

# 橋梁の塗替塗装機械の開発

谷中幸和<sup>1</sup>・坂本光重<sup>2</sup>・廣田昭二<sup>3</sup>・兼田教一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 本州四国連絡橋公団 第二管理局長 (〒700-0031 岡山県岡山市富町2-19-12)

<sup>2</sup>正会員 工博 本州四国連絡橋公団 保全部設備課長 (〒651-0081 兵庫県神戸市中央区小野柄通4-1-22)

<sup>3</sup>正会員 本州四国連絡橋公団 第三管理局 機械課長代理 (〒722-0036 広島県尾道市東御所町1-20)

<sup>4</sup> ㈱ブリッジエンジニアリング 防食部長 (〒655-0014 兵庫県神戸市垂水区大町5-5-15)

既設橋梁の塗替塗装は、管理費の縮減・苦渋作業の解消・労働力の確保等より機械化が強く望まれているが本格的な実用例は皆無である。機械化を阻む要因として、複雑な橋梁構造・脆弱な作業足場・研削した塗料粉や塗料ミストの飛散等が挙げられる。これらの課題を解決するべく、本州四国連絡橋の箱桁橋梁を対象に、円柱状の回転ブラシ・塗装ロール・これらを支持するアーム付き台車を、既設の作業車に搭載する塗装システムを開発した。本システムを使用した大島大橋における実験工事によれば、人力施工と同等以上の品質・人力の10倍の施工能率・塗料粉や塗料ミストの飛散は皆無であり塗替塗装の機械化に成功した。

**Key Words** : bridge, repair coating, cylinder brush, roll coat,

## 1. はじめに

橋梁の塗替塗装は、高所で酷暑や寒風に曝される厳しい環境下で無理な作業姿勢を強いられる苦渋作業である。また、増大する維持管理費の縮減や近い将来に到来する少子高齢化社会における労働力の確保の面から機械化が望まれているが本格的な機械化施工例は皆無である。本四連絡橋の長大橋梁群は400万㎡を超える膨大な塗装面積<sup>1)</sup>を有し、本格的な塗替塗装を目前に控え機械化による施工費の縮減が求められた。

塗替塗装の機械化を阻む要因として、複雑な橋梁構造・脆弱な作業足場・塗料粉や塗料ミストの飛散防止対策等が挙げられる。

本四連絡橋の主要な橋梁には作業足場となる作業車が設置されている。また、塗装は6層よりなる長期防錆型塗装が施されており、表面の2層が劣化した時点で素地調整と中塗り・上塗塗装するように計画されている<sup>2)</sup>。

この特徴を生かし、比較的平坦な面が多い箱桁を対象に、作業車を足場とする塗装機械の開発に着手した。

開発に当たっての最重要点は、素地調整方法と塗装方法の選定である。従来の塗替塗装における素地

調整作業にはディスクサンダを取り付けた電動工具、塗装作業にはハケが使用されているが、これらは縦・横へのきめ細かい移動と押付力の調節が必要であり、機械化は困難である。また、工場で採用されているスプレー塗装は原理的にミストを発生させるとともに上向き塗装では大量の塗料が跳ね返るため環境対策上現場塗装には適さない<sup>3)</sup>。したがって、素地調整には円柱状の回転ブラシ、塗装にはロールを採用する。

塗装面は全体的には平面であるが、局所的には溶接ビードや溶接歪みによる凹凸が生じている。したがって、回転ブラシと塗装ロールの接触圧が変化し、素地調整効果や塗膜厚が変動する。すなわち、最大の技術課題は塗装面の凹凸への対処方法である。素地調整用の回転ブラシには剛性の低い砥粒入りナイロン線材を採用し接触圧は遠心力で得ることにした。また、塗装ロールは中心にスポンジゴムを設けた柔構造とした。

これらは新しい機構であり、回転ブラシと塗装ロールは室内実験により最適化を図った。この実験で得た知見を基に実用機を製作し、大島大橋で3000㎡規模の実験工事を実施した。この実験によると、塗装品質は人力施工と同等、施工能率は人力の10人分に相当する500㎡/日以上、塗料粉や塗料ミストの発

生は皆無であり、塗替塗装機械の開発に成功した。

## 2. 基本方針

### (1) 対象部位は箱桁の平滑部

橋梁には多くの形式があり、構造部材の形状も部位によって千差万別である。全ての橋梁の部材を塗装できることが望ましいが1台の装置でこれら全てへの対処を目的とすることはかえって中途半端な結果になりかねない。したがって今回は平滑面で構成される箱桁を対象にした。

箱桁は大半が平滑面であるが、部分的に添接ボルト・ブラケット・リップ等が配置されており、これらを対象にすると前述と同様な結果を招きかねないため、平滑部のみを対象とする。なお、添接部やブラケット部の面積は全塗装面積の3%以下であり、機械化の対象から除外しても機械化の効果が失われることはない。

### (2) 対象作業は素地調整・中塗り上塗り塗装

本四連絡橋には6層(合計膜厚250 $\mu$ )の長期防錆塗装型塗装が施されている。この塗装系の補修は、早期に劣化が現れるメカニカルダメージ部や現場塗装部等の部分塗替と、表層の2層が全体的に劣化した後に全面積に素地調整と中塗り上塗りを施工する全面塗替に分けられる。このうち、部分塗装は対象面積の2%程度が広い範囲に点在する微小な発錆のため機械化の効果は少なく、ここでは全面塗替を対象にした。

### (3) 作業能力は500 $m^2$ /日以上

開発に着手するには開発費を上回る効果が得られなければならない。今回の目標は省力化のため、人力施工の数倍の能力が必要であり、開発費用・開発の難易度・経済性等より人間の能力の10人分となる500 $m^2$ /日とする。なお、本機を3人で運転すれば1日に7人の省力化になり、本四連絡橋における箱桁の塗装面積20万 $m^2$ の費用を試算すると約2億円が縮減される。逆に言えば開発費用は2億円以下に制限される。

### (4) 既設の作業車の利用

本四連絡橋の主要な橋梁には写真-1に示すように維持管理用の作業車が設置されている。この作業車は桁の下面に設けたレールに懸架され、作業員や資機材を積載して橋軸方向全長にわたって0~30m/分の速度で走行する。したがって、この作業車上

