本州 四国連絡橋の規模と防食塗装について

藤 井 郁 夫*

ま え が き

本州と四国を橋で結ぼうと考えたのはいつごろからであらうか。

昭和45年7月、この架橋を実施する機関として、本州四国連絡橋公団が設立された。当公団はこれまで、建設省・日本道路公団・日本国有鉄道ならびに日本鉄道建設公団が行なった調査¹⁻³⁾のすべてを引継ぎ、さらに工事実施のための諸作業を進めている。

本文では本四架橋の概要と特に防食関係の現況について御報告したいと思う。

1. 本四架橋の概要

四国と本州を陸上交通路で直結することは、瀬戸内沿岸の人々の長い間の夢でもあった。このことは単に四国、あるいは西日本発展の基盤を造るのみならず、その効果は日本全体に及ぶと推算されている。

試みに、たとえば宇野～高松間の連絡船に乗ってみればおわかりになるであろう。瀬戸内海を東西に走る大型船の数々、そして四国と本州を直接結んで南北に走る船の多さを。昭和65年には、本四橋だけの通過量が1日当たり旅客37万人、貨物21万トン、自動車4万台と推定されている⁴⁾。(図-1)

本四架橋は次の3ルートであり、本四公団では建設・運輸両省の指示に従ってこの3ルートについて調査を進めている。

イ) 神戸～鳴門ルート——土木学会報告書⁵⁾に従ってAルートと呼ばれている。神戸から明石海峡を渡り、淡路島を通り、鳴門海峡を渡り、鳴門徳島に至る。国道28号線および鉄道を通す。

昭和47.5.1 受理
On the Honshu-Shikoku Bridges
Ikuo FUJII

* 本州四国連絡橋公団設計第2課。(現)児島調査事務所一岡山県倉敷市児島味野児島産業会館4階
東京都港区芝西久保城山町1第22森ビル6階

表-1 本四連絡橋ルート別延長・工費
(建設・運輸両省による)

ルート名		Aルート	Dルート	Eルート	合 計
延長 (<small>料</small>)	海峡部	6.9	9.5	9.9	26.3
	陸上部				
	道路	77.6	31.2	69.5	178.3
	鉄道	77	32.5	—	109.5
合 計		161.5	73.2	79.4	314.1
工費 (<small>億円</small>)	海峡部	2,452	1,747	1,013	5,212
	陸上部				
	道路	608	390	465	1,463
	鉄道	668	414	—	1,082
合 計		3,728	2,551	1,478	7,757

ロ) 児島～坂出ルート——いわゆるDルートと呼ばれている。岡山県倉敷市児島付近より島づたいに走り、香川県坂出市番ノ州に上陸する。国道30号線と鉄道を通す。

ハ) 尾道～今治ルート——いわゆるEルートで、国道317号線であり、尾道から、向島、因島、生口島、大三島、伯方島、大島を通して今治に至る。

これら3ルートの延長、工費を表-1に示す^{6,7)}。

本四架橋にとって、その技術的検討を行ない、その可能性を明らかにした土木学会報告書⁵⁾の意義は大きい。同報告書を中心に本四架橋の規模についてみると次のようである。

現在、世界最大の吊橋は米国のペラザノナローズ橋であるが、本四橋が竣功するとこれをはるかに越える規模となり、かつ世界20位までのうちの9橋までが本四橋となる。主要吊橋の塔の高さを図-2に示す。吊橋以外についても、たとえばトラス橋では現在世界最大はケベック橋のスパン548mであるが、本四では500m級のトラス橋が2橋計画されている。しかも本四橋は他国に比して水深・潮流などの自然条件がきびしい。たとえば諸外国の吊橋はほとんどが30～40m/秒程度の風速に対して設計されているが、本四橋は60～70m/秒以上の風速に

