

第2章 防錆・防食手法による長寿命化手法の提案

第2章 防錆・防食手法による長寿命化手法の提案 目次

§ 1.	はじめに	2-1
1-1.	背景	2-1
1-2.	提案のコンセプト	2-3
1-3.	検討内容	2-4
§ 2.	LCC 評価による提案シナリオの有用性について	2-5
2-1.	LCC 評価における前提条件の設定	2-5
2-1-1.	鋼道路橋の防食に関する技術解説書の概要	2-5
2-1-2.	現状の塗装維持管理費用算出における前提条件	2-6
2-1-3.	提案シナリオの塗装維持管理費用算出における前提条件	2-6
2-2.	提案シナリオの LCC 評価	2-8
2-2-1.	概要	2-8
2-2-2.	LCC 検証用モデル橋梁	2-8
2-2-3.	塗装塗替えシナリオ	2-9
2-2-4.	LCC 計算条件	2-9
2-2-5.	LCC 計算結果	2-10
2-2-6.	LCC 検討結果	2-12
§ 3.	複合サイクル促進試験による点検時塗装の適用性検討	2-13
3-1.	複合サイクル促進試験の目的	2-13
3-2.	実施内容	2-14
3-2-1.	塗装仕様の要求性能	2-14
3-2-2.	サイクル試験の条件設定	2-15
3-2-3.	試験体の条件設定	2-17
3-2-4.	計測項目	2-22
3-2-5.	実施工程	2-26
3-3.	試験結果	2-27
3-3-1.	試験体の外観	2-27
3-3-2.	重量測定結果	2-36
3-3-3.	膜厚測定結果	2-38
3-3-4.	付着力測定結果	2-39
3-3-5.	画像解析結果	2-41
3-3-6.	3次元形状計測結果	2-45
3-4.	考察	2-51
§ 4.	実橋による点検時塗装の施工性確認	2-54
4-1.	目的	2-54
4-2.	対象橋梁の概要	2-54
4-2-1.	諸元	2-54
4-2-2.	点検結果	2-55
4-3.	試験施工概要	2-56
4-3-1.	使用材料	2-56

4-3-2. 塗装範囲	2-56
4-3-3. 塗装方法	2-56
4-3-4. 作業環境	2-56
4-3-5. 塗装状況	2-57
4-4. 実施後状況	2-58
4-4-1. 塗装面外観	2-58
4-4-2. 膜厚	2-58
4-5. 考察	2-59
4-5-1. 事前作業の注意点	2-59
4-5-2. 作業時の注意点	2-59
4-5-3. 点検時塗装の施工性	2-59
§ 5. まとめと今後の課題	2-61
5-1. 検討項目のまとめ	2-61
5-2. 今後の課題	2-61
第 2 章の参考文献	2-62

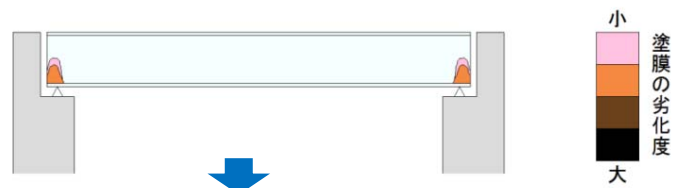
§ 1. はじめに

1-1. 背景

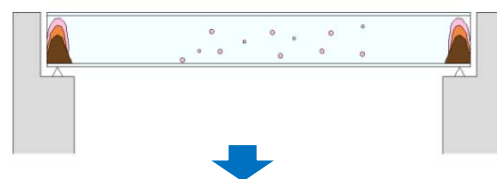
今日まで生活維持向上のために数多くの橋梁が架けられ、地域にはなくてはならない存在になっている。そのため、損傷や架替えなどにより機能が失われることは、生活環境への負担を大きくする。塗装橋梁の損傷原因は、腐食による劣化の割合は多いが、塗替えを適切に行うことで耐久性を維持できることは、100 年を越す寿命を保っている橋梁が実存することから証明できる。しかし、高度成長期に集中的に架けられた多くの橋梁は、経年劣化に合わせて集中的な維持管理対策を講じことになるが、財源の問題などにより著しい損傷がない橋梁の対策は先延ばしされやすく、地方自治体の管理する橋梁においては、足場や交通規制等で費用が嵩む塗装塗替えが行われずに放置されているものも多く見られる。

また、塗装塗替え方式には、鋼道路橋防食便覧¹⁾（以下：防食便覧）において「全面塗替え塗装」と「部分塗替え塗装」があるが、橋梁全体の劣化状態を評価として全面塗替えを基本的なシナリオとする傾向が強い。しかし、塗装橋梁の塗膜は、構造や地域特性により、劣化速度が異なることが知られており、JSSC テクニカルレポート No45 鋼橋塗膜の評価技術²⁾によれば、桁端部の劣化は腹板外面に比べて2倍の劣化速度となっている。そのため、劣化が先行している桁端部では、局部的な腐食がさらに進行することがあり、腐食による損傷を助長し橋梁自体の耐用年数を短くしている。

①桁端部において塗膜が劣化



②支間中央部においても一部劣化が発生、桁端部の劣化は進行



③橋梁全体に劣化が分布、桁端部はさらに劣化が進行

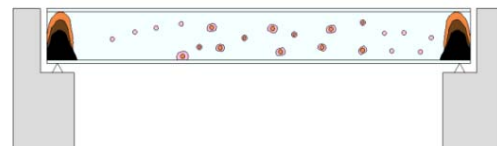


図 1-1 塗装橋梁の劣化進行イメージ

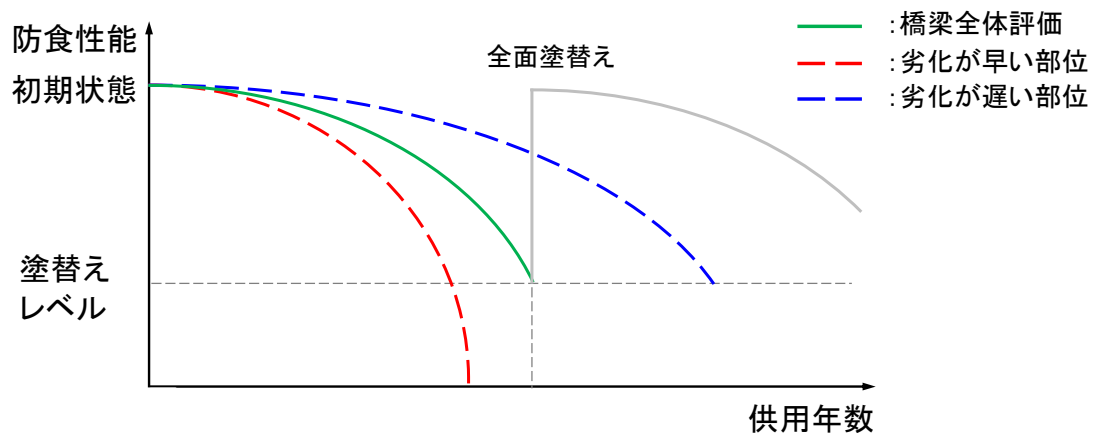


図 1-2 全面塗替え塗装時の劣化状態



劣化の早い部位
(桁端部の腐食事例)



劣化の遅い部位
(桁中間部の腐食事例)

図 1-3 鋼橋の損傷事例

一方，部分塗替え塗装は，桁端部などの劣化進行が早い部位を対象に塗装し，桁の中間部などの劣化進行の遅い部位の塗替えを延長することで，橋梁全体の健全性を平準化して全面塗替え時期を伸ばすことが可能である．さらに，全面塗替え塗装より安い費用で，桁端部などの構造上重要な部位の防食性能を回復し安全性を確保でき，費用対効果は大きい．しかしながら，積極的な採用はあまり見られていない．

1-2. 提案のコンセプト

部分塗替え塗装は、塗装塗替えにおいて有効性が高いが、桁中間部などの劣化が遅い部位については放置することになるため、橋梁全体としては劣化が進行してしまうことが、積極的に採用されていない一因と考えられる。そこで、桁中間部に応急的な補修塗装を加えることで、橋梁全体に対応した防食方法の提案を試る。

部分塗替え塗装と応急的な補修塗装を組み合わせた塗替え手法の劣化曲線のイメージを図 1-4 に記す。桁端部などの劣化が早い部位が、塗替えレベルに達した時点で部分塗替え塗装を行い、最も劣化が進行している部位の防食性能を確保することで、橋梁全体の劣化曲線が若干回復して立ち上がる。さらに、劣化がそれほど進んでいない部位の軽微な腐食部に、応急的な補修塗装をすることで、橋梁全体の劣化部位が少なくなり、劣化曲線の傾きを緩くすることができる。結果として、部分塗替えによる回復と応急塗装による塗膜劣化の緩和で、橋梁全体の劣化進行を緩やかにすることになり、通常の全面塗替えに比べ塗替え時期を延伸できる。

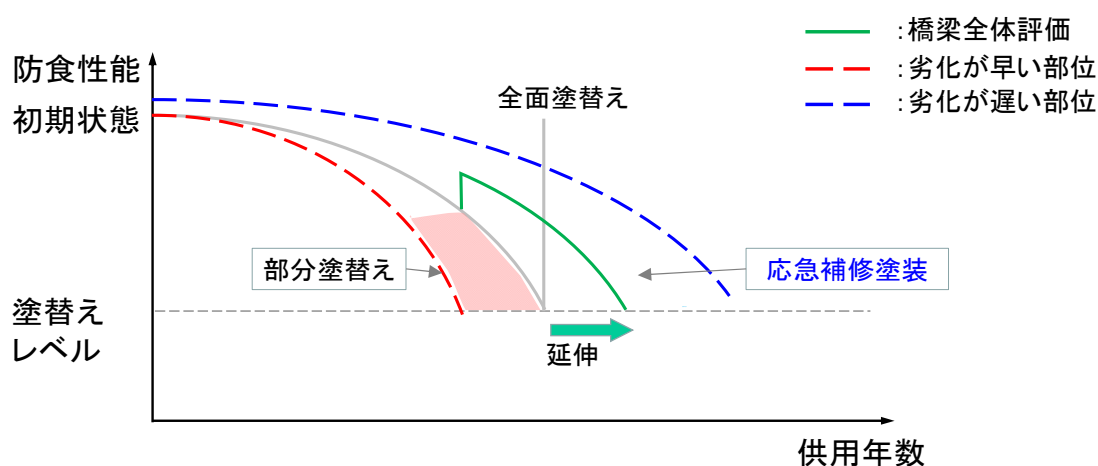


図 1-4 塗装橋梁の劣化曲線イメージ

この応急的な補修塗装は、桁の中間部にある劣化進行の遅い軽微な腐食部を対象とした簡易的な手法による対応が望まれる。本四高速道路（株）³⁾や阪神高速道路（株）⁴⁾においては、塗膜や構造物の点検時に発見した塗装のはがれや鋼材の腐食部に、簡易的な塗料で応急的な補修塗装を行っている。

そこで、本研究では、5年に1度に義務化された橋梁点検時に設ける近接目視用の足場を利用して、点検者自らが施工できる簡易な塗装方法にすることで、効率的かつ低コストで補修が行えると考えた。この点検時に行う応急的な補修塗装を『点検時塗装』と定義し、その有用性について検討する。

1-3. 検討内容

点検時塗装は、点検間隔に合わせて補修が行え、周期的な予防保全が確実にできることになる。また、部分塗替えと併用することで、塗装塗替えのシナリオを増やし、保全対策に幅を持たせることが期待できる。以上のことに着目し、以下の2項目について検討した。

1. 点検時塗装と部分塗替え塗装の組合せによる長寿命化シナリオの提案とライフサイクルコストによる評価

劣化の進行が早い桁端部を部分塗替え塗装で塗替え、劣化の進行が遅い桁中間部に5年に1回の点検時塗装を施すことで、橋梁全体の劣化を平準化し長寿命化を図る塗装塗替え手法の提案を行い、橋梁全体の防食性能の確保と全面塗替え時期の延長によるライフサイクルコストを検証する。

このとき、部分塗替え塗装は、防錆防食便覧及び鋼道路橋の部分塗替え塗装要領（案）⁵⁾の仕様や手法に準じて施工する。

2. 点検時塗装の適用性確認

点検時塗装は、仕様や規定がないことから、5年の点検間隔や点検と併せて行える施工性を考慮し、部分的な腐食面に直接塗装する場合について検証して、点検時塗装の塗料と対応できる塗装面の確認を行う。塗装性能の検証は、複合サイクル促進試験で行い、施工性の検証は、実橋塗装で行う。

なお、本研究では予防保全の促進を優先し、できるだけ多くの塗装橋梁の長寿命化を速やかに図ることを目的としており、景観性は考慮せず検討する。

§ 2. LCC 評価による提案シナリオの有用性について

2-1. LCC 評価における前提条件の設定

2-1-1. 鋼道路橋の防食に関する技術解説書の概要

鋼道路橋の防食に関する技術解説書の変遷は、昭和 46 年に「鋼道路橋塗装便覧（日本道路協会）」が発刊され、その後、技術や材料の進展に伴い昭和 54 年と平成 2 年に改訂が行われている。平成 17 年には、塗装便覧の内容を見直すと共に、塗装以外の防食技術についても記述を追加した「鋼道路橋塗装・防食便覧（日本道路協会）」が新たに発刊され、平成 26 年に現在最新の技術解説書である「鋼道路橋防食便覧（日本道路協会）」が発刊されている。

外面の塗装仕様は、平成 2 年の鋼道路橋塗装便覧を適用する場合、架橋位置の腐食環境により分類されており、一般環境、やや厳しい環境、厳しい環境に対し、それぞれ A 系（長油性フタル樹脂、シリコンアルキド樹脂）、B 系（塩化ゴム系樹脂）、C 系（ポリウレタン樹脂、ふっ素樹脂）を採用していたが、平成 17 年鋼道路橋塗装・防食便覧の発刊以降は、LCC 低減・環境対策等の観点から、上塗りに耐候性に優れたふっ素樹脂塗料を用いた重防食塗装系（C5 系、Rc-I 系、Rc-III 系）の適用を基本としている。なお、20 年以内に架替えが予定されている場合には A 系を適用することも可能となっている。

塗装の耐用年数や塗替え周期は、個々の橋でその架設環境や塗装履歴が異なるため、塗装の寿命も異なってくる。塗膜の防錆効果を合理的かつ経済的に維持するためには、塗膜点検を定期的に行い、その劣化状態を的確に把握した塗替え計画を立て、合理的、効率的な塗膜の維持管理を行う必要がある。しかし、長期間における維持管理費用を算出する場合、将来の劣化状態の予測が困難であるため、架橋位置の腐食環境や塗装仕様により、それぞれ一律の耐久年数を定めて LCC を算出するのが一般的となっている。現在、橋梁計画における LCC の算出で最も使用されている塗装耐久年数は、表 2-1 に示す「鋼橋のライフサイクルコスト（2001, 日本橋梁建設協会）」の塗装系別推定耐久年数である。

表 2-1 塗装系別推定耐久年数（出典：鋼橋のライフサイクルコスト（日本橋梁建設協会））

初期仕様		A-1	B-1	C-1	C-2 (全工場塗装)	C-4 (全工場塗装)	I: 薄膜形重防食 (全工場塗装)
塗替え仕様		a-1	b-1	c-1	c-1	c-3	c-1
塗装名称		長油性フタル酸樹脂塗装	塩化ゴム系塗装	ポリウレタン樹脂塗装	ポリウレタン樹脂塗装	ふっ素樹脂塗装	ポリウレタン樹脂塗装
環境	一般環境 (山間部)	15年	20年	40年	40年	60年	30年
	やや厳しい環境 (市街地部)	10年	15年	30年	30年	45年	20年
	厳しい環境 (海岸部)	—	10年	20年	20年	30年	—

注) 塗装仕様の記号は、鋼道路橋塗装便覧による。

2-1-2. 現状の塗装維持管理費用算出における前提条件

(1) LCC 算出における塗装耐用年数

塗装の耐用年数は、架設環境や塗装履歴により異なるが、本 WG の LCC 算出においては、表 2-1 に示す塗装系別推定耐久年数を採用し、架設環境は、代表して市街地部（やや厳しい環境）のものを使用する。

(2) 塗装仕様及び塗替え方針

塗替え塗装仕様は、鋼道路橋防食便覧に基づき、ライフサイクルコスト、環境対策の配慮などの観点から、より耐久性に優れた重防食塗装系（Rc-I 系）による全面塗替えとする。

旧塗装系については、架橋位置の環境や現時点での塗替えの有無等により異なっていると思われるが、塗装系別推定耐久年数（表 2-1）で A 系、B 系の塗装の市街地部耐久年数は 10 年から 15 年であり、重防食塗装系を基本とした H17 年便覧の発刊から 10 年以上経過していることを考えると、現状の塗装仕様は、新設・塗替え共に、ほとんどが重防食塗装系となっていることとなる。従って、旧塗装系の仕様も、重防食塗装系（C5 系、Rc-I 系）とする。なお、旧塗装については、個々の橋毎に塗替えからの期間が異なるが、本項においては、塗替え直後を基点として、LCC を算出して有用性の検証を行うものとする。