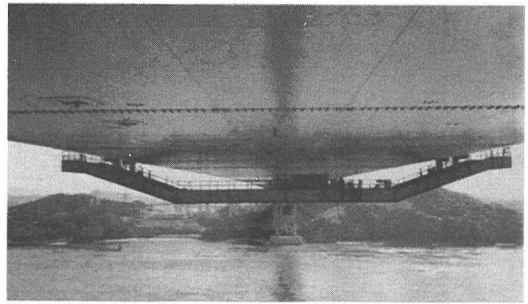


写真-1 桁下に設置されている作業車例

を橋軸直角方向に移動する台車上に塗装装置を搭載すれば桁下面全体に接近することができる。

## 3. 素地調整方法

### (1) 現状の素地調整作業

素地調整は表面の付着物や劣化した塗膜を除去し、下層の健全な塗膜にアンカーパターンを形成する(目荒らし)作業である。従来は円盤状のサンドペーパーを電動工具で回転させるディスクサンダが使用されている。円盤の端部を塗装面に押し付け、劣化塗膜の除去状況を確認しながらディスクサンダを前後左右に移動させる方法である。この方法では、塗装面の凹凸に応じた押付力と処理時間(移動方法)をきめ細かく調節しており、このような判断と調整の機械化は困難である。

### (2) 回転ブラシ

最も機械化に適した方法は乗用車の洗車装置に見られるような円柱状の回転ブラシである。回転ブラシを塗装面に押し付けて回転させながら移動させればブラシ長分帯状に処理できる。この方法による作業能率は式(1)で求めることができる。ここで、作業車の走行速度を5m/分・ブラシ長さ0.5m・作業効率0.7・ラップ率0.1・日作業時間6時間とすると、1日当たりの作業量は567 $m^2$ になり目標を満たすことができる。

$$Q_k = 60 \cdot W_B \cdot V(1-r) E_k \cdot t_k \quad (1)$$

$Q_k$  : 素地調整能力 ( $m^2$ /日)  
 $V$  : 作業車の走行速度 (m/分)  
 $r$  : ブラシ長方向のラップ率  
 $E_k$  : 作業効率  
 $t_k$  : 作業時間 (時間/日)

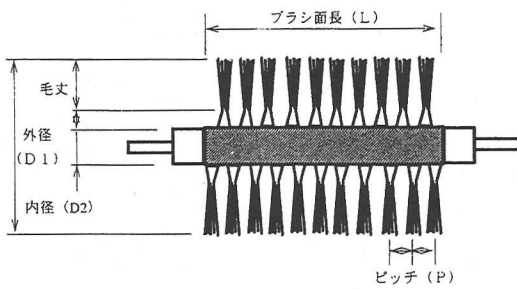


図-1 回転ブラシ

### (3) 技術課題

回転ブラシは図-1に示すように、回転軸の周りに線材を放射状に配置したものである。構造は単純であるが、塗装面には溶接ビードや溶接歪みによる高さ5mm程度の凹凸があるため素地調整の効果が変動することが考えられる。すなわち、素地調整の目標であるアンカーパターンの形成は塗膜の研削であり、回転ブラシによる研削効果は線材の接触力と通過回数(研削回数)によって決まる。この接触力を得る方法には、軸の押付力と遠心力の2種類が考えられる。前者では剛性の高い線材が必要であり、ブラシの長手方向に凹凸が生じている場合には凸部では過研削、凹部では研削不足が生じる。一方、後者の場合には剛性の低い線材で対応が可能であり接触力は式(2)に示すように、質量・半径・角速度の自乗に比例する。

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 / 1000 \quad (2)$$

ここに、  
 F : 遠心力 (N)  
 m : 線材の質量 (kg)  
 r : 半径 (mm)  
 ω : 各速度 (rad/秒)

したがって、塗膜面の凹凸を5mm・ブラシの半径を50mmとすれば、接触力の差は10%程度になる。また、通過回数・角速度とも回転数に比例するため、素地調整の程度は回転数のみで調節できる。これらの理由により回転ブラシには剛性の低い線材を使用し、最適な線材の種類・必要な回転数・凹凸と処理効果の変動等を室内実験で確認した。

## 4. 塗装方法

### (1) 現状の塗替塗装作業

塗替塗装はハケ塗りが一般的であり、片手に持った塗料缶内の塗料を反対の手に持ったハケの毛先に

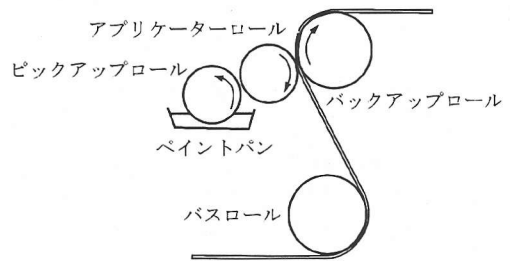


図-2 鋼板のロール塗装例

吸収させこれを塗装面で排出させるとともに塗り広げている。塗膜厚は、塗料の吸収具合・ハケの押付力・ハケの移動速度によって異なり、作業員は塗布状況を見ながら調節している。このような複雑なハケ運びを機械化することは容易ではない。また、人力塗装の作業能率は50㎡/人日程度であり、複雑なハケ運びを10倍の作業速度に向上させることは現実的に不可能である。

### (2) スプレー塗装

機械塗装の例にスプレー塗装がある。塗装面と塗装ガンが非接触のため、複雑な曲面塗装に適しており自動車塗装では一般化している。この塗装ではノズルにより塗料を微細なミスト状にし、高速で塗装面に噴出させている。したがって、風を受けるとミストが飛散するとともに、上向き塗装では塗装面に当たった塗料の跳ね返りが生じ、さらに飛散ミストを増大させる。現場施工において環境対策は極めて重要な条件でありハケ塗りにおいても塗装箇所をシートや極細目の網で覆う等の対策が施されているが完全に防止することは困難である。したがって、ハケ塗り以上にミストを発生させるスプレー塗装を現場塗装に採用することは環境対策面より現実的でない。

### (3) ロール塗装

機械化塗装の例にカラー鋼板の塗装に用いられているロール塗装がある。ロール塗装は図-2に示すように、ペイントパンの塗料をピックアップロールを介してアプリーケーターロールで鋼板に転写している。この方法では塗料は各ロールの表面に付着して移動するためミストは発生しない。また、塗膜の厚さと均一性はアプリーケーターロールと鋼板の間隔並びに回転速度で管理され比較的簡便である。

