

## ゴンドラとロールによる塗装の機械化

### —吊り橋の主塔用塗装装置の開発—

坂本光重・河野正樹・土山正巳・秋山和夫

本州四国連絡橋の吊橋の主塔は高さ300mに達する超高層の鋼構造物であり、表面には重防食塗装が施されているが塗装は経年劣化するため15～20年程度のサイクルで塗替えが必要になる。この塗替え作業はゴンドラに搭乗した作業員で実施しているが、高所の揺れるゴンドラ上で寒風や酷暑の下で塗料で汚れる苦渋作業であり機械化が望まれてきた。このたび、塔壁に吸着して揺れを防ぐ磁石車輪ゴンドラとロール塗装装置による塗替え塗装装置を開発した。この装置は500m<sup>2</sup>/日の作業能率を有し1～2人で運転でできるため、経済性や安全性の向上と大幅な省力化を実現した。

キーワード：磁石車輪、ゴンドラ、塗装機械、ロール塗装

#### 1. はじめに

吊り橋の主塔は高さが300mに達する高層構造物であり塗替え塗装はゴンドラに搭乗した作業員によって施工されている。しかし、ゴンドラは風によって揺れるため稼働率が低下するとともに危険な高所作業になる。この揺れを防ぐため塔壁に連続して吸着する磁石車輪ゴンドラを開発し、安全性と稼働率を向上させた<sup>1)</sup>。一方、塗替え塗装は、寒風や酷暑の下で塗料で汚れる苦渋作業であり機械化が望まれてきた。このため、回転ブラシによる素地調整（ケレン）と塗装ロールによる箱桁用の塗装装置を開発し、経済性、安全性の向上と省力化を実現した<sup>2)</sup>。

本報文で紹介する主塔用塗替え装置は先に開発した磁石車輪ゴンドラと箱桁用塗装装置で得たノウハウを結集して開発したものである。開発に当たっての最大の課題は、従来は2組用いていた塗装ロールの単数化であり、ゴムの材質と柔軟性を変えた多くの実験によって解決した。次いで、因島大橋で実際の塗替え塗装を行い、塗装品質、作業性、作業能率などを確認した。この実橋実験によると塗装品質は人力塗装と同等であり、均一性では人力よりも優れる。また、運転人員は2名、作業能率は500m<sup>2</sup>/日（10人日に相当）以上であり、経済性、安全性を向上させるとともに、大幅な省力化を実現した。

#### 2. 主塔の塗装

吊り橋の主塔は主ケーブルを支える構造物であり、高さはスパンとサグ比によって決まり、本四架橋では140～300mの高層構造物となる。塔の断面は矩形であり、表面には6層より成る重防食塗装が施されている。塗替えは表面の2層が劣化した後に、第4種素地調整の後に中塗り、上塗りを施工する予防保全的塗替え計画としている。ここでは、代表例として実橋実験を行った因島大橋の主塔を図-1に示す。今回の塗装部分は塔柱の道路側を除く3面（東西2塔柱で6面）であり、高さは基部から約40mである。

