

図-1 塗膜品質に与える主な要因

るが、鋼橋生産という総合的な見地から、その品質・コスト並びに納期に大きな影響を与えるものである。

(1) 素地調整から第一層塗装まで

素地調整の良否は塗膜品質に大きな影響を与える。ある説によれば、素地調整のグレード（除錆度と表面粗さの程度）の塗膜機能に与える寄与度は50%であるときえ言われている。この説にはいささか疑問を持つが、重要な工程であることは言を待たない。（表-2）

本四海上橋では鋼板を圧延直後ブラストし、無機ジंकクリッチプライマーを塗付する。加工して部材完成後に再度ブラスト（グレード 除錆度Sa 2½ 表面あらさ70 μRz）し厚膜型無機ジंकクリッチペイント（以下厚膜無機ジंकと言う）を塗付する。これらの工程で特に留意したのは以下の点である。

- ① 一次プライマー塗付鋼板の切断と溶接
- ② 二次素地調整後の厚膜無機ジंक塗装間隔
- ③ 高力ボルト摩擦接合面の塗膜厚管理
- ④ 厚膜無機ジंक塗付時の湿度調整

表-2 各要因の塗膜寿命におよぼす影響

要 因	寄与率%
素地調整（AケレンとBケレンの差）	49.5
塗装回数（1回塗りと2回塗りの差）	19.1
塗料の種類	4.9
その他の因子	26.5

日本ペイントKK「さび止塗装とその管理」より  
注）Aケレンとは清浄度1種、Bケレンとは清浄度2種をさす。

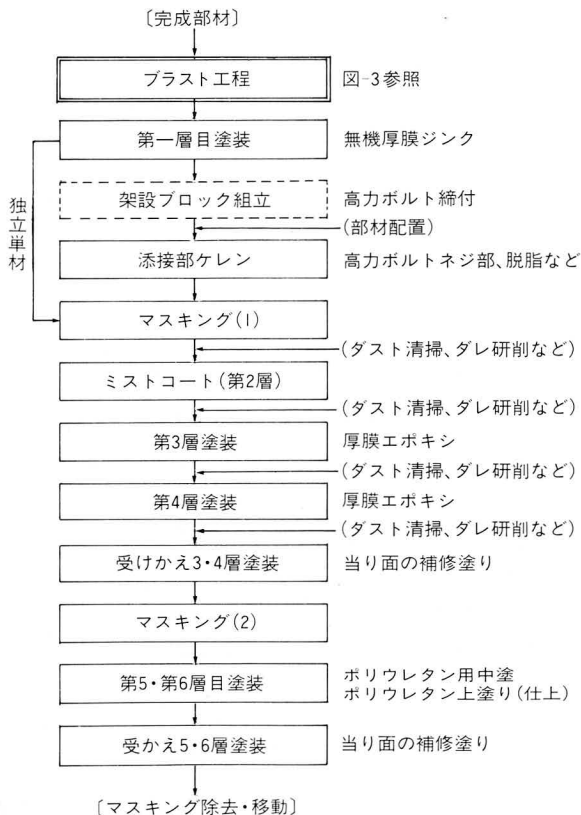


図-2 塗装工程概要

(a) 一次プライマー塗付鋼板の切断と溶接

前述のように本四橋の鋼板にはすべて無機質ジンクリッチプライマー（以下無機ジンクと呼ぶ）がプレコートされているが、これが比較的厚膜（20～30 $\mu$ ）であること、鋼板が厚いこと（50mmアップもある）、材質が高級なこと（HT70～80など調質鋼が多い）、並びに切断面の要求品質が高いことなどの要因が相乗して、切断効率を著しく低下させた。このため特殊な塗布剤（フツ化水素カリウム+硼酸）を使用したり、或いはベルトサンダーでプライマーを除去したりして対応した。

また溶接継手部は特にすみ肉の場合のルートブローホール（とけ込み底部に発生する気泡）を防止するため、すべてベルトサンダー等によりプライマーを完全に除去した後、組立て溶接を行った。これらのことは塗膜の防錆機能には無関係だが、加工効率を著しく阻害した。

