

導電性表面材料を用いた 鋼構造物用き裂検知手法の開発

坂本 達朗* 鈴木 実* 田中 誠**
小林 裕介*** 杉舘 政雄#

Development of Detecting System of Fatigue Crack in Steel Railway Bridge Using Electric Conductive Surface Material

Tatsuro SAKAMOTO Minoru SUZUKI Makoto TANAKA
Yusuke KOBAYASHI Masao SUGIDATE

In maintenance of steel railway bridges, assessment of safety against fatigue failure is considered as one of significant factors. The current method of the inspection of the steel railway bridge has been mainly visual check. Therefore, it is needed to devise a method for detecting fatigue cracks automatically with greater accuracy. We have developed an electric conductive paint which can detect the generation and the progress of fatigue cracks. We have evaluated the detective properties by the experiments under the simulated actual steel bridge and real environment. Further we have examined the optimization of the installing method of this device in order to judge whether this device can be applied to actual steel bridge or not.

キーワード：疲労き裂，導電性表面材料，インピーダンス，塗装系，維持管理

1. はじめに

鋼鉄道橋の維持管理において、鋼材に生じる疲労き裂は安全性を低下させる重大な変状の一つである。そのため、構造物の健全性判定を目的として、2年を超えない範囲で実施される巡回足場からの目視検査や、塗替え塗装周期での塗装足場を利用した詳細な目視検査が定期的に行なわれてきた¹⁾。目視検査は複雑な機器を使用しない簡便な検査手法であるが、橋りょうの構造や架設箇所によっては、全ての部材を点検するのが困難となるケースがある。また、初期段階の変状発見は検査者の技術に依存し、一般的に長さ10mm以下の疲労き裂の発見は困難とされている。そのため、補修・補強が行われるのは、疲労き裂がある程度進展した段階となることが多い。したがって、目視困難な箇所における変状の有無の確認や、疲労き裂の早期発見が可能となれば、補修・補強工事の計画化、経済化に寄与し、維持管理費の節減および精度向上が期待できる。

筆者らは、目視検査を補完する疲労き裂検知手法について検討を行い、電気的特性変化から疲労き裂の発生お

よび進展を検知可能な導電性表面材料を開発し、試験片レベルでのき裂検知性能や長期耐久性等を確認した²⁾。本報では、導電性表面材料を用いたき裂検知手法の実構造物への適用性把握を目的として、実構造物を模擬した試験体を用いたき裂検知性評価試験や、屋外環境(温湿度条件)に対する導電性表面材料への影響評価、導電性表面材料の施工工程最適化に関する検討を行なった結果について述べる。

2. 導電性表面材料の基本特性

開発した導電性表面材料は塗膜状の材料であり、導電性顔料の配合により適度な抵抗率を有する。これは、表1の各項目に示すき裂検知材料の要求性能に合致する材料について検討した結果である。項目Aは現場で想定される制約下で施工できる材料を目標とした。導電性表面材料は現場塗替え作業に用いられる防食塗料と同等の施工性を有する。項目Bは、長期耐久性を有する防食塗膜(以下、塗装系と称する)の塗替え塗装と同時に更新、補修できるような経済性を目標とした。導電性表面材料は塗装系の塗装工程へ組み込むことができるので、塗装系と同等の取り扱いができる。また、組み込んだ塗装系の長期耐久性を促進劣化試験から確認した。項目Cは、現行の目視検査では発見困難とされる数mm単位の疲労き

* 材料技術研究部(防振材料), ** 前材料技術研究部
*** 構造物技術研究部(鋼・複合構造)
前構造物技術研究部(現 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株))

特集：材料技術

裂を発見できることを目標とした。鋼材に導電性表面材を適用した場合、鋼の疲労き裂発生に伴って塗膜がほぼ同時に破壊され、数mm単位のき裂進展を検知可能であることを確認した。また、き裂進展とともに塗膜の電気抵抗が増加することを試験片レベルで明らかにした。