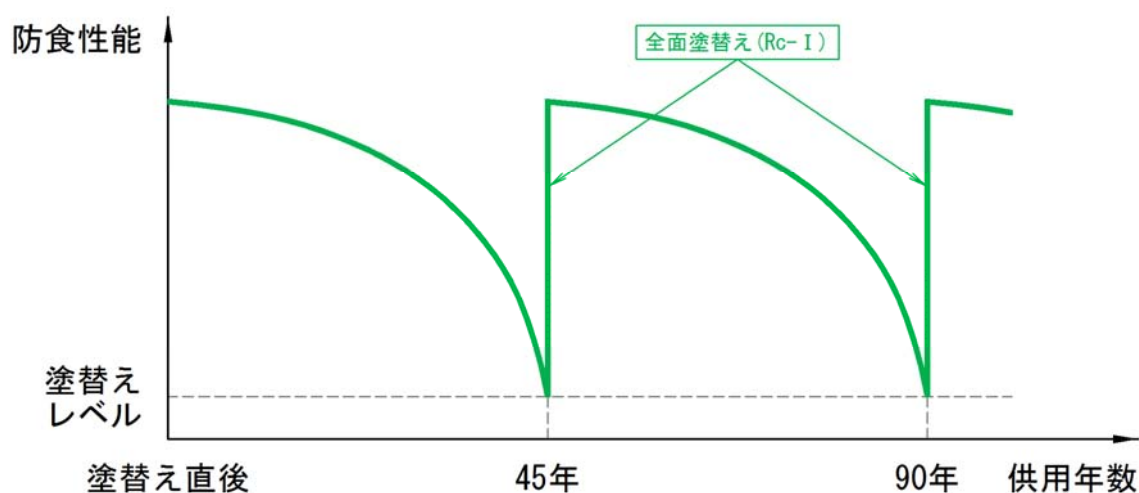


図 2-1 現状の LCC 算出の概念図及び想定している塗膜の劣化曲線

2-1-3. 提案シナリオの塗装維持管理費用算出における前提条件

(1) LCC 算出における塗装耐用年数

提案シナリオは、塗膜劣化の実態に合わせ、桁端部の部分塗替えと点検時塗装を併用することで、比較的健全な部分の全面塗替え期間を延長させることを提案している。本 WG で実施した促進試験において、点検時塗装の点検サイクルにおける耐久性については検証を行ったが、実橋の塗膜劣化の実態である、腐食の早い箇所と遅い箇所のそれぞれの耐久年数については、架橋環境や個々の橋の事情により異なり、一律に想定された表 2-1 の様なデータも無い。従って、過去の点検結果等を参考に以下の通り想定した。

表 2-2 提案シナリオの推定耐久年数の想定値（市街地部）

	部位	想定耐久年数	備考
部分塗替え塗装	桁端部	30 年	一律に設定された表 2-1 の期間の 2/3
全面塗替え塗装	全面	60 年	部分塗替え範囲が一律に設定された期間から-15 年で想定。これより、比較的良好な箇所は+15 年と想定
点検時塗装	損傷箇所	5 年	点検サイクル

(2) 塗装仕様及び塗替え方針

塗替え塗装仕様は、部分塗替え、全面塗替え共に、より耐久性に優れた重防食塗装系（Rc- I 系）とする。なお、部分塗替え塗装の範囲は、橋長 30m 程度の単純桁を想定し、両側の 1.5m 分が桁端部対象区間として、全塗装面積の 10%とする。

点検時塗装の塗装面積は、H26 鋼道路橋防食便覧の塗替え時期の判定を参考に設定する。便覧における塗替え時期は、さび、はがれの程度により判定することとしており、表 2-3、2-4 の通り、さびの発生面積が全橋梁面積の 8%以上となった場合に早い時期に塗替えを検討するものとしている。

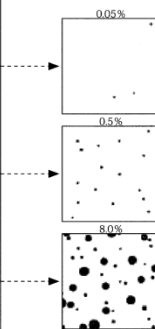
表 2-3 塗替え時期の判定
（出典：鋼道路橋防食便覧）

		はがれの程度			
		1	2	3	4
さびの程度	1	①		②	
	2				
	3	②		③	
	4				

表 2-4 さびの評価

（出典：鋼道路橋防食便覧）

評価	発生状態		JIS K 5600-8-3 さびの等級 (さびの面積%)
	発生面積 (%)	外観状態	
1	$X < 0.05$	さびが認められず、塗膜は健全な状態	Ri1 (0.05%)
2	$0.05 \leq X < 0.5$	さびが僅かに認められるが、塗膜は防食機能を維持している状態	Ri2 (0.5%)
3	$0.5 \leq X < 8.0$	さびが顕在化し、塗膜は一部防食機能が損なわれている状態	Ri3, Ri4 (1.0%, 8.0%)
4	$8.0 \leq X$	さびが進行し、塗膜は防食機能が失われている状態	Ri4 以上 (8.0%以上)



これを基に、以下の通り点検時塗装の対象面積を算出する。

- ・市街地環境の一律耐久年数である 45 年で 8%のさびが発生していると考え、但し、その内、さびの進行が速いと想定している桁端部のさびが半分程度は占めるものとし、一般部では 4%のさびが発生しているものとする。
- ・さびの発生は、その耐久年数の後半に集中するものとも考えられるが、計算上の対象面積は、均等にさびが増えていくものとして算出する。
- ・上記より、年毎のさびの発生面積を算出し、本シナリオの全面塗替え期間の平均である 30 年目の対象面積分の塗装が毎年発生するものとして LCC を算出する。

$$\text{【点検時塗装の対象面積} = (4\% \div 45 \text{ 年}) \times 30 \text{ 年} = 2.7\% \text{】}$$

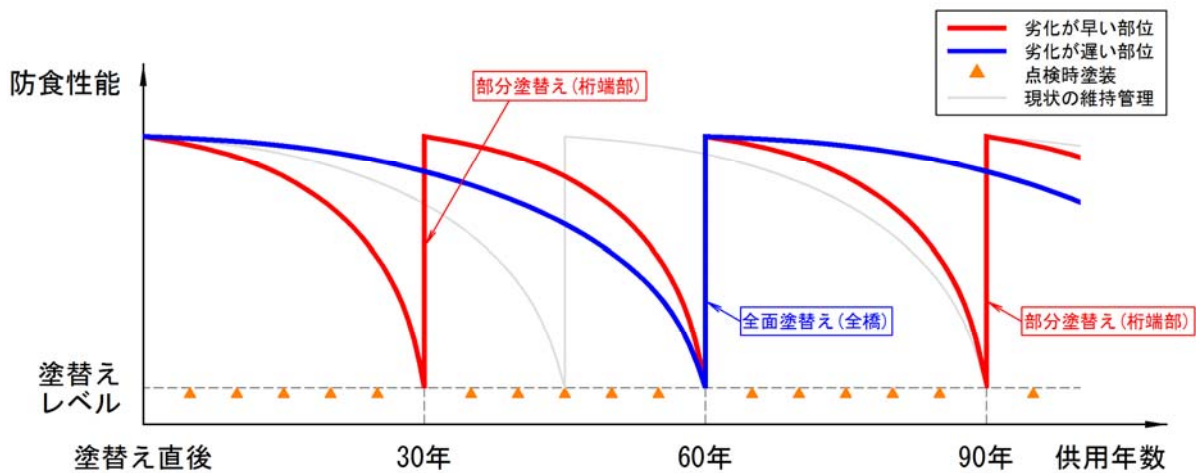


図 2-2 提案シナリオの LCC 算出の概念図及び想定している塗膜の劣化曲線

2-2. 提案シナリオの LCC 評価

2-2-1. 概要

本部会で提案する点検時塗装と部分塗替え塗装の組合せによる長寿命化シナリオが有用であることを確認するため、検証用モデル橋梁を用いて LCC 計算を行った。

2-2-2. LCC 検証用モデル橋梁

形 式：単純非合成鈹桁橋

橋 長：30.500m（支間長：29.500m）

総幅員：13.000m

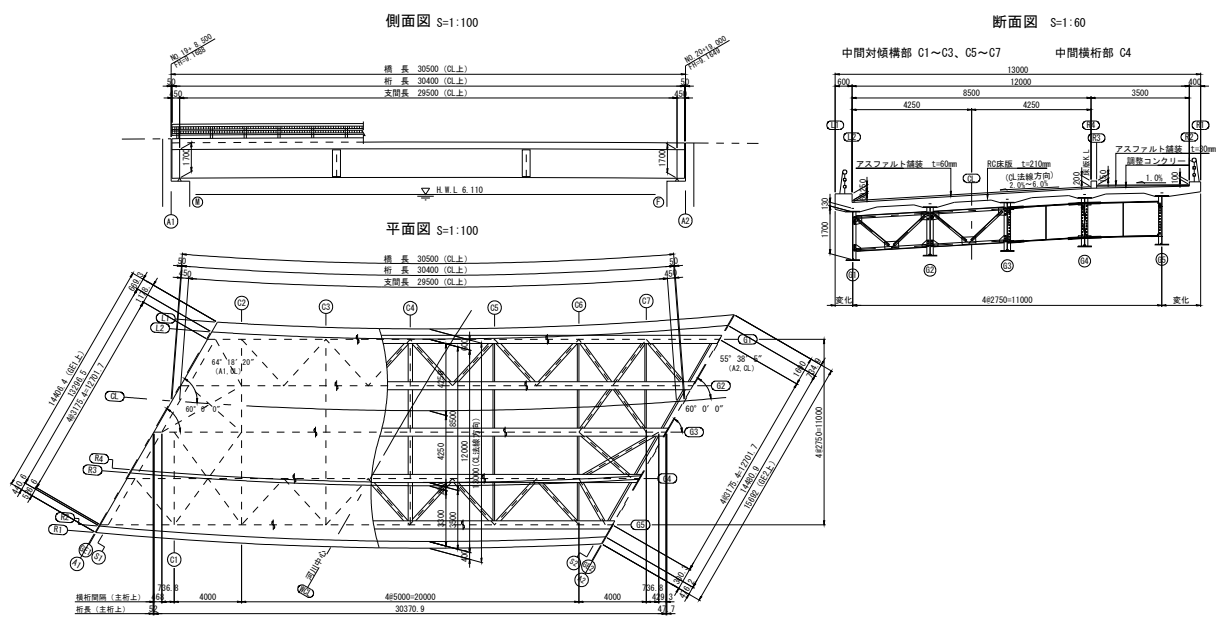


図 2-3 検証用モデル橋梁

2-2-3. 塗装塗替えシナリオ

現状行われている全面塗替えを基準（シナリオ1）とし、本WGで提案する劣化の進行が早い部位（桁端部）に部分塗替え、一般的な劣化進行の桁中間部に、5年に1回の点検時塗装を適用した場合（シナリオ2）のモデル橋梁におけるLCCを計算し、比較を行う。なおシナリオ3は、架橋位置の腐食環境が良好な場合には、提案シナリオによる管理によって全面塗替えを行わない場合があることを想定して追加した。

【基準】 Rc-I 全面塗替え（45年）

【提案①】 Rc-I 桁端部部分塗替え（30年）と Rc-I 全面塗替え（60年）を交互
+点検時塗装（5年）

【提案②】 Rc-I 桁端部部分塗替え（30年）+点検時塗装（5年）

※（ ）内は、塗替えサイクルを示す

2-2-4. LCC 計算条件

各塗替え仕様における塗替え1回当たりの費用を算出し、設計期間内に必要回数繰り返すものとしてLCCを計算する。塗替え費用は直接費の算出とした。間接費については、各自治体により様々な算出係数があるため、本検討では対象外とした。

(1) 塗装単価

本検討で考慮する塗装仕様は、塗替え塗装仕様 Rc-I（全面・部分）と点検時塗装の2種類となる。Rc-Iの塗装単価に関しては、塗装仕様ごとの市場単価の加算+研削材及びケレンかす処理費用により求めた。点検時塗装に関しては、使用した塗料の材料費より m^2 当たりの単価を算出した。点検時塗装の人件費に関しては、橋梁点検費用に含まれているものとする。なお、本検討では点検時塗装に関しては最も単価が高い塗装仕様（高耐久性塗料/2液性エポキシ樹脂塗料）を用いて検討を行った。

$$\begin{aligned} \text{① Rc-I の塗装単価 (11,012 円/}\text{m}^2\text{)} \\ & (\text{塗装単価}) + (\text{研削材及びケレンかす回収工}) \\ & = 7,375 \text{ 円/}\text{m}^2 + 3,637 \text{ 円/}\text{m}^2 \\ & = 11,012 \text{ 円/}\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{② 点検時塗装の塗装単価 (12,333 円/}\text{m}^2\text{)} \\ & (\text{塗料単価}) / (\text{スプレー缶容量}) \\ & = 3,700 \text{ 円} / 0.3 \text{ m}^2 \\ & = 12,333 \text{ 円/}\text{m}^2 \end{aligned}$$

注) 計算内容の詳細は、別添資料（付録C）を参照のこと

(2) 足場設置の有無、設置費用

足場設置に関しては、労働安全衛生法に則り、全面塗替え及び部分塗替え時には基本的に『必要』と考えた。部分塗替え時には桁端部のみの塗替えを想定するため、部分的な足場の設置を想定している。本検討では、桁端部から1.5mを部分塗替えの範囲と考えるため、足場設置範囲は、最小800mmの設置と考える。点検時塗装時には、点検用足場または高所作業車等を使用していると考えため不要と考えている。

Rc-Ⅰ の場合の吊足場イメージ図
(ブラスト作業のため全面板張防護足場が必要)

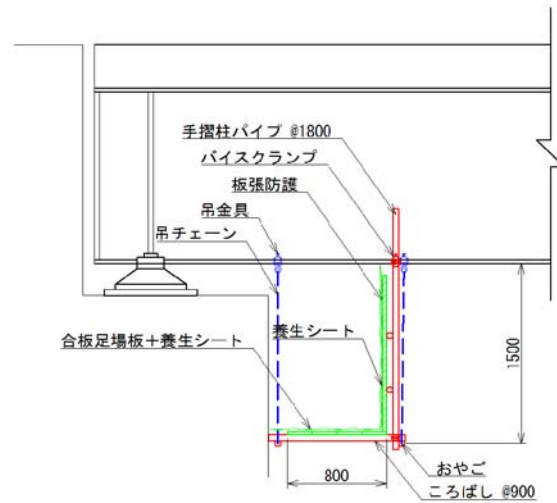


図 2-4 Rc-Ⅰ の場合の吊足場イメージ図

$$\begin{aligned}
 & \text{足場設置費用 (8,200 円/㎡)} \\
 & \quad (\text{主体足場工費用}) + (\text{ブラスト養生費用}) \\
 & = 2,990,000 \text{ 円} / 500 \text{ ㎡} + 1,124,000 \text{ 円} / 500 \text{ ㎡} \\
 & = 4,114,000 \text{ 円} / 500 \text{ ㎡} \\
 & = 8,200 \text{ 円/㎡}
 \end{aligned}$$

注) 計算内容の詳細は、別添資料 (付録 C) を参照のこと

(3) 点検費用

本検討で考慮する点検費用は、「道路橋定期点検業務積算資料 (暫定版) 平成 26 年 8 月」⁶⁾により算出した。

$$\begin{aligned}
 & \text{点検費用 (187,507 円/1 橋当たり)} \\
 & \quad (\text{点検人件費}) + (\text{機械経費}) + (\text{安全費}) \\
 & = 83,356 \text{ 円} + 78,991 \text{ 円} + 25,160 \text{ 円} \\
 & = 187,507 \text{ 円/1 橋当たり}
 \end{aligned}$$

注) 計算内容の詳細は、別添資料 (付録 C) を参照のこと

2-2-5. LCC 計算結果

各シナリオにおける LCC 計算結果を以下に示す。塗替え方法ごとに 1 回当たりの費用を計算し、設計期間内に実施する回数の合計値によりシナリオ毎の LCC を算出する。設計期間は全て 100 年とした。

(1) 基本情報

- ・ 橋梁形式 : 鈑桁橋 (従来形式)
- ・ 床版との結合 : 非合成
- ・ 径間数 : 単純
- ・ 平均支間長 : 29.500m
- ・ 総幅員 : 13.000m
- ・ 外面塗装面積 : 1153.769 m²

(2) 塗替え方法ごとの塗装費用計算結果

① Rc- I 全面塗替え

- ・ 塗替え仕様 : Rc- I
- ・ 塗替え面積 : 1153.769 m² (=外面塗装面積)
- ・ 足場設置 : Rc- I 用 / 383.5 m² (=13.000×29.500)
- ・ 周辺環境 : 普通環境

$$\begin{aligned}\text{塗替え費用} &= (\text{塗装費用}) + (\text{足場費用}) + (\text{点検費用}) \\ &= 11,012 \times 1153.8 + 8,200 \times 383.5 + 0 \\ &= 15,850 \text{ 千円} / 1 \text{ 回当たり}\end{aligned}$$

② Rc- I 桁端部部分塗替え

- ・ 塗替え仕様 : Rc- I
- ・ 塗替え面積 : 115.4m² (=外面塗装面積の 10%)
- ・ 足場設置 : Rc- I 用 / 20.8m² (=13.000×0.800×2)
- ・ 周辺環境 : 普通環境

$$\begin{aligned}\text{塗替え費用} &= (\text{塗装費用}) + (\text{足場費用}) + (\text{点検費用}) \\ &= 11,100 \times 115.4 + 8,200 \times 20.8 + 0 \\ &= 1,441 \text{ 千円} / 1 \text{ 回当たり}\end{aligned}$$

