

塗料で鋼橋のき裂を監視する

坂本 達朗

材料技術研究部
(防振材料 研究員)

田中 誠

同
(同 研究室長)

鈴木 実

同
(同 副主任研究員)



さかもと たつろう



たなか まこと



すずき みのる

はじめに

鋼鉄道橋は、鉄道開業当初から用いられてきた構造物です。鉄道網の拡大・更新に伴って、様々な年代・形式のものが製作され、その多くが現在も使われている状況にあります。そのため、在来線における現在の鋼鉄道橋の平均供用年数は70年を超える状況になっています。鋼鉄道橋を架け替える場合、列車運行の調整や、多額の費用を要する等の問題があるため、今後も平均供用年数の増加が予想されます。これまでは、適切な設計と検査の下で、重大事故の発生を防いできましたが、これからの維持管理については、こうした老朽化した鋼鉄道橋の増加を念頭に考える必要があります。

経年で発生する鋼鉄道橋の重大な変状の一つに、鋼の疲労き裂が挙げられます。疲労き裂発生に伴う損傷は、維持管理上の重要項目であるため、2年に1度実施される通常全般検査において、目視による点検が行なわれています。疲労き裂が発見された場合には、その程度や発生個所の重要度に応じた補修がなされます。ただし、通常全般検査では作業足場を架設しないため、図1に示すように、橋りょうの構造、架設個所によっては全体の点検が困難となる場



図1 全体の点検が困難な橋りょうの例

合があります。また、初期段階の疲労き裂発見は検査者の経験、技能に依存し、10mm以下の疲労き裂は発見しにくいとされています。このため、疲労き裂の早期発見や進展予測ができれば、計画的かつ効率的な補修対策を行える可能性があり、今後の鋼鉄道橋の維持管理に寄与できると考えられます。ここでは、鋼に疲労き裂が発生・進展していることを検知可能な塗料と、その塗料を用いた疲労き裂の検知システムの概要を紹介します。

塗料によるき裂検知

疲労損傷以外に、経年で発生する鋼鉄道橋の変状として、鋼の腐食が挙げられます。現在供用されている鋼鉄道橋の大部分において、塗装による防食が用いられ、定期的な塗替え塗装が実施されています。鋼鉄道橋の防食塗装では、目的の異なる塗料を組み合わせた多層の複合塗膜（これを塗装系と呼びます）を用いて、長期間の防食を行ないます。

このような背景から、き裂検知機能を付与した塗料を塗装系に組み込むことにしました。これで、塗装系と同程度の耐久性を有することが期待できます。また、疲労き裂の発生に伴って防食塗膜も破壊されることが知られているため、疲労き裂発生に伴う塗膜破壊に起因するき裂検知塗膜の特性変化により、疲労き裂の検知が期待できます。

き裂検知が可能な塗料の開発

鋼の疲労き裂を検知するには、き裂の進展に伴って塗膜特性が変化し、その特性変化を外部から精度良く評価できることが重要です。ターゲットとする特性について様々な検討を行なった結果、塗膜に発生するき裂長さに応じて電気抵抗値が変化する導電性塗料が適当であると判断し、開発に着手しました。