現場塗装に適用した場合の塗装能率は式(1)中の回転ブラシ長をロール長に置き換えて求めることができ、目標の500㎡/日を満たすことができる。

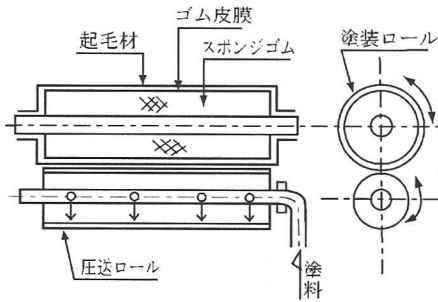


図-3 橋梁用塗装ロール

#### (4) 技術課題と対応方針

塗装方法は、機械化への適性・ミスト防止対策・塗装能率の確保よりロール塗装を採用することとした。

しかしカラー鋼板の塗装は、バックアップローラで平滑に整形された水平面への塗装であるが橋梁の塗装面には傾斜や凹凸が存在する。また、通常カラー鋼板の塗膜厚は $10\mu\text{m}$ 程度であるが橋梁では $50\mu\text{m}$ 程度の塗膜厚が必要になる。したがって、橋梁の塗替塗装に適用する場合の課題は、塗装面の傾斜や凹凸への対応・塗膜の厚膜化になる。このため、図-2に示すペイントパンとピックアップロールを図-3に示すように、ホースで圧送された塗料を内部より表面に排出する圧送ロールに変更して塗装面の傾斜へ対応する。また、ロール本体を柔軟スポンジゴムで形成して凹凸に馴染ませる。さらに、外周には塗料を保持する起毛材を巻いて塗料の付着量を増加させる等の対応を講じた。このロール塗装装置は新しく考案した装置であり、各ロールの押付力・回転速度・塗膜厚の変動等は室内実験で確認する必要があった。

### 5. 室内実験

#### (1) 実験装置

実験の主目的は、凹凸のある塗装面への回転ブラシと塗装ロールの適応性の確認であり、要諦は塗装面の三次元的な面構成にある。大島大橋と来島海峡大橋で桁下面の凹凸を調査した結果は次のとおりである。

- ① 溶接ビードの断面は幅 $10\sim 15\text{mm}$ の高さ $5\text{mm}$ 程度の半月状であり、位置は橋軸方向に数条、橋軸直角方向に $10\text{m}$ 程度のピッチで存在する。
- ② 溶接歪みは桁内面の補強リブによるもので、高さ $3\text{mm}$ 、ピッチ $0.5\text{m}$ の液状であり、橋軸方向に連続している。

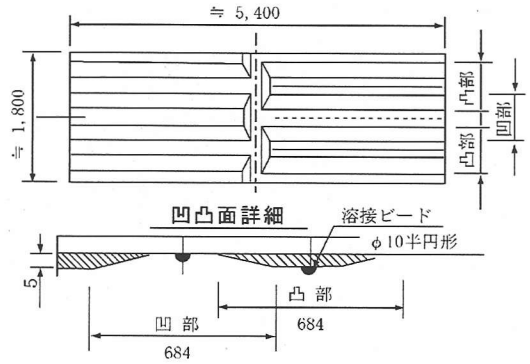


図-4 実験用塗装面の凹凸

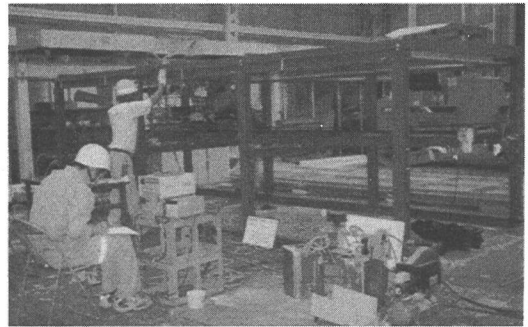


写真-2 実験装置全景

したがって、塗装面模型には図-4に示すように、 $1.8\text{m} \times 5.4\text{m}$ の耐水ベニア板に台形状の凹凸と半月状の溶接ビードを設けた。この塗装面を天井面とし、その下部に回転ブラシと塗装ロールの移動装置を設置した。実験装置の全景を写真-2に示す。

#### (2) 回転ブラシ

回転ブラシの線材はブラシ用として市販されている砥粒入りナイロン線材を使用する。この線材はナイロン線がU形の鋼材で固定された帯状の製品であり、この線材を回転軸の周りにヘリカル状に巻き付ければ容易に回転ブラシとすることができる。ナイロンの摩耗につれて新しい砥粒が現れるため研削効果が長時間保持できる。研削効果に影響する要因として、線材径・砥粒径・線材長・ピッチが考えられるため、表-1に示すように6種類のブラシを製作して研削効果を確認した。

劣化した塗装面を模型でつくるのは難しいため、新鮮な塗装面に劣化した塗料を模したチョークを塗り、回転速度 $2300\text{rpm}$ と $4100\text{rpm}$ 、ブラシの潰し量 $6\text{mm}$ と $16\text{mm}$ で研削し、チョークの除去状況と砥膜の研

表一 実験用ブラシの使用

区分	線材径 (mm)	ブラシ長 (mm)	外径 (mm)	毛丈 (mm)	ピッチ (mm)	砥粒径 (μm)
A	0.80	500	116	40	50	67
B	0.70	500	116	40	50	65
BL	0.70	500	156	60	50	65
C10	0.55	500	116	40	50	48
C20	0.55	500	116	40	25	48
C20L	0.55	500	156	60	25	48

表二 表面粗さの計測例

項目	今回の供試体		大鳴門橋供試体	記事	
	素地調整前	素地調整後	4体の平均		
粗さ計 (μm)	Ra	0.08	0.35	0.36	算術平均粗さ
	Ry	0.73	3.10	2.50	最大高さ
	Rz	—	2.07	1.78	10点平均粗さ
	Rq	0.10	0.45	0.49	二乗平均粗さ
光沢度計 (%)	80~83 平均80	13~20 平均15	—		
素地調整条件	回転ブラシ: C20L 回転速度: 4600rpm 走行速度: 5 m/分		ディスクサンダー (#40)		

削状況で評価した。この実験では、

- ① 回転速度2300rpm では研削力が不足しチョーク跡と未研削部分が残る。
- ② 巻数10では研削面にむらが生じ未研削部が残る。
- ③ 潰し量 (ブラシの押付量) 6mmではチョークの跡が残る。

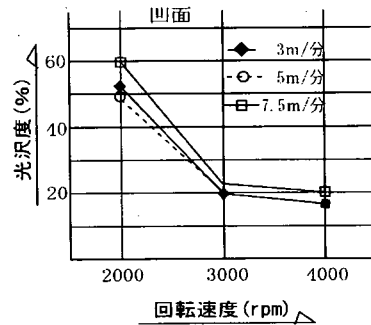
が判明し、結果はブラシC20L (ピッチ25mm・潰し量16mm) のみ良好な研削面が得られた。

