

無塗装耐候性橋梁の適用性に関する研究

計画部	特定計画調整室	鈴木	巖
工務部	設計課	南 莊	淳
同 部	同 課	足 立	幸 郎

要 約

近年においては、鋼道路橋の塗装の維持管理の問題がクローズアップされてきている。

これに対処する方法のひとつとして、耐候性鋼材を用いた無塗装橋梁の開発を当公団において進め、昭和54年に湾岸線出島出路橋（試験橋）の建設をおこなった。本研究ではさらに、無塗装耐候性橋梁自体の成立性を検討するとともに、当公団高速道路の建設地域への適用性を検討するために、出島出路橋の追跡調査、大阪湾岸域における飛来塩分量調査及び飛来塩分量と耐候性鋼材の腐食量との関連性について検討を行ってきた。

本研究の成果を概説すれば、①出島試験橋及びそれに付随する試験片による直接暴露試験においては、良好な安定錆の形成が早期より確認され、無塗装耐候性橋梁の経年安定性が実橋において確認され、また、②大阪湾岸域における飛来塩分量と腐食量との関連性に関する検討結果から判断すれば、当公団で一番腐食環境の悪い大阪湾岸域においても無塗装耐候性橋梁の50年後の腐食減板厚は平均で0.22mm、3σのばらつきを考慮しても0.39mmであり、建設省土木研究所で示されている0.4mm/50年¹⁾の基準値を下回り、当公団の高速道路の建設予定地においては、十分無塗装耐候性橋梁の建設が可能であることが示された。

1 はじめに

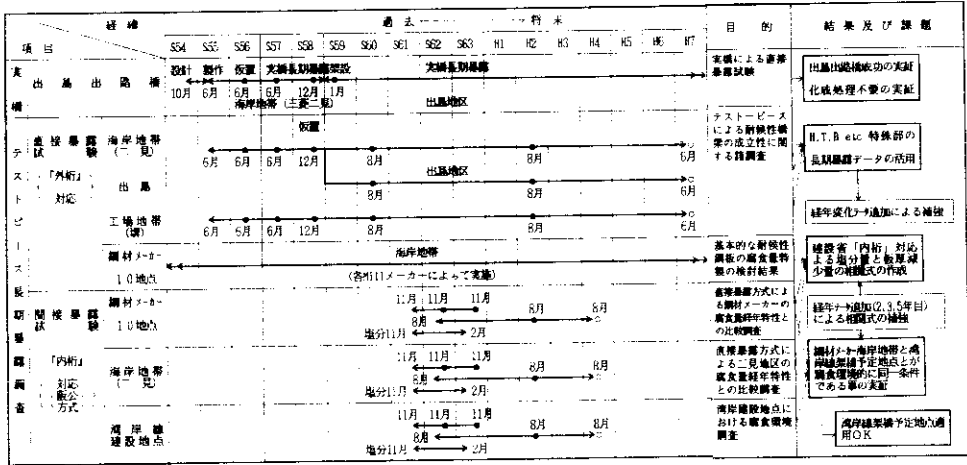
阪神高速道路のような広大なネットワークを持つ道路網において共通した問題として、維持管理の問題がある。特に、当高速道路網の上部工の大半を占める鋼桁には、腐食による経年劣化を防止するために塗装が施されているが、この塗装の寿命が維持管理上の大きな問題点となっている。

これに対処する方法の一つとして、塗装に対するメンテナンスフリー化を目指した耐候性鋼材を適用した無塗装橋梁の建設が挙げられる。当公団においては世の中に先駆けてこの問題に着目し、

昭和54年には防錆橋梁委員会を組織し、無塗装耐候性橋梁についての検討を開始した。その成果として、湾岸線出島地区において耐候性鋼材を用いた無塗装橋梁出路橋の建設を行った。

その後も、継続して無塗装耐候性橋梁に関する成立性・適用性の検討を行ってきた。その調査項目を以下に述べ、その調査工程を表-1に示す。

表一 無塗装耐候性橋梁の開発研究全体概要



1-1 無塗装耐候性橋梁及び使用鋼材の経年変化特性に関する調査(直接暴露試験)

—無塗装耐候性橋梁の成立性に関する検討—

無塗装耐候性橋梁の経年変化特性を調査するために、試験橋である出島出路橋(3径間連続非合成I桁橋)を直接的に暴露した試験その中でも多列桁における外桁部に着目した暴露試験を行い、経年変化等の調査を行った。同橋に用いた耐候性鋼材は、JIS規定(SMA-W)制定以前の阪神公団独自に制定したH-SMA41材、H-SMA50材である。

この調査においては、外観、錆の安定度、腐食減量、板厚減少量のほとんどすべての面において良好であり、耐候性鋼材の無塗装使用は実用に耐えられると推定され、無塗装耐候性橋梁の成立性が示された。

1-2 大阪湾岸域での飛来塩分量と耐候性鋼材の腐食量及びその経年変化特性に関する調査(間接暴露試験)

