

塗膜のせん断方向の付着性に着目した塗膜健全性評価

鈴木 慧* 坂本 達朗* 鈴木 隼人**

Evaluation of Adhesion Stress of Coating Film Focusing on Shear Direction

Akira SUZUKI Tatsuro SAKAMOTO Hayato SUZUKI

Recently, cracking and peeling of the coating film have occurred at earlier stage after repainting. One of the reasons for this is the degraded coating film is not sufficiently removed. In order to improve the subject, it is necessary to properly evaluate the state of the existing coating film and remove before repainting. In this report, the authors considered a new method for evaluating adhesion stress of coating film focusing on the shear direction. The result of the study showed that the new method correlated with the conventional method.

キーワード：鋼橋，腐食，塗膜，付着性，促進劣化試験，健全性評価

1. はじめに

鋼橋の塗替え施工では、経済性や防食性の観点から、劣化した塗膜やさびのみを除去し、健全な塗膜を残した状態で新たに塗料を塗り重ねる方法が用いられている¹⁾。ところが、近年、塗替え施工後の比較的早期にこれら残存した塗膜（以下、旧塗膜とする）を起点とした割れや剥がれといった変状が散見されている。この理由の一つに、塗膜の定量的な健全性評価手法が確立しておらず、劣化した旧塗膜を残した状態で塗り重ねたことが挙げられる。鋼橋によっては数十年前の新設時に塗装した塗膜が残存している場合があり、特にそれらの劣化が近年になり顕在化してきたと推定される。変状が発生した箇所では部材の防食性が失われることから、腐食による構造物の安全性低下が懸念される。

劣化した旧塗膜を確実に除去する手法の一つに、旧塗膜をすべて除去する塗膜更新が挙げられるが、一般的な塗替え施工よりも時間とコストを要するため、塗替え対象となった全ての鋼橋に対して実施するのは困難である。このため、塗膜の健全性を定量的に判定する手法を構築し、従来の塗替え施工の適切な実施を推進する必要がある。

以上の状況に鑑み、本研究では塗膜の定量的な健全性評価手法の開発を目的として、塗膜に作用する内部応力すなわちせん断方向の力が塗膜変状に影響するとした報告²⁾をもとに、塗膜のせん断方向の付着性に着目した手法を検討した。また文献3を元に条件設定した劣化促進試験により付着性の異なる塗装試験体を用いて、当該手法の妥当性を室内試験によって評価した。

2. 変状のメカニズム

実鋼橋で見られる割れおよび剥がれ発生時のイメージを図1に示す。旧塗膜上に塗り重ねた後に変状が生じる要因の一つに、塗り重ねた塗料が硬化する過程で体積収縮し、旧塗膜に内部応力が蓄積することが挙げられる²⁾。この内部応力は面方向、すなわち塗膜のせん断方向に作用する。この力の作用により、旧塗膜が脆化している場合には割れ、鋼材／塗膜間の付着性が低下している場合には剥がれなど、旧塗膜の状態に応じた塗膜変状が発生すると推定される。

3. 新規評価手法の概要

現在、塗膜の健全性を評価する主な手法として、表1に示すアドヒジョン試験および基盤目試験が挙げられる。これらはJISに規定された試験方法であり、塗膜の垂直方向またはせん断方向に力を作用させた際の塗膜の破壊挙動から付着性を評価するものである。本研究で対象としている塗膜変状は、前章で述べたせん断方向の力に起因すると仮定した場合、特に基盤目試験との相関が強いと考えられる。同試験は図2に示すようにカッターで塗膜に傷を導入し、せん断力を作用させる試験方法である。カッターの操作は人力であるため、作業者によって作用する力にばらつきが生じ、複数の試験結果を定量的に比較することは困難である。

これを受けて、筆者らは基盤目試験をベースとして、楔（くさび）状工具を機械的に塗膜に押し込むことによってせん断力を作用させる新たな評価手法を考案した⁴⁾。本試験で使用した楔状工具およびその治具の形状を図3に示す。同手法では塗膜上に受け治具を設置し、差し込み口に楔状工具を挿入する。この状態で上部から載荷することで、目的箇所に垂直に楔状工具を押し込むことが

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 材料技術研究部 防振材料研究室

(現 建設塗装工業株式会社)