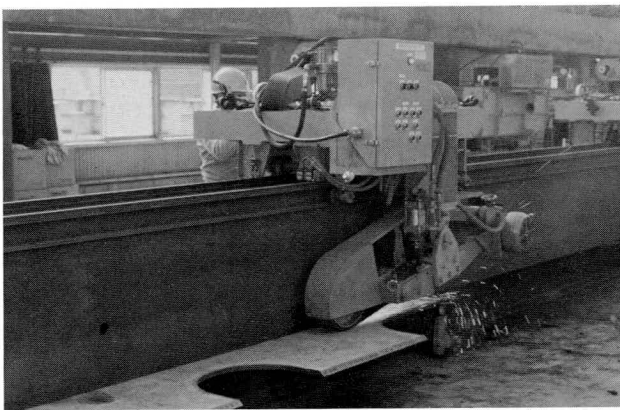


写真-1 鋼板のベルトサンダー作業

(b) 二次素地調整後の厚膜無機ジンク塗装間隔

本四橋では部材寸法が大きい。即ち一部材の塗装面積が大きいためブラスト処理時間が長い。例えば鋼床版等では一台の処理に5時間以上を要するものもあり、一方ブラスト処理面は活性に富み、空気中ですぐに酸素・水分と反応し錆を形成する（リターン現象）ので、直ちに塗装しなければならない（基準2時間以内）。従って最初に処理した部分は処理完了時にはリターンを起こしている恐れがある。無機ジンクは鋼地金に直接接触してこそ防錆効果があるので錆上に塗ることを避けるため、全面処理完了後、再度ブラストハウスに入れ、今度は軽くスリーブブラストして（10～20分）塗装を行った。

なお鋼床版などは処理面積が更に大きいため二分割処理とした。ブラスト室を空調式にすれば、効果はあるが本橋のように超大部材には対応し難い。

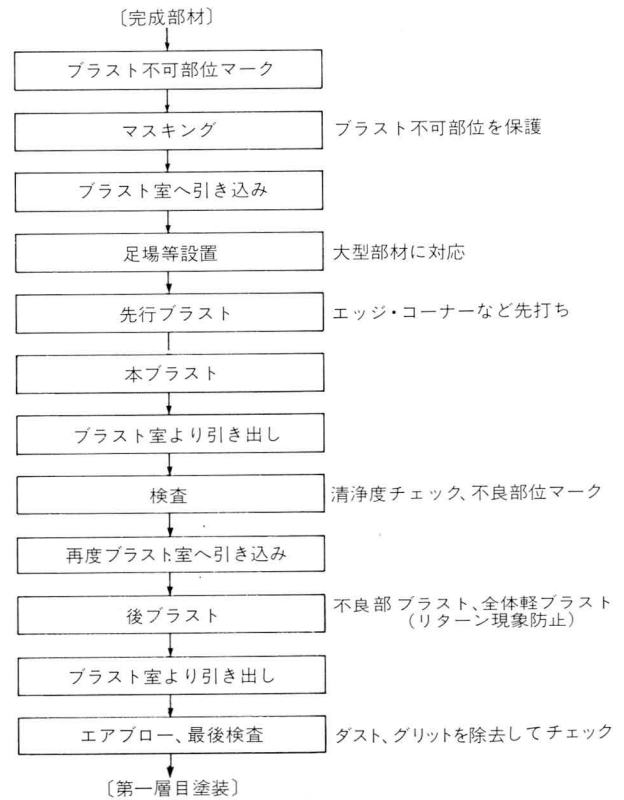


図-3 ブラスト工程概要

(c) 高力ボルト摩擦接合面の塗膜厚管理

高力ボルト摩擦接合面は必要なすべり耐力を得るため膜厚の上下限を管理しなければならない。（55 $\mu$ ～110 $\mu$ ）従来一般塗面では下限だけ押えれば良かった（厚ければ厚いほどよい）ので、この塗装は困難が予測された。そのため作業者にかなりの期間（2～3週間）訓練を施して開始したが、それでも当初は不良（110 $\mu$ 超）が多発、やむなくディスクサンダーで研削手直しを行った。その後、作業者各自にウェットフィルムゲージを持たせ自主管理させたり、或いは二度吹き（ウェット・オン・ウェット



写真-2 接合面のサンダー削り

ト方法)を採用したり色々工夫をして、合格率約90%程度には治まったが、研削手直しは皆無とすることは不可能のようである。今後の問題としては、やはりこのような上下限值でなければ本来の機能が満されないのかどうかも含めて研究を必要とする。

#### (d) 厚膜無機ジンク塗付時の湿度調整

無機ジンク系の塗料の特徴として、その乾燥硬化機構が他の塗料と相異し、硬化過程に水分を必要とするので極端な低湿度(50%RH未満)では塗装できない。例えばエポキシ樹脂系塗料など多くの塗料は大概高湿度(80%超)では乾燥が進行し難いのと比べて対照的である。また大気湿度が50%RHを割ることも冬期ではしばしば起こるので注意を要する。これに対しては床面に散水することで湿度調節を行って塗装した。しかし同一塗装ラインの近傍で他の塗料の塗装作業が行われていることもあり、今後も問題として残るであろう。