—無塗装耐候性橋梁の適用性に関する検討—

無塗装耐候性橋梁の建設にあたっては、その建設地点での温湿、飛来塩分量及び大気環境などの腐食環境についての、十分な環境調査を行う必要がある。建設省より示された「無塗装耐候性橋梁の設計、施工要領(案)」(昭和61年)¹⁾ によれば、

大阪湾岸地域は灰色地域(つまり無塗装橋梁架設可と不可の中間)に位置しており、腐食環境を十分調査した上で、適用の可否を判断するように指導されている。

また、前出の無塗装耐候性橋梁の成立性の調査においては、直接暴露試験つまり多列桁における外桁部に対応した試験を行ってきた。しかし、腐食環境としては塩分を含んだ空気流の滞留の考えられる内桁部の方が腐食環境が厳しいと考えられる。

従って、ここでは、湾岸線建設地点における、飛来塩分量と耐候性鋼材試験片の多列桁の内桁部に対応する間接暴露試験による腐食量との関連性を調査し、当公団で一番腐食環境の悪い湾岸線建設地点における、無塗装耐候性橋梁の適用性について検討をおこなった。本結果によれば、湾岸線建設地での、飛来塩分量から50年後の腐食量を推定する限りにおいては、3σのばらつきを考慮しても0.39mmの板厚減少でおさまり、建設省土木研究所で示されている0.4mm/50年²⁾の基準値を下回ることが示された。

2 無塗装耐候性橋梁及び使用鋼材の経年変化特性に関する調査(直接暴露試験)

2-1 概要

出島出路橋の追跡調査の主目的はH-SMA41材およびH-SMA50材（昭和54年阪神公団耐候性鋼材規格）の耐候性能を検討し、無塗装耐候性橋梁の成立性を検討することにある。このような試験目的に対して最も精度の良い方法は、実験橋の部材からその一部を採取して試験を行うことであるが、実質上この方法は不可能である。従って、腐食量等の基本的な耐候性鋼材の性能の調査以外は、実験橋に使用した鋼材と同一の鋼材による試験片を別途製作して、これを直接暴露試験（外桁部に対応）することによって追跡調査を行うこととした。出島出路橋については製作完了後、海岸地帯（二見地区）での3年間の仮置きによる暴露期間を含み15年間の追跡調査を行うものである。また、海岸地帯（二見地区）、工場地帯（堺地区）にも試験片を暴露して、暴露試験後1年、3年、5年、10年、および15年後に腐食量測定等の試験を行うこととした。

ここでは、暴露後10年間までの調査結果について報告を行う。

2-2 調査項目および調査要領

追跡調査項目は外観調査、板厚測定、表面粗度測定及びフェロキシル試験とした。また、各試験片の形状は図-1に示すとおりである。また、こ

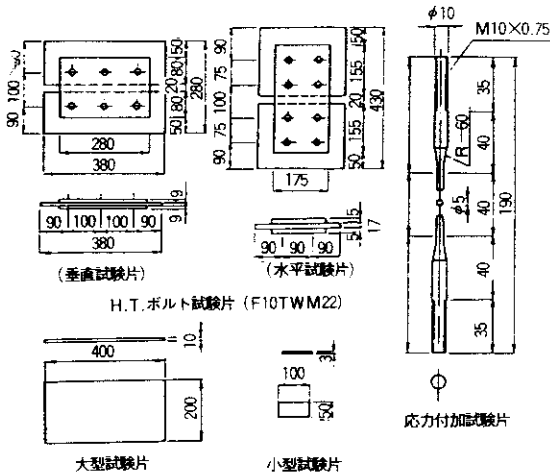


図-1 試験片形状

これらの試験片は海岸地帯（二見地区）および工場地帯（堺地区）の試験場所それぞれ設置された暴露台に取付けられたものと、出島出路橋への取付けられたものがあり、これらの暴露条件を各試験片毎にまとめると表-2に示すようになる。なお、一部の試験片には、出島出路橋でそうであったように、さび安定化处理（化成処理）を施し、その効果についても調査した。

表-2 暴露試験条件

試験片種類	暴露試験			表面状態	
	場所	姿勢	無塗装	化成処理	
小型試験片	出島出路橋	桁外側	水平	○	○
		桁内側	水平		
		東面	垂直		
	西面	垂直			
工場地帯（堺）	南向35°	○	○		
	海岸地帯（二見）	南向35°	○	○	
大型試験片	工場地帯（堺）	南向35°	○	○	
	海岸地帯（二見）	南向35°	○	○	
H.T.ボルト 継手試験片	出島出路橋	桁内側	水平	○	○
			垂直		
	工場地帯（大阪）	水平	○	○	
		垂直			
海岸地帯（二見）	水平	○	○		
	垂直				
応力負荷試験片	出島出路橋	(負荷応力なし) ①応力負荷なし ②1.0σ _y ③0.6σ _y	垂直	○	---