表1 き裂検知材料の要求性能

項目	要求性能
A	既設構造物への適用性
B	長期間（10年以上）の耐久性および信頼性
C	数mm単位のき裂発生・進展検知性

導電性表面材料を用いたき裂検知システムおよびき裂発生時の検知イメージを図1および図2に示す。き裂検知部位ではき裂発生を確実に把握するため、断線に伴う導通の有無によるき裂発生検知を目的とした細線状塗膜と、簡易な直流抵抗測定を用いた抵抗変化によるき裂進展検知を目的とした帯状塗膜を塗装系に組み込むこととした。また、き裂検知部位が接近困難な箇所にある場合を想定し、抵抗測定用の端子台を近接しやすい箇所を設置した。その際、端子台と導電性表面材料を接続する材料として、塗装系と同等の耐久性を確保するため、抵抗率が非常に低い導電性表面材料（以下、配線用導電性表面材料と称する）を用いた。表2に、き裂検知用と配線用の導電性表面材料のそれぞれの特徴を示す。き裂検知用導電性表面材料のバインダーは、主剤にビスフェノールA型エポキシ、硬化剤にポリアミドアミンを用いたエポキシ樹脂であり、数百 μm オーダーのカーボンブラック凝集体（カーボンブラック自体は数十～数百nm）を分散して、 $10\ \Omega \cdot \text{cm}$ 程度の抵抗率とした。配線用導電性表面材料は、材料コストを押さえながら金属線に近い体積抵抗率とするため、バインダーにポリウレタン樹脂、金属顔料にフレック状の銀粉および銀被覆銅粉を用いた。その結果、幅2mm、膜厚60 μm 程度に塗布した場合、長さ100mの細線状に塗布しても、電気抵抗は100 $\ \Omega$ 以下となった。

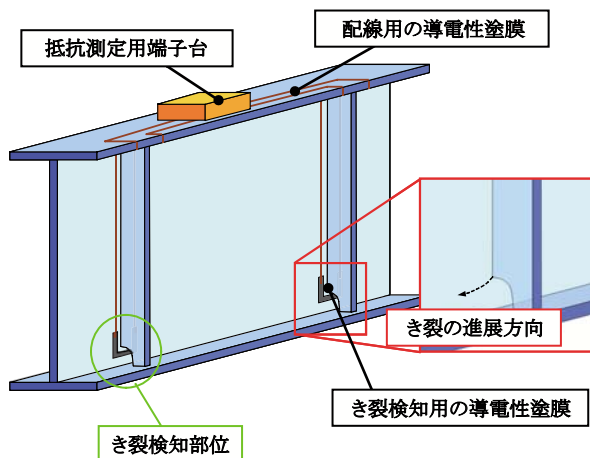


図1 導電性表面材料を用いたき裂検知イメージ

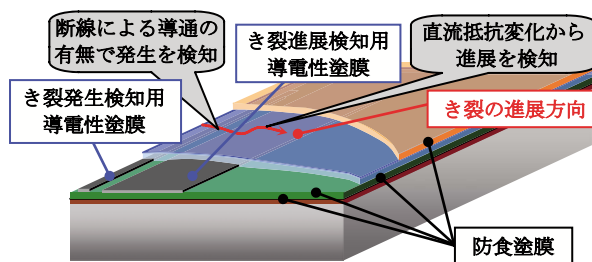


図2 き裂検知部位におけるき裂検知イメージ

表2 き裂検知用、配線用導電性表面材料の特徴

	き裂検知用	配線用
バインダー	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂
顔料	カーボンブラック	銀粉、銀被覆銅粉
顔料:樹脂	2:1（質量比）	2:5（質量比）
抵抗率	$10\ \Omega \cdot \text{cm}$	$10^{-3}\ \Omega \cdot \text{cm}$