回転ブラシの実験を行なう上の課題に素地調整面の評価方法がある。実施工においては、経験者の目視検査が一般的であり、定量的な評価方法は確立されていない。表面粗さの定量的な評価法の一つに表面粗さ測定法があり、大鳴門橋の塗装工事で計測した良好な素地調整面と判定された表面粗さと、今回の回転ブラシによる素地調整面の表面粗さを比較した。

この結果は表二に示すように、ほぼ同程度の表面粗さが得られている。また、同時に計測した60度鏡面光度計によれば良好な塗装面の光沢度は60%~80%程度であり、良好な素地調整面では15%~20%程度を示し明確に区分されている。

表三 素地調整条件と光沢度

ケース	回転速度 (rpm)	移動速度 (m/分)	凹凸区分	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
1	2000	3.0	凸面	46.2	10.1	21.9
2		5.0		55.5	11.8	21.3
3		7.5		56.2	10.6	18.9
4		3.0	凹面	51.8	11.5	22.2
5		5.0		51.2	10.7	20.9
6		7.5		59.5	10.6	17.8
7	3000	3.0	凸面	19.7	2.9	14.7
8		5.0		20.9	3.3	15.8
9		7.5		24.4	3.0	12.3
10		3.0	凹面	21.3	2.8	13.1
11		5.0		21.3	3.2	15.0
12		7.5		23.5	3.9	16.7
13	4000	3.0	凸面	18.3	2.6	14.2
14		5.0		22.9	3.0	13.1
15		7.5		24.5	4.0	16.3
16		3.0	凹面	18.0	4.3	23.9
17		5.0		17.5	3.1	17.7
18		7.5		20.1	3.0	14.9

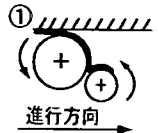
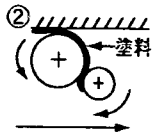
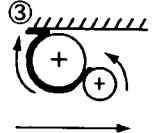
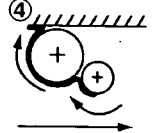


図五 回転速度・移動速度・光沢度の関係

表面粗さの計測は計測作業とデータの整理に手間を要し、施工現場における品質管理手法としては不向きである。また、今回の実験は表面粗さの絶対値よりも凹凸面における研削量の変動が重要であり、計測が容易な60度鏡面光度計で評価した。

凹凸面ごとに、回転速度・移動速度を変えた18ケースの処理面を、ブラシの長手方向に10mmピッチで計測した光沢度の値を表三に示す。凹面凸面とも光沢度に顕著な差が見られないため凸面における、回転速度・移動速度・光沢度の関係を求めると図五に示すように、移動速度の影響が微少であり回転速度が支配的となっている。したがって、実施工においては作業車の走行速度が変動しても素地調整の

表-4 ロールの回転の組合せと塗料の流れ

ロールの回転方向	塗装面と 塗装ロール	塗装ロールと 圧送ロール
① 	・塗装はロールと 塗装面の間で薄 く延ばされて転 写される。	・圧送ロールの 塗料はそのまま 塗装ロールに 転写される。
② 	・ロールと塗装面 の接触圧が高い と塗料の転写量 が減少し前方に 運ばれる。	・圧送ロールの 塗料は薄く延 ばされ塗装ロ ールに転写さ れる。
③ 	・ロール表面の塗 料はそのまま転 写される。	・圧送ロールの 塗料は薄く延 ばされ塗装ロ ールに転写さ れる。
④ 	・塗料の転写状態 はロールと塗装 面の接触圧に左 右されない。	・圧送ロールの 塗料はそのまま 塗装ロールに 転写される。

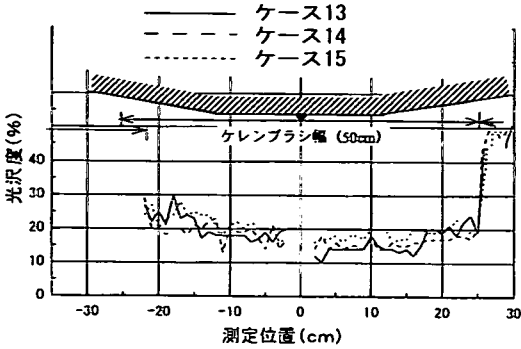


図-6 回転ブラシの長手方向の光沢度

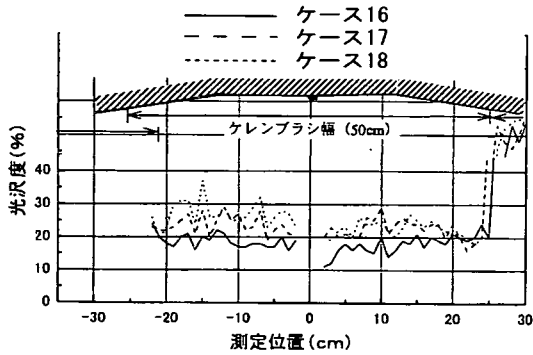


図-7 回転ブラシの長手方向の光沢度

品質の変動は少なく、また、凹凸面とも同じ要領で作業することができると考えられる。

同様に、回転ブラシの長手方向の光沢度の代表的な変動状況を整して図-6（ケース13~15）及び図-7（ケース16~18）に示す。この図から次に示すとおり実用上十分な性能を有していると判断できる。

- ① 回転速度が2000rpmでは光沢度が高く（効果が少ない）変動が大きい、3000rpm以上では十分な効果が見られ変動も小さくなる。
- ② 凹面凸面ともいずれのケースも顕著な差異は見られない。
- ③ 研削面は肉眼では変動が判別できない程度に均一に仕上がっている。

なお、溶接ビード部のデータが欠落している原因は溶接ビードが半円であり計測が不可能なためである。

### (3) 塗装ロール

ロール塗装では塗装ロールと塗装面を接触させなければならない。ここで、凹部・凸部・凹部の溶接ビード部・凸部の溶接ビード部等、代表的な接触条件において塗装ロールの全長を接触させるのに必要

な押付力を求めると98N~130N程度であり、実験における押付力はこの範囲で管理する。

また、塗料の塗布量は、乾燥膜厚 $25\mu\text{m}$ ~ $30\mu\text{m}$ を満たすウェット膜厚 $70\mu\text{m}$ に、溶剤の添加量・施工のばらつき・塗装能率( $150\text{m}^2/\text{h}$ )を考慮して $200\text{g}/\text{分}$ ~ $250\text{g}/\text{分}$ の範囲で管理する。