2-3 調査結果

(1) 部位別板厚減少量特性

出島出路橋における、直接暴露試験結果のうち、H-SMA41,50材の腐食量の平均値を部位別にまとめたものが、図-2である。H-SMA材の腐食傾向は、年月を経る毎に、垂直材及び水平材においても腐食速度が低下する傾向にある。また、水平材の腐食量は垂直材のその1.5倍程度となる傾向にある。これは、垂直材よりも水平材の方が湿潤状態が長い為、初期錆量が大きかったからと考えられる。また、水平材において桁の内外に着目すれば、初年度の腐食量に大きな差異があるものの、その後の腐食速度はほぼ同程度であることがわかった。現時点においての桁内

側の腐食量は、外側の約60%程度である。

(2)設置場所別板厚減少量特性

工場地帯（堺地区）、湾岸地帯（二見地区）別に板厚減少量（H-SMA41,50材を平均）特性をまとめたものが図-3である。明らかに湾岸地帯の方が工場地帯に比べ腐食量が大きいことがわかる。しかし、飛来塩分量そのものには、(9)で述べるが差はみられなかった。

(3)材質別板厚減少量特性

当時のJIS規格SM50,SMA50,及び阪神公団規格H-SMA50材における、材質毎の腐食量特性の比較をおこなったのが図-4である。H-SMA50材は、当時のSM50及びSMA50材よりも腐食量は小さい傾向にあることがみられた。

(4)応力付加状態における腐食量特性

付加応力に着目した結果を図-5に示す。これによれば、応力が大きい場合は、腐食量が増加する傾向にあった。また、外観的には、はくりし易い粗い錆が厚く付着する傾向がみられた。

(5)さび安定化処理材の効果

表面粗度の面から考察すると、さび安定化処理材は、鋼材自体の表面粗さは試験前の状態とほとんど変化はみられず、良好な錆の進行がみられた。しかし、一方、無塗装鋼材においても、鋼種、暴露条件による差は特に認

められなく、全体的に見ると孔食係数は2年後付近で最大となるが、その以降はほぼ一定の値となっており、腐食は全面腐食の形で進行していく傾向がみられ、特別なさび安定化処理を施さずとも、良好な安定錆を生成することが可能であることが示された。

(6)HTボルト添接部の状態

HTボルト継手の添接部においては、重ね合わせ部からの雨水の侵入が見られ、この付近を中心にさびが薄く発生している様子が観察されたが、経年後もこの傾向に変化はなく、添接部から大きな腐食が発生する様子はみられなかった。

(7)さび安定度

フェロキシル試験の結果をみれば、無塗装鋼材では、若干のばらつきはあるものの全体的に見ると、海岸地帯（二見）の試験片の方が工場地帯（大阪）のものより斑点数はやや多いが、経年的には減少する傾向が見られ、鋼種、暴露条件による差は認められなかった。また、さび安定化処理材の皮膜は健全であった。また、出島出路橋のフェロキシル試験は、暴露後3年目に行った結果、桁の腹板より、フランジ下面の方がどちらかといえば良好な結果を示していた。