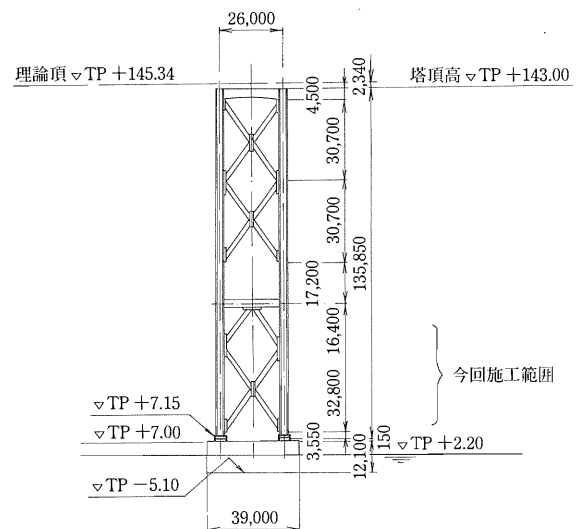


図-1 因島大橋主塔一般図

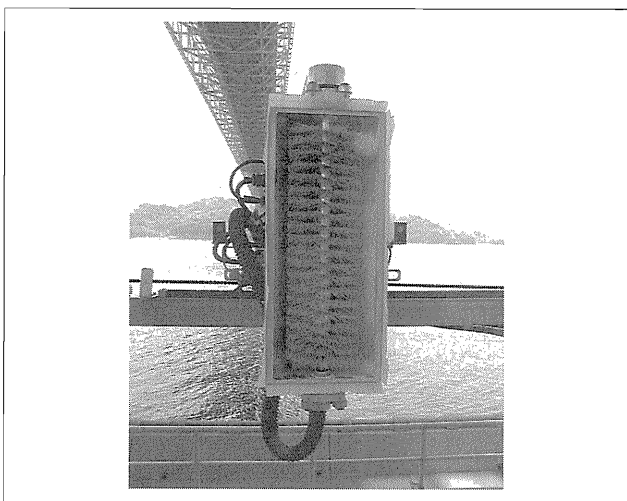
### 3. 全体構想

#### (1) 対象作業

塔柱は全体的には平滑面であるが10m程度の間隔で高力ボルトによる添接部がある。また、塗装面の劣化は全体的には一様に進んでいるが、メカニカルダメージ部や隅角部など局部的な発錆が点在している。全ての部位の塗装作業を機械化することも考えられるが、機構が複雑になる難点が生じる。一方、添接部の面積は全体の5%程度であり、発錆部の面積は1%に満たない。したがって、この装置の対象部位は添接部を除く平滑面、対象作業は第4種素地調整、中塗り、上塗りとする。

#### (2) 素地調整具の選定

素地調整は劣化した表層の塗膜を除去するとともに、下層の健全な塗膜面に塗料が付着しやすいようにアンカーパターン（目荒らし）を形成する作業である。通常はディスクサンダなどの電動工具を人間が移動させる方法が使用される。一見して単純な作業であるが、人間は塗料の除去状況やアンカーパターンの形成状況を見ながらディスクの押付け力や角度を調整している。このような作業の機械化は複雑な移動機構や制御機構が必要になるとともに能率の向上は困難であるので、今回は写真—1に示すように、回転軸の回りに砥粒を含む柔らかいナイロンブラシを埋込んだ回転ブラシを採用する。



写真—1 素地調整用回転ブラシ

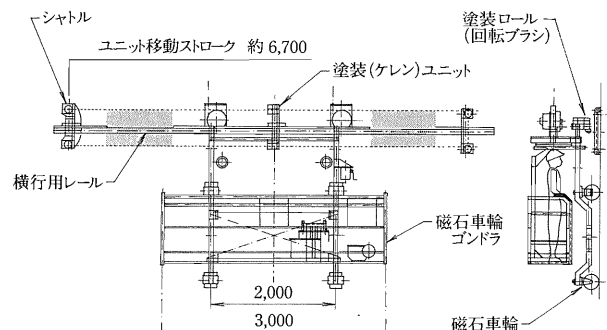
#### (3) 塗装具の選定

通常の塗替え塗装には刷毛が使用されている。一見して単純な作業に見えるが塗膜の形成状況により、刷

毛の押付け力、移動速度、塗料のしみ込み状況等をきめ細く制御しており、このような作業を機械化することは容易でなく、能率の向上も困難である。また、機械塗装ではスプレーが多用されているがスプレーは塗料をミスト状にして塗装面に吹付けており、風によって飛散するため現場塗装では環境対策上困難である。ロール塗装はロールに付着させた塗料を塗装面に転写するためミストは発生しない。また、能率はロール幅と移動速度の積であり刷毛塗りの数倍の能率が期待できるため、今回はロール塗装を採用する。