図-1 本 四 架 橋 の ル ー ト

表-2 1985 年における世界長大支間吊橋の予想

順位	橋 名	国 名	中央支間 (m)
1	明石海峡大橋	日 本	1,517
2	ハンバー橋	イギリス	1,396
3	ベラザノ・ナロウズ橋	アメリカ	1,298
4	ゴールデン・ゲート橋	"	1,280
5	マキノ橋	"	1,158
6	南備讃瀬戸大橋	日 本	1,110
7	ボスポラス橋	トルコ	1,074
8	ジョージ・ワシントン橋	アメリカ	1,067
9	サラザール橋	ポルトガル	1,013
10	来島第3大橋	日 本	1,008
11	フォース道路橋	イギリス	1,006
12	セバーン橋	"	988
13	下津井瀬戸大橋	日 本	909
14	因島大橋	"	907
15	多々羅大橋	"	887
16	北備讃瀬戸大橋	"	869
17	来島第1大橋	"	867
18	ニュー・タコマ・ナロウズ橋	アメリカ	853
19	大鳴門橋	日 本	808
20	関門橋	"	712

耐えなければならない。また日本は世界有数の地震国でもある。

ここで表-1 からわかるように、本四架橋全ルート延長 314 km のうち、いわゆる海上部は約 26 km であり、取り付け部といわれる陸上部が、道路 178 km、鉄道 110 km に及ぶ。これは名神高速道路が 180 km、新幹線大阪～岡山間が 161 km であることからその事業規模が推定されよう。

本四架橋の事業費は表-1 のように推定されている^{6,7)}。この巨額の資金は政府および関係地方公共団体の出資金と、本州四国連絡橋公団債とによって調達し、自動車通行料・鉄道利用料などで償還することとなっており、20 年～30 年前後で償還し得ると推定されている⁴⁾。

なお 45 年度および 46 年度の出資金の合計は、政府 7 億円、地方公共団体が 5 億円で、その出資地方公共団体は、大阪府・兵庫・岡山・広島・徳島・香川・愛媛・高知の各県および大阪・神戸の両市であった。

本四公団としては、現在神戸、児島および尾道に調査事務所を置き、昭和 60 年完成をめざし、48 年度には 3 ルートそれぞれ着工できるように調査を進めている。

本四公団の 46 年度予算は 57 億円であり、47 年度は 100 億円を越える。

2. 防 食 調 査

2.1 調査経過

直接に本四橋を対象とした調査はこれまで建設省土木研究所および国鉄技術研究所を中心に行なわれてきた。そのおもなものは次のとおりである。

イ) 淡路島松帆岬および鳴門市大毛島での現地暴露を中心とする各種塗装系の比較調査⁸⁾

ロ) 大毛島および神戸市垂水での現地暴露を中心とす

図-2 主要塔の高さ

る油性サビ止め-フタル酸系塗装の調査^{9,10)}

ハ) 組成・成分の明らかな塗料を用いて, 児島での現地暴露を中心とする各種塗装系および方法などの調査⁹⁾

ニ) 高松 (現在は児島) のイカダ上での現地暴露を中心とする重塗装あるいは金属被覆などの調査³⁾

ホ) 岩屋沖での現地暴露を中心とする主として海面付近の鋼材の防食調査¹¹⁾

ヘ) 現地暴露を含む鋼材の腐食疲労調査³⁻¹²⁾

本四公団発足後も, 上記両研究所に委託あるいは御指導を頂き, これらの調査を引続き進めている。

さらに, 昭和 46 年度より土木学会に委託した「本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会」内に, 塗装分科会を置き, 佐藤靖博士に主査を, 橋本達知, 蒔田実, 森芳徳の諸氏に委員をお願いして, 必要に応じて有識者の御出席をお願いしたり, 現地調査を行なうなどにより総合的な検討を行なっている。

2.2 本四橋の塗装

1) 本四架橋全体の上部工重鋼は表-3 のように推定されている^{6,7)}。このうち陸上部橋梁の塗装についてはこれまでも各方面で調査が進められているので, 以下主として海峡部上部工を対象にすることとする。