8)出島出路橋の付着塩分量測定

暴露後3年目に測定した結果によれば、付

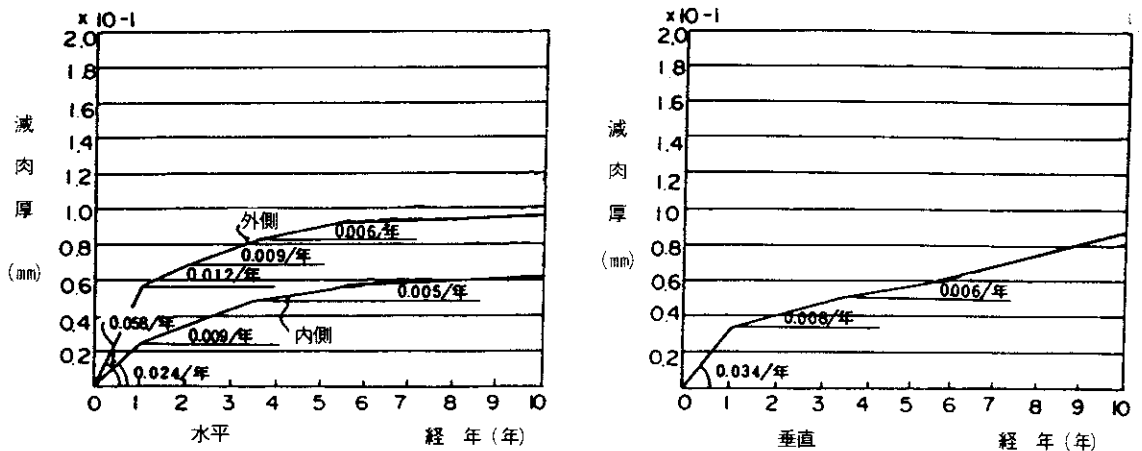


図-2 出島出路橋における部位別板厚減少量特性

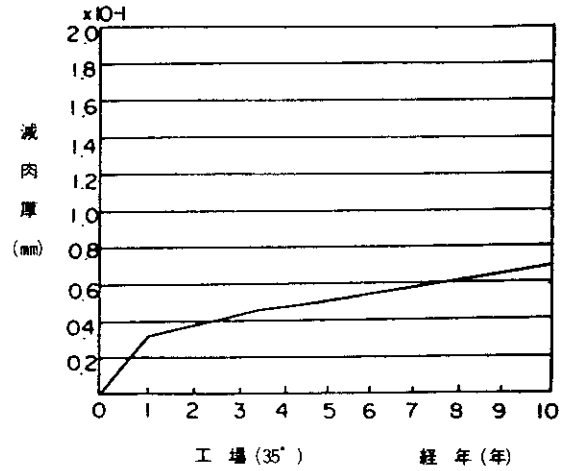
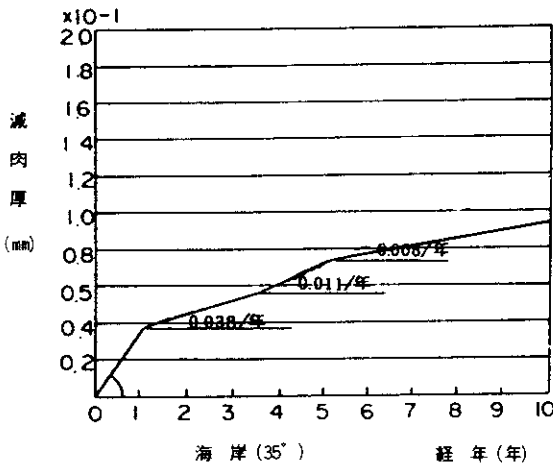


図-3 設置場所別板厚下減少量特性

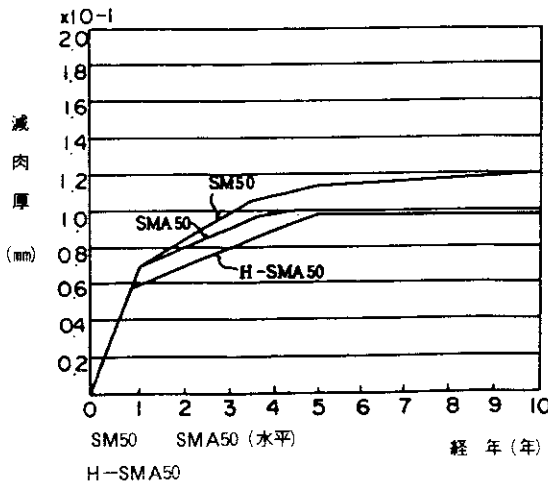


図-4 材質別板厚減少量特性

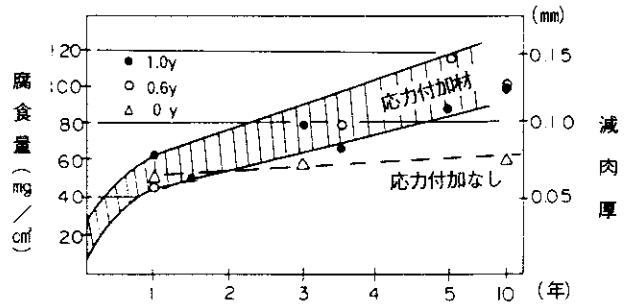


図-5 応力付加試験片の腐食量の経年変化

着塩分量は、桁の外側面に比べて内側面の方が、また腹板よりも下部水平フランジの方が著しく多くなる傾向にあった。

⑨ 大気中の塩分測定

海岸地帯（二見）と工業地帯（大阪）の差は認められず、また3年目と5年目の差もほとんどなく $1 \text{ mg} \cdot \text{cl} / 100 \text{ cm}^2 / \text{月}$ 前後であった。

2-4 考察

無塗装耐候性橋梁の出島出路橋に関しては、3年間の仮置、および引続き出島地区での架設後の

本橋の状況、また、海岸地帯（二見地区）、工場地帯（堺地区）における、試験片による直接暴露試験結果などより判断して、外見、さびの安定度、板厚減少量などは、すべての面で良好であり、無塗装耐候性橋梁は十分実用に耐えられることが示された。また、特殊なさび安定化処理を施さずとも、経年後の腐食特性にはそれほど影響しないことも示された。そこで、阪神高速道路建設予定地のうち、最も腐食条件の悪い湾岸線地域における、無塗装耐候性橋梁の適用性について、次章において、検討することとする。

3 大阪湾岸域での飛来塩分量と耐候性鋼材の腐食量との関係に関する調査 (間接暴露試験)

3-1 概要

無塗装耐候性橋梁の計画に際しては、事前調査を十分に実施し、耐候性鋼材の無塗装使用の適否を判断しなければならない。

無塗装耐候性鋼材橋梁の適否判定に関する事前調査としては、テストピースによる大気暴露試験がより確実な方法としてあげられるが、新規に暴露調査を実施し適用性を判断することは、時間の面から困難である。そのために、鋼材の耐候性に関する各種環境因子と腐食量との関係をあらかじめおおまかに評価しておき、無塗装耐候性橋梁の建設予定地点における環境因子を測定することによって、その適否を判断することが有力な方法として考えられる。