#### (4) 支持装置

ロール塗装ではロールと塗装面の接触状況やロールの移動速度で塗膜厚が変動する。同様に回転ブラシと塗装面の接触状況でアンカーパターンの形成状況が異なる。したがって、塗装ロールや回転ブラシを一定の接触圧で塗装面に押付けるとともに一定の速度で移動させなければならない。塔の幅方向に移動させるにはレールを配置し、このレール上を往復するシャトルを設け、このシャトルに塗装ロールや回転ブラシを保持させれば可能になる。また、レールは塔壁に密着する磁石車輪ゴンドラのフレームに取付ければ塔壁との間隔を一定に保つことができる。塔壁には溶接歪み(0~2mm)や溶接ビード(3~10mm)の凹凸があり、回転ブラシや塗装ロールの接触圧が変動する。このため、シャトルと塗装ロールの間に空気圧シリンダとサーボモータによる定押付け力調整機構を挿入する。これらの全体構想をまとめると図—2に示すようになる。



図—2 主塔塗装装置構想図

#### (5) 作業方法

塗装作業は塗膜の均一性(垂れの防止)より上方から下方に向けて進める。一方、塗装直後の塗装面は柔らかいため、次章(4章3節)に述べるゴンドラを保持する磁石車輪が通過することはできない。したがって、塗装作業は図—3に示すように、塗装ロールの塔

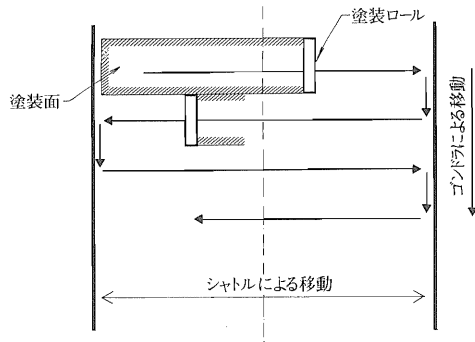


図-3 作業要領

の幅方向の移動と、 Gondolaの塗装ロール幅相当分の降下を交互に繰返して全体を塗装する。すなわち、ピルの窓拭きと同様な要領で進めることになる。

#### 4. 技術課題

##### (1) 塗装ロールの単数化

箱桁用塗装装置ではロールが進行方向に回転するナチュラル塗装で先行し、ロールが逆方向に回転するリバース塗装で後行する2連装の塗装ロールを採用した<sup>2)</sup>。両ロール間隔は50 cmであり、始末端では1本のロールの塗装のみとなるため塗膜厚が不足し、人力による増塗りが必要になるため塗装ロールの単数化が望ましい。また、塗装ロールは塗装面の凹凸に対応するため、内部に収納したスポンジゴムをゴム皮膜とプラスチック皮膜で被覆し外周に起毛材で被覆した多層構造としたが、取扱い上はゴム単層皮膜とすることが望ましい。これらの課題を解決するには、適切なゴム弾性を見極めと溶剤（トルエン、キシレン、アルコール等）に冒されないゴムが必要になる。

##### (2) 塗膜厚の均一化

ロール塗装では塗装ロール表面の塗料を塗装面に転写するため、塗装ロール表面に均一な塗膜を形成しなければならない。箱桁用の塗装装置では圧送ロールを10区画に分けた多室構造とし、各区画ごとに塗料を順次圧送して均一化を図った。しかし、箱桁用の塗装ロールは水平方向で使用しており、今回は垂直方向で使用するため塗料の偏在の増加が考えられるため、区画の細分化（多室化）が必要になる。

##### (3) 磁石車輪 Gondolaとの一体化

高さ300 mに達する鉛直面で形成される主塔への実用的な接近手段は Gondolaに限られる。しかし、通常の Gondolaは風によって揺れるため、塔壁との一定間隔や一定接触圧が必要な塗装装置を支持させること