2) 架橋地点は図-1 に示すように東は明石から西は今治まで広がる。瀬戸内海は近年汚濁が著しく, しかも重化学工場が散在するため一概にはいえないが, 調査資料からみると, 垂水では亜硫酸ガスが 1.12 mg/日/1000 cm²PbO₂, モール法による海塩粒子量は 1.23 ppm/月/100 cm² であり, 雨水分析による SO₄ および Cl 降塩量

表-3 上部工鋼重 (単位 1,000 トン)

	A ルート	D ルート	E ルート	合 計
海 峡 部	228	201	226	655
陸 上 部	100	100	48	248
合 計	328	301	274	903

の全降塩量に対する比は, 児島では SO₄ が 0.16, Cl が 0.37 であった。いずれも海塩粒子の影響を受けているのは当然であるが, そのほかに, 川崎あるいは東京ほどではないが工場地帯的な大気汚染をかなり受けているといえる。

3) 現地に暴露した無塗装鋼板の重量減より推定した平均侵食深さは 2 年間で 0.2 mm, 5 年間で 0.7 mm 程度であった。試料数の多い 2 年間暴露での値では鋼材の強さ, 普通鋼, 耐候性鋼による差は認められなかった。

7.4 mm 厚鋼板を現地暴露したのちの引張強さは, 5 年間で 5~15% 減少している。(図-3)

列車のように重い荷重を繰り返して負担する橋梁部材にとっては, 鋼材の疲れ強さが非常に重要である。現地暴露をした鋼材 (φ10 mm) の疲労強さの減少率は表-4 のとおりであった。

4) 実験室内で, 鋼材を 3% 食塩水に浸しながら疲労試験をすると, 材質, 強さに関係なく一つの疲労強さの曲線になる。(図-4 破線) これに対して, 陽極的防食法

図-3 各種鋼材の引張強さ減少率

表-4 暴露試験片の疲労限 U_w (鉄道技術研究所による)

期 間 鋼 種	暴 露 前	3 カ 月		6 カ 月		1 年		2 年	
	σ_w (mg/mm ²)	σ_w (kg/mm ²)	減少率 (%)	σ_w (kg/mm ²)	減少率 (%)	σ_w (kg/mm ²)	減少率 (%)	σ_w (kg/mm ²)	減少率 (%)
SS 41 鋼	18.5	14.0	24	14.0	24	13.0	30	11.5	38
40 kg 耐候性鋼	24.0	18.0	25	16.0	33	16.0	33	15.0	37
50 kg 耐候性鋼	30.0	21.5	28	21.5	28	19.5	35	19.5	35
60 kg 調質高張力鋼 (HT 60)	34.0	22.5	34	21.5	37	21.5	37	—	—
80 kg 調質高張力鋼 (HT 80)	41.0	25.0	39	24.0	41	23.0	44	—	—

$$\text{減少率} = \frac{\text{暴露前疲労限} - \text{暴露後疲労限}}{\text{暴露前疲労限}} \times 100(\%)$$

表-6 暴露条件の差 (イカダ上での暴露)

	上 面	下 面
異常を生じたもの	18個	26個
ワレ・ハガレ	13	6
サビ	4	16

注) 試料総数 48 個 暴露開始後 17 月目

これまでの経験では溶接部や板の端面からとかくサビやすい。現地暴露試験でも日光や雨を直接受ける試験片上面よりもむしろ下面側の方に問題が多くてている。溶接で型づくり、長手方向数カ所に隔壁の入った口型部材内面の防食法をどう考えればよいのであろうか。

工程あるいは作業の単純化、能率化の点からいえるべく使用塗装系の種類が少ない方が望ましい。しかし防食の観点からの諸条件を適確には握した上で、それぞれに適した塗装系を選択すべきであろう。