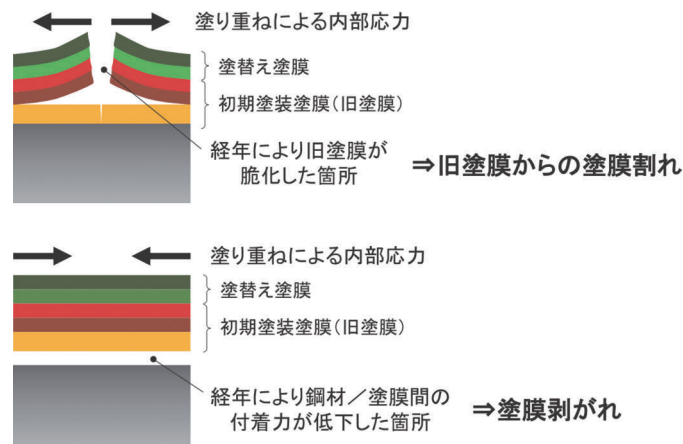


図1 塗膜の変状イメージ

表1 従来付着性評価試験の概要

試験名称	対応規格	概要	力の作用方向	測定原理に基づいて推定される 実現象との相関程度
アドヒジョン試験	JIS K 5600-5-7	アルミニウム合金製のジグを 接着剤で塗面に貼り付け、 専用機器で垂直引張した際の破断時応力から 塗膜の付着性を評価する。	垂直方向	弱
基盤目試験	JIS K 5600-5-6	カッターで塗膜に切れ込みを導入して せん断力を作用させた後、 テープで同箇所を引張塗り、 塗膜に垂直引張力とせん断力を作用させ、 塗膜の残存程度から付着性を評価する。	・せん断方向 ・垂直方向	強

可能となる。人力に頼らない統一された载荷条件を導入することにより、作業者によるばらつきの影響を抑制することができる。

4. 劣化塗装試験体の作製

新規評価手法の妥当性を検証するためには、付着性の異なる塗装試験体を準備し、既往の付着性評価試験結果との関係を比較する必要がある。塗膜の付着性は経年による塗膜の酸化・脆化程度、すなわち劣化状態に影響する。このため、塗膜の劣化を促す環境条件（以下、促進劣化条件とする）を見出すことにより、付着性の異なる塗装試験体を作製することが可能となる⁵⁾。そこで本章では、塗装試験体の付着性を変化させることが可能な促進劣化条件について検討した。

4.1 試験方法

試験体には、架け替えに伴い廃棄対象となった3つの鋼橋から切出した部材を用いた。これらはいずれも架設から50年以上供用された経歴があり塗膜の経年数も比

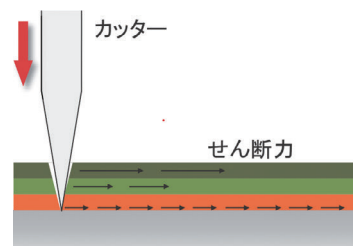


図2 基盤目試験 概要

較的長いものであるが、後述する付着性試験の結果、垂直方向およびせん断方向の付着性を有していることが確認された。そのため促進劣化試験により付着性を調整できる余地があり、かつ実際に供用されていた塗膜を使用することで、現場で測定する状況に近い結果を得られると判断した。各々の部材から約220×120mmの寸法で切り出したものを試験体①～③とした。塗膜断面の観察結果と架設時期から判明した、各試験体に適用されていた塗装系の構成とその詳細を表2～5に示す。試験体①、②は新設時塗装系が残存しており、それ以降の塗装系B-7の塗り重ね回数が異なることから、フタル酸樹脂塗料

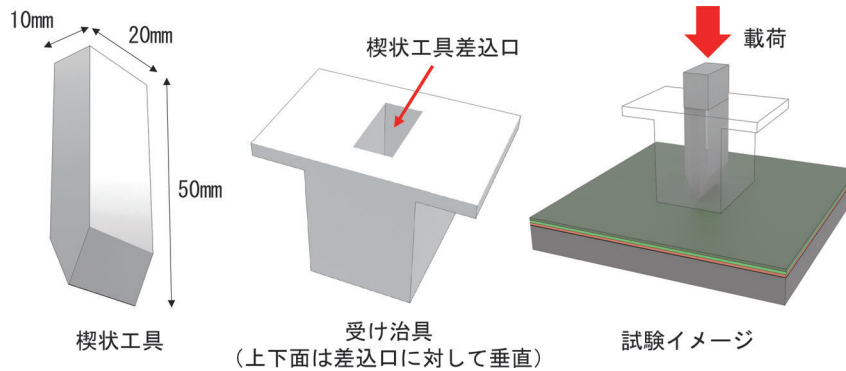


図3 楔状工具および受け治具

を主とした塗装系で膜厚が異なる条件を比較するために用いた。試験体③は塗装系 B-7 が 2 回適用された上にエポキシ樹脂塗料を主とした塗装系 G-7 が適用されていることから、塗料種による挙動の変化を試験体①、②と比較するために用いた。