開発した導電性塗料は、主に塗膜を形成する樹脂と導電性を有する導電性顔料で構成されています。樹脂には、防食塗料で実績のあるエポキシ樹脂を用いました。ここでは、

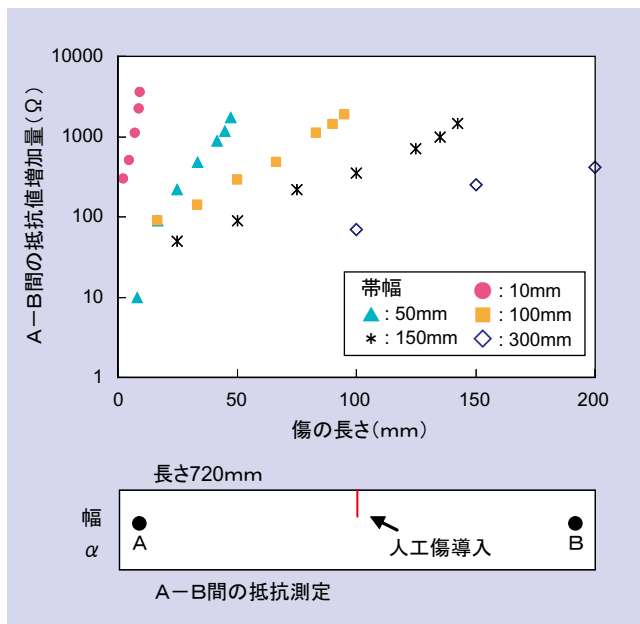


図2 人工傷を導入した導電性塗膜の抵抗値変化

液状エポキシ樹脂にポリアミドアミン系の硬化剤を用いて塗膜化しました。導電性顔料には、金属や炭素系の導電性材料について検討を行なった結果、安価であり、簡易な測定器でも測定可能な範囲の抵抗値を付与できる、カーボンブラックを導電性顔料として用いました。

導電性塗料のき裂検知性能

疲労き裂補修の緊急性は、構造物の構造や発生する部位等によって異なりますが、疲労き裂が10mmまで進展した場合には、発見次第緊急の措置を必要とするケースがあります。そのため、導電性表面材料のき裂検知性能として、き裂の発生を数mmから検知できることが求められます。

図2に、導電性塗料を帯状に塗布し、帯中央部に人工傷を導入した場合の直流抵抗値変化量を示します。人工傷が長くなるほど抵抗値は増加傾向にあり、傷の長さが数mmから検知可能であることが分かりました。また、抵抗値増加量は帯幅によって異なり、塗布する部位に応じて塗膜の帯幅を変えることで疲労き裂の検知精度を制御できることも分かりました。

次に、実橋りょうと同程度の板厚で作製した小型試験片と、模擬部材を溶接して疲労き裂を発生しやすくした実橋りょうの切り出し部位について、疲労き裂を発生させた場合の抵抗値変化を測定しました。図3に、き裂長さと直流抵抗値変化量を示します。いずれの測定結果においても、き裂長さの増加に伴って抵抗値が指数関数的に増加してお