③ 点検時塗装

- ・ 塗替え仕様 : 点検時塗装① (2 液性エポキシ樹脂塗料)
- ・ 塗替え面積 : 31.2 m² (=外面塗装面積の 2.7%)
- ・ 足場設置 : なし
- ・ 周辺環境 : 普通環境

$$\begin{aligned}\text{塗替え費用} &= (\text{塗装費用}) + (\text{足場費用}) + (\text{点検費用}) \\ &= 12,333 \times 31.2 + 0 + 187,507 \\ &= 572 \text{ 千円} / 1 \text{ 回当たり}\end{aligned}$$

(3) シナリオごとの LCC 計算結果

① シナリオ 1 / Rc- I 全面塗替え (45 年)

- ・ 全面塗替え : 2 回
- ・ 部分塗替え : 0 回
- ・ 点検時塗装 : 0 回

$$LCC = 15,850 \times 2 + 1,441 \times 0 + 572 \times 0 = 31,700 \text{ (千円)}$$

- ② シナリオ 2/Rc- I 桁端部部分塗替え（30 年）と Rc- I 全面塗替え（60 年）を交互
+点検時塗装（5 年）

- ・全面塗替え：1 回
- ・部分塗替え：2 回
- ・点検時塗装：16 回

$$LCC = 15,850 \times 1 + 1,441 \times 2 + 572 \times 16 = 27,879 \text{ (千円)} \quad \text{※シナリオ 1 比：88\%}$$

- ③ シナリオ 3/Rc- I 桁端部部分塗替え（30 年）+点検時塗装（5 年）

- ・全面塗替え：0 回
- ・部分塗替え：3 回
- ・点検時塗装：16 回

$$LCC = 15,850 \times 0 + 1,441 \times 3 + 572 \times 16 = 13,471 \text{ (千円)} \quad \text{※シナリオ 1 比：42\%}$$

2-2-6. LCC 検討結果

図 2-5 に各シナリオにおける LCC 計算結果グラフを示す。従来の管理方法（シナリオ 1）に対し、本部会で提案した手法（シナリオ 2）が LCC 面でも有効であることが言える。100 年間の LCC 比較では 10%程度の低減率となっているが、設計期間を 50 年とした場合には約 60%の低減となる。

さらに、定期点検時に点検時塗装を施すことで、これまで見過ごされていた初期の塗膜劣化を早期に手当することにより全面塗替え間隔をさらに広げる（なくす）ことができる可能性がある。その手法がシナリオ 3 であり、シナリオ 3 はシナリオ 1 に対して、100 年間の LCC 比較では約 68%の低減効果がある。

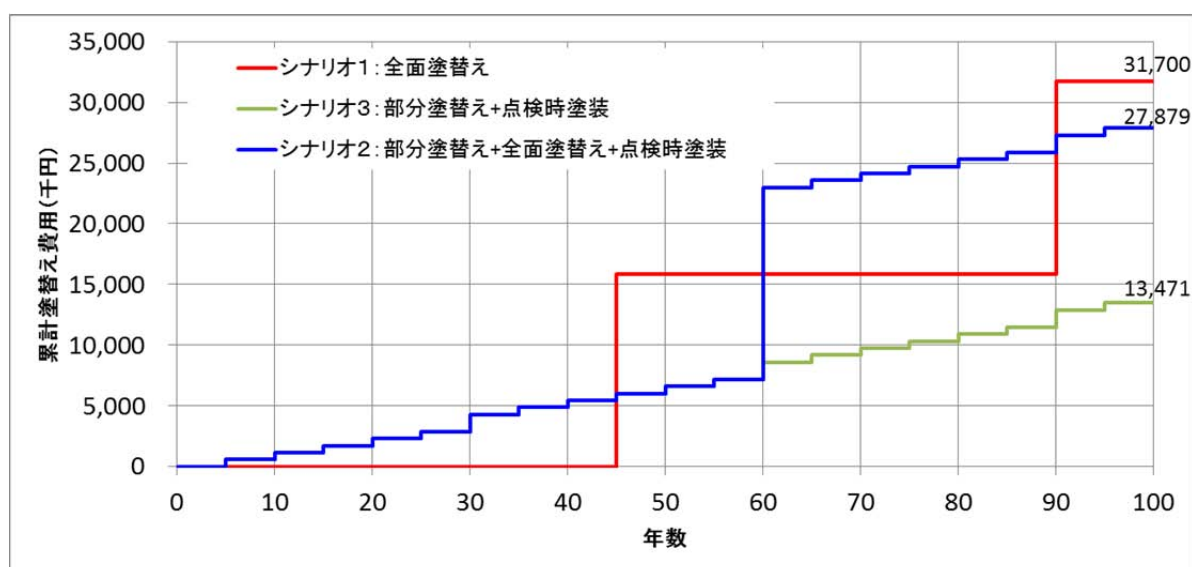


図 2-5 LCC 比較（シナリオ 1～3）

§ 3. 複合サイクル促進試験による点検時塗装の適用性検討

3-1. 複合サイクル促進試験の目的

本研究では、5年ごとに実施される定期点検と同時に腐食部分への簡易な補修塗装を実施することにより、従来の塗替え塗装より低いコストで鋼構造物の腐食進行を抑制することを狙いとした点検時塗装を提案する。

点検時塗装は、使用する塗料と既設構造の素地状態の組合せがその耐久性に大きく影響すると考えられる。本研究では各種塗料と素地状態の組合せに対して複合サイクル促進試験を実施してそれぞれの耐久性を評価する。

3-2. 実施内容

3-2-1. 塗装仕様の要求性能

点検時に実施する塗装に用いる塗装仕様の要求性能は以下の通りとする。

- ① 塗装実施後，次回定期点検までの5年間で母材のさびが進行しない，または橋梁一般部と同程度のさび進行度に抑制すること。
 具体的には塗膜表面のさび状態で塗装仕様の適用可否を判定する．鋼道路橋防食便覧¹⁾の塗替え時期の判定（表3-1）では，塗膜のはがれの評価が2以下の場合，表3-2に示す評価点3（ $0.5 \leq X < 8.0$ ）までは「数年後に塗替えを計画する」としているため，本研究においては5年経過時でさび面積比8%まで許容するものとする。
- ② 可搬性，塗装の施工性に優れるエアゾールタイプの塗料であること。
- ③ 塗装面の下地処理に極力電動工具などを用いないこと。

表 3-1 塗替え時期の判定

		はがれの程度			
		1	2	3	4
さびの程度	1	①		②	
	2				
	3	②		③	
	4				

- ①当面塗替えの必要性はない
 ②数年後に塗替えを計画する
 ③早い時期の塗替えを検討する
 ※赤枠が適用可能範囲

表 3-2 さびの評価

評価	発 生 状 態		JIS K 5600-8-3 さびの等級 (さびの面積%)
	発生面積 (%)	外 観 状 態	
1	$X < 0.05$	さびが認められず，塗膜は健全な状態	Ri1 (0.05%)
2	$0.05 \leq X < 0.5$	さびが僅かに認められるが，塗膜は防食機能を維持している状態	Ri2 (0.5%)
3	$0.5 \leq X < 8.0$	さびが顕在化し，塗膜は一部防食機能が損なわれている状態	Ri3, Ri4 (1.0%, 8.0%)
4	$8.0 \leq X$	さびが進行し，塗膜は防食機能が失われている状態	Ri4 以上 (8.0%以上)

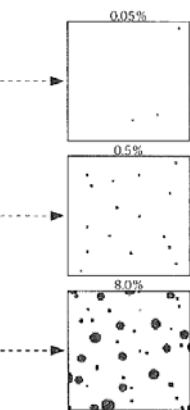


図-11.6.3 さび発生限度標準図³⁵⁾

3-2-2. サイクル試験の条件設定

複合サイクル試験は、その対象物によって種々の方法が規定されている。本研究では、塗膜を対象としているため、JIS K 5600-7-9（塗料一般試験方法）⁴⁾を適用した。同規定には4種類の試験サイクルが規定されているが、使用する試験機（CYP-90：スガ試験機製）で可能な仕様のうち、塗料の性能試験で採用事例の多いサイクルDを適用した。

図3-1に使用する試験機、表3-3にサイクルDの操作手順を示す。



図3-1 複合サイクル試験機（CYP-90：スガ試験機製）

表3-3 サイクルDの操作手順

段階	時間	温度	条件
1	0.5	30±2	塩水噴霧
2	1.5	30±2	湿潤（95±3% RH）
3	2	50±2	熱風乾燥
4	2	30±2	温風乾燥

試験時間は定期点検間隔の5年に1年の余裕を持たせて6年間相当となるように設定した。試験時間の実時間への換算は、藤原の研究⁵⁾による東京地域での倍率（表3-4の着色部）を用い、216サイクル（1296時間）とした。

表3-4 藤原による促進試験時間の換算率

促進試験 条件	基準の暴露地					備考
	東京	沖縄 内陸	沖縄 海岸	北陸	藤沢	
SS	45.40	51.45	16.55	15.94	12.22	JIS Z 2371
S6	39.38	44.62	14.36	13.83	10.60	サイクルD
DS	27.33	30.97	9.97	9.60	7.36	S55ごろ建設省土木研究所で検討
NS	70.41	79.80	25.67	24.72	18.95	日産自動車社内規格
JASO	67.17	76.12	24.49	23.58	18.08	日本自動車技術会 JASO規格
海水NS	42.15	47.77	15.37	14.80	11.34	
ASTM	37.52	42.52	13.68	13.17	10.10	ASTM D 2933-74

また，促進試験のスケジュールは表 3-5 に示す通り 1 週間単位で 24 サイクル実施し，後述（3-2-4 計測項目）する計測内容を 12 サイクルごとに実施した．

表 3-5 複合サイクル促進試験の週間スケジュール

時刻	月	火	水	木	金	土	日	
1:00	停止	サイクル3	サイクル7	サイクル11	サイクル14	サイクル18	サイクル22	
3:00								
5:00								
7:00								
9:00	計測2	サイクル4	サイクル8	サイクル12			サイクル23	
11:00								
13:00	サイクル1	サイクル5	サイクル9	計測1	サイクル16	サイクル20	サイクル24	
15:00								
17:00								
19:00	サイクル2	サイクル6	サイクル10	サイクル13	サイクル17	サイクル21		
21:00								
23:00							サイクル14	サイクル18

3-2-3. 試験体の条件設定

(1) 試験体の形状

試験体の形状は、JIS に記載される寸法と同様に長さ 150mm、幅 70mm とした。板厚は試験機の重量制限（最大 20kg）および入手性を考慮して 3.2mm とした。材質は橋梁に一般的に使用される SS400 とした。試験体形状を図 3-2 に示す。試験体の向きを判別するため、左上をカットした。

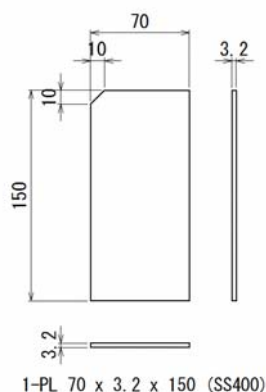


図 3-2 試験体形状

(2) 使用塗料

点検時塗装に適用可能な塗料を以下の条件で調査し、促進試験に使用する候補を選定した。候補は期待される耐久性や用途別に A～D の 4 種類に分類した（表 3-6）。

〔点検時塗装に適用可能な塗料の条件〕

- ・さび面への直接塗布が可能
- ・エアゾールタイプが製品化されている

〔候補の分類〕

- A：すでに本四公団、阪神高速で点検時塗装用の塗料として使用されているもの
- B：A 以外の塗料で高い耐久性を有する塗料
- C：A より防錆性能が劣るが、広く使用されているさび面への塗布が可能な塗料
- D：さびをマグネタイト(黒さび)に転換してさびの進行を抑制する機能を有する塗料

区分 A の 2 種類の塗料についてはそれぞれ阪神高速（変性エポスプレーNEXT）、本四高速（SRI 防食スプレーK）で用いられており、十分な耐久性が期待できること、その他の塗料の適用可否の比較基準と考えられることから両者を採用した。

区分 B は、塗料の性能的に区分 A と同等程度の耐久性が期待できるが、試験体数の上限により、より低コストな区分 C の塗料の採用を優先するため不採用とした。

区分 C は区分 A、B に耐久性で劣ると考えられるが、低コストであり、5 年間の短期使用であれば効果が期待できるため、候補の中から多色展開している油性高耐久鉄部用スプレーを採用した。

区分 D では高い耐久性が期待できる 2 液性防錆剤のうち、有機溶剤を使用せず環境負荷の小さいサビットメントを採用した。以降、これらの塗料の表記は表 3-6 中の塗料システムを用いる。

上記塗料以外では、各塗料との比較対象として一般的な塗替えで使用される Rc-Ⅲ仕様と、無塗装の条件を追加した。

表 3-6 使用塗料の候補

区分	採用	塗料名	塗料系統	備考
A	○	変性エポスプレーNEXT	2液性変性エポキシ樹脂塗料	白色
	○	SRI防食スプレーK	1液性変性エポキシ樹脂塗料	グレー，着色可
B		2Kエポキシプライマー	2液性エポキシ樹脂塗料	グレー，ベージュ，着色不可
		AGスプレー	1液性エポキシ樹脂塗料	水色，着色可
C	○	油性高耐久鉄部用スプレー	シリコンアクリル樹脂塗料	11色展開
		5674プライマー	変性アルキド樹脂塗料	グレー，赤さび，着色不可
D		ラストチェンジ	エポキシ樹脂系防錆剤	着色不可
		サビキラーPRO RS	2液性エポキシ樹脂防錆剤	クリアー
	○	サビットメント	2液性エポキシ樹脂防錆剤	クリアー，無溶剤
区分外	○	—	無塗装	試験結果の比較対象
	○	—	Rc-Ⅲ塗装系	試験結果の比較対象

(3) 素地条件

各塗料が適用可能な素地の状態を検証するため、以下の素地条件を設定した（図-3.3）。

鋼材面：試験体は磨き鋼板の状態、塗料単体の防錆性能を検証する。

3種ケレン：一般的な塗替え塗装で適用される素地調整方法。試験においては、後述のさび促進実施後に電動工具を用いて鋼材面を露出させる。

4種ケレン：3種ケレンよりも簡易なケレンで電動工具を用いずに施工可能。阪神高速の補修塗装で用いられている。試験においては、さび促進実施後にサンドペーパーを用いてさびを落とす。

さび進行度①：母材がさびた状態で塗装を行う。さび面積比で20～30%程度。

さび進行度②：さび進行度①からさらにさびが進行した状態。さび面積比60%以上。

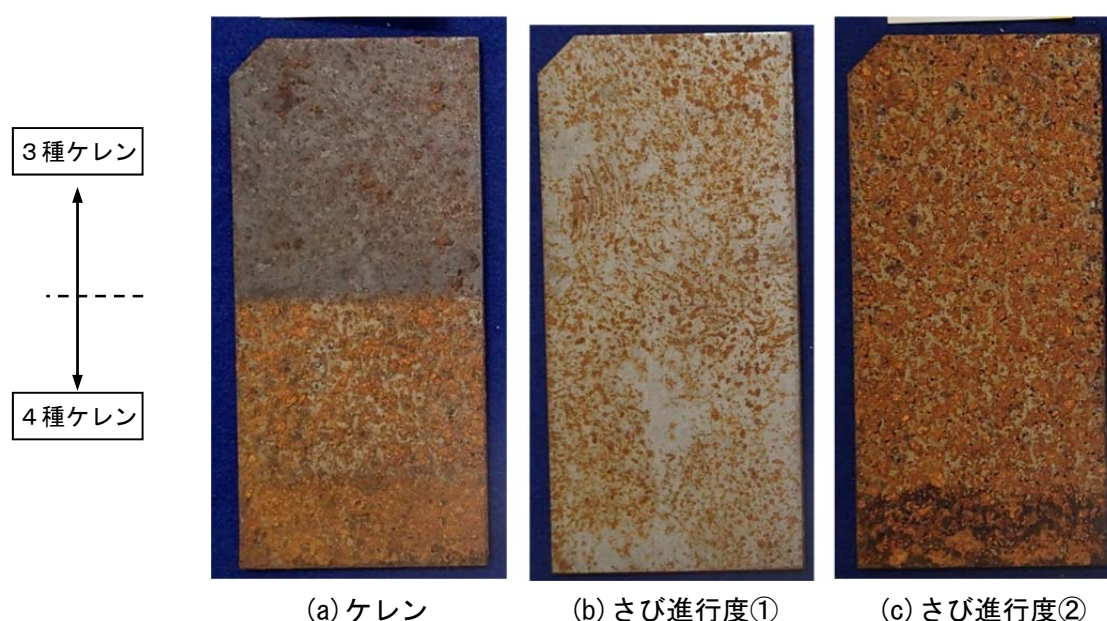


図 3-3 各素地条件の状態

(4) 塗料と素地調整の組合せ

各塗料と素地条件の組合せた試験ケースおよび試験体数を表 3-7 の通りとした。試験体数は試験機サイズの制約から 48 体とした。

表 3-7 試験ケース一覧

番号	使用塗料	塗装面の状態	カット	名称	付着試験	
					試験前	試験後
1	無塗装	ケレン		1B-1		
2		さび進行度①		1C-1		
3		さび進行度②		1D-1		
4	Rc-Ⅲ 塗装系	ケレン		1B-2		2
5			○	1B-3	2	2
6		さび進行度①		1C-2		
7			○	1C-3	1	2
8		さび進行度②		1D-2		
9			○	1D-3	1	2
10	2液性変性エポキシ 樹脂塗料	鋼材面		2A-1		
11			○	2A-2		2
12		ケレン		2B-1		
13			○	2B-2		
14			○	2B-3		4
15		さび進行度①		2C-1		
16			○	2C-2		
17			○	2C-3		2
18		さび進行度②		2D-1		
19			○	2D-2		
20			○	2D-3		2
21	1液性変性エポキシ 樹脂塗料	鋼材面		3A-1		
22			○	3A-2		2
23		ケレン		3B-1		
24			○	3B-2		
25			○	3B-3		4
26		さび進行度①		3C-1		
27			○	3C-2		
28			○	3C-3		2
29		さび進行度②		3D-1		
30			○	3D-2		
31			○	3D-3		2
32	シリコンアクリル 樹脂塗料	鋼材面		4A-1		
33			○	4A-2		2
34		ケレン		4B-1		
35			○	4B-2		
36			○	4B-3		4
37		さび進行度①		4C-1		
38			○	4C-2		
39			○	4C-3		2
40		さび進行度②		4D-1		
41			○	4D-2		
42			○	4D-3		2
43	2液性エポキシ 樹脂防錆剤	さび進行度①		5C-1		
44				5C-2		
45			○	5C-3		2
46		さび進行度②		5D-1		
47				5D-2		
48			○	5D-3		2