8) 鋼橋の施工手順を示すと図-7 のようである。

工期としては、原板ロール後ファブリケーターで加工

図-7 鋼橋の施工手順

図-8 鋼橋の工期

図-9 塗装手順

を開始するまでに 1~2 カ月以上を要する。ファブリケーター内の工期は、これまでの実績から、加工開始後大組立終了まででまとめると図-8 のようであった。現場架設の工期は現地の条件によって大幅に変動するが、最初の部材架設を始めてから最後の高力ボルト締め終了までの期間を実績値でみると図-8 のようである。海峡部橋梁のような大規模橋梁の例は少ないが、これらの経験から塔架設に 10~15 カ月、1,000m 級の吊橋の補剛桁架設には 5~10 カ月、500m 級トラスの架設にほぼ 10~15 カ月を要すると推定される。

図-7 に示す工程のどの時点で、どこで、どれまでの防食作業を組み込むべきであろうか。これまでの普通の橋梁での標準的な例を図-9 に示す。図において (B) が現在の主流であり (A) は現在では例が少なくなってきたと思われる。

施工管理さえ適切であれば、素地調整にショットブラ

表-7 塗装下地作製方法の差による塗膜劣化状態

試験板 番号	サビ止め塗料 の種類	サビ落し	金属前 処理塗 料	サビ発生 度 鳴門 地区	サビ発生 度 明石 地区
3	鉛丹-アマニ 油ペイント	黒皮ツキ	無	2	2
4	"	サンドブラスト	"	6	6
5	"	"	有	9	7
6	含鉛サビ止メ ペイント	黒皮ツキ	無	8	9
7	"	サンドブラスト	"	9	10
8	"	"	有	10	10

注) 試験開始後 30 カ月目のデータ

スト、リン酸ピッキング、塩酸ピッキングいずれの方法を用いても差支えなく、またこの上にエッチングプライマーを塗装することは有効である(表-7)。しかしたとえ長暴型でもエッチングプライマーのままで2カ月以上現地暴露をすると、試験片ですら相当のサビ発生があった。油性サビ止め塗装のままで現地に置くと層間付着性が著しく悪かった(表-8)。試みに暴露試験片の塗膜内

図-10 塗料内部の塩素濃度の分布

部の塩素濃度を測定すると図-10 のようであり、下塗りのまま現地暴露したものには明らかに海塩粒子の影響が

表-8 暴露試験結果

項 目	対 象	鳴 門 側					垂 水 側						
		フクレ	ワ	レ	ハガレ	防食性	付着性	フクレ	ワ	レ	ハガレ	防食性	付着性
下 地 処 理	ショットブラスト	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	リン酸ピッキング	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	塩 酸 ピ ッ ク リ ン グ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
亜 鉛 面 の 塗 装	ジンクリッチ有機	○	○	×	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	ジンクリッチ無機	○	○	×	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	メ タ リ コ ン	○	○	×	○	○	○	○	△	○	○	○	○
	メ タ リ コ ン	○	○	×	○	△	○	△	○	○	○	○	○
塗 装 間 隔 サビ止メ後現地暴 露現地で中塗り、 上塗り	3月サビ止メ6月中塗り	○	△	○	○	×	○	○	△	○	○	○	△
	〃 9月 〃	○	△	○	○	×	○	○	△	○	○	○	△
	6月サビ止メ9月中塗り	○	△	○	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	〃 12月 〃	○	○	○	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	9月サビ止メ12月中塗り	○	○	×	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	〃 3月 〃	○	○	○	○	×	○	○	△	○	○	○	×
	12月サビ止メ3月中塗り	○	○	○	○	×	○	○	△	○	○	○	△
	〃 6月 〃	○	○	○	○	×	○	○	△	○	○	○	△
鋼 材 種 別	SM 40 A	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	SM 50 A	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	HT 60	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	70	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	×
	80	○	△	○	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	100	○	△	○	○	×	○	○	△	○	○	○	×