は困難である。このため、磁石車輪によって塔壁に連続して吸着する磁石車輪 Gondolaを使用する。 Gondolaの難点は積載荷重や積載面積が制約されるため塗装装置の小型軽量化が必要になる。また、塗替え作業は回転ブラシや塗装ロールの横行動作と Gondolaの降下動作の組合せとなるため両者の制御機構の連結が必要になる。

#### 5. 室内実験

##### (1) 実験装置

塗装ロールの単数化と圧送ロールの多室化が必要であるが、これらの有効性を確認するには理論的な検討とともに実際のロールによる実験が必要になる。このため、写真-2に示すような実験装置を製作した。この装置は実機で使用する、レール、横行機構、保持機構を備えており、実機で使用する塗装ロールを装着して長さ3 m、高さ1.5 mの鋼板を塗装することができる。

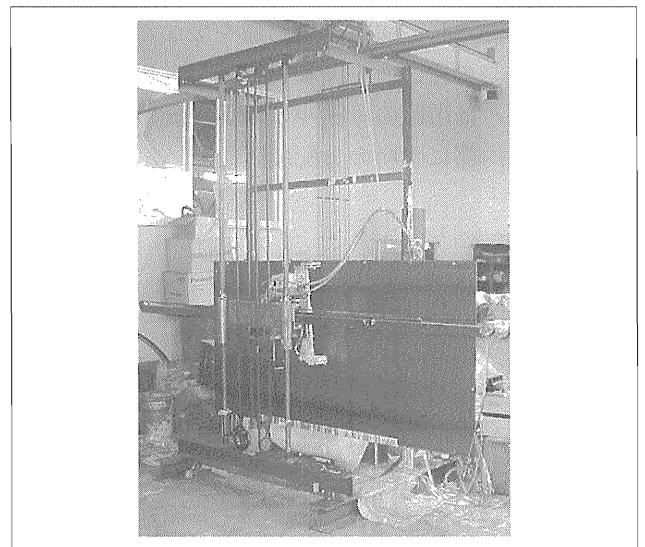


写真-2 室内実験状況

##### (2) ロール塗装のメカニズム

ロール塗装は図-4に示すように、圧送ロールと塗装ロールで構成される。ポンプで圧送ロールの各区画に送られた塗料は外周の孔から滲みでる。圧送ロール

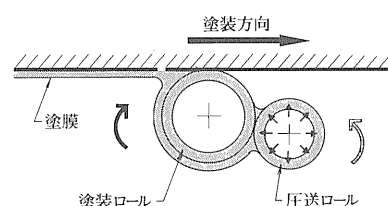


図-4 ロール塗装のメカニズム

と塗装ロールは接するとともに反対方向に回転しているため、塗料は圧送ロールと塗装ロール間で軸方向に延ばされて塗装ロールの表面に付着する。塗装ロールと塗装面は接触しているため塗装ロールの表面の塗料は塗装面に転写される。したがって塗膜厚の均一性を左右する要因は、

- ・圧送ロールからの排出状況、
- ・圧送ロールと塗装ロールの間の延ばされ状態、
- ・塗装ロールと塗装面の接触状況、

等になる。

### (3) 圧送ロール

箱桁用塗装装置の圧送ロールの姿勢は水平であり区画数は10区画であったが、今回の姿勢は鉛直になる。このため、区画数を可能な限り増やすものとし、加工可能な24区画とした。また上下方向の偏在を防止するため塗料の圧送ホースを2分岐して圧送ロールの上下から供給する機構とした。この改良により塗料は鉛直姿勢でも均等化され、上下方向の偏在は見られなくなった。さらに、端部は重塗りになるため塗料の供給孔を細くして塗料の供給量を少なくしなければならない。この圧送ロールの機構を図-5に示す。この圧送ロールは市販のロールの表面に流出孔を加工するとともに内部に塗料の分配装置を組込んだものである。