ロール塗装には、ロールの移動方向に回転させる順回転塗装と反対方向に回転させる逆回転塗装がある。

順回転塗装での実験では凹部には塗料が塗布されるが凸部は薄い塗膜しか形成されず、逆回転塗装では凸部には塗料が塗布されるが凹部には塗布されない逆の結果が得られた。

今回のロール塗装は塗装ロールと圧送ロールを組み合わせており、それぞれの回転方向と塗装方向（ロールの移動方向）によって塗料の流れは表-4に示す4ケースになる。圧送ロール→塗装ロール→塗装面に至る塗料の流れを詳細に観察すると次のようになる。

- ① 順回転塗装では、塗装ロール表面の塗料は擦り込まれる形で塗装面に転写される。したがって、接触圧が高い部分（凸部）は擦り込まれる量が少なくなり前方に運ばれる。逆回転塗装では塗料は擦り込まれることなく塗装面にそのまま転写されるが、塗装面とロールが接触しない部分（ビード横）は転写されない。

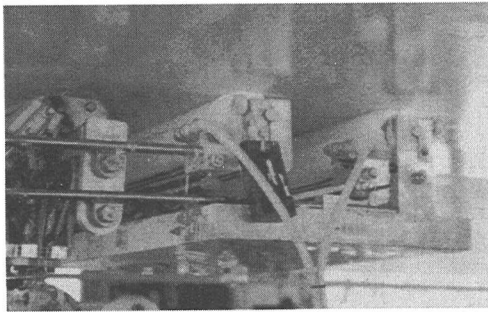


写真-3 2連装ロール外観

② 塗装ロールと圧送ロールの回転方向が同じ場合は圧送ロールから滲み出た塗料はそのまま圧送ロールに転写されるが、反対の場合は互いのロール間で薄く延ばされる。次いで、順回転で凹部に塗装した面を逆回転で上塗りする2度塗りを試みると正常な塗装面が得られる。

この場合の圧送ロールの回転方向は、順回転ではロール間に余剰塗料の溜まりができる順回転（ケース1）が適し、逆回転では塗装ロールに均一な塗膜が形成できる逆回転（ケース3）が適する結果が得られた。

この結果より、塗装装置を写真-3に示すように、順回転で先行し逆回転で後行する2連装ロールに改造し実験を再開した。この実験で先行する順回転ロールと後行する逆回転ロールの塗布量を変えた場合の塗膜厚の均一性を評価する。塗膜厚はあらかじめ塗装面に貼付した厚さ20 $\mu$ mの鋼テープの乾燥膜厚を10mmピッチで計測した値であり表-5に示す。表-5に示す値をロールの長手方向の変動状態で整理すると図-8（ケース3）及び図-9（ケース4）のとおりであり次に示すように実用上十分な性能を有している。

- ① 中塗り塗装の乾燥膜厚はいずれのケースも40 $\mu$ m $\sim$ 70 $\mu$ mであり、目標の30 $\mu$ mを満たしている。また、目視観察でも、だれ・しわ・むらの無い良好な塗膜である。
- ② 上塗り塗装の乾燥膜厚は目標25 $\mu$ mをほぼ満たしているが下回る部分も見られるので圧送量の増が必要である。
- ③ 上塗り塗装ではビードの頂部にだれが生じた。なおフッ素樹脂塗料はハケ塗りにおいても膜厚が厚くなるとだれが生じやすいため、入念な膜厚の管理がなされている。

なお、これらの実験は実施工で多くを占める水平面を上向き塗装で実施している。実施工では水平面の他に、箱桁のウェブは垂直面の横向き塗装になる。さらに、吊橋の箱桁の両側のフェアリング部では傾

表-5 2連装ロールの塗装条件と乾燥膜厚

ケース	区分		塗料配分 (l/分)		平均値 ( $\mu$ m)	標準偏差 ( $\mu$ m)	変動係数 (%)
	種別	凹凸面	先行	後行			
1	中塗り	凹面	150	100	59	12.1	20.5
		平坦面			64	12.0	18.8
		凸面			52	7.9	15.2
2	中塗り	凹面	100	100	57	11.5	20.1
		凸面			73	10.1	13.8
3	中塗り	凹面	100	75	57	12.2	21.4
		平坦面			51	8.6	16.9
		凸面			47	8.1	17.2
4	上塗り	凹面	100	100	29	5.1	17.6
		平坦面			57	12.1	21.2
		凸面			28	11.5	41.1

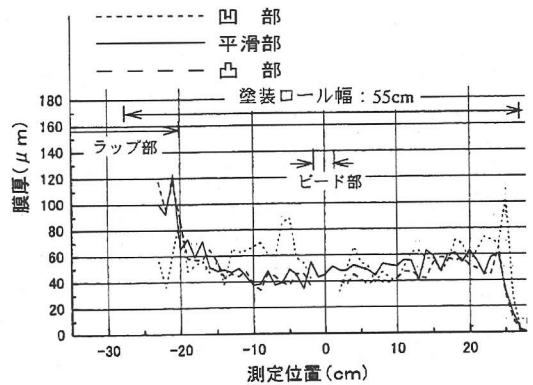


図-8 乾燥膜厚の変動状況 (ケース3)

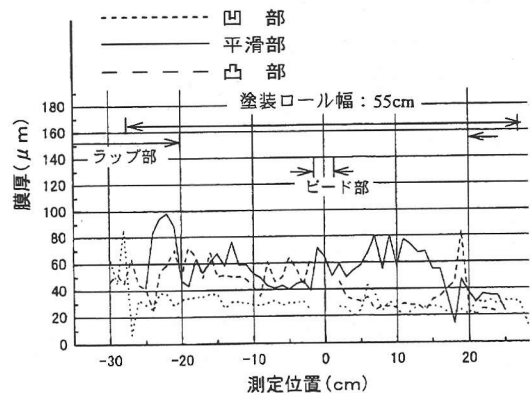


図-9 乾燥膜厚の変動状況 (ケース4)

斜面の上向き塗装が必要になる。このため、実験の終了前に実験装置全体を30度傾斜させて塗装を試みたところ、塗装ロールの下側のみ塗布され上側は塗布されなかった。原因は、圧送ロール内の塗料が重力により下側に滞留したためである。

## 6. 実用機の計画

### (1) 課題

室内実験により回転ブラシによる素地調整とロール塗装の実用化の見通しを得たが、施工法として確立するには実橋における実証実験が必要であり、室内実験で得られた知見を基に実用機を設計した。設計上の課題を整理すると次のようになる。

- ① 回転ブラシでは、線材の潰し量（研削面と回転軸間の距離）を一定に保つ機構と塗膜の研削粉を吸収する集塵機構
- ② 塗装ロールでは、ロールの押付力を一定に保つ機構と、傾斜面でも全長にわたり一様に塗料が滲み出る圧送ロール
- ③ 回転ブラシや圧送ロールを塗装面の任意の位置に支持する多関節アームと台車
- ④ 素地調整ならびに塗装の品質管理方法