3. 実構造物への適用性把握試験

3.1 試験項目

導電性表面材料を用いたき裂検知手法の実構造物への適用性把握を目的として、以下の項目を検討した。

(1) き裂進展検知性の評価

これまで実施したき裂の進展検知性評価試験では、早期のき裂発生を目的とし、薄板鋼板を用いた²⁾。本試験では実橋りょうを想定した疲労き裂に対するき裂検知性を確認するため、実橋りょうと同程度の板厚を有する小型試験片と、模擬部材を溶接して疲労き裂を発生しやすくした模擬桁を用いた疲労試験から、所定の疲労き裂長さ進展時の導電性表面材料の抵抗変化を測定した。

(2) 動的载荷時のき裂の発生検知手法の検討

鋼材の疲労き裂発生に伴って塗膜が破壊されるのは、疲労き裂発生部において、列車通過時に鋼材への動的载荷が生じてき裂開口幅が変動するためと考えられる。図3に発生検知用導電性塗膜の破壊モデルを示す。導電性表面材料は樹脂主体であり、開口幅変動に伴う繰返し疲労により局部的破壊が進行して最終的に材料破断に至るため、破断面形状は破断線に対して左右対称に近くなるためと推定される。このとき、き裂発生後の開口幅変動は鋼橋の構造や内部応力状態等によって異なるため、列車通過状況によっては開口幅が減少し、破断部塗膜の凸部同

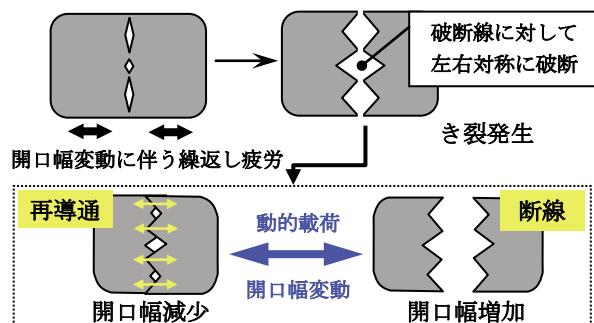


図3 き裂検知材の破壊モデル

士が部分的に接触して再接触すると推定される。この場合、き裂進展検知に用いる直流抵抗測定では、再接触により導通となりき裂発生を検知できない。そこで、動的載荷時におけるき裂発生を検知手法の可能性を検討するため、塗膜のインピーダンス成分変化の測定試験を行った。

(3) 湿度の影響評価

導電性表面材料の導電性は、バインダー中のカーボンブラック凝集体同士の接触によって発現していると考えられている。そのため、屋外施工によって湿度変化に伴う樹脂の吸水が生じた場合、凝集体の接触状況が変化し、電気抵抗が変動することが予想される。そこで、湿度が与える導電性表面材料の電気抵抗への影響把握を目的とした環境試験を行なった。

3.2 試験方法

(1) き裂進展検知性の評価

小型試験体は寸法84×88×10mmのASTM準拠の標準コンパクト試験片を用い、模擬桁は約5500×1000mmのI桁を用いた。塗装工程は絶縁用の厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料およびき裂検知用導電性表面材料の各1回塗りとした。導電性表面材料の寸法は、いずれの試験体においても幅20mm、長さ70mm程度とした。小型試験片の荷重条件はASTMに準拠し、5～10kNの繰返し引張載荷によってき裂進展速度を1mm/1万回とした。模擬桁では下フランジの応力振幅が100MPaとなるよう圧縮載荷した。図4にそれぞれの試験状況を示す。き裂長さはノギスを用いて測定し、導電性表面材料の抵抗にはマルチメータを用いた。