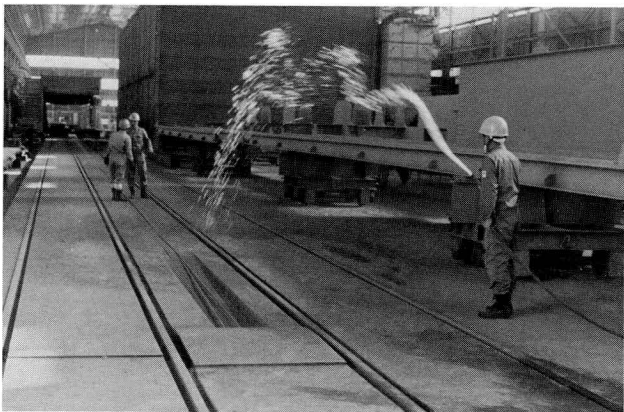


写真-3 厚膜無機ジンクの塗装(散水)

## (2) 第2層から最終塗装まで

この工程は塗装全工程の大半を占め、塗膜機能を左右する決め手の一つとも言える。前述のように塗装系が厚膜型エポキシ樹脂ペイントとウレタン樹脂ペイントとで構成されており、比較的近年に開発実用化された塗料という点でも塗装作業上問題はある。更に作業環境の制約や厚膜塗装のための使用機器や管理方法にも多々困難さを伴ったようである。また主体はエポキシウレタン系ではあっても構造的な暴露条件の相違や部材相互の接触面、或いはハンガーケーブル定着部のような特殊部位など夫々異なる塗装系が採用されていることによる塗り分け管理にもかなり手数を要した。この問題は無論本四橋独自のものではなく、鋼橋塗装全般にその傾向が強くなっている。以下主要な課題を列挙する。

- ① エポキシ樹脂ペイントの塗装での気象条件
- ② 塗り分け管理とマスキング作業
- ③ 塗料の入出庫と調合
- ④ スプレーダストの付着防止
- ⑤ 塗膜厚管理

#### (a) エポキシ樹脂ペイントの塗装での気象条件

エポキシ樹脂ペイントは耐久性や防水性などの優秀な塗料であるが、低温での硬化性が著しく劣るという特徴がある。従って作業基準では10℃未満での塗装は禁止されている。冬期では外気温が10℃を下まわるとはそう稀ではない。幸いなことに我が工場では、屋内塗装場を有したことでかなり有利ではあったが、それでも冬期の朝夕は気温が上がらず作業時間が著しく制約を受けた。勿論完全な空調設備が望ましいが、密室作業の場合の作業環境の問題などがあり、技術的にも経済的にも今後の課題となろう。



写真-4 塗装工場の温湿度表示(電光掲示)

#### (b) 塗り分け管理とマスキング作業

防錆防蝕という塗膜性能は勿論その他の多様なニーズを満たす必要上、鋼橋の部材部位による塗り分けは避けられないものである。特に本四橋のように仕上層まで工場塗装の場合には塗り分けの種別が多くなり勝ちであり、誤塗装を防止するための業務も極めて重要な意義がある。まずどの部材のどの部位にどんな塗装を施すかを図示して管理・監督者に正しく作業指示できるように計画した。複雑な部材は単に工作図だけでは判断が難しいので透視図などを画いてこれに塗り分けを記入した。また塗装に先立って、この区分図に従って、第一層塗面に粘着テープと不要図などを使ってマスキングを行い、他面への塗料付着を防止した。なお粘着剤が下地に残ると、塗膜の付着性を損なうので、粘着テープの種類も厳選した。(図-4)