促進劣化条件の設定にあたり、過去の文献では高温高湿条件下に設置した塗装試験体に、実鋼橋に見られるものと類似した変状が生じていると報告されている³⁾。また、鉄道で用いられる種々の塗料で作製した塗装試験体に対し、高温高湿環境下に設置したところ、フタル酸樹脂塗膜の脆化が顕著に進行し、同時に付着性が低下したことが報告されている⁵⁾。本研究ではこれらの知見に基づき、75℃、85%RH の高温高湿条件に設定した恒温恒湿槽内に試験体①～③を設置して促進劣化試験を行うこととした。

恒温恒湿槽に設置後、所定時間経過後に回収した試験体を 23℃、50%RH の室内で 48 時間養生し、表 1 のアドヒジョン試験および基盤目試験を実施した。各試験から得られた破断時応力および塗膜残存面積率から、試験時間と付着性の関係を評価した。

4.2 結果と考察

試験体①～③のアドヒジョン試験および基盤目試験の結果を図 4 に示す。各試験体とも時間とともに破断時応力および塗膜残存面積率が減少し、垂直方向およびせん断方向の付着性低下が確認された。

同種の塗装系で塗り替え回数が異なる試験体①、②を比較すると、本試験ではいずれの試験体に対しても破断時応力が 2MPa、残存面積率が 20% を下回るまで促進劣化試験を継続し、その日数は両試験体ともに 100 日程度であった。すなわち塗装系 B-7 の塗り替え回数による違いは確認されなかった。

一方、試験体①、②と適用された塗装系が異なる試験体③の条件では、促進劣化試験前の塗膜の付着性がほかの 2 試験体と比較して大きく変わらないにも関わらず、試験終了まで 250 日以上を要した。この要因の一つに、

表2 各試験体の構成

新設時塗装または 塗替え塗装回数	試験体①	試験体②	試験体③
1	新設時塗装系	新設時塗装系	塗装系 B-7
2	塗装系 B-7	塗装系 B-7	塗装系 B-7
3	塗装系 B-7	塗装系 B-7	塗装系 G-7
4	塗装系 B-7		

表3 新設時塗装系の構成

工程	塗料
第1層	鉛丹さび止めペイント
第2層	鉛丹さび止めペイント
第3層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗
第4層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗

表4 塗装系 B-7 の構成

工程	塗料
第1層	鉛系さび止めペイント
第2層	鉛系さび止めペイント
第3層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗
第4層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗

表5 塗装系 G-7 の構成

工程	塗料
第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料
第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料
第3層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料
第4層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料

同試験体に適用された塗装系 G-7 の影響が考えられる。同塗装系に用いられるエポキシ樹脂塗料はフタル酸樹脂塗料と比べて機械的強度、付着性、環境遮断性に優れる¹⁾。よって高温高湿環境下でも同樹脂は高い耐久性を有し、下層の塗装系の劣化を抑制したため、試験体③では付着性が低下するまでに長時間を要したと推定される。