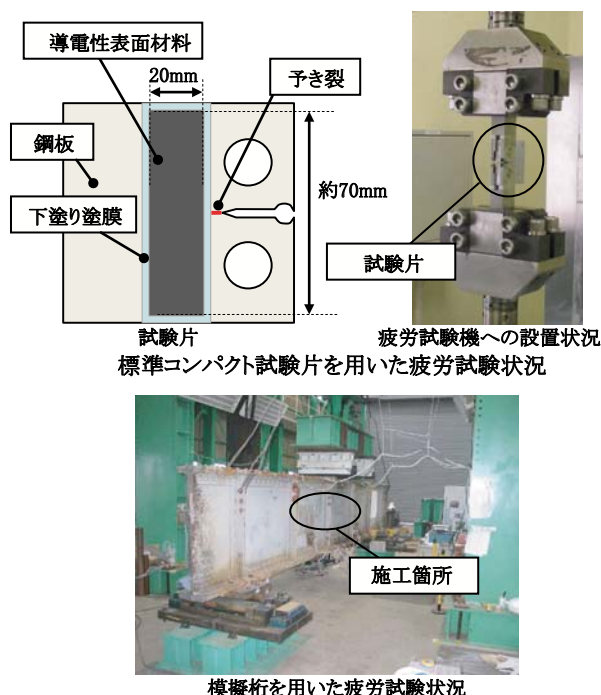


図4 小型試験片と模擬桁の試験状況

(2) 動的載荷時のき裂の発生検知手法の検討

試験片は、400×60×3.2mmの冷間圧延鋼板に厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料およびき裂検知用導電性表面材料を標準状態にて1回ずつ塗布したものを用いた。導電性塗膜寸法は210×2.6mmとした。また、疲労き裂が鋼板長手方向中央部に生じるように深さ2mm、角度90°の切り込みを導入し、最大応力170MPaの繰返し引張り載荷から導電性塗膜を横断する約5mmの疲労き裂を発生させた。図5に試験片の概要を示す。この試験片に0.05kN～20kNの範囲で引張り荷重を与え、き裂開口幅を変化させた場合のインピーダンスをLCRハイテスタで測定した。

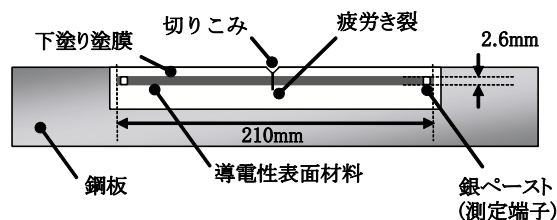


図5 載荷試験用試験片の概要

(3) 湿度の影響評価

試験板は寸法150×70×1.6mmの冷間圧延鋼板とし、塗装工程は絶縁用の厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料およびき裂検知用導電性表面材料の各1回塗りとした。導電性表面材料は25×110×0.03mm程度で塗付け、約23℃の室内で1ヶ月以上養生した。養生後、き裂検知材両端に銀板を銀ペーストで接着し、その銀板に導線をはんだ付けしたものを試験片とした。試験片枚数は5枚とした。試験片周辺の湿度は、恒温恒湿槽を用いて制御した。電気抵抗は高精度で測定するため、四端子法を用いた直流抵抗測定を行った。なお、大気中と導電性表面材料内部間における水分の吸脱着は、平衡状態に達するのに長時間を要したため、ある温湿度条件から別の温湿度条件に変更する際に1時間以上の移行時間を設けた。

3.3 試験結果

(1) き裂進展検知性の評価

小型試験片と模擬桁のそれぞれに疲労き裂を発生させた場合について、き裂長さと初期抵抗からの抵抗変化量を図6に示す。いずれの測定結果でも、き裂長さの増加に伴って抵抗が指数関数的に増加した。その一方で、き裂長さに対する抵抗変化量は模擬桁に施工した方が大きな値を示した。この要因として、模擬桁ではき裂発生に伴う溶接箇所での内部応力の開放により、小型試験片よりも大きなき裂開口幅を有するき裂が発生したことが挙げられる。したがって、き裂進展時の抵抗変化量はき裂開口幅に依存することが認められたが、き裂進展長さは抵抗変化量と一定の関係性を有することから、対象とする構造に係わらず、直流抵抗変化量から疲労き裂の進展長