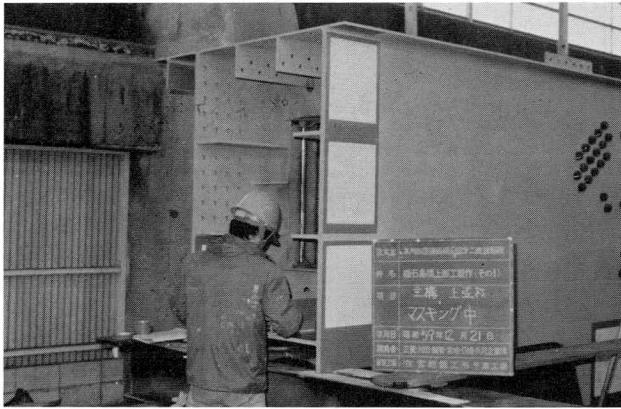


写真-5 マスキング作業

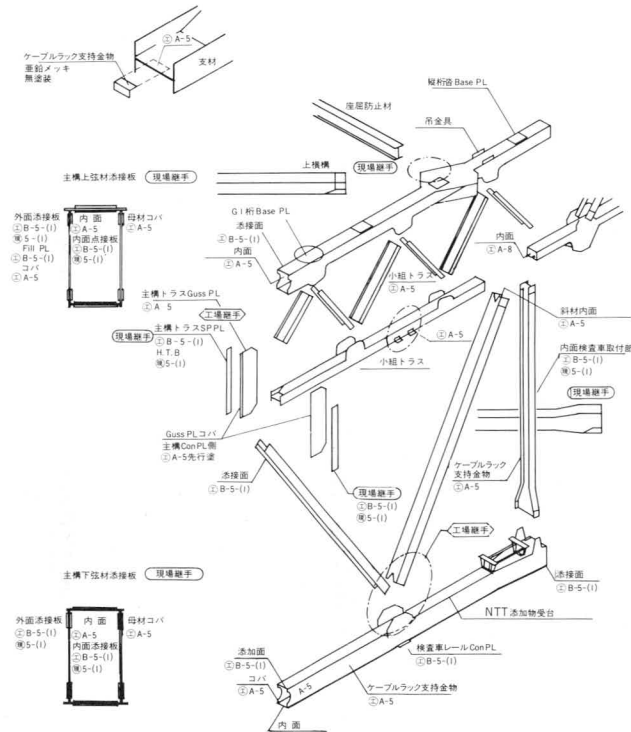


図-4 塗装区分の1例(補剛桁横トラス)

(c) 塗料の入出庫と調合

塗料は製造時から長期経過したものは変質して、性能の劣化をおこす場合がある。従って本工事のように大型プロジェクトで塗装が長期にわたる場合は使用時期と使用量に応じた購入管理を行う必要がある。これには精度のよい日程計画を立て、かつ塗装系及び塗装ロット毎の面積計算書を作成し、これに従って購入日程を立てた。この場合も詳細な塗装区分図が必要不可欠であった。

一方、塗料はその種類や塗装方法に応じて使用前に調合の必要がある(大抵の塗料は二液タイプ)。この場合混合してよく攪拌することと、調合後は可使用時間(ポットライフ)内に塗付作業を完了する必要がある。

以上の事柄は、必然的に塗料の入出庫管理をより綿密に行うことが必要となる。

(d) スプレーダストの付着防止

本四橋の使用塗料は大概速乾性であり、エアレススプレー塗装ではダスト状となって付近に飛散し、他の部材の素地や未乾燥塗膜に付着する恐れがある。このスプレーダストによる汚染は塗膜面の平滑度を粗化し、塗膜性能を損ずる。このため部材配置に留意し、かつ必要な場合ネットなどで仕切って防止に努めた。この点、塗装工場のレイアウトなどに工夫する余地がある。

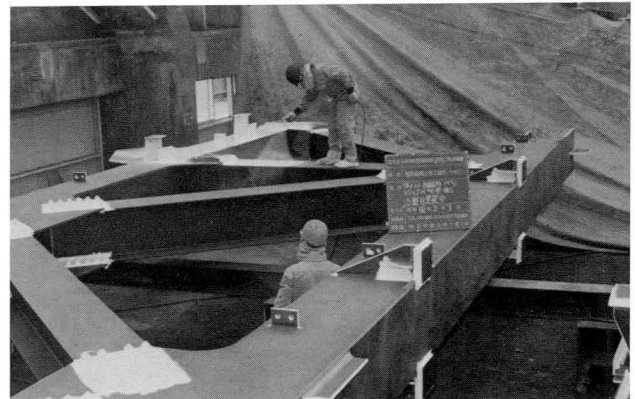


写真-6 ダスト防止養生

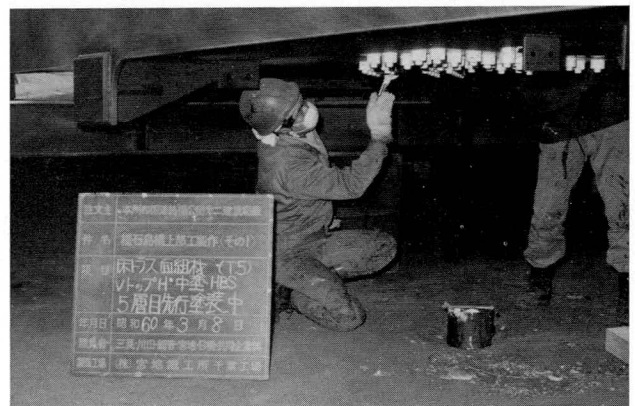


写真-7 先行塗装

(e) 塗膜厚管理

長期防錆という目的を達するには塗料の性能自体もさることながら、塗膜厚を大きくすることが効果的である。従って本四橋では総膜厚が250 $\mu$ を超える厚膜となっている。また第一層目の厚膜無機ジンクの膜厚は防錆機能を大きく左右するので、総厚膜と別に管理すべきものとし、第一層目と最終膜厚の二段階管理を行った。

