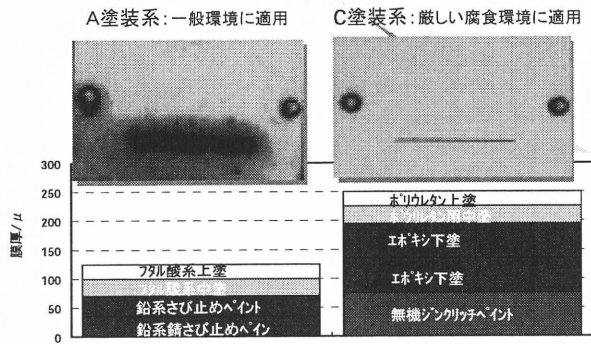
(1) 塗装系 橋梁一般外面の新設塗装系

A塗装系の例(A-1) : 一般環境			
塗装場所	工程	塗料一般名	塗装方法 膜厚(μm)
現場	上塗	長油性フタル酸樹脂塗料	上塗 25
	中塗	長油性フタル酸樹脂塗料	中塗 30
	下塗	鉛系さび止めペイント	下塗 35
工場	下塗	鉛系さび止めペイント	35
			合計膜厚 125

C塗装系の例(C-2) : 厳しい腐食環境			
塗装場所	工程	塗料一般名	塗装方法 膜厚(μm)
工場	上塗	ポリウレタン樹脂塗料	上塗 25
	中塗	ポリウレタン樹脂塗料	中塗 30
	下塗	エポキシ樹脂塗料	下塗 60
現場	下塗	エポキシ樹脂塗料	60
	サコート	エポキシ樹脂塗料	75
現場	下塗	無機ジンクリッチペイント	75
			合計膜厚 265

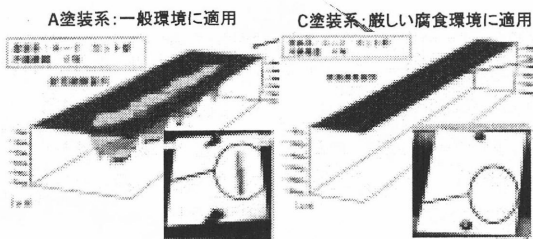
C系はA系に比べ膜厚が大きく、全工場塗装可能なため施工品質面からも長期耐久性塗装系である。

① 塗装系による防錆性の差異 (I) 海浜暴露 8年



② 塗装系による防錆性の差異 (II)

レーザー変位計によるカット部の腐食深さの測定例

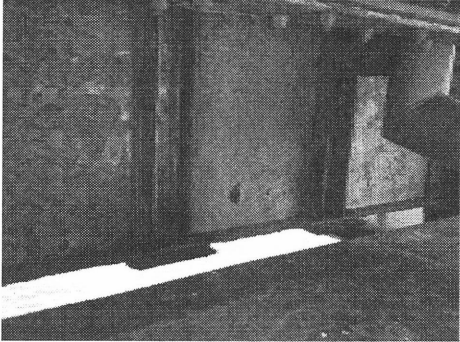


C系はカット部(塗膜ダメージ部)があっても腐食しにくい。A系はカット部があると腐食し、その部分が板厚減となり易い。

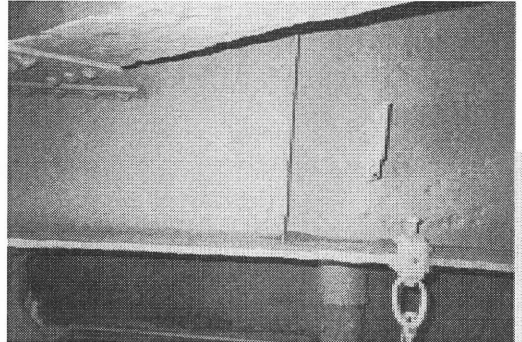
③ 環境による各塗装系の期待耐用年数

	A-1 工場・現場塗装	C-1 工場・現場塗装	C-2 全工場塗装	C-4 全工場塗装
新設仕様	A-1 工場・現場塗装	C-1 工場・現場塗装	C-2 全工場塗装	C-4 全工場塗装
塗替仕様	a-1 現場塗装	c-1 現場塗装	c-1 現場塗装	c-3 現場塗装
塗装名称	鉛系さび止め ~フタル酸	ジンクリッチ~エポキシ ~ポリウレタン	同左	同左 ~ふっ素
環境	一般環境 (山間部)	15年	40年	50年
	やや厳しい環境 (市街地部)	10年	20年	30年
	厳しい環境 (海岸部)	—	10年	20年

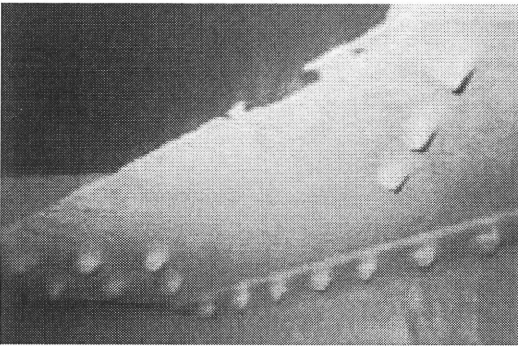
黒皮鋼板に塗装した橋梁の塗膜劣化



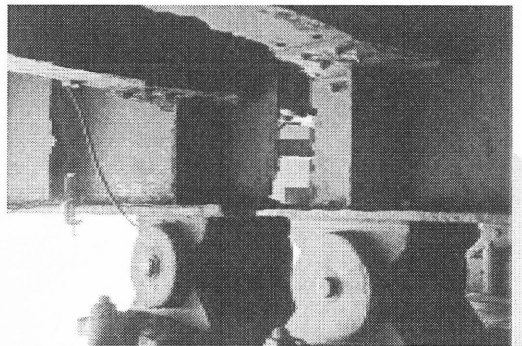
ハンマリング後にブラスト処理 (I)