特集：材料技術

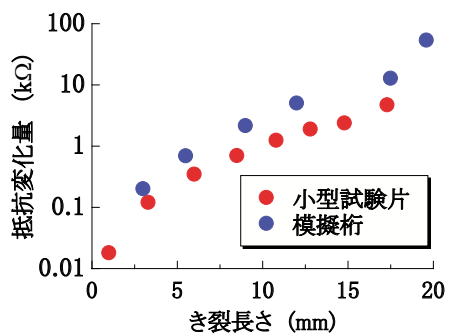


図6 疲労き裂長さとの抵抗の関係

さを検知できることが確認された。

(2) 動的載荷時のき裂の発生検知手法の検討

図7に引張荷重とインピーダンスの関係を表すボード線図を示す。低周波数域でのインピーダンスは荷重条件によって大きくばらついており、一部の条件では疲労き裂発生前の値と大きな違いはないことが確認された。実際の鋼橋においても、構造によってき裂開口幅の変動が小さい場合が想定され、低周波数域では明確なインピーダンス変化が確認できない可能性が示唆された。

高周波数域では、いずれの荷重条件においても周波数に逆比例してインピーダンスが低下した。これは、き裂開口部が静電容量と抵抗の並列回路から成る等価回路を形成するためと考えられる。したがって、高周波数域でのインピーダンス特性がき裂開口幅に依存しないこと、き裂が発生していない場合にはこのようなインピーダンス特性となり得ないことから、高周波数域のインピーダンス測定から動的載荷時のき裂発生を検知できると考えられる。

以上より、次のき裂発生検知方法を考案した。まず、き裂発生以前は直流抵抗の測定によるモニタリングを行なう。その後、測定値が初期抵抗より増加し、き裂発生が懸念される場合、列車通過時等の構造物変位変動時に高周波数域を中心にインピーダンス計測する。高周波数域において、インピーダンスが周波数に逆比例して低下するか否かにより、疲労き裂発生を検知可能であると考えられる。

(3) 湿度の影響評価

一般に塗膜の諸特性は水分の吸湿によって変化すること

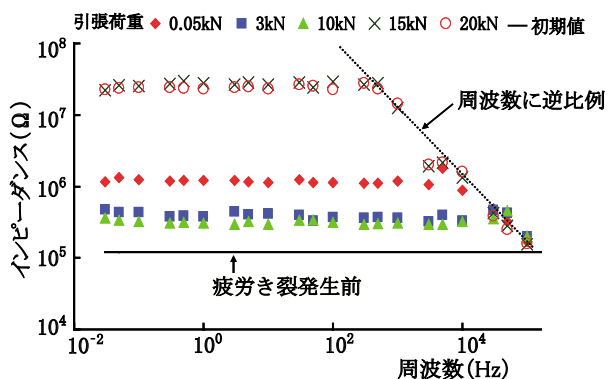
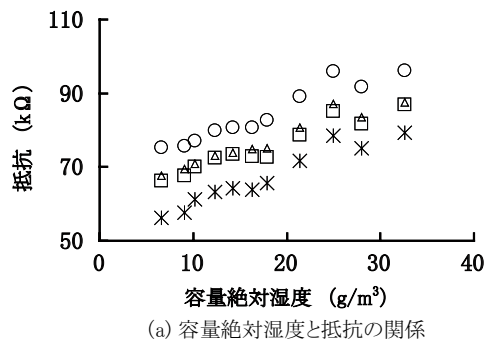
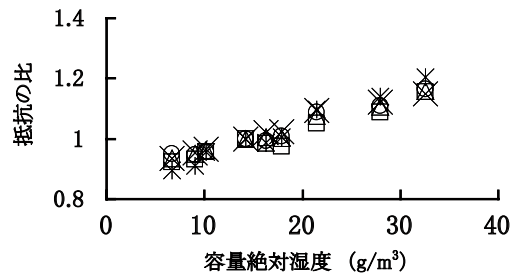