塗膜厚はその最低値も問題だが、バラつきにも注目する必要がある。即ち、部材全面にできる限り均等に塗付されていないといけない。勿論部材縁端部や狭隙部などは、スプレー塗りだけでは塗料の付着が充分ではなく、



構造区分	部材名称	塗装系	A-5 (Z.R.P)
	全部材	基準値	75 $\mu$

度数分布表

No.	クラス	区間の中心値 X	度数マーク	度数 f	u	uf	u <sup>2</sup> f
1	55~64	60		209	-2	-418	836
2	65~74	70		472	-1	-472	472
3	75~84	80		497	0	0	0
4	85~94	90		358	1	352	358
5	95~104	100		175	2	350	700
6	105~114	110		84	3	252	756
7	115~124	120		45	4	180	720
8	125~134	130		10	5	50	250
9	135~144	140		2	6	12	72
10	~						
11	~						
12	~						
13	~						
14	~						
15	~						
仮の平均値 X <sub>0</sub> =80 区間の幅 h = 10				1852	—	312	4164

測定結果

測定点数(N)	1852 点	管理値 (本四公団規格)	
平均値(X)	81.7 $\mu$	平均値	67.5 $\mu$ 基準値×90%以上
最小値(MIN)	55 $\mu$	最小値	52.5 $\mu$ 基準値×70%以上
最高値(MAX)	140 $\mu$	最高値	$\mu$
標準偏差(S)	14.9	標準偏差	15 ※測定平均値×20%以下

※但し平均値が基準値以上の場合は合格

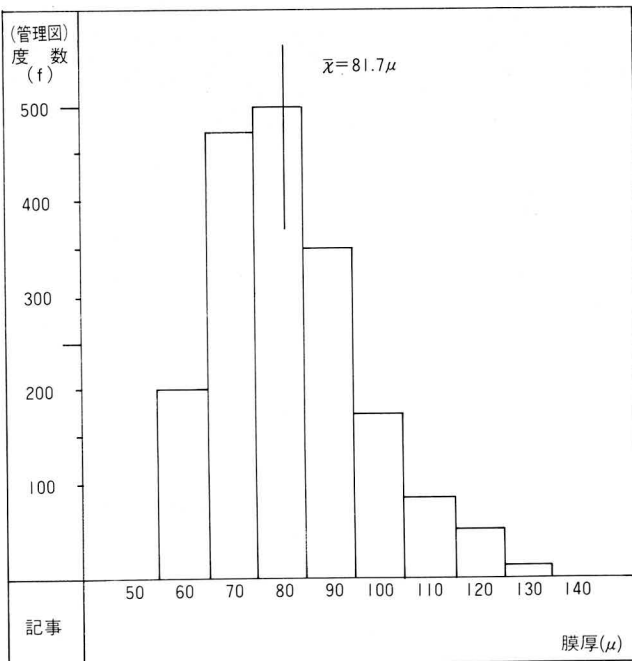


図-5 塗膜厚管理図 (第一層目厚膜無機ジンクまで)

構造区分	部材名称	塗装系	A-5
	全部材	基準値	75 $\mu$

度数分布表

No.	クラス	区間の中心値 X	度数マーク	度数 f	u	uf	u <sup>2</sup> f
1	190~209	200		55	-5	-275	1375
2	210~229	220		108	-4	-432	1728
3	230~249	240		186	-3	-558	1674
4	250~269	260		261	-2	-522	1044
5	270~289	280		305	-1	-305	305
6	290~309	300		334	0	0	0
7	310~329	320		276	1	276	276
8	330~349	340		155	2	310	620
9	350~369	360		97	3	291	873
10	370~389	380		55	4	220	880
11	390~409	400		29	5	145	725
12	410~429	420		5	6	30	180
13	430~449	440		0	7	0	0
14	450~469	460		2	8	16	128
15	~						
仮の平均値 X <sub>0</sub> =300 区間の幅 h = 20				1868		-804	9808

測定結果

測定点数(N)	1868 点	管理値 (本四公団規格)	
平均値(X)	291.4 $\mu$	平均値	229.5 $\mu$ 基準値×90%以上
最小値(MIN)	190 $\mu$	最小値	178.5 $\mu$ 基準値×70%以上
最高値(MAX)	450 $\mu$	最高値	$\mu$
標準偏差(S)	45.0	標準偏差	51 ※測定平均値×20%以下