認められた。

海峡部橋梁はこれまでの常識をはるかに越える巨大寸法である。したがってロールされた鋼板もロール能力の限界大きさ（最大幅 4m, 長さ 25m, 重量 20 トン程度）が多用されるであろう。ファブリケーターから出荷される部材としては、塔部材を除き、1 部材で幅 2m, 高さ 2~3m, 長さ 20~25m, 重量 50~60 トン程度のものまで予想される。鋼床板はさらに大面積となり、塔部材となるとさらに大寸法、大重量となる。現場の架設に当たっては、一般的には部材数が少ない方が望ましい。海上作業では、1,000~2,000 トン吊りの大型クレーン船が容易に使用できる。ファブリケーターの工場能力もまたこのクレーン船の能力に合わせて向上しつつあり、工場または現場仮組場で 500~1,000 トン程度に大組みしたものを運搬、架設することも考えられる。

塗装設備、とくにメッキ槽あるいは機械による溶射などの場合を考えると、なるべく部材寸法・重量の小さいうちに作業をした方が望ましい。一方部材寸法重量が小さいうちに作業するほど、その後の移動加工の度合いが高くなり、これによるキズは避けられない。

ファブリケーターの工場は大半がいわゆる工場地帯内かまたは海岸に位置する。したがっていずれにしてもゴミなどを含み塗装環境としては悪い場所である。加えて部材が大きいだけに敷地の回転率が経済性に大きく影響する。これらのことから乾燥の速い塗料が望まれている。たとえば塩化ゴム系、ビニル系塗料などは著しく乾燥が速いが、これまでの調査からみると、なお検討の余地があると思われる。

各種鋼材について、鋼材差を意識しないでショットブラストをした上に同一塗装を行なった暴露試験結果は表-8 のようであった。

図-1 などからもわかるように鋼橋はすべて一品生産であり、かつ一橋一橋が図-6 のように複雑な、加工度の高い生産物である。したがって塗装設備もまたこれらのことを考慮する必要があり、特に自動機械化を計るときにはこれが問題である。

これらのことから、塗装は単に塗料の面だけからでなく、塗装作業あるいは鋼橋の製作、架設作業との関連を考慮しながら、必要な施工基準を設定すべきであろう。

9) 有名なゴールデンゲート橋は 1937 年に竣工している。トラス橋として世界第一位のケベック橋は 1917 年に、第二位のフォース鉄道橋は 1890 年に竣工して、今なおその使命を果たしていると聞く。これらからみても建設費の大きい長大橋は 100 年程度の寿命は考えておくべきであろう。しかも橋は船舶と異なり塗装以外の要

因で定期整備を行なうことは考えていない。建物と異なるのはすべての部材が力を受持つ構造部材であり、部分的な補修取り替えを行なう機会も少ない。

一方塗装の寿命はどの程度であろうか。周知のように塗装費、特に塗り替え塗装の費用の大きな部分は塗料費以外の足場費などを含んだ塗装作業費である。したがって若し若戸橋のように 3 年程度で塗り替えが必要であればむしろ恒久的な足場などの設備、あるいは作業チームを置く方が望ましくなる。今後ますます強化されるであろういわゆる職人の不足、労働安全性の向上の点からもしっかりした設備は必然的であろうし、またこれだけの大きな構造物であるから、比較的早い時期に局部的な補修が必要となるものだと考えた方がむしろ妥当であろう。

近年橋梁も重塗装化の方向にある。たしかに金属被覆は有効であり、たとえば始めからキズをつけて現地に暴露したのち調べた結果からみても亜鉛系の下地の上に塗装を行なったものはより良い結果を得ている。しかしその被覆金属の寿命については、JIS H 8300 あるいは JIS 9301 の解説に示されたような値であっても橋の寿命よりはるかに短い。また上記規格に示されているように、これらの金属被覆はその上に何らかの塗装をすることが望ましい。とすればこれら金属被覆上に適合した塗料は何であろうか。暴露試験結果（表-8）からも相当問題であろうと思われる。さらに作業中避けられないであろうと思われるキズの補修あるいは塗り替え時に金属被覆の処置をどう考えるべきであろうか。

一体橋梁の塗装系をどのような考え方で選択すべきであろうか。美観維持の点、補修、塗り替えなどを考え合わせて、むしろ貴重な初期投資額と建設工期を減少させるという考え方もあり得るように思える。