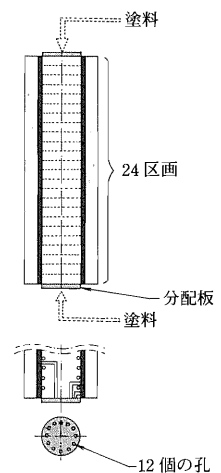


図-5 圧送ロールの構造

### (4) 塗装ロール

塗装ロールの課題は表面の被覆構造（ゴム皮膜、プラスチック皮膜、起毛材）の単純化である。最外面の起毛材は圧送ロールから排出される塗料を含み、この塗料を塗装面で排出することにより塗膜厚を均一化する機能を持つ。今回は圧送ロールの区画数を箱桁用塗装装置に比べて2倍以上の24区画に増やしているた

め均一性は向上している。またこの起毛材は塗膜内に空気を送込む作用があるため除去することが望ましい。ここでは、図-6に示すように表面は被覆ゴムのみとし、内部のスポンジゴムの弾性を変えたロールを数種類試作して塗膜の形成状況を観察して最適値を見いだす。

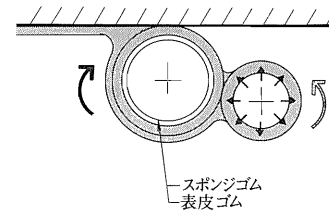


図-6 塗装ロールの構造

### (5) 実験結果

#### (a) 雨垂れ模様の発生

実験を開始したところ塗膜に雨垂れ模様（塗料が点状に転写されて垂れる）が発生した。この原因は図-7に示すように、圧送ロール表面の流出孔の穿孔時に周辺の起毛材が錐によって筆り取られ、空間（起毛材が無い）が生じたため塗料は塗装ロールとの間で延ばされることなくそのまま転写された。このため、特殊な穿孔錐を用いて再加工した結果、雨垂れ模様は消失して良好な塗装面が形成できるようになった。

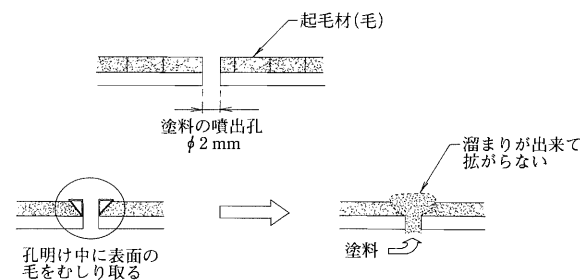


図-7 雨垂れ模様の発生原因

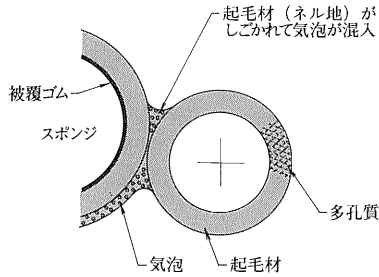
#### (b) 塗装ロールの起毛材の除去

最初に溶剤に強いゴムの選定を進めグランポール（商品名）に決定した。このゴムは耐溶剤性に優れるためプラスチック被覆を無くすことができる。

塗装ロール表面の起毛材の機能は、塗料の含有・被覆ゴムの保護、塗装面の凹凸への緩衝などである。起毛材の有無で実験したところ塗膜の出来栄は差がなく、むしろ起毛材の無い方が気泡の少ない良質な塗膜が形成されていた。起毛材の機能のうち、

- ① 塗料は塗膜厚 150  $\mu\text{m}$  程度まで被覆ゴムのみで転写できる、
- ② 材質を替えた被覆ゴムは十分な耐久性を有する、
- ③ 塗装面の凹凸は内部のスポンジの弾性で対応で

きる、  
 ことが明らかになり、以後の実験は起毛材を取外した。  
 ロール塗装の難点の一つに塗膜内に気泡を含むことが挙げられる。この原因は図—8 に示すように、圧送ロールと塗装ロール、塗装ロールと塗装面の間で起毛材がしごかれるためであり、起毛材を除去した結果、塗膜内の気泡は消失したものと考えられる。