(5) 試験体の準備

① 素地条件の再現

未処理の状態の試験体を促進試験機に入れてさび促進し、表 3-7 に示す素地条件に合致する状態とした。ケレンについては、さび進行度②までさびを促進したのち、ケレン処理を行った（図 3-4）。実施サイクル数はさび進行度①で 10 サイクル程度、さび進行度②で 20 サイクル程度とし、試験体の状態を確認して順次試験機から取り出しさび促進を終了した。



(a) 3 種ケレン



(b) 4 種ケレン

図 3-4 素地調整実施状況

② 試験体の塗装

①で試験体を各種素地条件にしたのち塗装を実施した。塗装は試験体の両面に実施し、ノズルを試験体から約 30cm 離れた位置から試験体全面に 5 往復させた。また、試験体の外周部は防食上の弱点となり、促進試験の結果に影響する懸念があるため、試験体の外周 5mm 幅範囲を増し塗りした。また、一部の試験体は塗膜に長さ 90mm のカットを入れて部分的に腐食を促進した（図 3-5）。

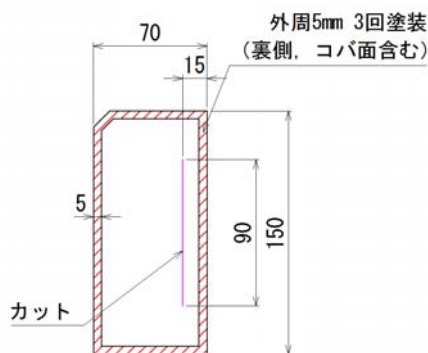


図 3-5 試験体の増し塗り範囲およびカット位置

③ 試験体の配置

試験体 48 体を図 3-6、図 3-7 に示すように配置する．設置角度は約 20° とし，試験中の場所の移動は行わない．

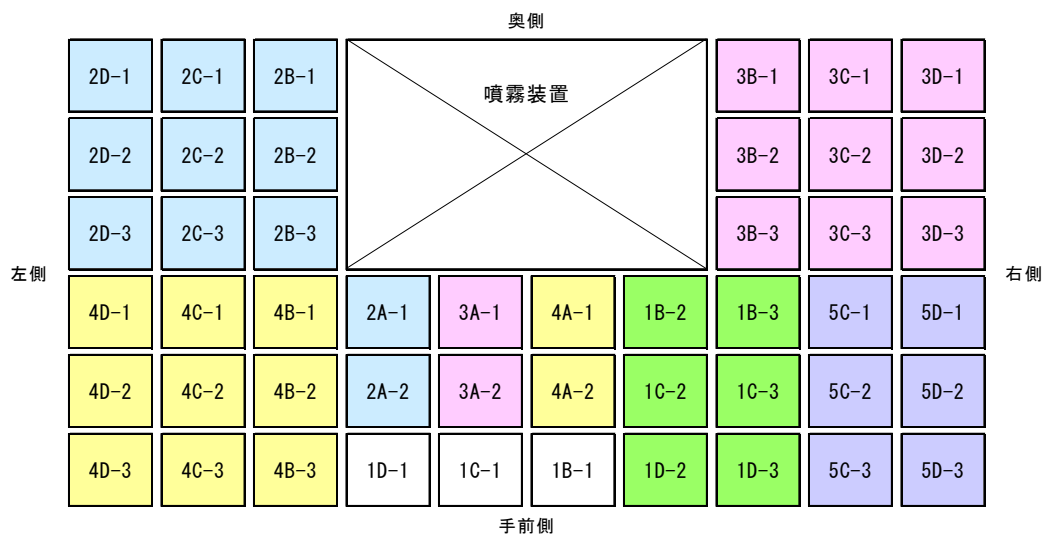


図 3-6 試験体の配置

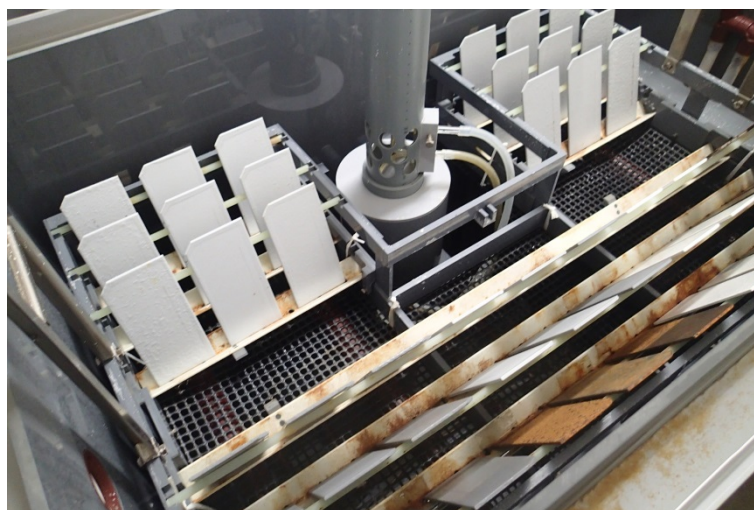


図 3-7 試験体配置状況

3-2-4. 計測項目

本研究では複合サイクル促進試験に関連して、表 3-8 に示す計測を実施した。

表 3-8 本研究の計測項目

項 目	内 容
外観	試験体外観の写真撮影によるさび進行の確認
試験体重量	試験体重量の計測によるさび進行との相関確認
膜厚	試験体膜厚の計測による塗膜厚とさび進行の相関確認
付着力	塗膜の付着力とさび進行の相関確認
さび面積比	画像解析および鋼材表面の形状計測によるさび進行の定量的評価

(1) 試験体の外観観察

試験開始前（素地調整後，塗装後）および促進試験中に 12 サイクル（72 時間）ごとに試験体の写真撮影による外観の確認を行った。写真撮影は撮影台を用いて同条件で撮影した。

(2) 試験体の重量測定

試験開始前（素地調整後，塗装後）および促進試験中（36 サイクル以降 12 サイクルごと）に試験体の重量を計測した。

(3) 試験体の膜厚測定

試験開始前（塗装後）および促進試験中（36 サイクル以降 12 サイクルごと）に試験体の膜厚を計測した。膜厚測定には電磁式膜厚計（図 3-8，NDT マート社製 KC-260）を用い，各試験体で 5 箇所計測し，平均値で評価した。



図 3-8 電磁式膜厚計（KC-260）

(4) 塗膜の付着力測定

試験開始前および試験終了後に塗膜の付着力を計測した。計測はプルオフ式の付着試験器（図 3-9, Elcometer 社製 elcometer 106）を使用した。プルオフ式付着試験は、塗装面に接着したドーリーを引き剥がす際の引張力を付着力として測定するため、実施後は塗膜が損傷した状態となる。損傷部分が促進試験に影響することを懸念して、試験前の付着力測定は促進試験に使用する試験体とは別に付着試験用の試験体を用いて実施した。促進試験後の計測は促進試験を行った試験体で実施し、各試験ケースにおいて、一般部とカット近傍部で計測を実施した。付着力測定の対象試験体を表 3-9、各試験体の実施箇所を図 3-10 に示す。

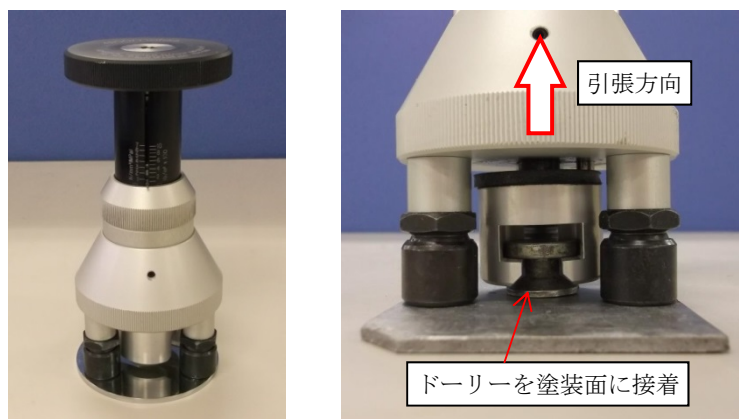
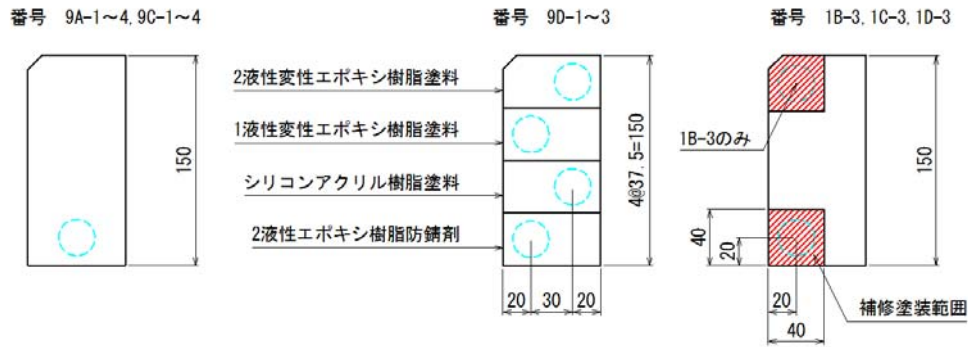


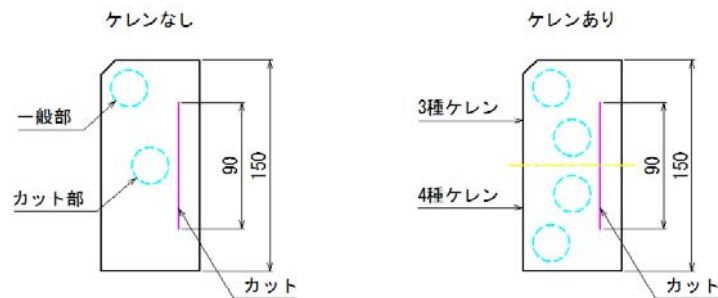
図 3-9 プルオフ式付着試験器（elcometer 106）

表 3-9 付着力測定実施対象

番号	使用塗料	塗装面の状態	名称	付着試験（箇所）	
				試験前	試験後
4	Rc-Ⅲ 塗装系	ケレン	1B-2		2
5			1B-3	2	2
7		さび進行度①	1C-3	1	2
9		さび進行度②	1D-3	1	2
11	2液性変性エポキシ樹脂塗料	鋼材面	2A-2		2
14		ケレン	2B-3		4
17		さび進行度①	2C-3		2
20		さび進行度②	2D-3		2
22	1液性変性エポキシ樹脂塗料	鋼材面	3A-2		2
25		ケレン	3B-3		4
28		さび進行度①	3C-3		2
31		さび進行度②	3D-3		2
33	シリコンアクリル樹脂塗料	鋼材面	4A-2		2
36		ケレン	4B-3		4
39		さび進行度①	4C-3		2
42		さび進行度②	4D-3		2
45	2液性エポキシ樹脂防錆剤	さび進行度①	5C-3		2
48		さび進行度②	5D-3		2
49	2液性変性エポキシ樹脂塗料	鋼材面	9A-1	1	
50		さび進行度①	9C-1	1	
51	1液性変性エポキシ樹脂塗料	鋼材面	9A-2	1	
52		さび進行度①	9C-2	1	
53	シリコンアクリル樹脂塗料	鋼材面	9A-3	1	
54		さび進行度①	9C-3	1	
55	2液性エポキシ樹脂防錆剤	鋼材面	9A-4	1	
56		さび進行度①	9C-4	1	
57	4種混合	3種ケレン	9D-1	4	
58		4種ケレン	9D-2	4	
59		さび進行度②	9D-3	4	



(a) 促進試験前計測



(b) 促進試験後計測

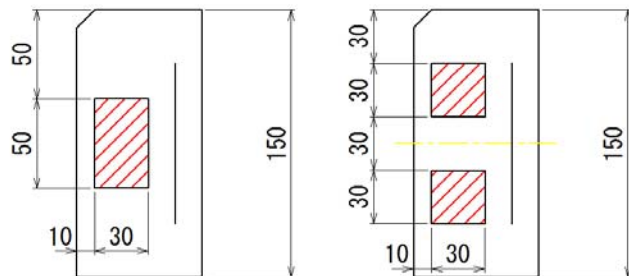
図 3-10 付着力測定実施箇所

(5) 画像解析によるさび面積比の算出

外観観察で撮影した画像を大日本塗料の「DNT 塗膜診断システム」に用いられる技術で解析し、さび面積比を算出した。画像解析には、図に示すように試験体の一般部（カット部を含まない）を切り取った画像を使用した（図 3-11）。

画像解析の実施対象を表 3-10 に示す。耐久性の期待できる塗料と、実施工のターゲットとしているさび進行度①の組合せについては時系列の変化を確認するため、36 サイクルごとの画像を対象とした。また、5 年相当経過時（180 サイクル）については各塗料の鋼材面以外の素地条件を対象とした。

前述（3-2-1 塗装仕様の要求性能）のとおり、さび面積比は 5 年（180 サイクル）経過時で 8.0%まで許容する。



(a) ケレン以外の試験体

(b) ケレン試験体

図 3-11 解析用画像切出し範囲

表 3-10 画像解析対象

			試験ケース																	小計
			無		Rc-Ⅲ			2液性変性エポキシ 樹脂塗料				1液性変性エポキシ 樹脂塗料				シリコンアクリル 樹脂塗料				
年	月	サイクル	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D	5C	5D	
0	0	0						3				3						3		9
0	4	12																		0
0	8	24																		0
1	0	36						3				3						3		9
1	4	48																		0
1	8	60																		0
2	0	72						3				3						3		9
2	4	84																		0
2	8	96																		0
3	0	108						3				3						3		9
3	4	120																		0
3	8	132																		0
4	0	144						3				3						3		9
4	4	156																		0
4	8	168																		0
5	0	180					6	3	3		6	3	3		6	3	3	3	3	42
5	4	192																		0
5	8	204																		0
6	0	216						3				3						3		9
小計			0	0	0	0	6	21	3	0	6	21	3	0	6	3	3	21	3	96

(6) 3次元形状計測によるさび面積比の算出

(5)で示した算出方法は塗膜表面のさび面積比を算出するものであり、厳密には塗膜内部の母材のさび状態を評価できるものではないため、3次元形状計測システム（図 3-12、Keyence 社製 VR-3000）を用いて鋼材表面の凹凸から内部さびの進行状況を推定した。3次元計測実施に当たっては、試験体の塗膜を剥離剤（バイオハクリ X-WB）により除去し、内部さびの状態を確認後、クエン酸二水素アンモニウム 10%溶液に試験体を浸漬してさびを除去した。

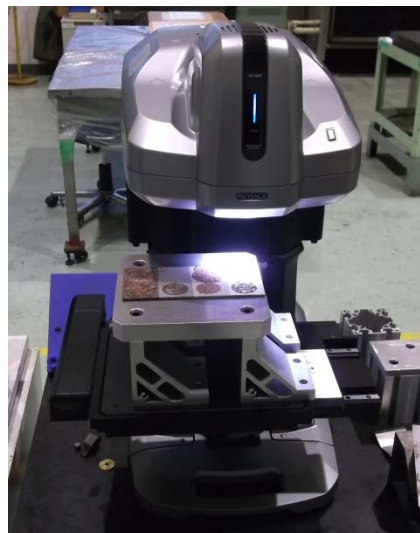


図 3-12 3次元形状計測システム（VR-3000）

3-2-5. 実施工程

表 3-11 に複合サイクル促進試験の実施工程表を示す。

表 3-11 実施工程表

項目		2015							2016		
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
試験 準備	材料手配	→								→	
	素地条件の再現	→	→								
	塗装		→								
	塗膜剥離		→							→	
促進 試験	鋼技研実施 (6年相当)		↑	→	→	↑					
	茨城大実施 (5年相当)		↑			↑	→	→			
計測	外観		●	→	→	●	→	→			
	重量		●	→	→	●					
	膜厚		●	→	→	●					
	付着力		●			●					
	画像解析								→		
	3次元形状										→