図7 インピーダンスと引張荷重および周波数との関係

とを考慮すると、導電性表面材料の電気特性は大気中の水分量に影響を受けると考えられる。そこで、本試験では一般的に湿度の指標として用いられる相対湿度ではなく、絶対湿度の影響について評価することとした。図8(a)に、5枚の試験片の測定データについて、容量絶対湿度(単位容積中に含まれる水蒸気量)と抵抗の関係に整理した結果を示す。これより、いずれの試験片においても抵抗は容量絶対湿度に対して概ね線形な関係を有し、かつ比例係数はほぼ同等であることが認められた。図8(b)には、23°C、相対湿度70%の抵抗で正規化した結果を示す。これより、5枚のデータは同一の線形関係となり、抵抗と湿度に定量的かつ再現性の高い関係が認められた。その一方で、容量絶対湿度の抵抗に対する影響は無視できないほど大きく、き裂発生・進展に伴う抵抗変化を精度良く測定するには、気象変動による抵抗変化を補証する方法が必要であることが分かった。



(a) 容量絶対湿度と抵抗の関係



(b) 容量絶対湿度と抵抗の関係(23°C, 70%RHで正規化した場合)

図8 絶対湿度と抵抗の関係

4. 気象変動補償方法の検討

4.1 試験概要

前節より、抵抗と容量絶対湿度には、定量的かつ再現性の高い関係が認められた。そのため、ほぼ同一環境下において複数箇所に導電性表面材料を塗布する場合、各導電性表面材料の抵抗は温湿度条件の変化に伴ってほぼ一定の関係を保ったまま推移すると考えられる。したがって、疲労き裂が進展しない箇所に基準となる導電性表面材料を塗布し、その抵抗との比率を求めることにより、気象変動にともなう抵抗変化を補償できると考えられる。そこで、実環境を模擬した同一の温湿度条件下に

において、環境条件と複数の導電性表面材料の抵抗との関係を調査した。

4.2 試験方法

試験片は、400×60×1.6mmの冷間圧延鋼板に厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料およびき裂検知用導電性表面材料を1回ずつ塗布したものをを用いた。導電性塗膜寸法は216×20mmとし、実用を想定して異なる膜厚(40, 80, 110μm)になるようにした。作製した試験片は前章と同様の恒温恒湿槽内に設置した。温湿度条件は、四季を通じた一般的な気象変動に伴う影響を補償できることを確認するため、気象官署の毎時気象データを参考にして、各四季を代表する温湿度変化を示す日を設定した。図9に設定した温湿度条件を示す。春→夏→秋→冬→春…の順に条件を変え、四端子法を用いて抵抗を連続測定した。なお、各条件で平均温度が異なることを考慮し、得られた各時刻の抵抗について、初期(1時)の測定値を基準として、各時刻の抵抗変化率を算出した。

4.3 試験結果

図10に測定例として、秋条件の測定結果を示す。温湿度変動による抵抗変化は、塗膜厚みに影響することが確認された。また、膜厚の異なる3種の試験片を用いて温・湿度サイクル3回実施したところ、気象変動に対して高い再現性が確認された。図11に、基準とした試験片に対

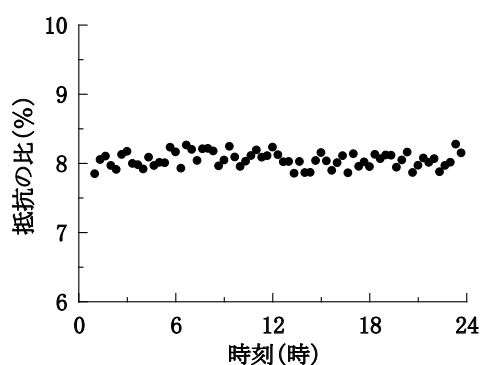


図11 基準試験片に対する抵抗比率の推移

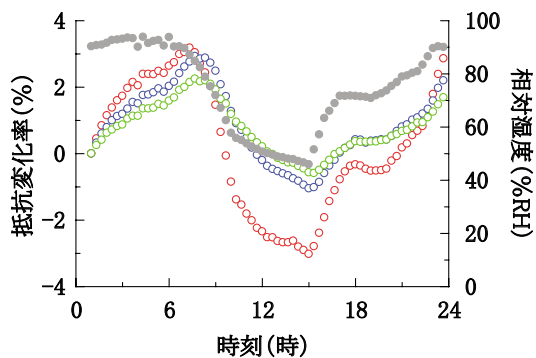
するそれ以外の試験片の測定値の比率の一例を示す。四季すべての条件において、温湿度変動に対する抵抗の比率は一定であった。