### (2) 回転ブラシ

回転ブラシは、線材の潰し量（塗装面と回転軸間の距離）を一定に管理しなければならない。このため、写真-4に示すように、バネにより常に塗装面に押し付けられるガイドローラを設け、このガイドローラアームと潰し量の調節ボルトを介して支持する。また、回転ブラシ全体をカバーで覆い、発生する塗膜の研削粉を集塵機で吸塵する。

### (3) 塗装ロール

塗装ロールは塗装面に常に一定の力で押し付けなければならない。このため、図-10に示すようにバネによって常に塗装面に押し付けられるガイドローラを設け、このガイドローラを支点とする梃子の片側に塗装ロール、反対側に空気圧シリンダを設ける。したがって、塗装ロールと塗装面の接触圧はシリンダに供給する空気圧で調節することができる。

### (4) 圧送ロール

塗料を塗装面に均等に塗布するには、ポンプで圧送された塗料を圧送ロール表面から均等に滲み出させなければならない。室内実験で使用した圧送ロールの表面には10mmピッチで塗料の排出孔を設け、ロ

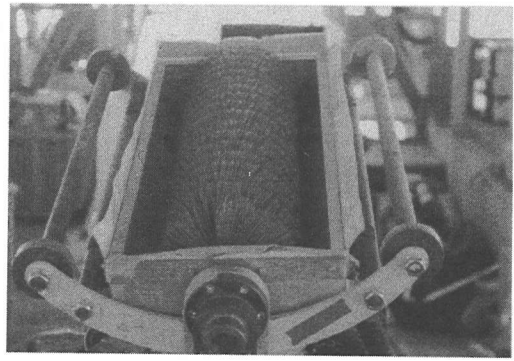


写真-4 回転ブラシ全景

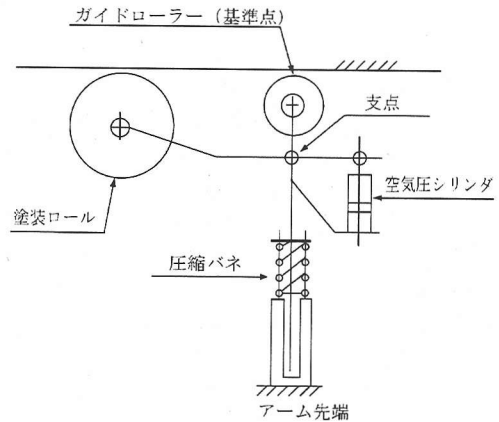


図-10 塗装ロールの支持機構

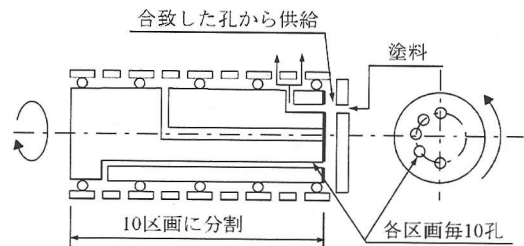


図-11 圧送ロールの塗料分配機構

ール内に送られた塗料は重力で拡がり、この排出孔からにじみ出る機構とした。水平では塗料は全長にわたって均一に拡がるため全体から均等ににじみ出るが、ロールが傾斜すると塗料は下方のみに滞留して上方から滲み出ないこととなる。

傾斜しても均等に滲み出させるにはロールを長手方向に多室に分割し、各室ごとに塗料を等分しなければならない。ここでは図-11に示すように、ロー



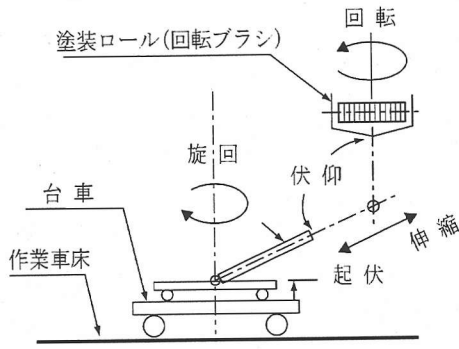


図-12 多関節アームの自由度

ルを10等分し、それぞれの室への供給孔を円周方向に等分に配置した。この供給孔はロールの回転に合わせて回転するが、ポンプから圧送される塗料の供給孔は1箇所である。したがって、塗料は互いの孔が合致した箇所からのみ供給されるため1回転で全長に分配され、連続して回転すれば全面から均等に滲み出る。

(5) 支持機構

回転ブラシと塗装ロールを塗装面の任意の位置に支持するには図-12に示すように、5自由度(旋回・伸縮・伏仰・起伏・回転)を有する多関節アームと、作業の進行に合わせて全体を作業車上で橋軸直角方向に移動する台車が必要になる。これらの全景を写真-5に示す。

(6) 品質管理方法

素地調整の程度(劣化塗膜の除去・健全塗膜の研削深さ)は回転ブラシの回転速度で管理することができる。したがって、計測された光沢度により回転速度を任意に調整できるような可変速電動機を採用する。

塗膜厚は、塗料の供給速度・ロールの移動速度(作業車の走行速度)・ロール長で求まるため式(3)に示すように、必要な塗膜厚より求まる塗料の供給速度に膜厚の変動量を割り増して供給する。したがって、計測されたウェット膜厚に応じて圧送速度を任意に調整できる可変圧送量式塗料ポンプを採用する。

$$Q = t / 1000 \cdot W_p \cdot V \cdot K \quad (3)$$

- ここに、 Q : 塗料ポンプの圧送速度 (l/分)
- t : ウェット塗膜厚 (μm)
- W<sub>p</sub> : 塗装ロール幅 (m)
- V : 作業車の走行速度 (m/分)
- K : 割り増し係数

