

# 導電性塗料を用いた鋼構造物用き裂検知手法の開発

材料技術研究部 防振材料研究室

副主任研究員 坂本 達朗

## 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、構造物の健全性を判断するため、2年を超えない範囲での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いる<sup>1)</sup>。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検査困難な部位が生じる場合がある。また、初期段階の変状発見は検査者の技術に依存するため、疲労き裂がある程度進展した段階で対処することが多い。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、大規模な補修・補強工事を実施する前に工事計画を立てることが可能となり、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、目視に頼らずに疲労き裂を検知できる手法として、導電性塗料を用いた手法を開発した。これは、導電性塗料を塗布した鋼材に疲労き裂が発生した場合に、き裂発生に伴って導電性塗膜が破断することで塗膜の電気抵抗が増加する特性を利用したものであり、本手法により疲労き裂の発生および進展を検知できると考えられる。本発表では、導電性塗料を用いたき裂検知手法の概要を述べるとともに、実構造物への適用を目的として実施したき裂検知性評価や、導電性塗料の施工方法の最適化等の各種検討結果について述べる。

## 2. き裂検知手法の基本構成

### 2. 1 導電性塗料の材料構成

前述したように、本検知手法は導電性塗膜の電気抵抗を測定することで鋼材に生じる疲労き裂の発生および進展を検知するものである。したがって、導電性塗料をき裂検知材料として長期間用いる場合の主な要求性能として、き裂発生・進展時の抵抗変化が容易にかつ明確に測定できることと、長期にわたり導電性塗膜の電気特性および防食性が保持できることが挙げられる。検討の結果、バインダーにエポキシ樹脂、導電性顔料として数百 $\mu\text{m}$ のカーボンブラック凝集体（カーボンブラック自体の粒径は数十～数百 $\text{nm}$ ）を分散させた導電性塗料を開発した<sup>2)</sup>。開発品のき裂検知性能把握のため、プラスチック板に導電性塗料を膜厚 $15\mu\text{m}$ 、長さ $300\text{mm}$ 、帯幅 $20\sim 40\text{mm}$ で塗装し、長辺中央部にカッターで人工傷を導入した場合の直流抵抗変化を測定した。試験結果を図1に示す。き裂長さ数 $\text{mm}$ のときに導電性塗料の抵抗値は有意な変化を示したことから、疲労き裂を数 $\text{mm}$ から検知可能であることが確認できた。

### 2. 2 導電性塗料を用いたき裂検知手法

導電性塗料を用いたき裂検知システムの全体構成およびき裂の発生する部位（き裂検知部位と

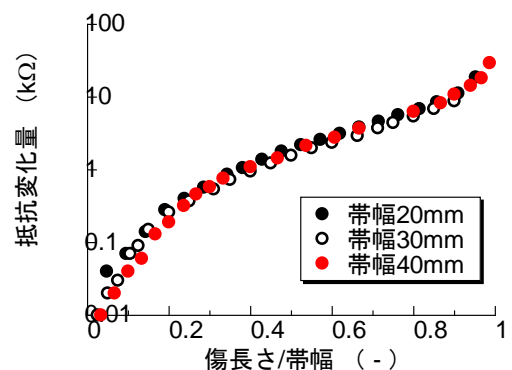
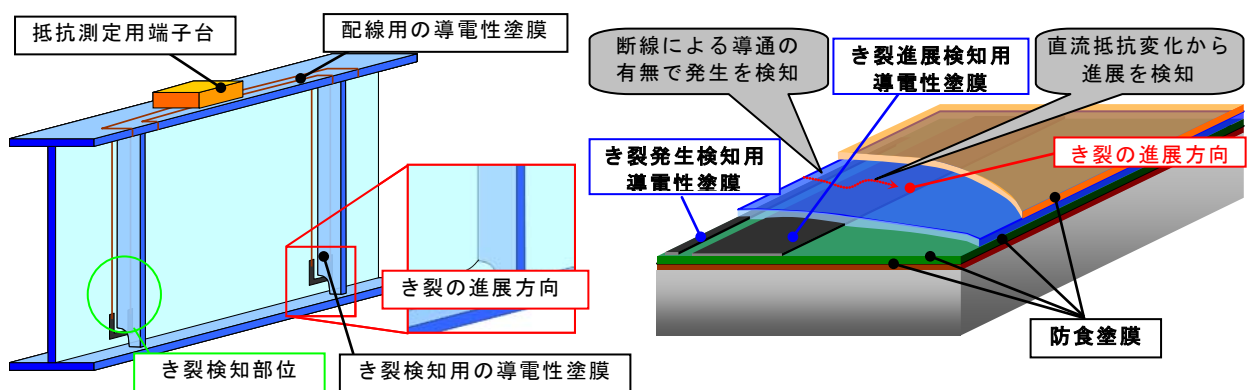