以上の結果から、一般的な気象変動の影響を補償するには、対象とする橋りょうにおいて疲労き裂の発生しない箇所に設置した基準となる導電性表面材料の抵抗に対し、き裂検知部に塗布した導電性表面材料の抵抗の比率を監視すれば良いことが確認できた。また、実際には導電性表面材料の上に中塗り塗膜と上塗り塗膜が塗り重ねられるので、気象変動による抵抗変動は本結果よりさらに小さくなると考えられる。

5. 実用的な塗装工程の検討

5.1 試験概要

導電性表面材料を組み込む塗装系は、鋼構造物塗装設計施工指針に規定されている塗装系ECOを想定している。塗装系ECOは表3に示す4層から成る塗装系である³⁾。導電性表面材料を組み込む際の条件は、素地との絶縁性が確保されていることと、耐用年数未滿で導電性塗膜が露出しないことである。素地との絶縁性を確保する場合、より上層に組み込むのが望ましいが、表層に近い場合には紫外線等による塗膜減耗に伴う早期の導電性塗膜露出が懸念される。そこで、下塗り塗料の塗り回数と塗膜に生じるピンホール数の関係と、塗り重ねの塗膜厚が確保しにくい導電性塗膜エッジ部について上塗り塗装した場合の塗膜厚について検討し、導電性表面材料をど



1回目のサイクルの測定値を示す。
導電性塗膜厚は、赤…40μm、青…80μm、緑…110μm
相対湿度は灰色で示している。

図10 秋季の条件での測定例

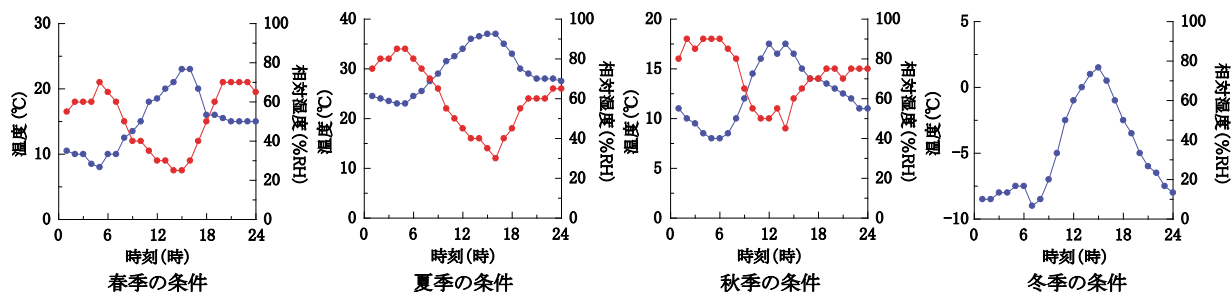


図9 試験に用いた温・湿度サイクル条件 (青：温度，赤：相対湿度を示す)

※試験装置に用いた恒温恒湿槽は、温度設定を5℃以下とした場合に湿度設定が不可能となるため、冬季条件は温度条件のみとした。

特集：材料技術

表3 塗装系 ECO (ECO1-7) の塗装工程³⁾

工程	塗料	塗布量 [g/m ²]	乾燥膜厚 [μm]
第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	約60
第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	200	約60
第3層	水系エポキシ樹脂塗料	220	約60
第4層	水系上塗塗料	120	約30

の層間に組み込むかを決定することとした。

5.2 試験方法

下塗り層の絶縁性を確認するため、塗膜の微小欠陥を検査可能な湿式ピンホール試験を実施した。200×100×3.2mmのプラスト鋼板に対し、下塗り塗料としてメーカ3社のいずれかの厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料を塗り付けた。塗装方法および塗装回数は、後述する表4に示す通りとした。すなわち、塗装方法はスプレー塗装またははけ塗りとし、塗装系 ECO の1～2層間または2～3層間に導電性表面材料を組み込むことを想定して、目標膜厚60μmで1回または2回塗装した。また、スプレー塗装は部位によって膜厚が確保しにくい場合があることを考慮し、目標膜厚30μmで1回塗装した試験片も作製した。