※但し平均値が基準値以上の場合は合格

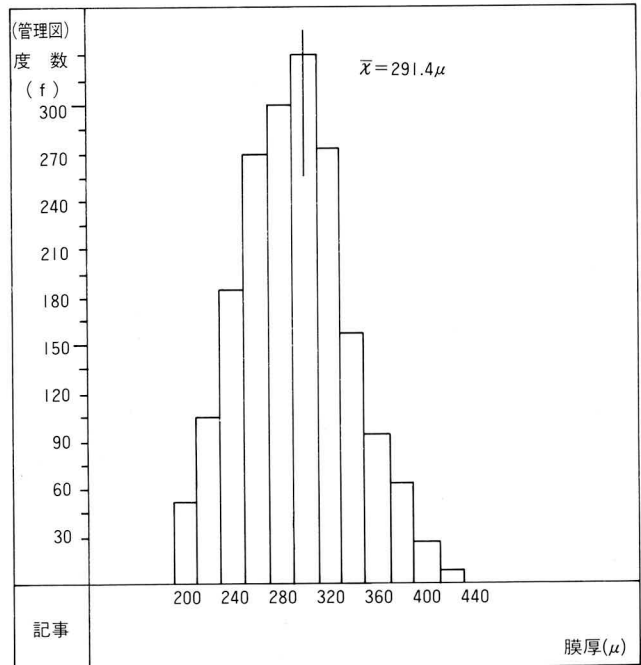


図-6 塗膜厚管理図(仕上層まで)

刷毛塗りにより先行塗装を行っている。

従って塗膜厚は二段階それぞれに最低値、平均値及び標準偏差値について管理した。このように膜厚管理については、その測定頻度がかなり膨大となり、専門の要員を数名常時配置して対処した。代表的な仕様について塗膜厚管理図の例を図-5、6以下に示す。

### (3) 保管から発送まで

工場製作から現場架設までの仕掛品バッファーとして工場または岸壁付近での保管は避けられない必要悪である。また海上架橋のため海上専有時間の削減のため勢い架設単位ブロックは巨大化し、必然的に海上を台船で現地まで輸送することとなった。

一方、仕上塗装まで工場施工のため、保管や輸送の際の荷扱い作業による塗膜の損傷を最小限にすること、保管中及び海上輸送中の有害付着物の防止—特に海塩粒子の付着防止には多々留意を要した。以下にその主要事項を列挙する。

- ① 荷扱いによる損傷防止
  - ② 水洗作業
  - ③ オーニング
- (a) 荷扱いによる損傷防止

塗装後保管場所への移動時は勿論、塗装工程中でもクレーンによるハンドリングは必要となる。本四橋の場合できる限り設計段階において吊金具を部材に取付けるよう工夫したが、それでも工場内荷役では、ほとんど玉掛けを必要とした。通常工場内荷役の場合でも部材表面を損傷しないようワイヤと部材の間に「当て物」(ヤワラ)を挟んで養生しているが、本橋のように塗装完了部材(または塗装中の部材)では、吊り金具を利用できる場合以外は鋼製ワイヤロープによる玉掛けは極力避け、ナイロンスリングを用いた。但しナイロンスリングは吊り能

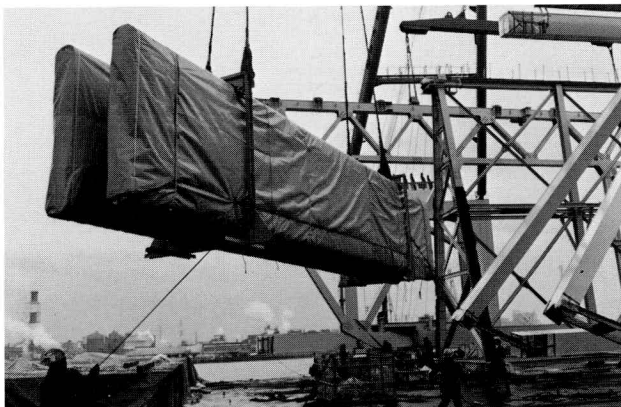


写真-8. 塗装部材のハンドリング

力に限度があり、どうしてもワイヤを使用せざるを得ない時は、内側にゴム張りした特製枠型吊り治具を用いて荷役及び反転などを行った。

### (b) 水洗作業

部材が大きいことと、海上輸送のため工場製作の最終工程である塗装は、海岸至近になり勝ちである。従って海塩粒子の付着が多くなり、塗膜機能を損なう恐れが多い。幸いなことに実験測定の結果、塩分付着はそれほどではなかったが、その他の塵芥や排煙による浮遊物の付着も少なからず憂慮されたので、特に塗装仕掛り部材の塗り重ね直前及び発送直前においては、外観及び塩分チェックなどを行い、高圧ジェットによる水洗を行った。勿論このような処置は本橋だけではなく、鋼橋塗装のいずれの場合にも必要である。