図—8 塗膜内の気泡の発生メカニズム

(c) 始終端における垂れの発生

始点部と終端部では塗膜が厚くなり塗料が垂れる現象が生じた。この原因は、シャトルの横行の開始と停止、塗装ロールの回転と停止、塗料ポンプの作動と停止のタイミングのずれである。実験ではこれらの操作を手動で行っているため3種類の操作には数秒間の遅れが生じる。したがって、実用機では次に示すようなタイミング制御が必要になる。

- ・開始時：横行開始→ロール回転開始→ロール接触→ポンプ作動
- ・停止時：ポンプ停止→ロール離し→ロール回転停止→横行停止

(d) 塗重ね部の塗膜厚の均一化

塗装は横方向に進めるため先行塗装面と後行塗装面のラップが必要であり、塗重ね部では塗膜が厚くなる。基準塗膜厚は中塗り 30 $\mu$ m、上塗り 25 $\mu$ m であり、仮に2倍になっても品質上の問題は生じないが均一化の方が望ましい。このため圧送ロールの端部への塗料の供給孔を細くした。この措置は効果的でありラップ部の厚膜化が軽減され、均一な仕上げとなった。

6. 実橋実験

(1) 実験概要

室内実験で得られた知見を基に表—1 に示す実用機を製作して、因島大橋で機能を確認した。塗装部は塔の基部から約 40 m の範囲であり、塗装面積は約 800 m<sup>2</sup> である。

表—1 主塔塗装装置の主要仕様

要 目	仕 様
塗 装 幅	500 mm
塗 布 量	~150 g/m <sup>2</sup>
ケ レ ン 幅	500 mm
ケ レ ン 種 別	4 種
横 行 速 度	5 m/min
昇 降 速 度	7.2 m/min
電 源	200 V, 10 kVA

(2) 作業方法

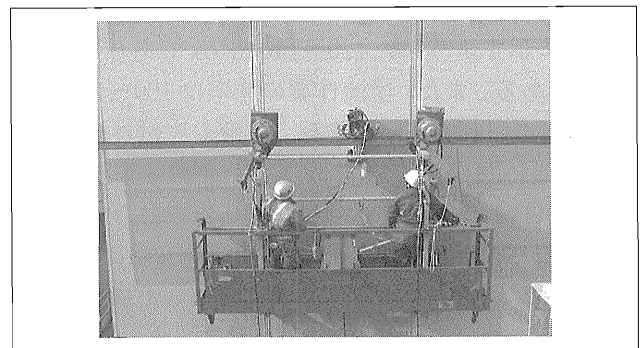
写真—3 に示すように磁石車輪ゴンドラのフレームにレールを取付け、レール上のシャトルに、素地調整では回転ブラシ、塗装では塗装ロールをセットし、床面上に集塵機や塗料ポンプを搭載すれば準備完了である。また塔壁への取付けは通常のコンドラと同様である。ゴンドラを作業開始位置まで上昇させて、磁石車輪の操舵機構によりゴンドラ本体を塔壁の中央に導く。この後に自動運転ボタンを押せば、

塗装ロールの接触→回転→横行→端部検知→塗装ロール離し→ゴンドラ降下→塗装ロール接触→横行

の一連の動作が自動的に進む。約 10 m 間隔に配置されている添接部（ボルト列）は塗装できないため、塗装ロールや回転ブラシが添接板に接する直前に自動運転を停止し手動操作で添接部を越えた後に再び自動運