以上の結果から、当該の促進劣化条件を適用することで塗膜の付着性を調整できることが分かった。

5. 新規評価手法の妥当性評価

楔状工具を用いた、付着性に関する新規評価手法の妥

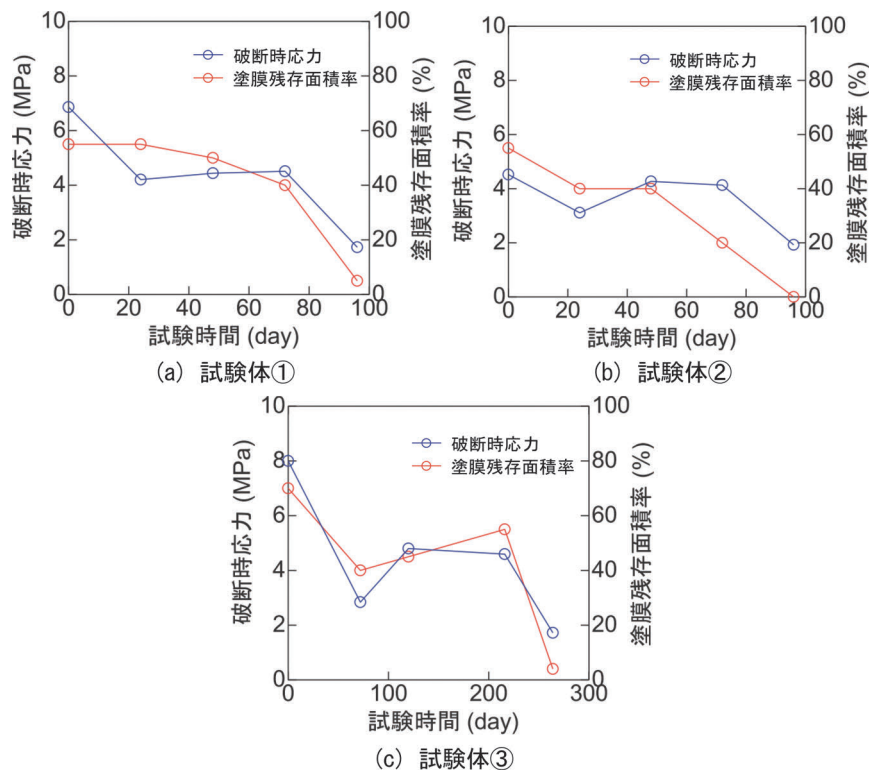


図4 付着性評価結果

当性を検討するため、前章で設定した促進劣化条件を適用して作製した付着性の異なる塗装試験体に対して、新規評価手法を適用し、従来評価試験であるアドヒジョン試験と基盤目試験との相関を検討した。

5.1 試験方法

試験には前章で用いた3試験体のうち、促進劣化試験に対する付着性の低下速度が比較的緩やかであり、目的の劣化程度の試験体を作製しやすいと考えられた試験体③を採用した。劣化程度の異なる条件として初期状態のものに加え、75℃、85%RHの促進劣化条件に設定した恒温恒湿槽内に49日および77日間時間設置したものをを用いた。このとき各試験体の基盤目試験実施箇所における残存率はそれぞれ約80%、30%となった。

試験状況を図5に示す。楔状工具の押し込みには材料試験機を使用し、工具の押し込み量と荷重を測定した。なお、試験体の膜厚は数百 μm 程度であり、これに対して工具の押し込み量は設計上十分に確保されている。このとき試験体の固定には山形形状のアルミ製アングル材を使用した。また塗膜表面のわずかな不陸によって工具の押し込み方向が完全な垂直ではないことを考慮し、球座を介して工具を押し込むこととした。工具の移動量の測定には接触式変位計を用いて比較した。予備試験の結果、押し込み速度により塗膜破断時の荷重が変化する傾向が見られたことから、本試験では押し込み速度を

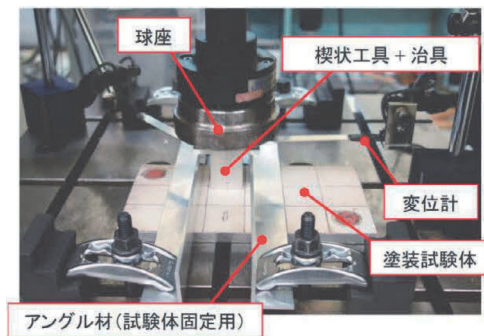


図5 試験状況

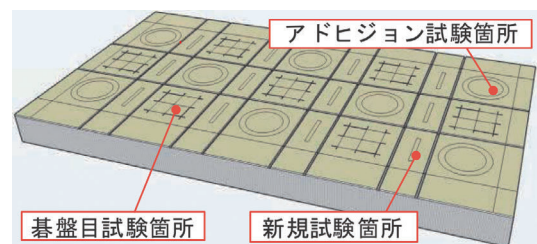


図6 試験体の使用状況

0.1mm/minで統一した。楔状工具が塗膜に接触する際の接触面積の影響を把握するため、先端が鋭利な工具（工具①）と、先端に0.25, 0.45, 0.65mmの平坦な幅を設けた工具（それぞれ工具②, ③, ④）を用いた。新規評価手法と従来手法の相関を評価するため、工具を押し込んだ箇所の近傍で前章と同じくアドヒジョン試験および基盤目試験を実施した。

なお、このとき各種試験を連続した塗膜に対して行くと、相互に結果に影響を及ぼす可能性が懸念される。そこで図6に示すように電動工具で塗膜に格子状のカット傷を導入し、各試験により塗膜に作用させた外力の影響が格子内に収まるようにした。また、基盤目試験についてはすべての作業を同一の作業者が実施することとし、作業者によるばらつきを低減させた。