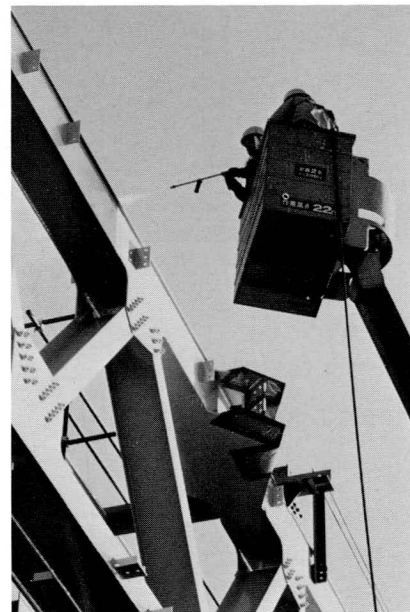


写真-9. 水洗作業

### (c) オーニング

塩分は勿論、塵芥や油分などを遮断するため保管中および台船上の部材にかなり徹底したオーニングを行った。特に現場添接部などの無機ジンク塗膜は塩分の影響を受けやすく、また表面が粗く、有害物が多く付着しやすいので、完全にシートで密ぺいするよう荷造りを行い、更に台船上で全体のシートカバーを行った。

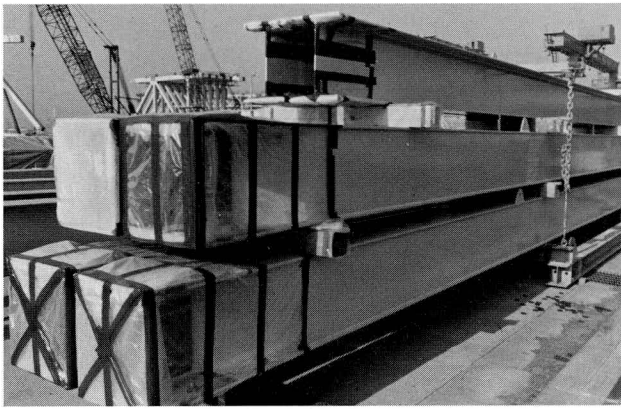


写真-10 添接部の養生



写真-11 台船上のオーニング

## 4. 今後の課題

### (1) 原板ブラスト方式について

現在鋼橋製作では原板ブラスト方式が一般的である。即ち、ミルメーカーでショットブラストプライマー塗装した鋼板を加工する方法である。しかしプレコートしたプライマー塗膜は前述のように加工性、特にガス切断性と溶接性を著しく損なう。本来鋼板の一次ブラストは表面のきずやへげ（圧延工程で生ずる欠陥）を圧延直後に発見して直ちに対処でき、かつ圧延工程へのフィードバックが敏速にできることと黒皮鋼板のブラスト能率が著しく悪いという理由からであった。しかし本四橋のような切断と溶接に対するシビアな要求品質の場合は、むしろデメリットの方が大きい。黒皮鋼板か、もしくはブラストのまま加工する方式を採用した方が有利と考える。ただしブラストのままの場合は、赤さびの発生が著しいのでブラストと加工着手の期間を短縮するなど、発錆防止対策を考える必要がある。

### (2) 高力ボルト接合面の塗膜厚

高力ボルト摩擦接合面の厚膜無機ジンクは、防錆とすべり耐力の両者を一応満足させる意味でメリットはある。ただしあまり薄い（ $40\mu$ 未満）とすべり耐力も劣るしあまり厚い（ $150\mu$ 超）とボルト軸力の経時的低下が大きくなり、ひいてはすべり耐力を損なう。以上の理由により上下限の管理を要求される。今回の経験で $55\sim 110\mu$ という管理限界が妥当なものであるのかどうかの研究も必要だと思う。またエアレスプレーガンによる塗装（塗料供給は自動でガン操作は手動）では限界があり、今後自動塗装、或いはロボット化なども考慮すべきであろう。

### (3) 塗装系の問題

冒頭本四塗装仕様は一応現段階で実用的に最高水準の塗装であると述べたが、品質・コスト・納期の総合的な面から見た時、特にコスト的に問題があると思う。勿論メンテナンスフリーという目標には一歩近づいた観はあるが、一方ではイニシャルコストが過大であるという評価も否めない。最近開発実用化されつつあるシリコン系やフッ素系塗料などをも含め、まだまだ研究の余地があるように思う。