写真—3 塗装装置と磁石車輪ゴンドラ



写真—4 塗装作業状況

転を進める。ゴンドラの搭乗人員は写真—4 に示すように2名であり、1名は塗装装置の運転監視、他の1名はゴンドラの運転と塗料の調査などを行う。

(3) 素地調整作業

素地調整作業は、劣化した表層の塗膜を除去するとともに、下層の健全な塗膜にアンカーパターンを形成するものである。素地調整の出来栄えの要因は回転ブラシの回転速度が支配的であり、出来栄えは光沢度計で確認する。すなわち、作業開始前に、回転速度、目視観察、光沢度を求め、作業中は適時に光沢度を計測して出来栄えを確認する。この光沢度は、素地調整前は40~50程度であるが素地調整後には15~25程度に低下する。作業中に光沢度が変動した場合は回転速度を増減する。回転ブラシは周囲を密閉したケースで覆っており、除去した塗料粉は集塵機（業務用掃除機）で吸引回収するため外部には飛散しない。

(4) 塗装作業

素地調整後に中塗り塗装（エポキシ樹脂：30μm）し、翌日（塗装間隔）に上塗り塗装（フッ素樹脂：25μm）を施工する。塗装中は適時にウェット膜厚ゲージで塗膜厚を計測して塗料ポンプの圧送速度を調整する。

塗料は、ポンプ→圧送ロール→塗装ロール→塗装面、と移動するため飛散は生じない。したがって、飛散防止用ネットなどは不要であり、開放的な環境で施工できる。

(5) 作業能率

作業能率は塗装では塗装ロール幅、素地調整では回転ブラシの幅からラップ代を減じた値に横行速度を乗じた基本能率に作業効率を乗じて求めることができる。

$$\text{塗装作業能率} = (\text{塗装ロール幅} - \text{ラップ代}) \times \text{横行速度} \times \text{作業効率}$$

(1)

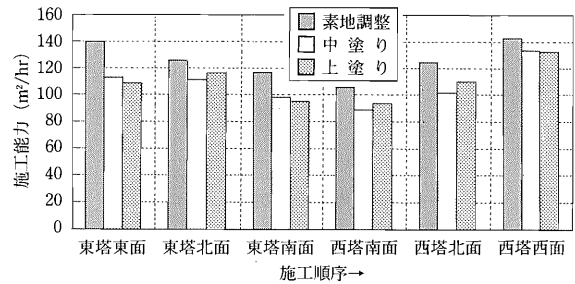
各作業日ごとに計測した素地調整作業の能率は表—2 に示すように、120~140 m<sup>2</sup>/h であり平均 130 m<sup>2</sup>/h である。また、塗装作業の能率は 100~120 m<sup>2</sup>/h であり平均 110 m<sup>2</sup>/h である。準備や片付け時間を除いた作業時間は 6 h/日 であり、いずれも目標とした 500 m<sup>2</sup>/日は十分に満足する。図—9 で得られた作業能率を基に、一般化した作業能率は算定式 (1) に示すように、塔幅やスプライス間隔によって異なるが通常の塔構造では 500 m<sup>2</sup>/日以上になる。

表—2 作業能率 (単位: m<sup>2</sup>/h)

6 m 面				
区分	東塔東	西塔西	平均	最大
素地調整	140	143	142	143
中塗り	113	134	124	134
上塗り	109	133	121	133

3 m 面						
区分	東塔北	東塔南	西塔南	西塔北	平均	最大
素地調整	126	117	106	124	118	126
中塗り	112	98	89	101	100	112
上塗り	117	95	94	110	104	117



図—9 作業能率

(6) 素地調整品質

素地調整中は適時に光沢度を計測して仕上がり状況で確認した。総計 180 の計測データは表—3 に示すように基準値の 20% に対し 13.5~20.3% の範囲にあり、平均 20.3%、変動係数 21.8% であり均一な処理がなされている。