図1 傷導入に伴う導電性塗膜の抵抗変化

称する)における検知イメージを図2に示す。き裂発生懸念される箇所にき裂検知部位を設置し、測定容易な箇所に抵抗測定用端子台を設置した。その際、端子台と導電性塗料を電気的に接続する材料として、抵抗が非常に低い導電性塗料(以下、配線用導電性塗料と称する)を用いた。これは、リード線等を比較的長距離で使用した場合に強風や外力等の影響によるリード線の切断が懸念されたためである。配線用導電性塗料は金属線に近い体積抵抗率にするため、バインダーにポリウレタン樹脂、導電性顔料に銀粉および銀被覆銅粉を用いた。

き裂検知部位では、導電性塗膜の種類として、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の2種類を考案した。また、導電性塗膜と鋼材との絶縁性確保および、紫外線等の塗膜劣化因子を防ぐため、目的の異なる塗料を組み合わせさせた多層の複合塗膜(塗装系と称する)の層間に導電性塗料を組み込んだ。



(a) システムの全体構成

(b) き裂検知部位の詳細構成

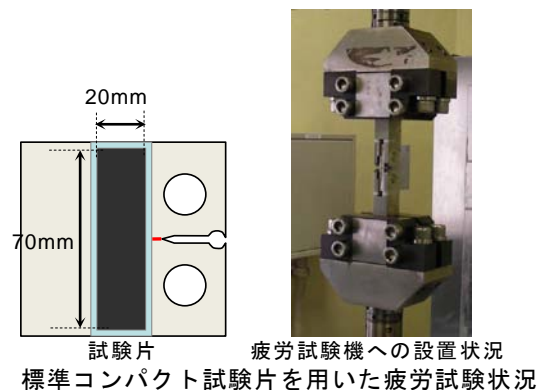
図2 導電性塗料を用いたき裂検知手法(イメージ図)

### 3 実構造物への適用性把握試験

3.1 実構造物への適用を想定したき裂検知性評価  
前章で述べたように、導電性塗料を用いたき裂検知手法は室内試験レベルでき裂の発生および進展を検知可能であることを見出した。そこで、本手法が実橋りょうを想定した疲労き裂において適用可能かどうかを検証するため、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により、疲労き裂長さ進展時の導電性塗膜の抵抗変化を測定した。

#### 3.1.1 試験方法

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。塗装工程および導電性塗膜の寸法は、いずれの試験体においても同様とした。すなわち、塗装工程は絶縁用の厚膜型変性エポキシ樹脂



試験片 疲労試験機への設置状況  
標準コンパクト試験片を用いた疲労試験状況



模擬桁を用いた疲労試験状況  
図3 小型試験片と模擬桁の試験状況

系塗料およびき裂検知用導電性塗料の各1回塗りとした。導電性塗膜の寸法は進展検知用を想定し、帯幅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の繰返し引張载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となるよう圧縮载荷した。図3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、導電性塗膜の抵抗はマルチメータを用いて直流抵抗を測定した。

### 3. 1. 2 試験結果

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4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さを検知できることが確認された。