上塗り塗膜厚確認のための試験片は、導電性表面材料の保護に必要な上塗り層の最小膜厚の把握を目的とし、塗装系 ECO の3～4層間への導電性表面材料の組み込みを想定した試験片を作製した。すなわち、水系上塗塗料を目標膜厚30μmで1回塗布したものをを用いた。導電性塗膜のエッジ部をカット式膜厚計で円錐状に切削し、切削面の断面を拡大観察して上塗り塗膜厚を測定した。

5.3 試験結果

ピンホール試験結果を表4に示す。塗装回数2回にした場合、いずれの塗装方法においてもピンホールは確認されなかった。スプレー塗装では、目標膜厚60μmで1回塗装した試験片におけるピンホール発生は確認されなかったが、目標膜厚30μmではピンホールの発生が確認され、現場施工では部位によって絶縁性を確保できない可能性が示唆された。一方はけ塗りでは目標膜厚60μmで1回塗装した場合にピンホールが確認された。したがっていずれの塗装方法でも2回塗装してから導電性表面材料を塗装するのが望ましいことが分かった。

導電性塗膜エッジ部での上塗り塗膜厚を測定した結果、目標膜厚30μmに対して約10μmしかない部分が観察された。水系上塗塗料に用いられるポリウレタン樹脂塗料の減耗量は数μm/年とされており、導電性塗膜の上には2層分の塗膜を有するのが望ましいことが分かった。以上の結果から、導電性表面材料は塗装系 ECO の2～3層間で組み込むのが適切と判断した。

表4 下塗り塗膜のピンホール試験結果

塗布方法	塗布回数	目標膜厚 [μm]	ピンホール数 [個]		
			塗料 A	塗料 B	塗料 C
スプレー	1	30	8	11	25
スプレー	1	60	0	0	0
スプレー	2	60×2	0	0	0
はけ塗り	1	60	2	32	5
はけ塗り	2	60×2	0	0	0

6. まとめ

導電性表面材料を用いたき裂検知手法の実構造物への適用性把握を目的として、実構造物を模擬した試験体を用いたき裂検知性評価試験や、屋外環境(温湿度条件)に対する影響評価、導電性表面材料の施工工程最適化に関する検討を行なった。この結果、以下に示す結果が得られた。

- 1) 実構造物を想定した試験体においても、直流抵抗測定によってき裂の進展を検知できることが確認された。
- 2) 動的載荷に伴うき裂開口幅変動により、き裂の発生を直流抵抗測定で検知するのは困難な場合があるが、高周波数域でインピーダンスを測定することで、合理的にき裂発生を検知できることが分かった。
- 3) 導電性表面材料の電気特性は容量絶対湿度に影響を受けることが確認されたが、抵抗と湿度に定量的かつ再現性の高い関係も認められるため、気象変動による抵抗変化を補償する方法を考案した。
- 4) 塗装系 ECO への組み込み箇所は、施工方法に係わらず、下塗り塗装回数は2回以上、導電性表面材料の上には2層分の塗膜を有するのが望ましく、導電性表面材料は塗装系 ECO の2～3層間で組み込むのが適切と判断した。

今後は、実用的なモニタリングシステムの開発を目標とし、実構造物への施工試験を行ない、施工性および作業性の確認や、実環境における長期耐久性の追跡調査を行なう予定である。

謝辞

導電性表面材料の実用を想定した材料配合の開発にあたり、(株)日本特殊塗料の協力を得た。末筆ながら謝意を表す。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所編：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992
- 2) 田中，坂本，江成，鈴木：鋼構造物のき裂検知に用いる導電性表面材の開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.2, pp.17-20, 2007
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所編：鋼構造物塗装設計施工指針，2005