表—3 素地調整品質

管理目標値	20%
最大値	29.7%
最小値	13.5%
平均値	20.3%
標準偏差	4.41
変動係数	21.8%

※ケレン後全 180 個のデータより

(7) 塗装品質

塗装面にあらかじめ貼付したスチールテープによっ

表—4 塗装品質

実測値及び管理目標値	機械塗装		はけ塗り (多々羅)
	中塗り	上塗り	
基準膜厚 (μm)	30.0	25.0	30.0
実測値			
最大値 (μm)	53.1	45.2	49.0
最小値 (μm)	27.0	19.3	24.0
平均値 (μm)	33.8	32.5	36.5
標準偏差	3.94	5.7	5.79
変動係数 (%)	11.7	17.6	16.0
管理目標			
最小値 > 基準膜厚 × 0.7	21.0	17.5	21.0
平均値 > 基準膜厚 × 0.9	27.0	22.5	27.0
標準偏差 < 基準膜厚 × 0.2	6.8	6.5	7.3

て計測した塗膜厚は表—4に示すとおりであり、塗装基準を満たすとともに人力塗装と同等の品質を示している。また、最初に懸念していた塗膜内の気泡はまったく見受けられない。

## 7. ま と め

今回の主塔用塗装装置は平成13年度に開発した箱桁用塗装装置で得たノウハウを結集して種々の改良を加え、主塔の塗装の機械化を実現したものであり、この開発で得られた知見を整理すると次のようになる。

- ① 箱桁用塗装装置では二組必要であった塗装ロールを一組にしても均一な塗膜を形成することができる。
- ② 圧送ロールの多室化は有効であり、鉛直面の塗装においても均一な塗膜を形成することができる。
- ③ 塗装ロール表面の起毛材を省略しても良好な塗装面を得ることができる。この起毛材を省略することにより塗膜内の気泡を大幅に減ずることができる。
- ④ 回転ブラシや塗装ロールの横行とゴンドラの降下の自動制御は有効であり、作業能率を大幅に向上させることができる。
- ⑤ 磁石車輪ゴンドラは塔壁に常に吸着するため毎秒10m程度の風速でも安定して作業することができる。
- ⑥ 作業能率は素地調整で150m<sup>2</sup>/h、中塗り・上塗り塗装で110m<sup>2</sup>/h程度であり、前後の準備・片付け時間を加味しても目標とした500m<sup>2</sup>/日は十分に実現できる。

## 8. おわりに

鋼橋の塗替え塗装の機械化は古くから望まれてきたにもかかわらず、本格的な塗替え塗装機械は平成13年度に開発した箱桁用塗装装置が初めてであった。箱桁の塗装の機械化を実現したが対象塗装面積は本四架橋全体の塗装面の5%にすぎない。また、今回開発し

た主塔用塗装装置の対象塗装面積を加えても10%にすぎず、全体的には橋頭堡を築いたにすぎない。本四架橋の塗装面積の大半はトラス桁や鋼床版が占めており、経済効果を増やすにはこれらの機械化が不可欠になる。

今後は本機の開発で得たノウハウを基にトラス部材や鋼床版の機械化に挑戦する所存である。本機の開発の着手時期は平成14年6月であり1年で完了することができた。これは、室内実験、実橋実験を担当していただいた皆さんの精力的な努力の賜であり誌上を借りてお礼を申し上げます。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 坂本光重, 政田 潔, 廣田昭次: 磁石車輪を用いたゴンドラの開発, 建設の機械化, No. 7, 1995
- 2) 谷中幸和, 坂本光重, 廣田昭次, 兼田教一: 橋梁の塗替塗装機械の開発, 土木学会論文集, pp. 41-52, No. 721/VI-57, 2002年12月

### 【筆者紹介】

坂本 光重 (さかもと みつげ)  
本州四国連絡橋公団  
保全部  
設備課長



河野 正樹 (こうの まさき)  
本州四国連絡橋公団  
第三管理局  
向島管理事務所  
施設課



土山 正巳 (つちやま まさみ)  
株式会社ブリッジ・エンジニアリング  
施設部長



秋山 和夫 (あきやま かずお)  
株式会社技術開発研究所  
代表取締役社長