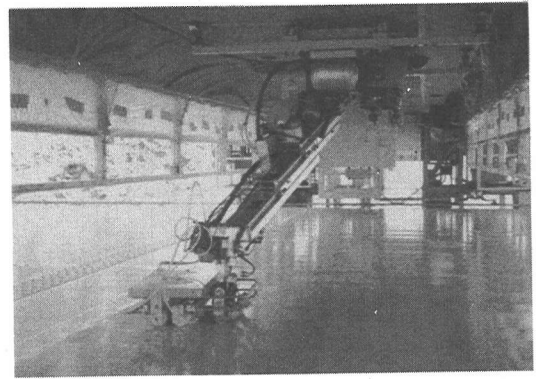


写真-5 塗装システム全景

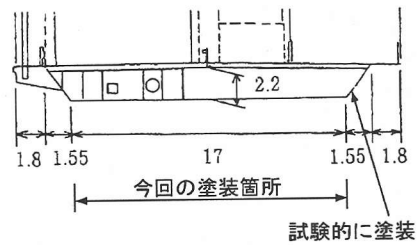


図-13 大島大橋補剛箱桁断面

表-6 大島大橋塗装仕様

	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層
既往塗装	ジンクリッチ プライマ 「75」	ミストコート ---	エポキシ 樹脂 塗料 下塗り 「60」	エポキシ 樹脂 塗料 下塗り 「60」	ポリウレタン 塗料 中塗り 「30」	ポリウレタン 塗料 上塗り 「30」
塗替え塗装	---	---	---	---	エポキシ 樹脂 塗料 中塗り {140}	フッ素 樹脂 塗料 上塗り {120}

7. 実橋実験

(1) 塗装仕様

大島大橋は昭和63年1月に供用した、橋長840mの単径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋である。箱桁は図-13に示すように下フランジ17m・上フランジ20.1m・高さ2.2mの逆台形状であり、両側にハンガーロープを定着するブラケットが設けられている。既設の塗装仕様と塗替塗装仕様は表-6<sup>4)</sup>に示すとおりであり、今回は第5層のポリウレタン塗料中塗りと第6層のポリウレタン塗料上塗りを除去した後に、エポキシ樹脂塗料中塗りとフッ素樹脂塗料上塗りを下フランジ面に塗装する。

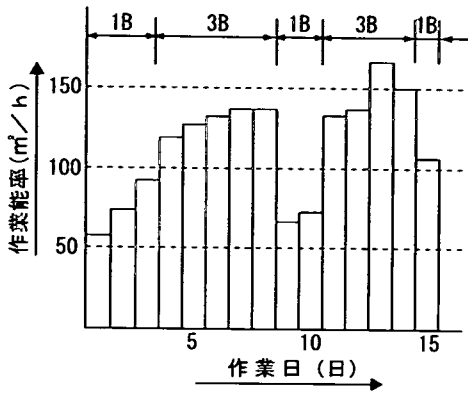


図-14 素地調整作業の能率

## (2) 素地調整作業

素地調整作業に先立ちブラシの回転速度と光沢度の関係を求めたところ、光沢度を20%以下に低下させるには回転速度を4000rpmとする必要があった。室内実験に比べて高回転が必要な原因は、塗装後の経過日数の差による塗料の硬度差と考えられる。また、図-5に示すように、移動速度を増加させても光沢度の低下は少ないため、作業車の走行速度を徐々に増速させたところ、8m/分までは光沢度に有為な変化は見受けられないが9m/分では部分的に処理不足箇所が見られた。したがって以後は回転数は4000rpm、走行速度は8m/分とした。

## (3) 光沢度

施工中は適時、光沢度を計測しており、約400回計測した光沢度の値は平均15%、標準偏差は4%であった。素地調整前の平均光沢度は51%、標準偏差は9%であり、室内実験と同等な素地調整効果が見られた。

## (4) 素地調整作業の能率

塗装の品質確保のため、素地調整後は同日中に中塗り塗装を終えるように定められているため、作業工程は午前中に素地調整、午後に中塗り塗装としている。

各作業日ごとの作業能率は図-14に示すように50~150m²/hの間でばらついている。大島大橋は約24m間隔で添接部が設けられており、図中の1Bは24mごとに横移動と往復を繰り返しており、3Bは72mごとに横移動と往復を繰り返している。

初期に能率が低い原因は操作の不慣れによるものである。また、1Bが3Bに比べて能率が低い原因は、回転ブラシを支持するアームの操作時間(作業上はロスタイム)の差によるものである。すなわち、

表-7 塗膜厚の計測結果

区分	中塗り塗装	上塗り塗装
管理項目及び基準値	30μm	25μm
平均値 > 基準膜厚 × 0.9	37	33
最小膜厚 > 基準膜厚 × 0.7	23	20
標準偏差 < 平均値 × 0.2	6.9	5.9

終端と始端ではアームによる回転ブラシの、離し・横移動・反転・位置決め・接触の操作が必要になる。一方、添接部を通過する場合のアームの操作は、離しと接触のみ(アームの起伏)であり、この操作時間の差異による能率の差である。したがって、今後の実施工においては数ブロックの連続施工が望ましい。

## (5) 塗装作業

素地調整直後(同日中)に中塗り塗装を施し、数日後に上塗り塗装を施工する。基準膜厚は中塗り塗装が30μm、上塗り塗装が25μmであり、乾燥減厚や割り増しを考慮してウェット膜厚が70μm以上になるように塗料ポンプの圧送速度を調整した。

また、素地調整と同様に作業車の増速を試みたところ、7m/分程度まで良好な塗膜が形成できるため以後の走行速度は7m/分で塗装した。この条件における塗料の使用量は、中塗り塗装で141g/m²、上塗り塗装で119g/m²であり、これは公団の塗装基準に示すハケ塗りの標準使用量(中塗り140g/m²・上塗り120g/m²)とほぼ同値である。

先行ロールと後行ロールの塗料の最適配分比は室内実験では面積の制限より十分に確認されていない。このため、等分より開始し、塗膜の形成状況を観察しながら、先行ロールの圧送量を増加し、後行ロールの圧送量を減じた。この評価は、だれ・むら・流れ・すけ等の目視による判定であるが、先行ロールの圧送量を70%~80%に増加させた場合が良好な塗膜が得られた。

これはハケ塗りにおける、配り塗り(最初に厚く塗料を配る)と均し塗り(微量の塗料を含ませて均一に仕上げる)塗装方法に似ている。

## (6) 塗装品質

素地調整後並びに中塗り後の塗装面に厚さ100μmの鋼製テープを貼付し、塗装後に剥がして塗装膜厚を計測した。計測点は中塗り、上塗りとも任意の橋軸直角方向の4測線(合計長さ72m)上の350点である。

この計測結果は表-7に示すように、新設橋に適

用する膜圧基準<sup>4)</sup>に比べて遜色の無い良好な値を示している。塗膜の品質は、塗膜厚の均一性に加えて、塗膜欠陥（だれ、ふくれ、流れ、気泡等）の有無・付着力等で評価される。だれ・ふくれ・流れ等は見受けられず良好な塗装面である。また、引き剥がし試験ではいずれも鋼面と第1層の間で剥離し、付着力は $2\text{ N/mm}^2$ 以上であり十分な品質を示した。