3-3. 試験結果

3-3-1. 試験体の外観

表 3-12 に各試験ケースの 180 サイクル（5 年間相当）経過時の外観を示す。

無塗装の試験体（1B-1, 1C-1, 1D-1）については、素地条件の差にかかわらず著しく腐食が進行していた。Rc-Ⅲ仕様では、さび進行度①、②とも試験体下端にわずかにさびが発生していた。すべての試験体において、試験体下端は V 字に設置した L 形鋼で支持される構造であり、L 形鋼に少なからず水がたまることによってさびが発生し易くなっている。Rc-Ⅲ仕様のさびもこれによる影響と考えられ、下端を除外した範囲で評価すると良好な状態であると言える。

2 液性変性エポキシ樹脂塗料を塗布した試験体は、さび進行度②の試験体（2D-3）でわずかに点さびが発生した以外は、試験体端部およびカット部にさびが発生するのみで良好な状態であった。

1 液性変性エポキシ樹脂塗料を塗布した試験体は、4 種ケレン（3B-1~3 の下半分）、さび進行度①、②で点さびが発生している。3 種ケレンではさびが発生しておらず、鋼材面とほぼ同等の耐久性を有すると考えられる。

シリコンアクリル樹脂塗料を塗布した試験体は、ケレンの試験体（4B-1~3）以外で全面にさびが発生した。一方、最も良好な素地条件である鋼材面（4A-1,2）で全面にさびが発生しており、想定と食い違う結果となった。また、さび進行度①、②では、それぞれ 4C-1, 4D-1 とその他の試験体でさび発生状況に大きく差が出る結果となった。

2 液性エポキシ樹脂防錆剤を塗布した試験体は、塗膜に変状は無く、カット部のみさびが進行している。塗膜が透明なため、試験前の状態と比較したところ内部のさび状況に変化が無いことが確認できた。

表 3-12 180 サイクル経過時の外観(1)

試験体名	1 B-1	1 B-2	1 B-3
塗料	無塗装	Rc-Ⅲ系	
素地条件	ケレン		
外観 (180サイクル)			
試験体名	1C-1	1C-2	1C-3
塗料	無塗装	Rc-Ⅲ系	
素地条件	さび進行度①		
外観 (180サイクル)			
試験体名	1D-1	1D-2	1D-3
塗料	無塗装	Rc-Ⅲ系	
素地条件	さび進行度②		
外観 (180サイクル)			

表 3-12 180 サイクル経過時の外観 (2)

試験体名	2A-1	2A-2	
塗料	2液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	鋼材面		
外観 (180サイクル)			
試験体名	2B-1	2B-2	2B-3
塗料	2液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	ケレン		
外観 (180サイクル)			
試験体名	2C-1	2C-2	2C-3
塗料	2液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	さび進行度①		
外観 (180サイクル)			

表 3-12 180 サイクル経過時の外観 (3)

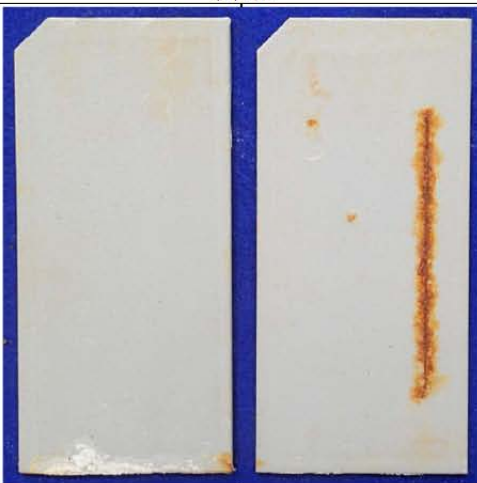
試験体名	2D-1	2D-2	2D-3
塗料	2液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	さび進行度②		
外観 (180サイクル)			
試験体名	3A-1	3A-2	
塗料	1液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	鋼材面		
外観 (180サイクル)			
試験体名	3B-1	3B-2	3B-3
塗料	1液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	ケレン		
外観 (180サイクル)			

表 3-12 180 サイクル経過時の外観 (4)

試験体名	3C-1	3C-2	3C-3
塗料	1液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	さび進行度①		
外観 (180サイクル)			
試験体名	3D-1	3D-2	3D-3
塗料	1液性変性エポキシ樹脂塗料		
素地条件	さび進行度②		
外観 (180サイクル)			
試験体名	4A-1	4A-2	
塗料	シリコンアクリル樹脂塗料		
素地条件	鋼材面		
外観 (180サイクル)			

表 3-12 180 サイクル経過時の外観 (5)

試験体名	4B-1	4B-2	4B-3
塗料	シリコンアクリル樹脂塗料		
素地条件	ケレン		
外観 (180サイクル)			
試験体名	4C-1	4C-2	4C-3
塗料	シリコンアクリル樹脂塗料		
素地条件	さび進行度①		
外観 (180サイクル)			
試験体名	4D-1	4D-2	4D-3
塗料	シリコンアクリル樹脂塗料		
素地条件	さび進行度②		
外観 (180サイクル)			

表 3-12 180 サイクル経過時の外観 (6)

試験体名	5C-1	5C-2	5C-3
塗料	2液性エポキシ樹脂防錆剤		
素地条件	さび進行度①		
外観 (180サイクル)			
試験体名	5D-1	5D-2	5D-3
塗料	2液性エポキシ樹脂防錆剤		
素地条件	さび進行度②		
外観 (180サイクル)			

シリコンアクリル樹脂塗料の鋼材面（4A-1,2）とケレン（4B-1~3）において、鋼材面の試験体のさびがケレンの試験体より進行して想定と食い違う結果になったことを受け、4A-1 と同仕様の試験体 3 体を作成し、再度 180 サイクルの促進試験を実施した。

表 3-13 に再試験の試験体の促進試験完了後の画像を示す。再試験の試験体は 180 サイクル経過時もほとんどさびは発生しなかった。

表 3-13 再試験 180 サイクル経過後の外観

試験体名	4A-3	4A-4	4A-5
塗料	シリコンアクリル樹脂塗料		
素地条件	鋼材面		
外観 (180サイクル)			

表 3-14 に 4A-1、4B-1 および 4A-3（4A-1 と同仕様の追加試験体）の促進試験開始前の塗膜表面を示す。4A-1 は表面に気泡によるものと見られる凹凸が多く、4B-1 と追加試験体は凹凸が少ない。この凹凸は吹付け時のノズルとの距離が短いことや吹付け量が多すぎることに由来するものと考えられ、これによって塗膜の耐久性が低下したと考えられる。

表 3-14 促進試験開始前の塗膜表面

4A-1	4B-1	4A-3(追加分)
		

図 3-13 に 180 サイクル経過時のカット部に発生したさび幅を示す。塗料別では 2 液性変性エポキシ樹脂塗料のさび幅が 5mm 以下と最も狭く、次いで 1 液性変性エポキシ樹脂塗料と 2 液性エポキシ樹脂防錆剤が 5～10mm 程度、シリコンアクリル樹脂塗料は特にさび進行度①，②でのさび幅が極端に広い結果であった。カット部の様に局部的に塗膜に傷がついた場合は 2 液性変性エポキシ樹脂塗料が最も耐久性が高いと考えられる。

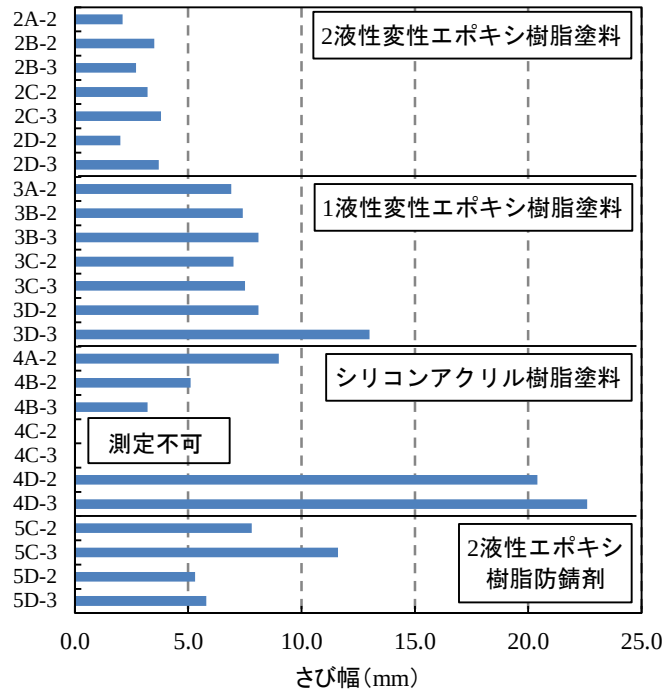


図 3-13 180 サイクル経過時のカット部のさび幅

3-3-2. 重量測定結果

図 3-14 に試験体の重量測定結果を示す。結果はカットの無い試験体のみを示している。無塗装ではさびが著しく進行するため、顕著に重量が増加している。その他の試験体についてはさびの進行が遅いため、重量の変化はほとんどない。

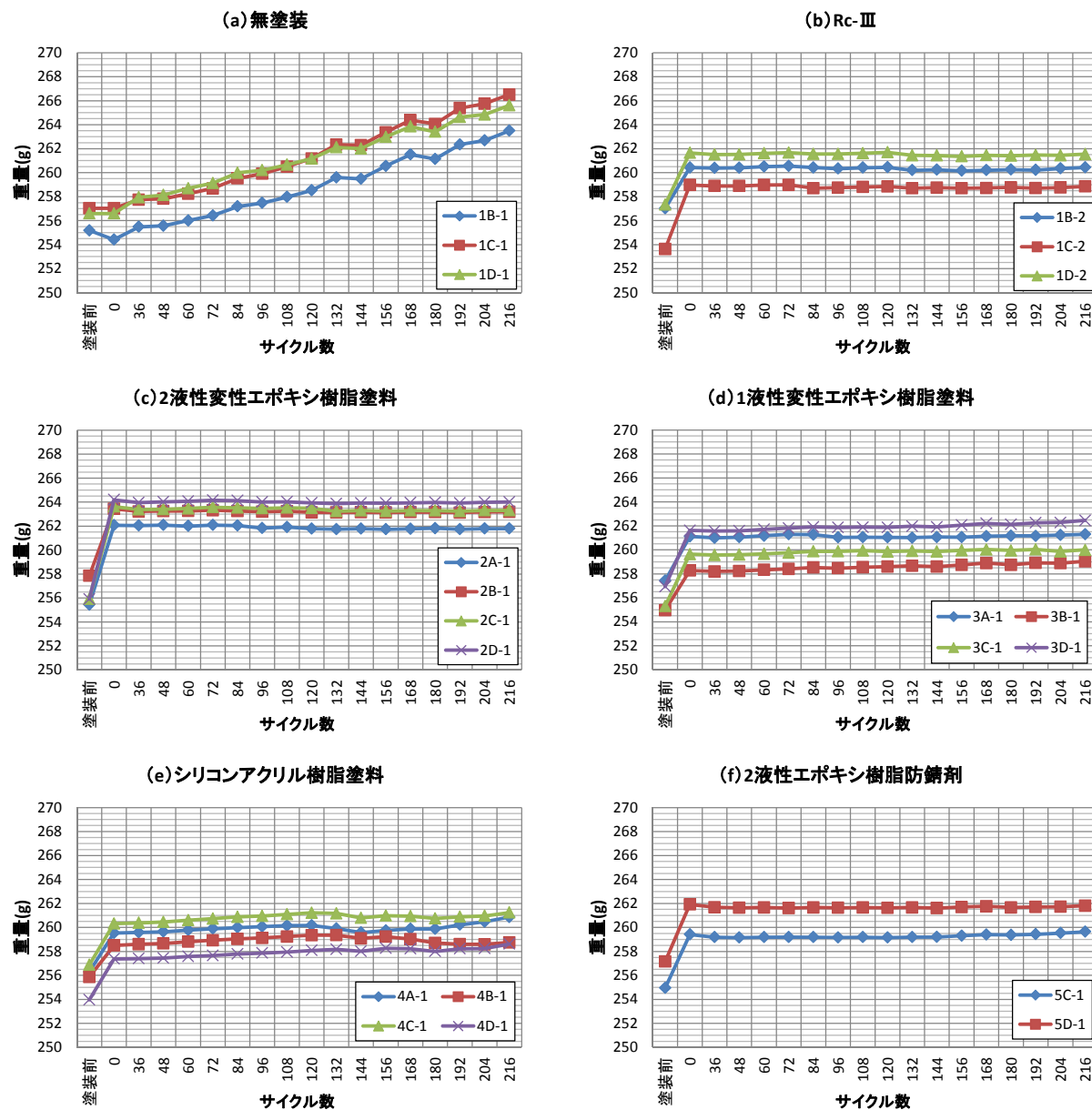


図 3-14 試験体重量測定結果

図 3-15 に試験前（サイクル 0）の重量に対する重量の変化率を示す。無塗装の試験体は最大 4%程度増加するが、その他の試験体では 1%未満の増減であった。外観でほとんどさびが確認出来ない (b) Rc-III, (c) 2 液性変性エポキシ樹脂塗料, (f) 2 液性エポキシ樹脂防錆剤については 0.1%程度の増減を示しており、これについては計測誤差の範囲と考えられる。

さびの発生が確認できる (d) 1 液性変性エポキシ樹脂塗料と (e) シリコンアクリル樹脂塗料については重量が増加傾向にあり、表面のさびとの相関が確認できた。

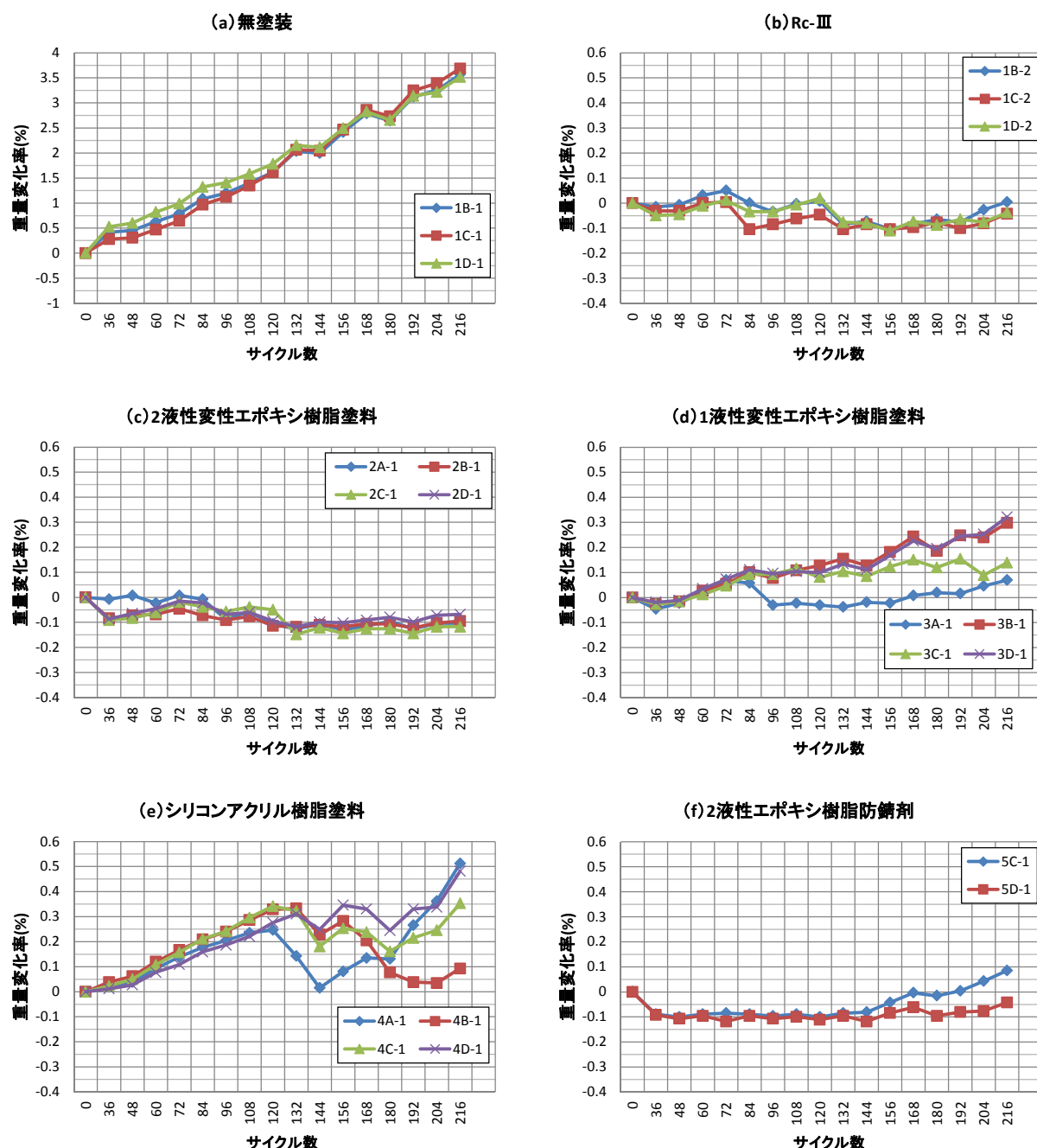


図 3-15 試験体の重量変化率

3-3-3. 膜厚測定結果

図 3-16 に各試験体の膜厚測定結果を示す。重量測定結果と同様にカットの無い試験体のみを示している。無塗装の試験体では塗装後（0 サイクル）から膜厚が増加している。