ここでは、環境因子の中で、耐候性に一番影響を与える飛来塩分量と腐食量との関係を、阪神公団の道路建設予定地のなかで、一番腐食環境の厳しい湾岸線建設地点、特に構造部位的にも腐食環境の悪い多列桁の中桁部に着目 (間接暴露試験) した評価をおこない、湾岸線建設地点における50年後の腐食量の検討をおこなった。なお、飛来塩分量と腐食量との関係については、阪神公団独自の腐食環境の悪い内桁部分に対応した暴露環境を

設定して調査を行った。

3-2 環境因子と腐食量との関係に関する過去の研究

建設省土木研究所による土研法による飛来塩分量及び亜硫酸ガス濃度と腐食量の関係²⁾を示したものが、図-6、7である。

これから、塩分量と腐食量に関しては相関関係が高く、亜硫酸ガス濃度と腐食量には相関関係が低いことがわかる。

したがって、耐候性に対する各種環境因子の代表として、塩分量を事前調査項目とするのが妥当であることがわかる。そこで、ここでは飛来塩分量によって腐食量の経年変化量の推定を行うことを考えることとした。

3-3 飛来塩分量と腐食量との関係の推定方法

建設省土木研究所の研究¹⁾によると、『耐候性鋼材の無塗装使用は、耐用年数50年後の片面当りの推定腐食量が0.4mm以下であれば適用可能と考える。』とされている。

ここでは、湾岸線建設地点での塩分量を事前計測し、その結果と関連付けてその地点での耐候性鋼材を無塗装使用した場合の50年後の板厚減少量 (腐食量) を推定できる方法を見出し、当公団建設地点での耐候性鋼材無塗装使用の適否判定を容易に行えるよう検討を行った。

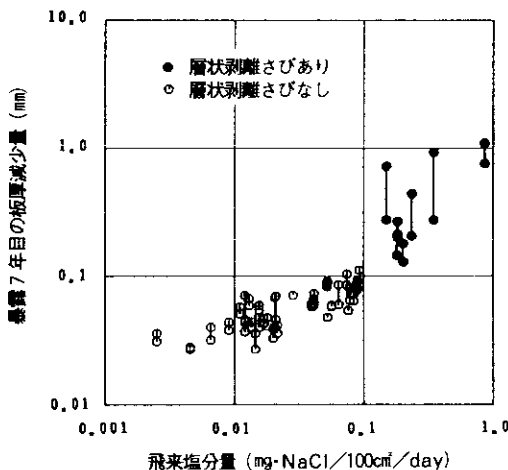


図-6 飛来塩分量と暴露7年目の板厚減少量の関係

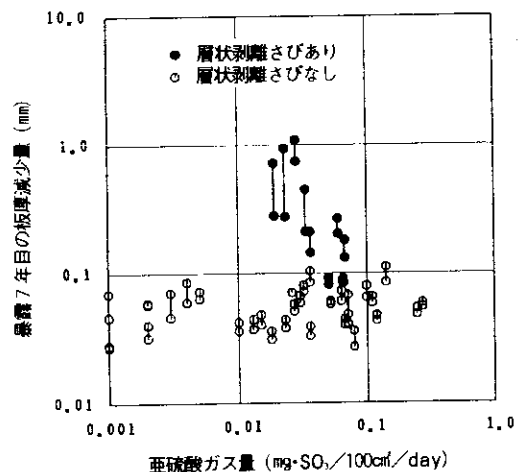


図-7 亜硫酸ガス量と暴露7年目の板厚減少量の関係

関連する二見地区とを対象に、阪神公団間接暴露試験要領により飛来塩分量を測定し、さらに腐食減少量を改めて測定した。表-3に場所の一覧を示す。

測定期間は、塩分計測は昭和61年11月～昭和63年2月の期間、腐食減量などの長期暴露試験は、昭和62年11月よりの1・2・3年後のデータを始め、5年後までを予定している。

表-3 鋼材メーカーでの試験箇所

メーカー	テ-クNo	地区	場 所
新日本製鉄	2	光	山口県光市 寮内地上
	4	広畑	広畑製鉄所 岐研屋上
	7	戸畑	八幡製鉄所 構内屋上
	9	室蘭	室蘭製鉄所 構内屋上
川崎製鉄	24	千葉	川崎千葉製鉄所 岸壁
神戸製鋼所	26	神戸	神戸製鋼所 構内屋上
	27	尼崎	神戸製鋼所 研究所 屋上
	29	東京	神戸製鋼所 南品川寮 屋上
住友金属	31	尼崎	尼崎総合技術研究所 屋上
三菱重工 (出島橋)		二見	三菱神戸造船二見工場構内

(2)架橋予定地点での間接暴露試験

湾岸線建設地点のうち阪神地区で12点、堺・泉南地区で7点を選び、橋梁模型による飛来塩分量、腐食減少量の測定を行った。測定箇所を図-10に示す。測定期間は、(1)と同じである。