### (7) 傾斜面への適応性

下フランジの塗装が完了後、ウェブ（傾斜51度）部の塗装を試みた。素地調整の仕上がりどおしと能率はフランジ部と同等である。また、高さ方向の3箇所計測した塗膜厚（ウェット膜厚）は表-8に示すとおりである。計測数は少ない（中塗り36・上塗り72）が管理基準のウェット膜厚 $70\mu\text{ m}$ で判定すると、平均値と最小値は基準を満たすが標準偏差が基準値を超えており、平面部に比べて膜厚の変動が大きくなっている。

この結果より圧送ロールの材料配分機構による塗膜均等化を図る意図は実証されている。したがって、今後は区画数の増加や上下両方からの塗料の供給等の工夫により傾斜面での膜厚の均等化が達成できるものと考えられる。

### (8) 塗装作業の能率

走行速度が $7\text{ m/分}$ で塗装した場合の作業能率は図-15に示すように $50\sim 150\text{ m}^2/\text{h}$ の間でばらついている。この原因は前(4)項で詳述したように、初期は操作の不慣れによるものであり、それ以後は1ブロック施工と3ブロック施工の差である。今後は3ブロック以上施工すれば目標性能の $500\text{ m}^2/\text{日}$ を満たすことができる。

### (9) 省力化と経済効果

人力施工の作業能率は $50\text{ m}^2/\text{人日}$ であり、本装置の作業能率は $500\text{ m}^2/\text{日}$ である。本装置は、本体運転・作業車運転・手元補助の3人で運転している。したがって、施工面積当たり70%の省力化になる。人力施工と本装置の経済効果は施工費の差が支配的である。したがって、労力費と本装置の機械損料を加味して両者の差額を求めると本装置による施工が $1000\text{ 円/m}^2$ 程度安価になる。これは材料費を加えた塗装費用全体の20~30%に相当する。また、しまなみ海道の各橋梁の対象面積より求めた塗り替え費用の縮減額を本装置開発に要した額で除した効果/費用は約6倍である。

表-8 傾斜面の膜厚値（ウェット膜厚 $\mu\text{ m}$ ）

位置及び管理項目	中塗り	上塗り
上部	85.8	73.8
中央部	82.5	92.9
下部	77.5	81.6
平均膜厚 $>70\times 0.9$	81.9	82.8
最小膜厚 $>70\times 0.7$	60.0	50.0
標準偏差 $<$ 平均膜厚 $\times 0.2$	23.0	22.2

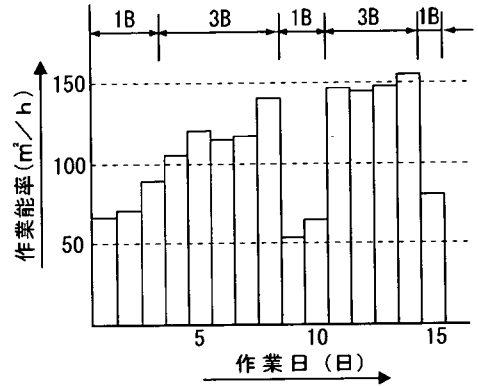


図-15 塗装作業の能率（中塗り）

### (10) 環境対策

塗装作業で求められる主要な環境保全対策は、素地調整時の塗料粉の飛散防止と塗装時の塗料ミストの飛散防止である。通常は塗装箇所全体をネットやシートで囲む方法が採用されている。本装置では塗料粉は集塵機で吸収するため飛散は生じない。また、塗料は、密閉回路とロール表面に付着して運ばれるためミストは発生しない。したがって、今回は作業場所の周囲を囲むネットを用いないで施工することができた。

## 8. おわりに

本研究は人力で施工されている橋梁の塗替塗装の機械化に取り組んだものである。機械化の要諦は素地調整用の回転ブラシと塗装用のロールにあり、最初に室内実験を行い機械確認と最適化を図った後に実用機を製作した。次いで実橋における実施工規模の実験により機械化塗装を実証したものであり、本研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

- ① 砥粒入りナイロン線材で構成する回転ブラシは、溶接ビードや溶接歪みによる塗装面の凹凸

に追従し、人力施工よりも均一性に優れる第4種素地調整面が得られる。

- ② スポンジゴムと起毛材で構成する柔軟形塗装ロールは塗装面の凹凸に追従し、人力施工と同等の品質の塗膜が得られる。
- ③ 素地調整・塗装とも作業能率は人力施工の10人分に相当する500㎡/日以上であり、人力施工に比べて20～30%程度塗装費用を縮減することができる。
- ④ 本装置によれば、素地調整時の塗料粉や塗装時の塗料ミストの飛散は皆無であり、これらの飛散防止対策を軽減することができる。
- ⑤ 本装置は本四連絡橋を対象にして開発したが、作業車が設置されている箱桁橋梁にはそのまま適用できる汎用性を有している。

本研究により、箱桁の塗替塗装の機械化を達成したが、箱桁の塗装面積は本四連絡橋全体の塗装面積の5%程度であり、全体的に見れば機械化塗装の橋頭堡を築いたに過ぎない。今後も大島大橋を初め他橋で実施工を重ねて得られるノウハウを蓄積しつつ、主塔・鋼床版・トラス部材等の機械化塗装に取り組み所存である。

謝辞：本研究は、本四公団と㈱ブリッジエンジニアリングとの共同研究である。また、本研究のうち、室内実験と実橋実験における計測作業等は(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所に担当していただいた。担当していただいた皆さんの精力的な努力により本研究を1年半で完了することができた。誌上を借りてお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 谷中 幸和：本州四国連絡橋公団の鋼橋塗装と維持管理計画，鋼橋塗装，pp.14-16, 2000.2.
- 2) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説，p.73,1990.
- 3) 本州四国連絡橋公団：長大橋の維持管理に関する省力化検討報告書，pp.80-85,1997.1.
- 4) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説，pp.74-82,1990.

(2001.11.16 受付)

## DEVELOPMENT OF REPAIR COATING MACHINE FOR BRIDGES

Yukikazu YANAKA, Mitushige SAKAMOTO, Shouji HIROTA and Kyoichi KANEDA

The mechanized repair coating for existing bridges has long been anticipated for the reasons such as cost reduction, mitigation of painful work. The complicated bridge structure, fragile platforms, dust and paint scattering, etc., can be listed as impeding factors. HSBA has newly developed a box-girder repair coating system. This system consists of a roll brush surface preparation unit, a roll coating unit, and their manipulator which is placed on and transversed by an existing maintenance trolley car. An experimental work by this system, carried out at Ohshima Bridge, showed a successful performance as the equal qualities and ten times of productivity as manual work.