いうまでもなく橋梁もまたメンテナンスフリーが最も望ましい。

各種塗料、あるいは塗装系の寿命とその判定、塗り替え時の施工基準、塗装作業用設備、これらを含めた塗装費用などの明確化が望まれる。

10) 塗料の最近の進歩は著しい。一方塗料の試験方法として、現在では現地暴露試験のほかに促進試験として、ウェザオメーター、あるいは塩水噴霧試験などが行なわれているが、これら促進試験は現地暴露の結果と対比すると必ずしも有効であるとはいえない。

新しい塗料に対して速やかに適確な評価を与えることのできる試験法の開発が望まれる。

あ と が き

本文では本四架橋の現況とその塗装の問題点について

表-9 暴露試験との比較

塩水噴霧試験の成績	明 石					鳴 門				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
30時間以内に異常を生じたもの					2					3
100時間以内に異常を生じたもの			1		4			1		4
100時間以上異常の見られないもの	8	6	10	0	1	1	4	17	1	2

御紹介をした。

塗料に関連して、仕上げ色調の問題が残されている。

それがあまりにも巨大なるがゆえに、それが美しい瀬戸内の島と海を結ぶがゆえに、わが娘の花嫁姿に紅をさす-にも増しての配慮が必要であろう。

本四橋の塗装については、これまで多くの方々のご努力によって、数多い知見が得られている。しかし実用までにはなお多くの問題が残されているといわざるを得ない。

私も本四架橋を無事に、しかもより良い姿で完成させたいと念願しているが、問題はあまりにも大きい。

諸賢の積極的な御検討と、御提言をお願いする次第である。

末尾ながら本文をまとめるに当たって、佐藤博士の御忠言を得た。記して謝意としたい。

文 献

- 1) 本州四国連絡架橋調査の概要, 建設省土木研究所刊, (昭和41年10月)。
- 2) 本州四国連絡道路調査概要報告, 建設省道路局, 近畿地方建設局刊, (昭和45年3月)。
- 3) 本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会中間報告書, 日本鉄道建設公団刊, (昭和45年6月)。
- 4) 本州四国連絡橋の経済効果(中間報告), 建設省道路局, 運輸省鉄道監督局刊, (昭和45年5月)。
- 5) 本州四国建設連絡橋技術調査報告書, 土木学会刊, (昭和42年7月)。
- 6) 本州四国連絡道路の工費工期, 建設省道路局刊, (昭和44年7月)。
- 7) 本州四国連絡鉄道, 道路併用橋の工事費工期, 日本鉄道建設公団刊, (昭和43年2月)。
- 8) 今井ほか:「海峡連絡鉄道橋の塗装」, 鉄道技研報, No. 422, (1964)。
- 9) 佐藤ほか:「海洋環境の橋りょうの防錆塗装」, 鉄道技研報, No. 771, (1971)。
- 10) 本州四国連絡橋用塗料大気暴露試験報告, 土木研究所資料, No. 447, (昭和44年3月)。
- 11) 森本: 金属材料, 10, [9], (1965)。
- 12) 国広:「耐候性鋼材の大気ばくろ調査」, 土木技術資料, 11, [10], (1969)。

色 材 協 会 誌 Vol. 45 No. 11 (予告)

総 説

水溶液中における第一鉄イオン空気酸化反応……………北海道大学 田 村 紘基他

報 文

顔料—水分散系の研究(第3報)……………近畿大学 桑 原 利秀他

塗膜の加工性に関する研究(Ⅱ)

塗膜の伸びに対する付着力の影響……………大日本塗料(株) 牧 島 博 他

テーマ資料

ピグメントレジソカラー……………東洋インキ製造(株) 天満屋 恵 美

非水分散系の物理化学……………岡山大学 田 里 伊佐雄

プラスチックに関する最近の話題……………日本ゼオン(株) 神 保 康太郎

色 材 サ ロ ン

「私の失敗談」……………東京大学 岩 倉 義 男