3-5 調査結果及び考察

(1)飛来塩分量

今回の阪神公団方式による、飛来塩分量の計測においては、土研の全国調査結果と比較してみると、若干高い塩分量の値を示す傾向がみられた(表-4)。これは、両者の暴露条件の相違によるものと考えられる。しかし、以後、このデータで、耐候性橋梁の適否を評価することは安全側となるため支障は無いと

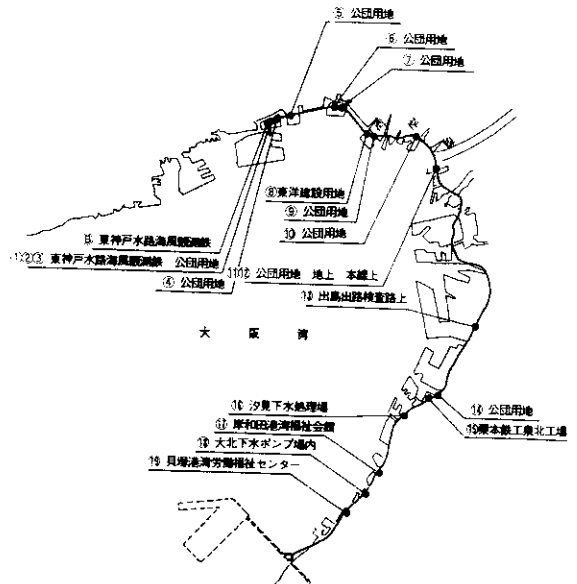


図-10 長期暴露試験測定地点位置図(湾岸線)

表-4 塩分量、土研データと阪神公団との比較
塩分量 (HaClmg/100cx2・D)

土研データ			阪神公団データ		
No.	塩分量	環境条件	No.	塩分量	環境条件
36	0.034	北九州市 工業地帯	7	0.38	戸畑 北九州(工業地帯)
23	0.152	大阪市 工業地帯	26	0.15	神戸
			27	0.31	尼崎
			31	0.16	尼崎
			二見	0.17	二見
			湾岸線(平均)	0.24	湾岸線
27	0.105	岡山市 都市部	2	0.16	光 瀬戸内
28	0.041	倉敷市 工業地帯	4	0.19	広畑 中西部
9	0.079	大宮市 出園部	24	0.29	千葉
10	0.185	東京湾 工業地帯	29	0.27	東京 東京湾
11	0.027	横浜市 都市部			
			9	0.49	室蘭 北海道

考えられる。

図-11では、土研判定と塩分量との関係、阪神公団方式による湾岸線各地点の塩分量ヒストグラムを示す。大阪湾岸域においては、一見土研判定の灰色ゾーンに位置しているように見えるが、土研データよりも高い塩分量を与える傾向からすると、今回の鋼材メーカーおよび湾岸線地域においては、土研判定の白つまり無塗装耐候性橋梁適用可能地域であるような考察がなされ、現在大阪地域が灰色判

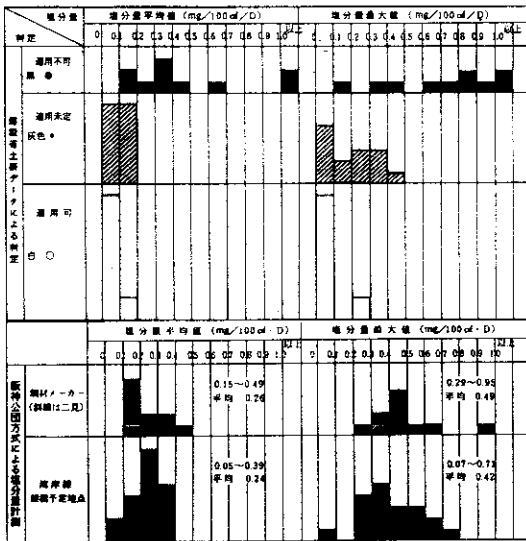


図-11 塩分量ヒストグラムと土研判定

定になっているのと少し違った結果が得られた。

(2) 塩分量と腐食量との相関性

1) 過去の各鋼材メーカーによる直接暴露試験の結果を、塩分量、腐食量で整理したのが、図-12である。塩分量 (max) と腐食量とは相関関係があり、特に大阪湾岸ではその傾向が顕著であることが図-12よりわかる。

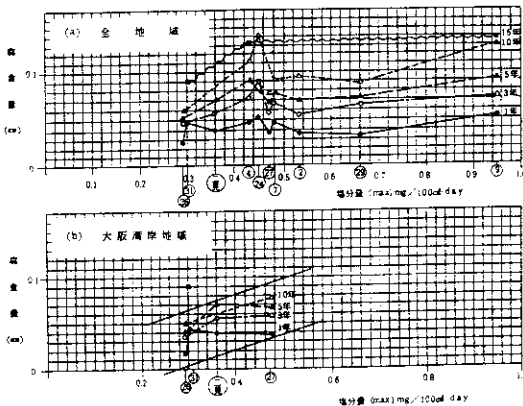


図-12 鋼材メーカーでの塩分量 (MAX) と腐食量との関係

2) 鋼材メーカーでの1年間の阪神公団方式による暴露試験後の塩分量と腐食量の関係をプロットしたものが図-13である。塩分量と腐食量の間には相関性が認められることから、鋼材の初期腐食には環境中の海塩粒子の量の多少が腐食量に影響を及ぼすことが、認められた。