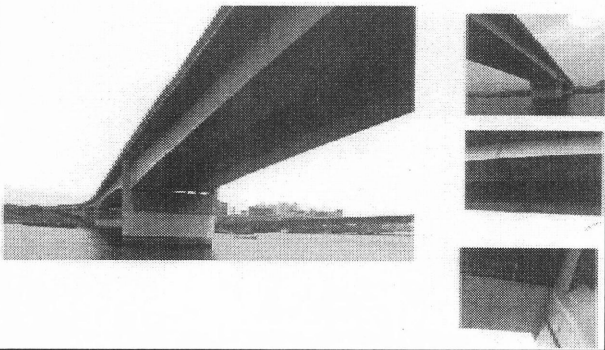
ハンマリング後にブラスト処理 (II)



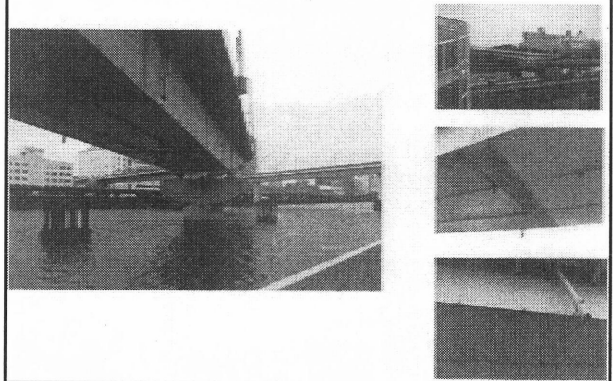
ブラスト処理前後



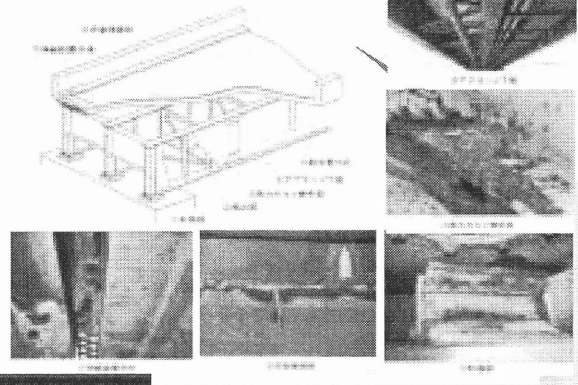
重防食塗装橋梁(東京湾岸)
京浜運河大橋 17年経過



八潮大橋 17年経過



(2) 構造部位による塗膜劣化と腐食
一般塗装系



(3) 架設環境

- 一般塗装系
橋梁の架設される環境区分：
一般環境、やや厳しい環境、厳しい環境
部材の環境条件：
結露し易い部位(下フランジ下面、桁内面など)、
滞水し易い部位(排水管周辺、ジョイント周辺など)
- 重防食塗装系
架設環境や部材の環境条件に左右されない

(4) 塗装前素地調整 ① 塗替前の素地調整程度の種類

種別	1種	2種	3種	4種
作業内容	さび/塗膜を完全に除去し、清浄な鋼材面とする	さび/塗膜を除去し、鋼材面を露出させる。ただし窪み部などにさび/塗膜が残存する	さび/劣化塗膜を除去し、鋼材面を露出させる。但し劣化していない塗膜(活膜)は残す	粉化物/付着物を落とし、劣化していない膜(活膜)は残す
作業方法	ブラスト工法	ディスクサンダー/ワイヤホイール等の動力工具と手工具の併用	同左	同左
素地状態	ピカピカ	さび	さび	活膜
表面写真				

② 塗替での素地調整と塗装系の防食性

塗装系	素地調整程度、膜厚	塗膜構成	海浜暴露3年の状態
a系	素地調整程度 3種(サンダー) 膜厚125 μ m	79 μ m系中塗 25 μ m 鉛系錆止め 35 μ m 鉛系錆止め 35 μ m 鋼板 錆残存 少	
C系 類似	素地調整程度1 種(ブラスト) 膜厚 175 μ m	79 μ m系中塗 25 μ m ふっ素系中塗 30 μ m エポキシ下塗 60 μ m エポキシ下塗 60 μ m 鋼板	

8. 塗装コスト

- 新設橋梁(単純桁)の工場製作費中の塗装費の割合
一般塗装系A; 10%以下
重防食塗装系C; 20%程度
- 塗り替え塗装費の構成
足場工; 21%
素地調整費; 27%
塗料代; 7%
塗装作業費; 40%

(1) 一般塗装系A1のLCCの試算

種別	工 程	単価	数量	積算費	単 位
新設工	鋼材	1000	100	100000	円
	溶接	1000	100	100000	円
	塗装	1000	100	100000	円
	足場	1000	100	100000	円
塗り替え工	足場	1000	100	100000	円
	素地調整	1000	100	100000	円
	塗装	1000	100	100000	円
	撤去	1000	100	100000	円
計	総計			60,000	円