これは今回使用した電磁式膜厚計がさびを含めた母材までの厚さを計測することによるものである。その他の試験体については測定値にばらつきがあるものの、概ね横ばいの傾向を示した。特に（b）Rc-III、（c）2 液性変性エポキシ樹脂塗料についてばらつきも少なくほぼ一定の値を示した。

この計測ではさび厚の増加と塗膜厚の変化の両方を計測すること、さらに 100 μm 単位の計測値のばらつきがあるため、さびの進行と明確な相関関係を得ることは難しいと考える。

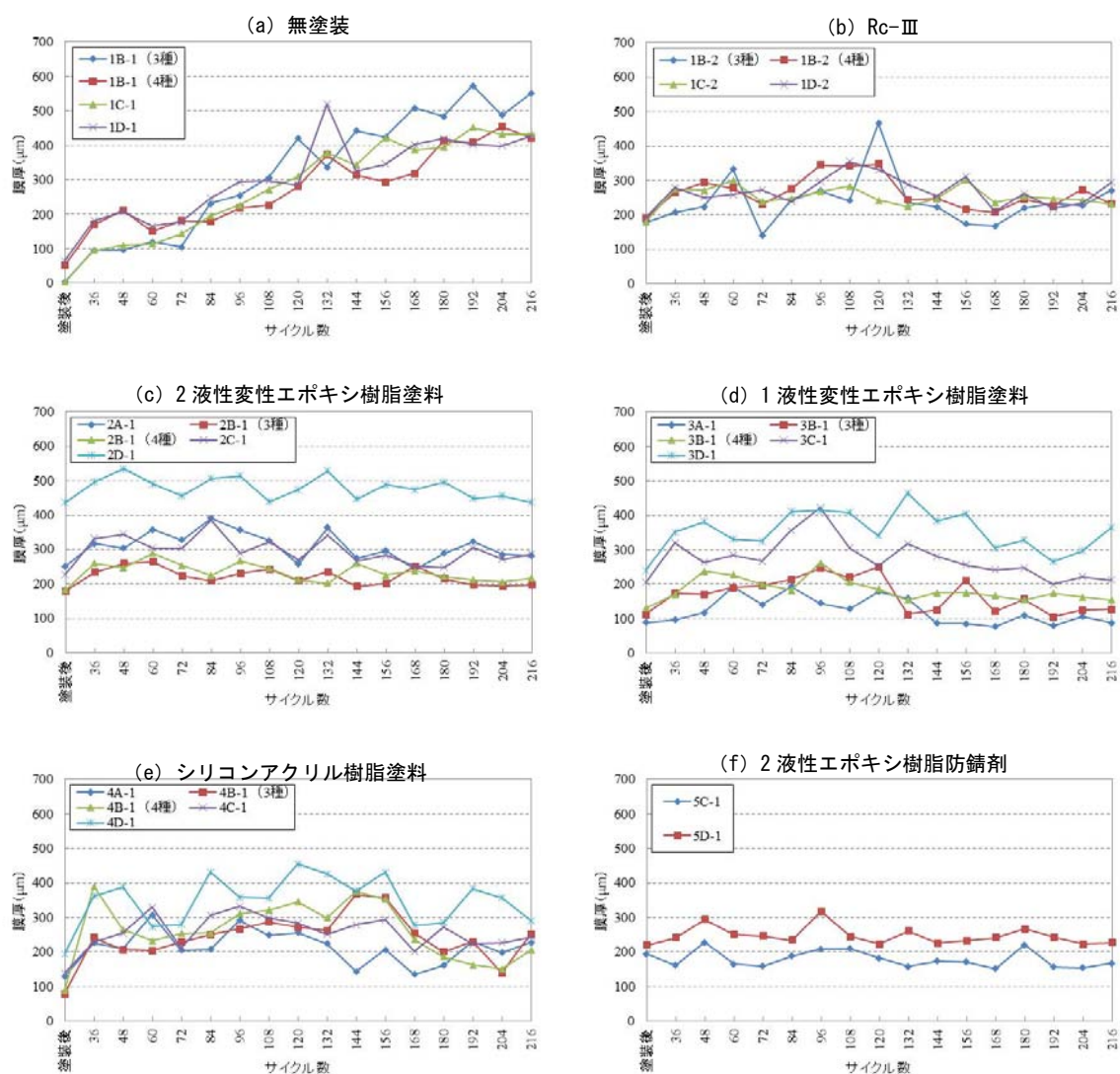


図 3-16 膜厚測定結果

3-3-4. 付着力測定結果

(1) 付着力の評価基準

付着力測定結果の評価は鋼橋塗膜調査マニュアル⁶⁾を参考に、評価点 2 まで許容するものとし、下限値を 1.0N/mm^2 とした (表 3-15)。

表 3-15 引張付着力の評価基準の一例

評価点 (RN)	引張付着力 (N/mm^2)
3	$2.0 \leq X$
2	$1.0 \leq X < 2.0$
1	$0.0 < X < 1.0$
0	$X=0$

(2) 付着力測定結果

表 3-16 に付着力測定結果を示す。「測定不可」はドーリー外周の塗膜除去時にドーリーが外れてしまったものを示し、塗膜と鋼板の付着が不十分であったと考えられる。

2液性変性エポキシ樹脂塗料は、促進試験前の測定で許容値を下回るケースがあったが、概ね 1.0N/mm^2 に近い値を示し、促進試験後の測定では全て許容値以上の値を示した。

1液性変性エポキシ樹脂塗料は、許容値を下回るケースが多く、特にさび進行度②については全ての測定で許容値を下回った。

シリコンアクリル樹脂塗料は、試験前はさび進行度②以外は良好な結果を示したが、試験後はさびの進行に伴い付着力が低下し、さび進行度①、②の全てで許容値を下回った。

2液性エポキシ樹脂防錆剤は試験前のさび進行度②のみ許容値を下回ったが、その他のケースでは良好な結果を示した。

表 3-16 付着力測定結果

塗料	素地	付着力 (N/mm^2)		
		試験前	試験後	
			一般部	カット部
Rc-III	3種ケレン	2.1	0.8	-
	4種ケレン	測定不可	1.5	-
	さび進行度①	1.9	1.0	-
	さび進行度②	1.4	1.0	-
2液性 変性エポキシ 樹脂塗料	鋼材面	2.3	2.8	2.2
	3種ケレン	1.0	1.9	2.5
			2.4	2.6
	4種ケレン	0.8	2.4	2.1
			2.6	3.0
	さび進行度①	2.1	1.1	1.1
			1.0	1.0
	さび進行度②	0.9	2.5	1.8
1液性 変性エポキシ 樹脂塗料	鋼材面	1.1	3.5	4.0
	3種ケレン	0.4	1.8	2.0
			1.2	1.7
	4種ケレン	1.0	1.0	1.2
			0.9	1.1
	さび進行度①	1.3	1.0	0.9
			1.2	1.6
	さび進行度②	測定不可	0.7 0.5	0.7 0.7
シリコン アクリル 樹脂塗料	鋼材面	3.1	0.4	測定不可
	3種ケレン	1.5	0.7	1.4
			1.0	1.0
	4種ケレン	1.4	1.0	1.2
			測定不可	0.8
	さび進行度①	3.8	0.7 0.4	0.4 0.5
			測定不可	0.4
2液性 エポキシ樹脂 防錆剤	鋼材面	2.0	-	-
	3種ケレン	1.3	-	-
	4種ケレン	2.5	-	-
	さび進行度①	1.9	2.5	1.6
			1.6	3.0
	さび進行度②	0.5	2.9	2.5
			1.8	3.5

3-3-5. 画像解析結果

表 3-17 に画像解析によって算出した塗膜表面のさび面積率を示す。

概ね外観目視の結果と同様の傾向を示し、180 サイクル経過時の結果で 2 液性変性エポキシ樹脂塗料では最大 0.2% (2D-3)，1 液性変性エポキシ樹脂塗料で最大 2.3% (3C-2) となっており、鋼道路橋防食便覧の評価点 3 以下となることが確認できた。

5C, 5D については塗料が透明なため、母材のさびが進行しなければ塗装前と同様の値を示すが、5C-2 の 0～144 サイクルの様に塗装前の結果と異なる結果を示すケースもあった。目視では大きな変化は確認できないため、塗膜表面の光の反射や付着物の影響による計測誤差と考えられる。

表 3-17 画像解析によるさび面積率 (%)

			2液性 変性エポキシ 樹脂塗料			1液性 変性エポキシ 樹脂塗料			シリコンアクリル 樹脂塗料			2液性 エポキシ樹脂 防錆剤	
年	サイクル	No.	2B	2C	2D	3B	3C	3D	4B	4C	4D	5C	5D
塗装前		1		26.1	85.3		27.1	69.3		25.2	77.4	15.3	57.7
		2		15.5	68.5		48.9	63.7		27.0	78.7	38.5	69.2
		3		17.4	63.4		37.0	78.9		19.0	71.7	27.7	58.3
0	0	1		0.0			0.0					11.0	
		2		0.0			0.0					18.1	
		3		0.0			0.0					21.9	
1	36	1		0.0			0.0					12.0	
		2		0.0			0.0					20.7	
		3		0.0			0.0					24.6	
2	72	1		0.0			0.1					13.8	
		2		0.0			0.1					21.2	
		3		0.0			0.0					24.9	
3	108	1		0.0			0.1					14.2	
		2		0.0			0.1					29.4	
		3		0.0			0.0					27.0	
4	144	1		0.0			0.1					15.2	
		2		0.0			0.3					30.5	
		3		0.0			0.0					27.9	
5	180	1(3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.8	0.0	20.0	4.4	17.1	70.9
		2(3)	0.0	0.0	0.1	0.0	2.3	0.2	0.0	58.8	45.3	31.4	73.3
		3(3)	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	83.8	38.9	28.0	49.7
		1(4)	0.0			0.5			0.5				
		2(4)	0.0			0.1			0.3				
		3(4)	0.0			0.2			0.9				
6	216	1		0.0			0.2					17.1	
		2		0.0			2.9					33.3	
		3		0.0			0.3					28.6	

※ () 内の数字はケレン種類を示す。

※着色部は目視でさびが確認できないため、画像解析を省略した。

表 3-18～表 3-20 に 2 液性エポキシ樹脂防錆剤を除く各塗料とさび進行度①の組合せでの画像解析結果を示す。画像解析後のさび面積算出画像は精度よくさび発生範囲をとらえており、表面の凹凸による陰影や、付着物に影響されていないことが確認できた。

表 3-18 画像解析結果（2 液性変性エポキシ樹脂塗料 さび進行度①）

サイクル数 180	原画	明度調整	算出	さび面積率 (%)
2C-1			—	0.0
2C-2			—	0.0
2C-3			—	0.0

表 3-19 画像解析結果（1 液性変性エポキシ樹脂塗料 さび進行度①）

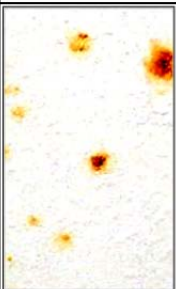
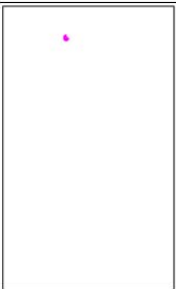
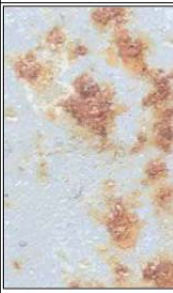
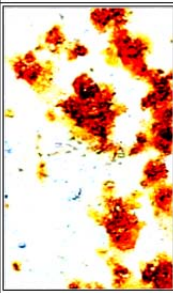
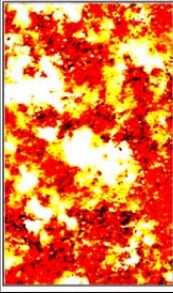
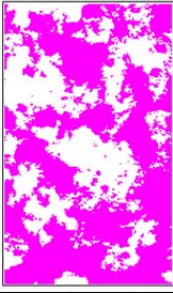
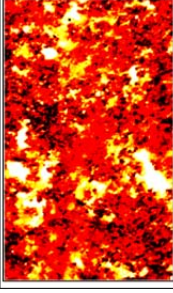
サイクル数 180	原画	明度調整	算出	さび面積率 (%)
3C-1				0.1
3C-2				2.3
3C-3				0.1

表 3-20 画像解析結果（シリコンアクリル樹脂塗料 さび進行度①）

サイクル数 180	原画	明度調整	算出	さび面積率 (%)
4C-1				20.0
4C-2				58.8
4C-3				83.8

3-3-6. 3次元形状計測結果

(1) 塗膜剥離結果

試験終了後の塗膜を図 3-17 に示すバイオハクリ X-WB を用いて除去した。



図 3-17 塗膜剥離剤および塗布後の試験体

図 3-18 に塗布後 90 時間後の試験体を示す。鋼材面に塗布した試験体は全面で塗膜が浮き上がっていた。一方、剥離剤が塗膜に十分浸透していない試験体もあり、それらについてはあまり膨潤反応が進んでいなかった。



図 3-18 剥離剤塗布後 90 時間経過時の試験体

剥離剤塗布後 90 時間経過時点で、スクレーパーによる塗膜の除去を行った。作業後の状態を図 3-19 に示す。素地が鋼材面の試験体（図中（a），（b））は剥離が容易でほぼ全ての塗膜が除去できた。（c）では、試験体の上半分（3 種ケレン範囲）では効果が高かったが、下半分（4 種ケレン）ではあまり効果が出なかった。また、2B-3 の下半分の様に塗膜が薄く残存し、スクレーパーでの剥離が困難なものもあった。（d）は塗膜剥離と同時に部分的にさびまで削り落としてしまったので、試験完了時の内部さび状態を維持できなかった。

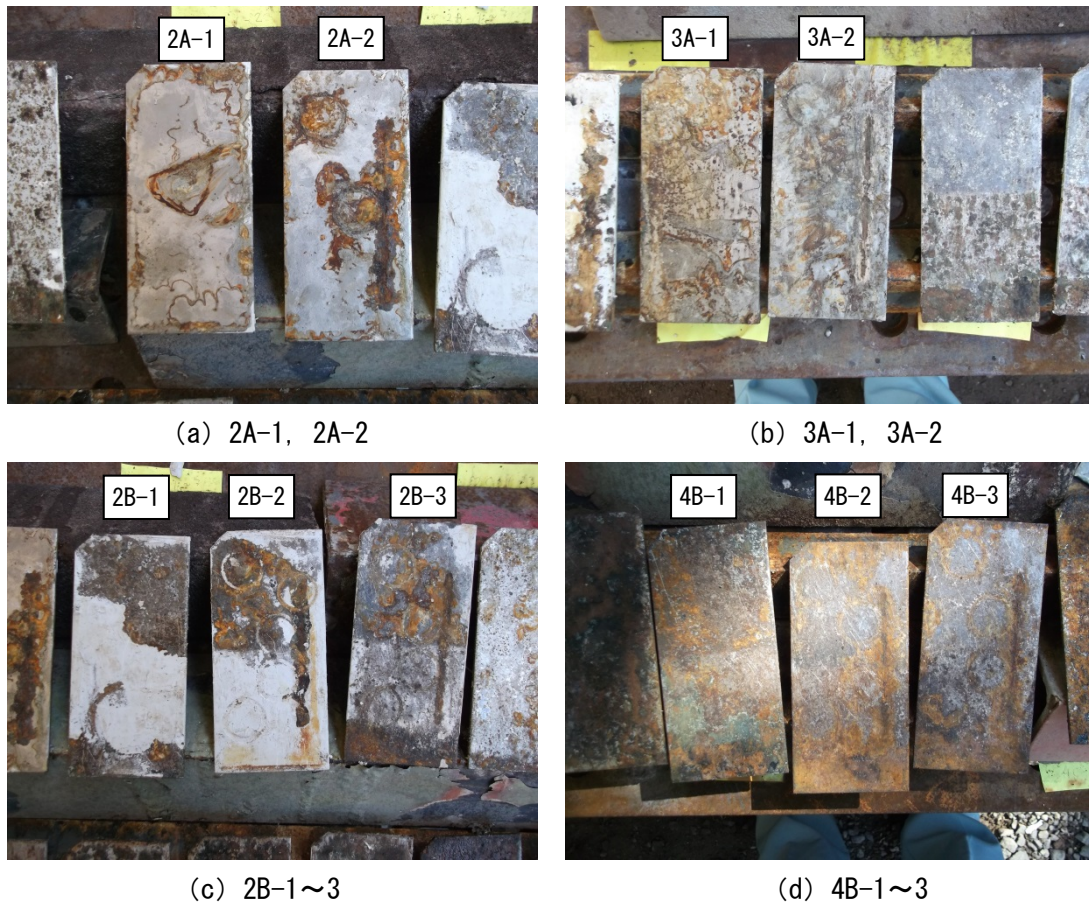


図 3-19 塗膜剥離（1 回目）実施後

上記工程を3回繰り返し、塗膜剥離を完了した。剥離剤による膨潤効果が小さかった試験体では、塗膜除去時にさびも削り取ってしまったため、当初期待していた塗膜除去後の内部さび状態を確認することはできなかった。