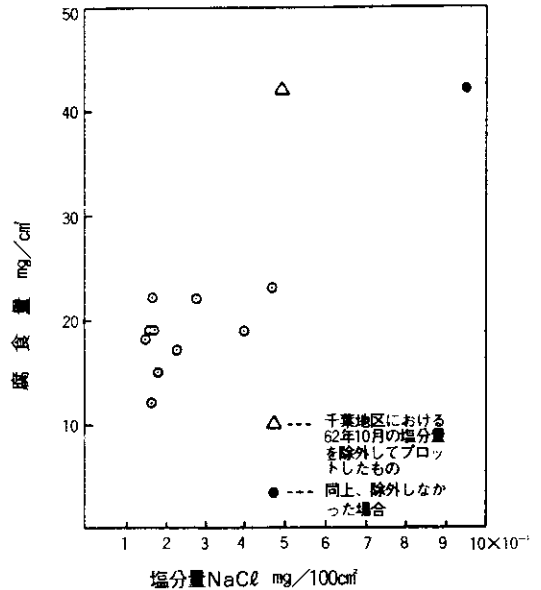


図-13 鋼材メーカー1年間暴露試験後の腐食量と塩分量の関係

(3) 腐食量の経年変化

さらに、腐食量の経年変化に着目した、阪神公団方式の測定法で測定した大阪湾岸域での結果と、土研測定結果とを比較したものを図-14に示す。湾岸線地域は1~3年目のデータによれば、土研判定の白と灰色の間で白に近い状況にあることがわかる。

腐食量と塩分量とが強い相関にあるとして設定した〔腐食量 (mg) / 塩分量 (max) (mg/cnf/day)〕という量の経年変化曲線を図-15に示す。これによれば、鋼材メーカー (海岸地域) の直接暴露試験によるデータと、今回の湾岸線地域の阪神公団方式の間接暴露試験によるデータとの間には、差は見られず、

全国各地の海岸地帯の鋼材メーカーでの直接暴露試験結果による腐食量経年化特性は、そのまま、大阪湾岸における腐食量の経年変化特性として利用してよいことが示唆された。

また、一方では、鋼材メーカーおよび二見では、橋梁外桁に対応する暴露試験（直接暴露試験）と橋梁内桁に対応する暴露試験（阪神公団方式間接暴露試験）とを行っている。両者を図-16に比較するが、両者とも1、2、3年目のデータから見れば大差なく、間接暴露試験結果の方が腐食曲線が低くスタートしている。したがって直接暴露試験データによる腐食量経年変化特性をそのまま大阪湾岸域に適用しても十分安全側に評価できることが示された。

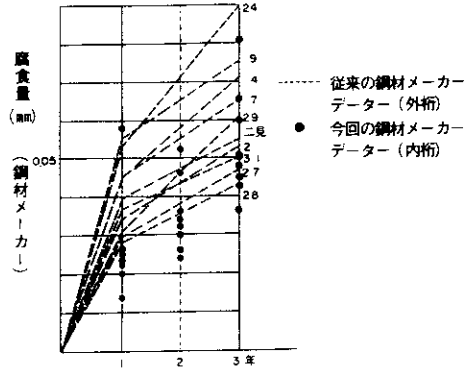


図-16 鋼材メーカーデータの暴露環境の差

3-6 板厚減少量の推定

前述までの考察をもとに、鋼材メーカーでの直接暴露試験結果を使用して将来の板厚減少量推定方式を下記のように作成し、50年後の板厚減少量を推定することを試みた。

$$Y = \frac{\delta}{S_{\max}}$$

とTの関係を両対数紙にプロットしてみると、図-17となる。

ここに、T：年数

δ ：腐食量 (mm)

S_{\max} ：1箇月間放置により得られた値を日平均にて表したガーゼ法による塩分量 (mg/100cm²/day) で年間を通じての最大値を与える月の値

log Yとlog Tとを直線回帰し、腐食量の平均値及び2 σ 、3 σ における腐食量推定式を推定すると次式のようになる。

$$\text{平均値} \quad : \quad \delta = S_{\max} \cdot T^{0.31} / 10.71$$

$$\text{平均値} + 2\sigma \quad : \quad \delta = S_{\max} \cdot T^{0.29} / 6.45$$

$$\text{平均値} + 3\sigma \quad : \quad \delta = S_{\max} \cdot T^{0.28} / 5.39$$

よって、湾岸線地域での塩分量最大観測地点〔 $S_{\max} = 0.71$ (mg/100cm²/day)〕での50年後の推定板厚減少量は

$$\delta_{50} = \begin{cases} \text{平均値} & 0.22\text{mm} \\ \text{平均値} + 2\sigma & 0.34\text{mm} \\ \text{平均値} + 3\sigma & 0.39\text{mm} \end{cases}$$