5.2 結果と考察

5.2.1 押し込み量と荷重の相関

先端が鋭利な楔状工具（工具①）を用いた場合の、試験中の押し込み量に対する荷重の関係を図7に示す。荷重は押し込み量約0.1mmでピークに達し、ここで塗膜の割れが確認された。一旦塗膜が割れると工具に対する抵抗は急速に低下し荷重が減少するが、やがて鋼素地近傍に達すると再び荷重が増加した。この試験結果から、塗膜の劣化程度や付着性は塗膜の破壊が生じるピーク荷重と相関があると考えられる。また2回の試行で荷重-変位曲線はおおむね同等の形状を示したため、本試験は良好な再現性を有していると考えられる。

5.2.2 工具の形状の影響

楔状工具の先端形状を変えて試験を実施した場合の工具先端の面積とピーク時の荷重の関係を図8に示す。なお、工具先端の面積は各工具の先端幅から算出したものであり、面積が小さい方から工具①, ②, ③, ④を示している。この結果よりピーク時の荷重と工具先端の面積

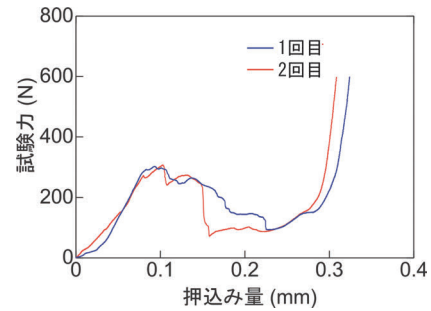


図7 押し込み量に対する荷重の関係

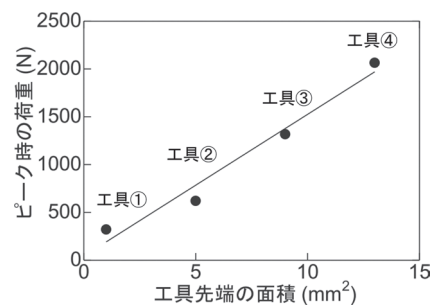


図8 接触面積と破断力の関係

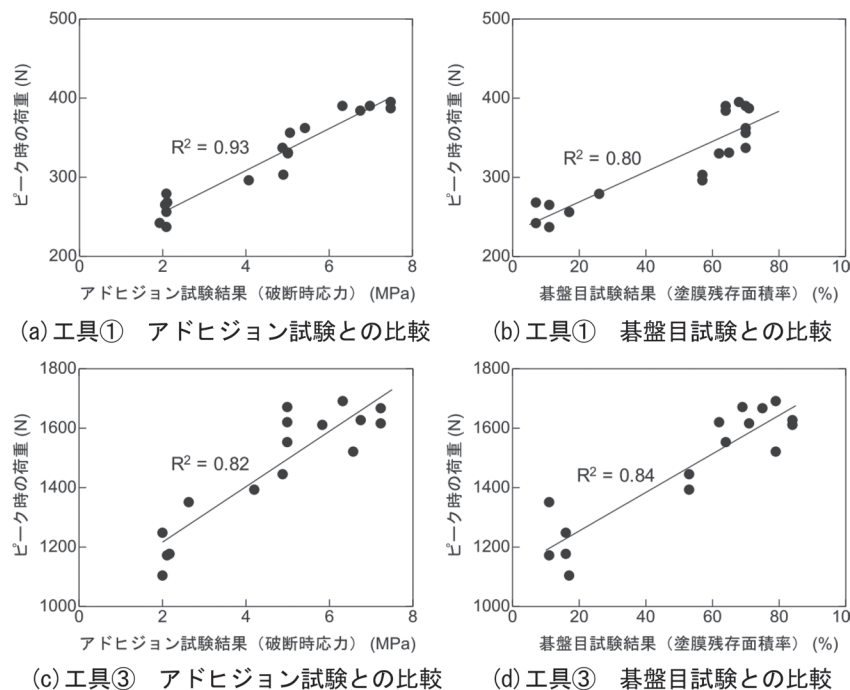


図9 新規評価手法と従来手法の比較

には線形の相関が確認された。ここで図中の直線の傾きは塗膜に作用する応力を示しており、約 150MPa である。すなわち本試験体では工具先端の面積によらず応力が約 150MPa に達すると塗膜が破壊されることが分かった。