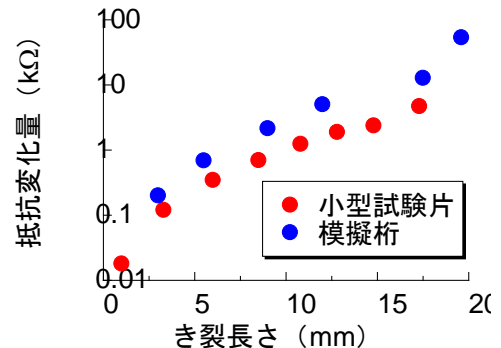


図4 疲労き裂長さと抵抗の関係

### 3. 2 導電性塗料を組み込んだ塗装系の耐久性評価

次に、導電性塗料を組み込んだ塗装系の長期耐久性評価結果について述べる。本検討では、導電性塗料を組み込む塗装系として、長期耐久性が期待でき、近年注目されている環境への影響を考慮した塗装系である塗装系ECOを用いた。その際、導電性塗料と素地との絶縁性を確保することや耐用年数未滿で導電性塗膜が露出しないことなどの条件を満たす仕様を検討した結果、き裂検知部の塗装工程を表1のように定めた。

表1 き裂検知部の塗装工程

工程	塗料	目標膜厚
第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	60 μm
第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	60 μm
第3層	導電性塗料	60 μm
配線部	配線用導電性塗料	60 μm
第4層	水系エポキシ樹脂塗料	60 μm
第5層	水系上塗塗料	30 μm

#### 3. 2. 1 試験方法

耐久性の評価は、塗装系の長期耐久性評価手法として一般に用いられている試験方法である、JIS K5600-7-1の連続塩水噴霧試験、JIS K5600-7-7の促進耐候性試験、鉄道総研式複合サイクル試験の3種類を実施した。

#### 3. 2. 2 試験結果

図5に、各試験の試験時間と直流抵抗値を示す。これより、汎用の防食塗装系で変状の生じ始める段階においても抵抗値に大きな変化はなかった。また、さび、塗膜のわれ、はがれといった変状も発生しなかった。したがって、導電性塗料を組み込んだ塗装系が長期間にわたり安定した防食性と電気特性を維持できる可能性が高いことが分かった。

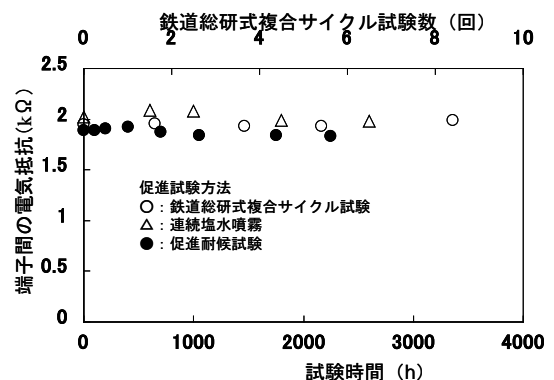


図5 各種耐久性評価試験結果

### 3. 3 導電性塗料の効率的な施工方法の検討

次に、導電性塗料を組み込んだ塗装系を実構造物に効率的に施工するための検討結果について述べる。導電性塗料を塗布する際、導電性塗膜および配線用導電性塗膜が所定の形状になるように、養生テープ等を用いてパターンニングしたうえで塗装する必要があるため、通常の塗装作業よりも作業時間が増大することが予想される。そこで、養生テープの貼り付け方法について検討することとした。

### 3. 3. 1 試験方法

塗装箇所は実物大の鋼鉄道橋の平坦部材（腹板）とした。各工程の塗装寸法を図6に示す。防食塗膜である第1層, 第2層, 第4層, 第5層は同寸法とし, 第3層目は進展検知用導電性塗膜, 発生検知用導電性塗膜を作製した。さらに, 各導電性塗膜の両端に配線用導電性塗膜を作製した。