と推定することができる。

以上の考察によれば、ある程度のバラツキを考

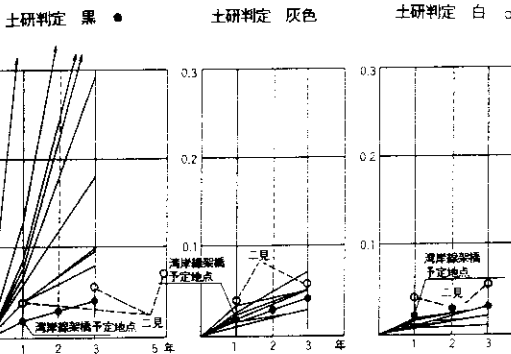


図-14 腐食量の経年変化と土研判定

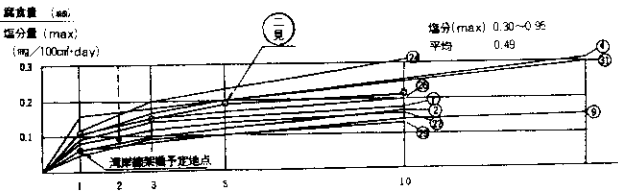


図-15 〔腐食量/塩分量(MAX)〕の経年変化曲線

慮したとしても、土研の目安としている $\delta_{s0} = 0.40\text{mm}$ 以下にすべての湾岸線地域つまり全ての阪神高速道路の建設地点において、無塗装耐候性橋梁の建設が可能であることが示された。

4 おわりに

以上のように、出島出路橋による実橋暴露試験による無塗装耐候性橋梁そのものの成立性、および、無塗装耐候性橋梁の阪神高速道路建設地点における適用性について論じてきた。今回の検討結果において、成立性及び適用性ともクリアーすることが示されたわけである。これまで、無塗装耐候性橋梁は、メンテナンスフリーを目指して開発されてきたが、時代とともにメンテナンスレス構造物としての位置付けが現在ではなされてきているように思われる。しかし、無塗装耐候性橋梁自体のメンテナンスに関する議論については、まだ確立したものがなく、今後この点についての検討を深めていく必要がある。

最後に、本研究の遂行に関して、貴重なご意見をいただいた、当公団技術審議会鋼構造分科会の諸先生方に感謝いたします。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所；「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書（Ⅷ）」：無塗装耐候性橋梁の設計施工要領（案），昭和61年3月
- 2) 建設省土木研究所；「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書（Ⅷ）」：暴露試験片の写真集，平成元年12月

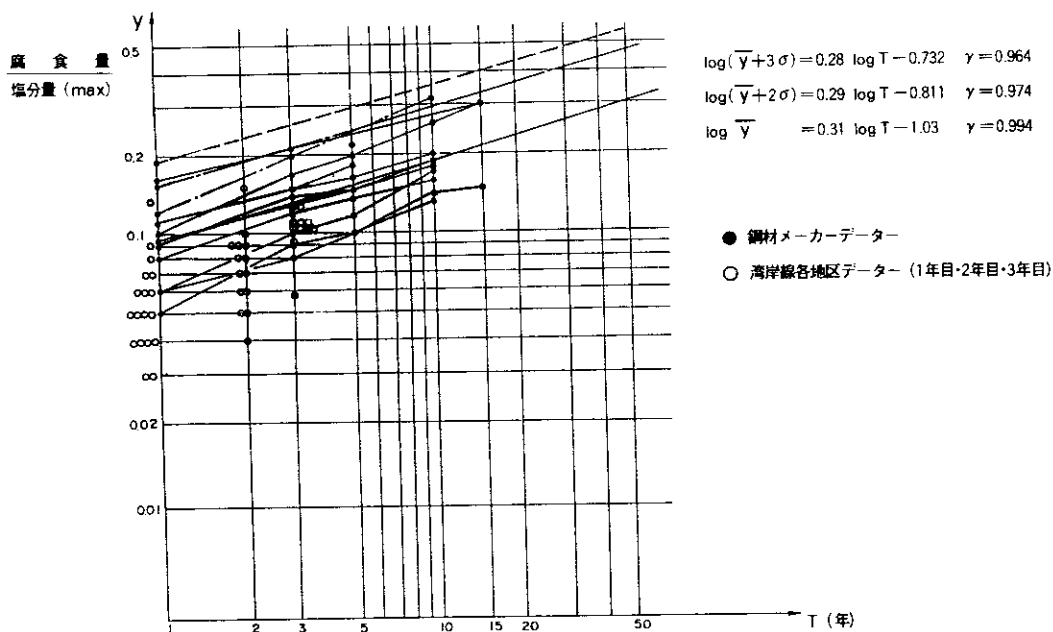


図-17 板厚減少量推定