5.2.3 従来試験との相関

新規評価手法におけるピーク時の荷重と、近傍で実施したアドヒジョン試験および碁盤目試験の結果を比較したものを図 9 に示す。工具の種類は先端形状が鋭利な工具①と、平坦な工具③の結果を示す。なおここでは平坦な条件として工具④は必要な荷重が比較的大きいため、試験効率を考慮して工具③を選定した。図より新規評価手法の結果は工具の先端形状によらず、碁盤目試験の残存面積率およびアドヒジョン試験の破断時応力に対して線形の関係を有することが確認された。

ただし新規評価手法は工具を押し込む際に発生するせん断方向の力に着目するものであり、せん断方向の力は先述したように塗膜厚に依存する。そのため、垂直方向の付着性を評価するアドヒジョン試験については本条件と異なる膜厚条件では相関が得られない可能性が懸念される。そこで、異なる膜厚間で実施した新規評価手法とアドヒジョン試験の結果を改めて比較することとした。試験体には平均膜厚が約 450 μ m の塗装鋼板を用いて、サンドペーパーで塗膜を部分的に表面から研削し、膜厚約 250 μ m となる領域を設けた。これらの膜厚が異なる 2 箇所に対して前節と同様に楔状工具の静的押しつけとアドヒジョン試験を実施した。

試験結果を図 10 に示す。新規評価手法の結果に着目すると、膜厚が薄い 250 μ m の条件の方が 450 μ m の条件に比べてピーク時の荷重が大きくなる傾向が見られた。この要因として、膜厚の減少に伴い楔状工具の押し込み量に応じて生じるせん断方向の力が小さくなったことが挙げられる。一方でアドヒジョン試験の結果に着目すると、破断時応力は膜厚によらず約 6~7MPa の範囲に収まっており、ばらつきは比較的小さかった。よって、新規評価手法とアドヒジョン試験の相関は膜厚により変化することが明らかとなった。

以上から、楔状工具を塗膜に静的に載荷する試験を実施したところ、従来の評価手法である碁盤目試験の結果との間に相関が見られ、検討した新規評価手法で塗膜の付着性を定量的に評価できる見通しを得た。

6. まとめ

塗膜の定量的な健全性評価手法の開発を目的として、変状発生への寄与が推定される塗膜のせん断方向の付着性に着目した新規の評価手法を検討した。また、付着性の異なる塗装試験体を用いて、当該手法の妥当性を室内

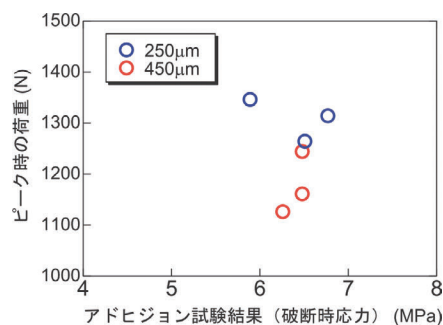


図 10 膜厚を変化させた場合の新規評価手法とアドヒジョン試験の比較

試験によって評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 塗り重ねに伴う内部応力の増加は主にせん断方向の力として作用し、塗膜変状の発生要因になることが推定された。このことから、塗膜の健全性を定量的に評価する手法として、楔状工具を静的に載荷してせん断方向の力を塗膜へ作用させる試験手法を検討した。
- (2) 新規評価手法の検討にあたり、付着性を変化させた複数種類の塗装試験体を作製するための促進劣化試験条件について検討した。その結果、75℃、85%RH の促進劣化条件の適用時間により付着性が調整できることが分かった。
- (3) 廃用桁から切り出した塗装鋼材に対し促進劣化条件を適用した試験体に載荷試験を実施したところ、従来の評価手法である碁盤目試験の結果との間に相関が見られ、新規評価手法で塗膜の付着性を定量的に評価できる見通しを得た。

以上の結果をもとに、今回検討した新規評価手法をベースに、今後は現場で使用可能な試験機器を開発する予定である。

文 献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013
- 2) 佐藤弘三：塗膜の内部応力と付着性および割れ (3)，接着，Vol. 43, No. 12, pp. 558-566, 1999
- 3) 田中誠，江成孝文，坂本達朗：鋼鉄道橋の塗膜劣化実態調査，防錆管理，Vol. 52, No. 4, pp. 137-144, 2008
- 4) 坂本達朗，鈴木慧，鈴木隼人：経年した塗膜の定量的な健全性評価方法，第 41 回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp. 147-150, 2021
- 5) 鈴木隼人，坂本達朗，鈴木慧：塗膜特性への温度と湿度の影響に関する基礎検討，第 42 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp. 9-16, 2019