塗膜剥離作業完了後、試験体をクエン酸水素二アンモニウム 10%溶液に24時間以上浸漬し、ブラシでさびを除去した(図3-20)。

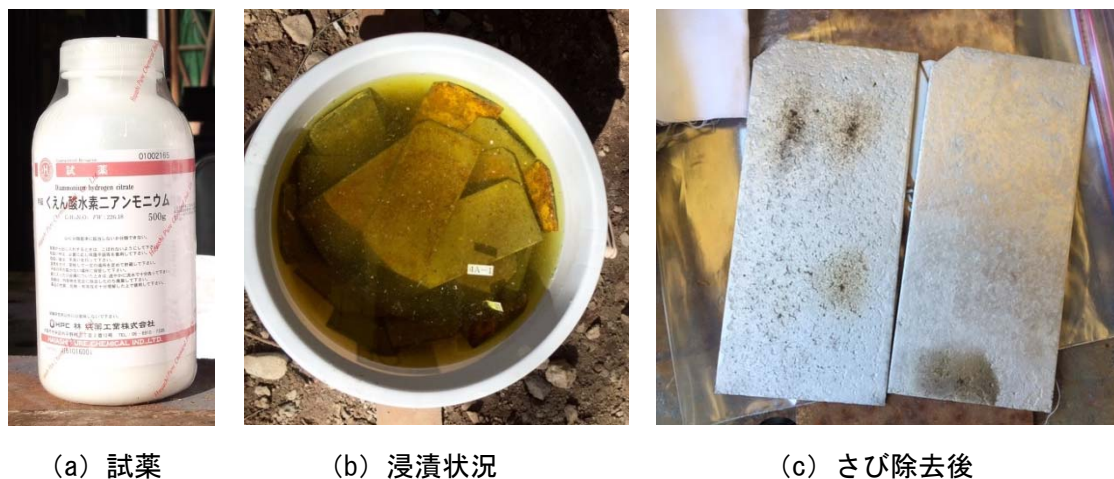


図 3-20 試薬によるさびの除去

(2) 3次元形状計測結果

(1)で塗膜、さびを除去した試験体を用いて3次元形状計測を実施した。計測結果を基に①さびによる減肉深さ、②減肉範囲の面積率を算出した。それぞれの算出方法は以下のとおり。

①さびによる減肉深さ

増し塗りにより試験条件の異なる試験体外周部、試験体の反りによる影響の大きい範囲を除外して対象範囲を設定し、形状計測により得られた高さデータから、対象範囲内の最大値と最小値の差を試験体の減肉深さとした。(図3-21)

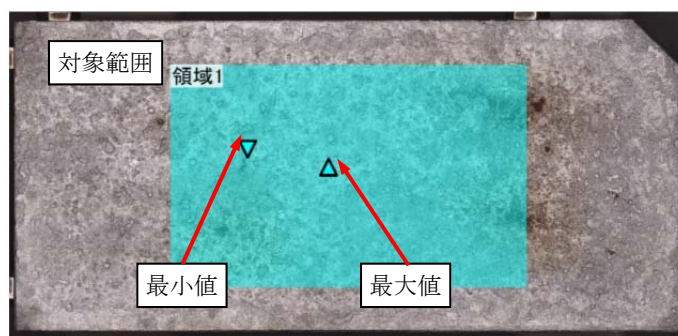


図 3-21 減肉深さの算出

②減肉範囲の面積率

①と同様に対象範囲を設定し、凹部と判断できる高さ以下の範囲の面積率（凹部面積／対象範囲面積）を算出する（図 3-22）。

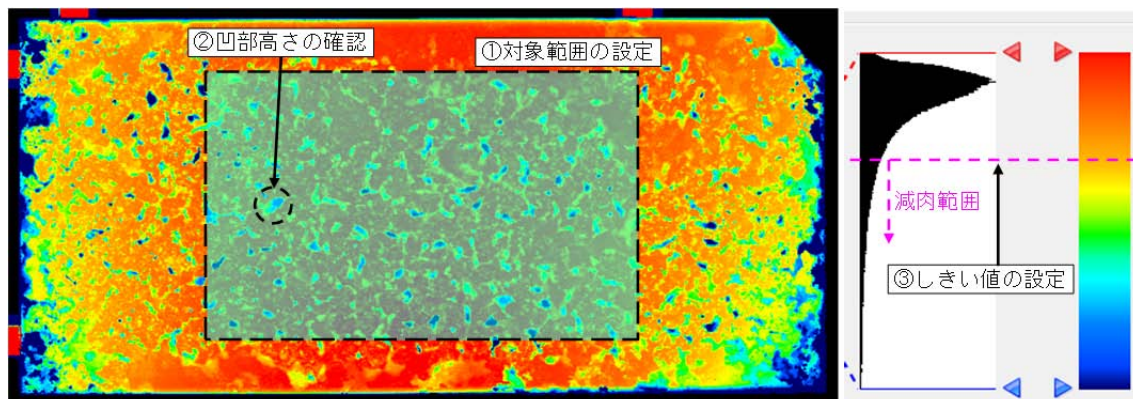


図 3-22 減肉面積率の算出

表 3-21、図 3-23 に各試験体の最大減肉深さおよび減肉面積率を示す。最大減肉厚は無塗装（a）とシリコンアクリル樹脂塗料（e）で 500 μ m 以上の値を示した。2 液性変性エポキシ樹脂塗料（c）、2 液性エポキシ樹脂防錆剤（f）は 200 μ m 程度、1 液性変性エポキシ樹脂塗料（d）は 200 μ m～400 μ m となり、外観目視の結果との相関が確認できた。

表 3-21 最大減肉厚および減肉面積率

試験体	塗料	素地条件	最大減肉厚 (μ m)	減肉面積率 (%)
1B-1	(a)	3種ケレン	656	59.8
		4種ケレン	830	54.0
1C-1	(a)	さび進行度①	830	53.1
1D-1	(a)	さび進行度②	816	52.3
2A-1	(c)	鋼材面	74	1.7
2B-1	(c)	3種ケレン	141	28.3
		4種ケレン	139	20.4
2C-1	(c)	さび進行度①	116	1.1
2D-1	(c)	さび進行度②	200	23.5
3A-1	(d)	鋼材面	230	0.8
3B-1	(d)	3種ケレン	130	21.7
		4種ケレン	340	37.5
3C-1	(d)	さび進行度①	299	3.8
3D-1	(d)	さび進行度②	337	23.0
4A-1	(e)	鋼材面	834	15.5
4B-1	(e)	3種ケレン	468	8.5
		4種ケレン	515	16.7
4C-1	(e)	さび進行度①	813	26.8
4D-1	(e)	さび進行度②	620	30.4
5C-1	(f)	さび進行度①	123	45.5
5D-1	(f)	さび進行度②	269	21.1

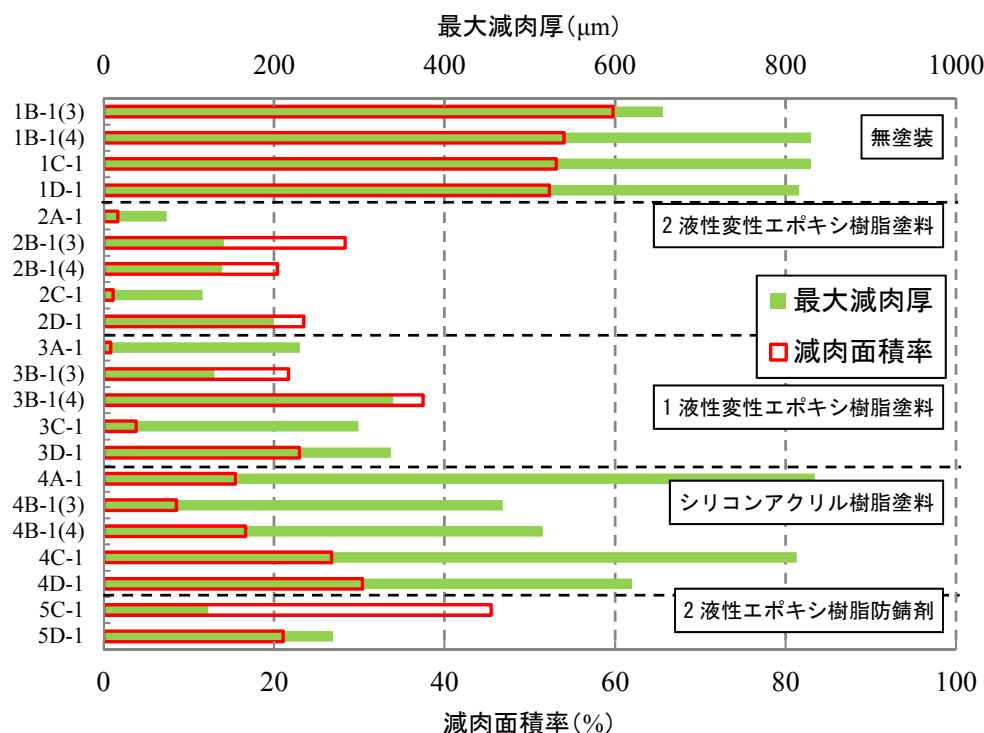


図 3-23 最大減肉厚および減肉面積率

3次元形状計測は促進試験完了後（396サイクル=11年相当）のみに実施しており，促進試験実施前の状態との比較ができないが，2液性変性エポキシ樹脂塗料を用いた試験体は396サイクル経過後もさびがほとんど発生していないため，この結果を試験前の状態と考える。

上記仮定のもと，さび進行度①は最大減肉厚 100μm 程度，減肉面積率 5%以下，さび進行度②（ケレンも含む）は最大減肉厚 150μm～200μm，減肉面積率 20%程度を初期状態とする。

1液性変性エポキシ樹脂塗料は鋼材面（3B-1）の減肉厚が大きくなっており，塗膜表面にさびは発生していないものの内部でさびが進行している。3種ケレン（3B-1(3)）ではあまり変化が見られないが，4種ケレン（3B-1(4)）になると減肉厚，面積比とも増加し，さびが進行していることが確認できる。さび進行度①，②（3C-1，3D-1）ではいずれも最大減肉厚が増加しているが，減肉面積率はほぼ変化していない。内部のさびは板厚方向に進行しているが，面的な拡がりは大きくないと考えられる。

シリコンアクリル樹脂塗料は全ての素地条件で減肉厚が大きく増加しており塗膜表面と同様に内部のさびが進行していることが確認できる。しかし，さび進行度①（4C-1）以外の試験体の減肉面積率は増加しておらず，3C-1，3D-1と同様に板厚方向にさびが進行している。

2 液性エポキシ樹脂防錆剤はさび進行度①（5C-1）で特に減肉面積率が大きくなっているが，最大減肉厚は初期値から大きく変化していない．これは試験体の反りによって高さの低い部分が凹部と判定されたためと考えられる（図 3-24）．さび進行度②（5D-1）では初期値から大きな変化は無く，内部さびが進行していないものと考えられる．

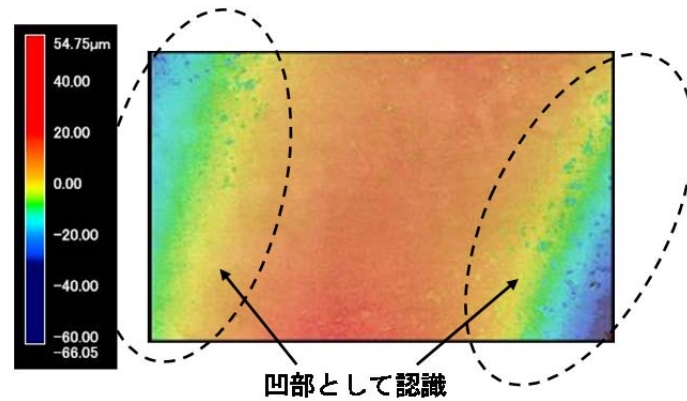


図 3-24 5D-1 形状計測結果

3-4. 考察

各試験体の測定値を表 3-22 に示す区分で色分けした結果を表 3-23 に示す。付着力の区分は鋼橋塗膜調査マニュアル、さび面積率の区分は鋼道路橋防食便覧によるものである。

表 3-22 測定結果の区分

項目	外観	カット部さび幅 (mm)	付着力 (N/mm ²)	さび面積率 (%)	最大減肉厚 (μm)
区分	◎:さびが発生していない	—	—	X=0.0	—
	○:わずかにさびが発生している	$0.0 \leq X \leq 5.0$	$2.0 \leq X$	$0.0 < X \leq 0.5$	$0 \leq X \leq 200$
	△:さびが発生している	$5.0 < X \leq 10.0$	$1.0 \leq X < 2.0$	$0.5 < X \leq 8.0$	$200 < X \leq 500$
	×:広くさびが発生している	$10.0 < X$	$0 \leq X < 1.0$	$8.0 < X$	$500 < X$

表 3-23 測定結果一覧(1)

塗料	試験体	外観	カット部 さび幅 (mm)	付着力 (N/mm ²)	さび 面積率 (%)	最大 減肉厚 (μm)
無塗装	1B-1(3)	×	-	-	-	656
	1B-1(4)	×	-	-	-	830
	1C-1	×	-	-	-	830
	1D-1	×	-	-	-	816
Rc-III	1B-2(3)	◎	-	-	-	-
	1B-2(4)	◎	-	-	-	-
	1B-3(3)	◎	-	0.8	-	-
	1B-3(4)	◎	-	1.5	-	-
	1C-2	◎	-	-	-	-
	1C-3	◎	-	1.0	-	-
	1D-2	◎	-	-	-	-
	1D-3	◎	-	1.0	-	-
2液性 変性エポキシ 樹脂塗料	2A-1	◎	-	-	-	74
	2A-2	◎	2.1	2.8	-	-
	2B-1(3)	◎	-	-	0.0	141
	2B-1(4)	◎	-	-	0.0	139
	2B-2(3)	◎	3.5	1.9	0.0	-
	2B-2(4)	◎	-	2.4	0.0	-
	2B-3(3)	◎	2.7	2.4	0.0	-
	2B-3(4)	◎	-	2.6	0.0	-
	2C-1	◎	-	-	0.0	116
	2C-2	◎	3.2	1.1	0.0	-
	2C-3	◎	3.8	1.0	0.0	-
	2D-1	◎	-	-	0.0	200
	2D-2	◎	2	2.5	0.1	-
	2D-3	○	3.7	2.9	0.2	-

2 液性変性エポキシ樹脂塗料は全ての素地条件において非常に良好な結果を示しており、本研究の対象とするさび進行度①よりさびが進行している場合の補修塗装に十分適用可能と考える。

表 3-23 測定結果一覧(2)

塗料	試験体	外観	カット部 さび幅 (mm)	付着力 (N/mm2)	さび 面積率 (%)	最大 減肉厚 (μm)
1液性 変性エポキシ 樹脂塗料	3A-1	◎	-	-	-	230
	3A-2	◎	6.9	3.5	-	-
	3B-1(3)	◎	-	-	0.0	130
	3B-1(4)	○	-	-	0.5	340
	3B-2(3)	◎	7.4	1.8	0.0	-
	3B-2(4)	○	-	1.0	0.1	-
	3B-3(3)	◎	8.1	1.2	0.1	-
	3B-3(4)	○	-	0.9	0.2	-
	3C-1	○	-	-	0.1	299
	3C-2	○	7	1.0	2.3	-
	3C-3	○	7.5	1.2	0.1	-
	3D-1	○	-	-	1.8	337
	3D-2	○	8.1	0.7	0.2	-
	3D-3	○	13	0.5	0.1	-
シリコン アクリル 樹脂塗料	4A-1	×	-	-	-	834
	4A-2	×	9	0.4	-	-
	4A-3	◎	-	-	-	-
	4A-4	◎	-	-	-	-
	4A-5	○	-	-	-	-
	4B-1(3)	◎	-	-	0.0	468
	4B-1(4)	○	-	-	0.5	515
	4B-2(3)	◎	5.1	0.7	0.0	-
	4B-2(4)	○	-	1.0	0.3	-
	4B-3(3)	◎	3.2	1.0	0.0	-
	4B-3(4)	○	-	測定不可	0.9	-
	4C-1	△	-	-	20.0	813
	4C-2	×	測定不可	0.7	58.8	-
	4C-3	×	測定不可	0.4	83.8	-
	4D-1	△	-	-	4.4	620
	4D-2	×	20.4	測定不可	45.3	-
	4D-3	×	22.6	0.5	38.9	-
2液性 エポキシ樹脂 防錆剤	5C-1	◎	-	-	17.1	123
	5C-2	◎	7.8	2.5	31.4	-
	5C-3	◎	11.6	1.6	28.0	-
	5D-1	◎	-	-	70.9	269
	5D-2	◎	5.3	2.9	73.3	-
	5D-3	◎	5.8	1.8	49.7	-

1 液性変性エポキシ樹脂塗料は全ての素地条件でさびの発生がわずかであり良好な結果を示した。促進試験前のさびによる減肉厚が各素地条件で同程度と仮定した場合、1 液性変性エポキシ樹脂塗料の減肉厚は2 液性変性エポキシ樹脂塗料より増加しており、内部さびが進行していると考えられる。この内部さびの進行が付着力の低下に影響していると考えられ、さび進行度②では付着力が 1.0N/mm^2 を下回った。以上より、さび進行度①までの素地条件であれば補修塗装に適用可能と考える。

シリコンアクリル樹脂塗料の結果のうち、4A-1,2 については前述の塗装不良の影響が大きいため、評価対象から除外する。鋼材面の追加試験体（4A-3～5）およびケレン試験体では表面のさびはわずかであり良好な結果であった。ケレン試験体における最大減肉厚と付着力の結果から、1 液性変性エポキシ