### (4) 塗装工場のレイアウト

ブラスト時の露点管理の必要性、或いは塗装時の気温湿度の管理など、作業環境が著しくシビアさを要求されるわけであるが、被塗物が闊大であるため、完全空調は極めて難しい。しかし、特別な大型部材は別として、主に一般的部材は（トラス弦材など）一応空調したコンパクトな塗装室を用意すべきであろう。勿論この場合、部材の移動方法も考慮に入れる必要がある。またブラストは現在エアブラストガンにより手動方式が主体となっているが能力的に限界があり、インペラーによる自動製品ブラストシステムの採用も考えたいものだ。

### (5) 部材の搬送方法

クレーンによる荷扱いは、折角の仕上塗膜が損傷する機会が多い、また保管の範囲が広がるとトラッククレーンの費用も無視しがたい。できればリフト装置付の専用台車なども備えることが望ましい。勿論この場合も塗膜損傷を考慮しなくてよいわけではないが、その機会は少なくできるのではなかろうか。要は塗装作業のレイアウト改善の余地がまだまだあると思う。



## 5. あとがき

鋼橋の防錆・防蝕という問題は我々の永遠のテーマである。耐候性鋼無塗装使用だとか、橋体溶融亜鉛メッキだとかかなり採用されつつあるが、塗装法と取りかわるといほどの決定的優位さは今のところ見出せない。しかしPC橋との経済的競合の激化という現状を考えると、塗装コストの肥大化もシェア維持上ゆゆしき問題である。

今後も更に鋼橋の防錆・防蝕方法のコストダウンという課題への真摯な取組の必要性を痛感する次第である。

終りに本橋の塗装施工に当り、大日本塗料(株)・日塗エンジニアリング(株)・磯部塗装(株)並びに東京メタリコン(株)の方々に多大の御協力を載しました。誌上を借りて深く感謝します。

### 〈参考文献〉

- 1) 鋼橋等塗装基準・同解説：本州四国連絡橋公団
- 2) 鋼道路橋塗装便覧：(社)日本道路協会
- 3) 重防食えの手引：大日本塗料(株)
- 4) 大鳴門橋塗装報告書：大日本塗料(株)
- 5) 櫃石島橋塗装報告書：大日本塗料(株)

## グラビア写真説明

### 大町ダムトレスル

大町ダムは、信濃川水系の犀川左支川、高瀬川の長野県大町地先に造られた建設省の多目的ダムである。昭和52年6月に本体着工、昭和60年3月に完成したこのダムは大町市街から約7kmの位置にあり、中部山岳国立公園内の特別地域であり、別荘地でもある。

ダムのコンクリート打設工法としては風致保存に特に留意し、さらに骨材プラント等の仮設備の配置上より有利であるトレスル工法が建設省としてはじめて採用された。トレスルはダム高が107mと高いため、下段走行路(上流と下流の2列)と上段走行路の2段配置とし、ジブ・クレーンは13.5m×37mのものを2台使用した。

当社は下久保ダム、草木ダム、一庫ダム、大町ダム、温海川ダム、定山溪ダム、弥栄ダムと多くのトレスル工事に参画している。

### YKK-50 新築工事

世界のYKKが、創業50周年の記念事業として、本拠地、黒部工場に、社是である「善の循環」を、メインテーマに、建設したものである。

本建物の圧巻は、円形ドーム状の国際会議場と、曲線状の鋼板構造とも言うべきロビー階段であり、当該部分を当社が施工した。

施工にあたっては、まず、設計者の設計思想の習熟から始め、試作及び試験等により、施工技術の限界を見きわめながら、ディテールを練り直す方法がとられた。

### 国立総合児童センター新築工事

昭和60年9月に完成したこの施設は、厚生省が国際児童年を記念して建設したもので、子供達が楽しみながらいろいろな体験をし、知識を身につけ、明るくたくましく育て欲しいという願いをこめて「こどもの城」と名づけられている。

渋谷駅に近い、国道246号線(青山通り)に面したこの建物は、最新の設備を誇る「青山劇場」、「青山円形劇場」、音楽・造形の両スタジオ、プールや体育室、コンピュータールームのほか、サービス部門として、ホテル、レストラン、会議室・研修室などさまざま設備が整えられている。

出生数の減少、高齢化社会を迎えて、未来を担う活力ある児童の育成が急務となっている現在、「こどもの城」は、まさにそのニーズに応えるための施設といえる。