導電性塗料と配線用導電性塗料を所定の寸法・形状で塗布するため, 2通りの方法を用いた。すなわち, 一般的なパターンング手法である, 養生テープを型枠として貼付ける方法と, あらかじめ塗布箇所を型抜きした粘着シートを貼付ける方法(図7)を実施し, それぞれにおける各工程の作業時間を計測した。

### 3. 3. 2 試験結果

塗装前に養生テープを貼付ける方法で施工した場合の作業時間を図8に示す。これより, パターンングを行なった第3層目および配線部について, 他の層と比較して2倍以上の塗装時間を要することがわかった。次に, 事前に型抜きした粘着シートを用いた場合の第3層目および配線部の塗装作業時間を図9に示す。この結果, 養生テープの貼付けおよび除去の時間を大幅に短縮することが可能となり, 各工程の塗装に要する作業時間をそれぞれ約1/2に低減できることがわかった。

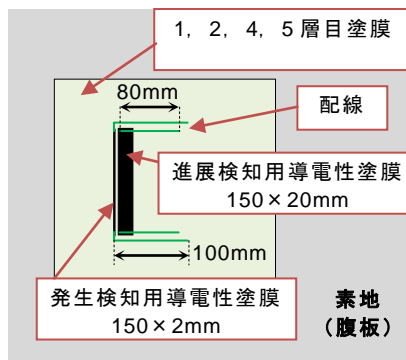


図6 各工程の塗膜寸法



図7 塗布箇所を型抜きした粘着シートの貼付け

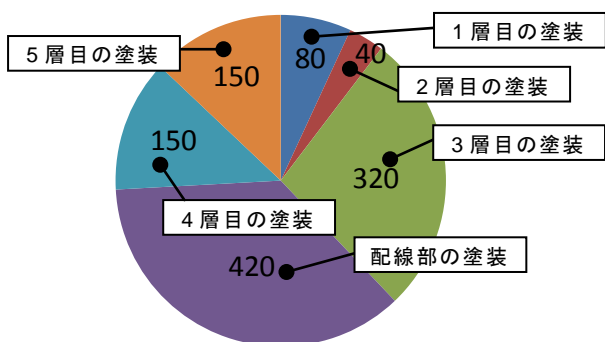


図8 養生テープを用いた場合の各行程における作業時間 [秒]

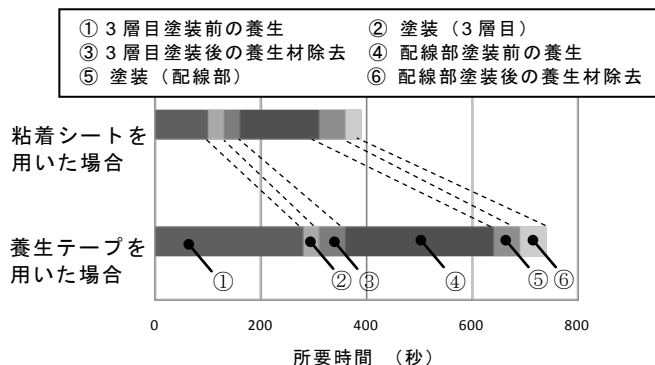


図9 3層目および配線部の作業時間の比較

## 4 まとめ

目視に頼らずに疲労き裂の発生を検知できる手法として開発した導電性塗料を用いたき裂検知手法について, 実構造物への適用を目的とした検討を行った。その結果, 以下の知見を得た。

- (1) 実用を考慮したき裂検知性評価試験を実施し, き裂進展長さと導電性塗膜の抵抗変化量は一定の関係の有することから, 本手法により疲労き裂の進展を検知できることを確認した。
- (2) 導電性塗膜を既存の塗装系に組み込む手法を考案し, 長期耐久性評価試験を実施した。その結果, 長期間にわたり安定した防食性と電気特性を維持できる可能性が高いことが分かった。
- (3) 導電性塗料の施工に際し, 塗布箇所を型抜きしたシートを使用することで, 従来の作業に要した時間の約1/2に低減できることがわかった。

## 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