樹脂塗料と同様に内部さびが進行しているものと推定できる。さび進行度①よりさびが進行している場合にはさびが著しく進行し、最大減肉厚も無塗装の試験体と同程度であるためさび進行度①を補修塗装の主対象とする場合は適用不可と考える。

2 液性エポキシ樹脂防錆剤は塗膜の耐久性が高く、付着力も十分であった。カット部のさびが 2 液性変性エポキシ樹脂塗料と比較すると進行しやすいが補修塗装には十分適用可能と考える。ただし、この塗料は本来上塗りが必要であり、紫外線に対する耐久性が未知であるため適用にあたっては今後検証が必要と考える。一方、塗膜が透明であることが景観上の問題とならない場合、母材のさび状況が常時確認できることは維持管理上の利点でもある。

複合サイクル促進試験の結果から、各塗料の点検時塗装への適用性について以下のように評価する。

点検時塗装の実績がある区分 A の中でも、2 液性変性エポキシ樹脂塗料は全ての素地条件で良好な結果を示し、点検時塗装に最も適していると考えられる。1 液性変性エポキシ樹脂塗料はさび進行度①までの適用との条件付きで十分適用可能と評価する。また、さびの進行を抑制する機能を有する区分 D の 2 液性エポキシ樹脂防錆剤は、複合サイクル促進試験においては 2 液性変性エポキシ樹脂塗料と同等の評価ができるが、紫外線に対する耐候性が不明であることから紫外線の影響の小さい内桁への適用であれば十分可能と考えられる。

§ 4. 実橋による点検時塗装の施工性の確認

4-1. 目的

点検時塗装とは、『定期点検作業時に塗膜劣化部を応急塗装することで、劣化速度を抑制でき、鋼部材の長寿命化を図ることのできる塗装手法』として定義している。本研究では、さび発生面に対する点検時塗装の効果（耐久性）を4種類の塗料において「複合サイクル促進試験」にて効果を確認している。点検業務における適用性を判断するために、実橋における点検時塗装の施工性の確認を行う。

4-2. 対象橋梁の概要

4-2-1. 諸元

試験施工の対象とする橋梁の諸元を表 4-1 に、一般図を図 4-1 に、全景写真を図 4-2 に示す。

表 4-1 対象橋梁の諸元

橋種	単純 I 桁橋
径間数	2
橋長	17.0m
全幅員	3.6m
供用開始年	昭和 41 年
塗装履歴	塗替え記録なし
設置環境	太平洋の海岸線から 2.3km, 凍結防止剤散布なし

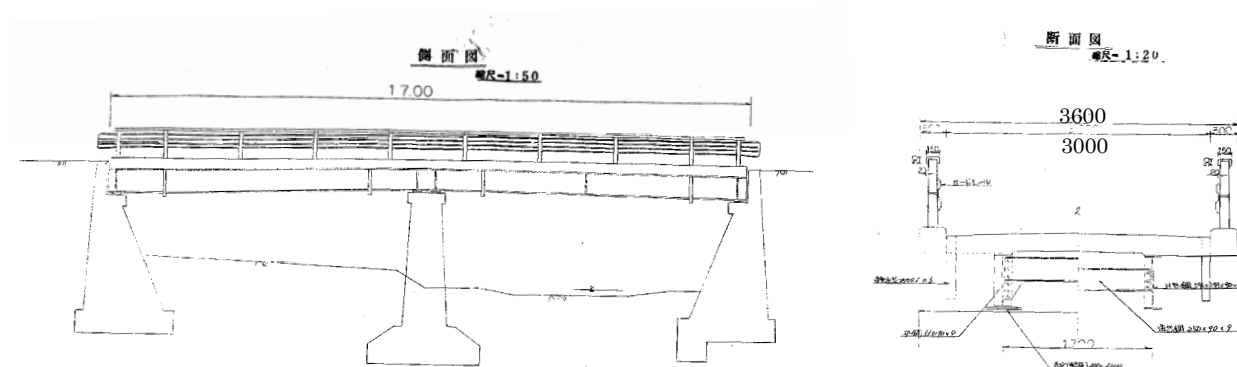


図 4-1 対象橋梁の一般図



図 4-2 対象橋梁の全景写真

4-2-2. 点検結果

対象橋梁は、2010 年に目視点検を実施しており、主桁・横桁に経年劣化が原因と思われる損傷が発生しているが、損傷は表面的で進行は遅いと思われることから「状況に応じて補修を行う必要がある(対策区分 B)」と判定されている。G2 桁に防食機能の劣化 e ランク，腐食 b ランクの損傷が発生している。上部工の損傷図を図 4-3 に、主桁の損傷写真を図 4-4 に示す。

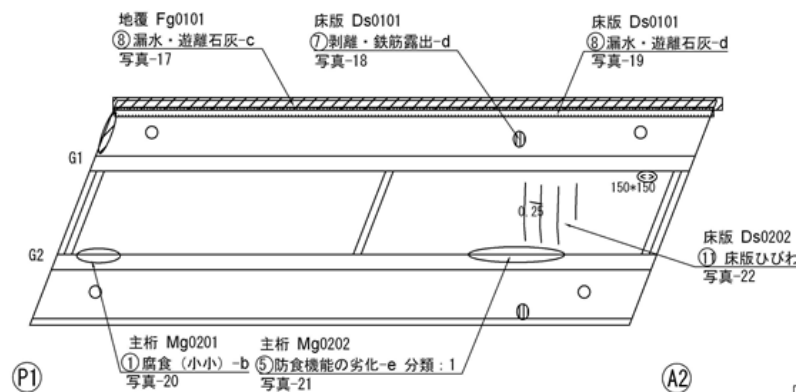


図 4-3 対象橋梁の損傷図



図 4-4 主桁 Mg0202 の損傷写真（試験施工対象範囲）

4-3 試験施工概要

4-3-1. 使用材料

§3の「複合サイクル促進試験による点検時塗装の適用性検討」と同様に、以下の4種類の塗料を用いて試験塗装を行った。塗料の詳細については、3-2-3. 試験体の条件設定(2) 使用塗料を参照。

- ①2 液性変性エポキシ樹脂塗料
- ②1 液性変性エポキシ樹脂塗料
- ③シリコンアクリル樹脂塗料
- ④2 液性エポキシ樹脂防錆剤

4-3-2. 塗装範囲

塗装範囲は、Mg0202の主桁腹板の両側（高さ200mm×幅100mm）、下フランジ上下面（幅100mm）、他の塗料との離隔100mmとして実施した。試験施工範囲を図4-5に示す。

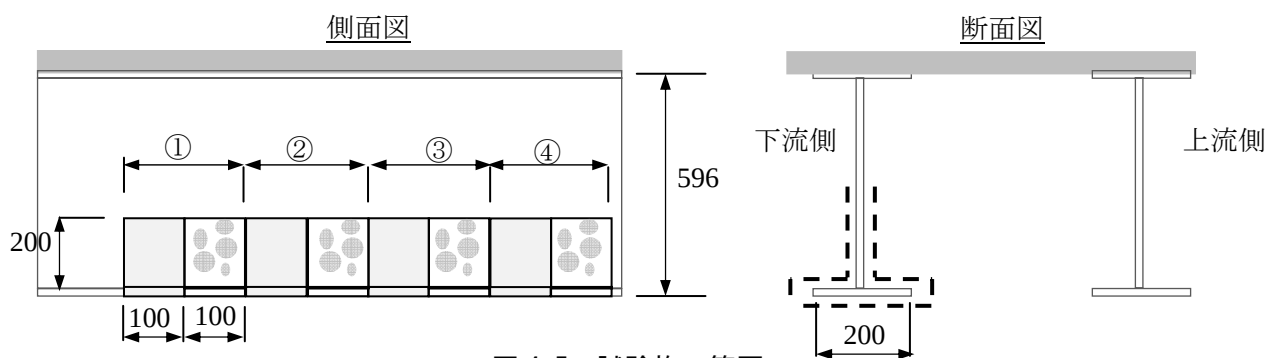


図 4-5 試験施工範囲

4-3-3. 塗装方法

塗装は、高さ200mm×幅100mmの面的な吹付けと、さび発生位置に合わせての点的な吹付けの2通り実施した。面的な吹付けは、30cm程度の距離で、1往復1～2秒程度を3往復実施した。点的な吹付けは、さび発生位置に合わせて、1回1～2秒程度実施した。

4-3-4. 作業環境

試験施工の作業日および外部環境を表4-2に示す。

表 4-2 試験施工時の外部環境

作業日時	2016年1月14日 13:00～15:00
天候	晴れ
気温	桁外側：9度，桁内側 11℃
湿度	桁外側：48%，桁内側 41%

4-3-5. 塗装状況

スプレー塗装作業は、以下の手順で実施した。

- ①塗装対象範囲の埃および既存塗装のはがれ等を乾いた布で拭き取る
- ②塗装対象範囲のマーキング
- ③塗装対象範囲の外側に塗料が付着しないように、マグネットシートを設置
- ④30cm ほど離れた位置からスプレー吹付け

塗装範囲のマーキングした状態を図 4-6 に、マグネットシート設置状況を図 4-7 に、吹付け後の状態を図 4-8、4 種類の塗料の吹付け後の状態を図 4-9 に示す。



図 4-6 マーキング

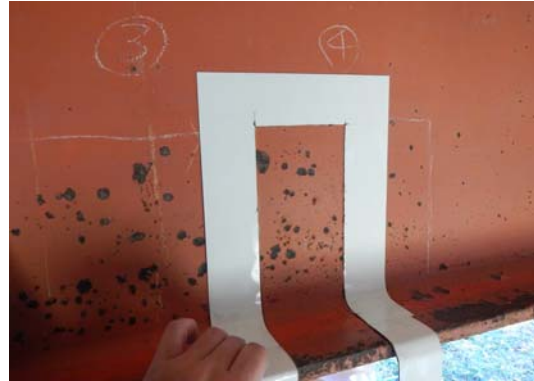


図 4-7 マグネットシート設置



図 4-8 吹付け後の状態



図 4-9 4 種類の塗料の吹付け後の状態

4-4 実施後状況

4-4-1. 塗装面外観

施工後 4 日後, 3 週間後, 7 週間後に, 塗装面の状態を観測しており, 表面の塗装劣化, はがれ等は見受けられない. 外観写真を図 4-10 に示す.



図 4-10 施工後 4 日後, 3 週間後, 7 週間後の塗装状態

4-4-2. 膜厚

外観写真と同様に, 施工後 4 日後, 3 週間後, 7 週間後に, 塗膜厚を観測しており, さび面, 下地が塗装面共に, 急激な減少は見受けられない.

4-5 考察

4-5-1. 事前作業の注意点

点検時塗装における事前作業での注意点を以下に示す。

- ・ケレンは必要ないが、塗装が剥がれかけている箇所は乾いた布等で拭いて、ある程度フラットにしておく必要がある。
- ・下フランジ上面には砂塵、埃の堆積があり、布等での簡易な清掃は必要である。

4-5-2. 作業時の注意点

点検時塗装における塗料吹付け作業での注意点を以下に示す。

- ・吹付け距離が 20cm 未満で近すぎると吹付け後、塗料が垂れるため、30cm 程度の距離を確保する必要がある。
- ・桁外側で作業する際は、風の影響があるため、吹付け角度に注意する必要がある。
- ・3 往復塗装では、塗膜が厚すぎるので、2 往復程度が妥当である。
- ・また、吹付け量が多く、塗膜が厚すぎると、液だれ、空気だまりが発生してしまう。
- ・2 液性塗料については、可使時間が 3 日間程度であるので、点検計画を策定する際に、点検時塗装を配慮する必要がある。

4-5-3. 点検時塗装の施工性

点検時塗装の施工性について、スプレーの携行性、事前準備、作業性、可使時間、スプレーの 1 本当たりの塗装可能面積などの観点から評価を行った。各塗料における評価結果を表 4-3 に示す。

表 4-3 各塗料における施工性の評価

塗料種別	携行性	事前準備	作業性	可使時間	塗装可能 面積 (1本当たり)	下面の 密着性
①2液性変性エポキシ樹脂塗料	○	△	○	△	△	○
②1液性変性エポキシ樹脂塗料	○	○	○	○	○	○
③シリコンアクリル樹脂塗料	○	○	○	○	○	○
④2液性エポキシ樹脂防錆剤	○	△	○	△	△	○

- ・4 塗料とも、8×20cm 程度の大きさのスプレー缶であるため、点検時に携行する大きさとしては、特に支障はない。
- ・2 液性のスプレーにおいては、2 液を混合させるために、10 分ほど時間を要するが、点検結果の記録、写真撮影など他の作業と並行することにより、この程度の時間であれば問題ないと思われる。
- ・下地処理は簡易的な清掃程度で吹付け可能であるので、点検作業と併せて作業が可能である。
- ・ウェブ、下フランジ上面への吹付けは容易に行えるが、上フランジ下面、下フランジ下面については、下からの吹付けになるため、吹付け角度に注意する必要があるが、斜め 45 度くらいの吹付けで、付着可能であるので、どの部位に対しても比較的容易に施工可能である。
- ・2 液性のスプレーにおいては、2 液を混合させた後 3 日以内に使用しないと効果が期待出来ないため短期間で使い切る必要があるが、点検計画策定時に、このことを配慮することによって大きな問題にはならないと思われる。

- ・ 1 本当たりの塗装可能面積が小さいのは、塗料①の 2 液性エポキシ樹脂塗料であるが、1 本当たり 0.3m^2 程度の容量であるため、移動車両等に数本のストックを携行する必要がある。

施工性の考察結果より、4 種類の塗料において大差はないと思われる。点検時塗装の施工性だけでなく、経過観察を実施し耐久性を検証する必要がある。

§ 5 まとめと今後の課題

5-1 検討項目のまとめ

本研究では、塗装橋梁の長寿命化手法として、橋梁点検時に合わせて応急的な補修塗装を行う「点検時塗装」を提案し、「部分塗替え塗装」と併用することで塗装塗替えの新たなシナリオを評価した。その結果を以下に記す。

- ・ 「点検時塗装」と「部分塗替え塗装」を併用し、橋梁全体の劣化を平準化して、全面塗替え塗装を延伸することで、設計耐用年数 100 年のライフサイクルコストにおいて、全面塗替え塗装をベースとしたシナリオより経済的に優位であることを確認できた。
- ・ 「点検時塗装」の塗料性能の評価を複合サイクル促進試験で検証し、外観、カット部さび幅、付着力、さび発生面積、最大減肉厚で評価した。さび発生面積が 20～30%の軽微なさび面に直接塗布した場合においても、2 液性変性エポキシ樹脂塗料、1 液性変性エポキシ樹脂塗料、2 液性変性エポキシ樹脂防錆剤の 3 種類の塗料で点検間隔 5 年間に相当する耐久性を確認できた。さらに、2 液性変性エポキシ樹脂塗料、2 液性変性エポキシ樹脂防錆剤については、さび発生面積 60%以上の試験体に対しても 5 年間相当の耐久性が確認できた。
- ・ 「点検時塗装」の施工性を、塗料性能の評価を行った 4 種類のエアゾール式スプレー塗料を用いて、I 桁形式の実橋への塗布で確認した。全ての塗料が、吹付け方向による影響も少なく、点検時に合わせて施工ができることを確認できた。ただし、吹付け距離が近すぎると気泡を発生し、塗装品質を悪化させることから、吹付け距離は使用する塗料に応じて留意する必要がある。
- ・ 簡易の入力項目で、「点検時塗装」、「部分塗替え塗装」、「全面塗替え塗装」を自由に組み合わせたシナリオのライフサイクルコストを比較できるソフトを作成できた。これを利用してもらうことで、「点検時塗装」を含めた長寿命化シナリオの立案を支援できる。

5-2 今後の課題

- (1) 暴露試験による点検時塗装の耐久性確認
紫外線など実橋における外部からの様々な劣化要因に対する耐久性を、実橋塗布や暴露試験で確認することが課題となる。
- (2) 点検時塗装塗り重ね部の外部と内部劣化の確認
点検時塗装部は、点検時にさび発生面に周期的に塗り重ねるため、点検時塗装部を塗り重ねることが想定される。その際の塗装外部及び内部の劣化進行を確認することが課題となる。
- (3) 既存塗装橋梁の塗装系に対する点検時塗装の性能確認
本研究では、軽微に腐食しているさび面に対する検証を行ったが、一般塗装系や重防食系の塗膜劣化面や塗装系により異なる腐食傾向に対する耐力等を確認することで、より効率的な予防保全方法としての活用が期待できる。

第2章の参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，丸善，2014
- 2) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術，JSSC テクニカルレポート No145，1995.9
- 3) 田中伸二：本州四国連絡高速道路における海峡部長大橋の保全への取り組み，建設マネジメント技術，2010.1
- 4) 井口 祐樹，杉本 義博：点検時措置による構造物の耐久性向上，平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集，2012.7
- 5) 国土交通省：鋼道路橋の部分塗替え塗装要領（案），2009.9
- 6) 国土交通省：道路橋定期点検業務積算資料（暫定版），2014.8
- 7) JIS K-5600-7-9，塗料一般試験方法 - 第7部 塗膜の長期耐久性，2006
- 8) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集 No.570, pp.127-140, 1997.7
- 9) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル，JSSC テクニカルレポート Vol.25，1993.9