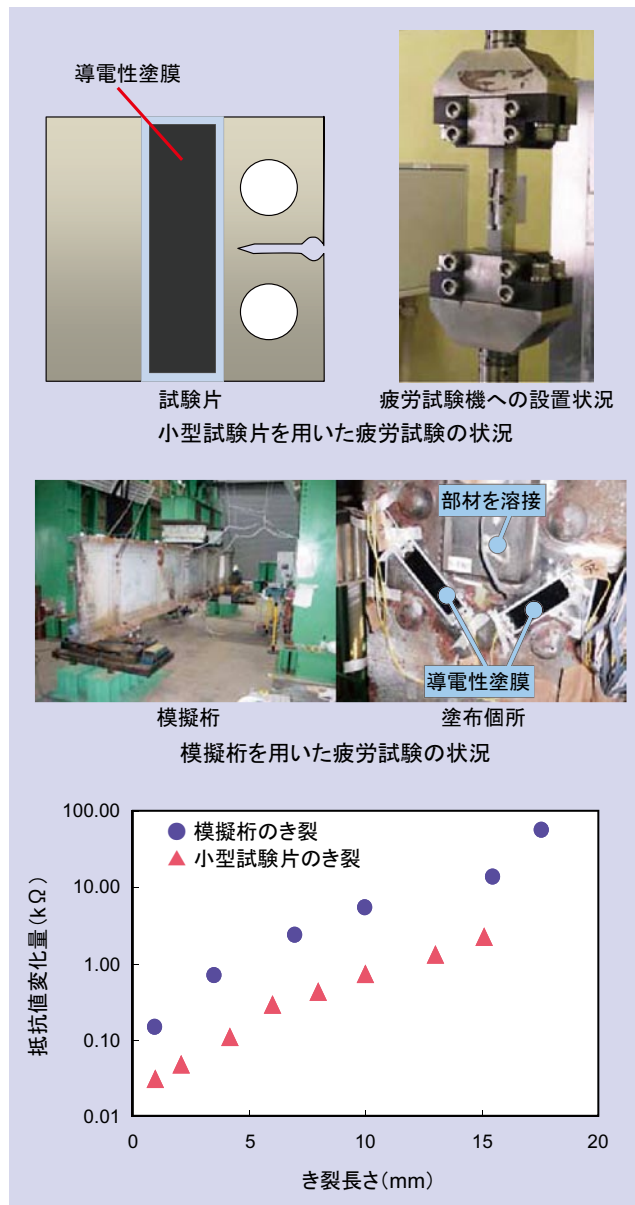


図3 小型試験片と模擬桁で発生させた疲労き裂長さと抵抗値の関係

り、抵抗値から疲労き裂長さを検知できることが分かりました。なお、き裂長さに対する抵抗値変化量が試験体によって異なりますが、荷重条件や構造がそれぞれ異なることから、き裂開口幅に違いが生じたためと考えられます。

導電性塗料の耐久性

塗装系に導電性塗料を組み込む場合、塗装系と同等の防食性能を有し、かつ、塗装系に期待される耐久年数の間は経年による電気特性変化のないことが必要です。そこで、導電性塗料を組み込んだ塗装系について促進耐候性試験を

実施し、耐久性を調べました。塗装系は、今後の環境問題を考慮し、鋼構造物塗装設計施工指針に記載されている環境負荷低減型の長期耐久性塗装系である、塗装系ECOを用いました。作製した試験片の塗膜構成を表1に示します。

耐久性の評価は、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で行ないました。図4に、試験時間と直流抵抗値を示します。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ありませんでした。また、さび、塗膜のわれ、はがれといった変状も発生しませんでした。従って、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りました。

導電性塗料のわれ追従性

防食塗膜が鋼の疲労き裂進展と同時に破壊されることは前述しましたが、導電性塗料を適用した場合に、どの程度の疲労き裂に追従して塗膜われを生じるかを確認する必要があります。そこで、鋼板に導電性塗料を塗布し、繰り返し荷重の載荷で疲労き裂を発生させた場合のき裂長さを、

鋼板側と塗膜側から測定しました。図5に、疲労き裂が2mmまで進展した場合の拡大写真を示します。これより、導電性塗膜も同時に破壊されているのが分かります。したがって、疲労き裂長さが数mm進展した段階から、疲労き裂の状況を遅滞なく検知可能であることが分かりました。

き裂検知システムの実用化にあたって

これまでの各種評価試験から、開発した導電性塗料は数mmの疲労き裂進展を検知可能であり、防食塗装系に期待される程度の長期耐久性を有する可能性をもつことが分かりました。この導電性塗料をき裂検知システムとして実用化する場合、検知システムの設計以外に、屋外への適用に伴う環境因子の影響を考慮する必要があります。

(1)環境因子(温湿度)の影響

開発過程において、導電性塗料の電気特性は温度および湿度に影響を受けることが分かりました。導電性顔料として使用しているカーボンブラックは、数～数十nmの粒子が数百 μm の凝集体として樹脂中に分散しており、凝集体同士の接触によって導電性が発現していると考えられます。

表1 試験片の塗膜構成

工程	塗料	厚み
第1層	ジンクリッチペイント	約30 μm
第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	約60 μm
第3層	導電性塗料	50～60 μm
第4層	水系エポキシ樹脂塗料	約60 μm
第5層	水系変性アクリル樹脂塗料	約30 μm

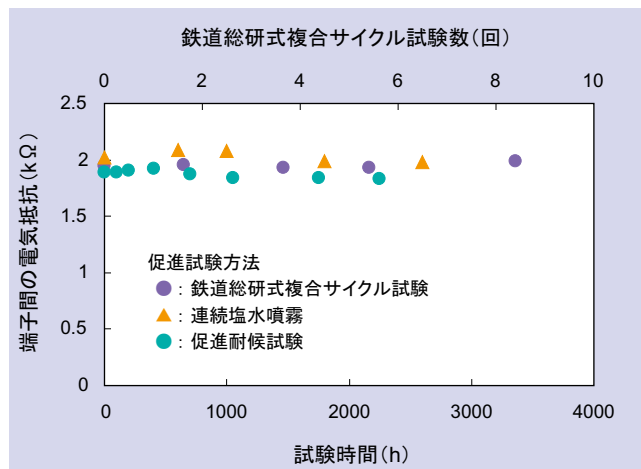


図4 各種耐久性評価試験結果

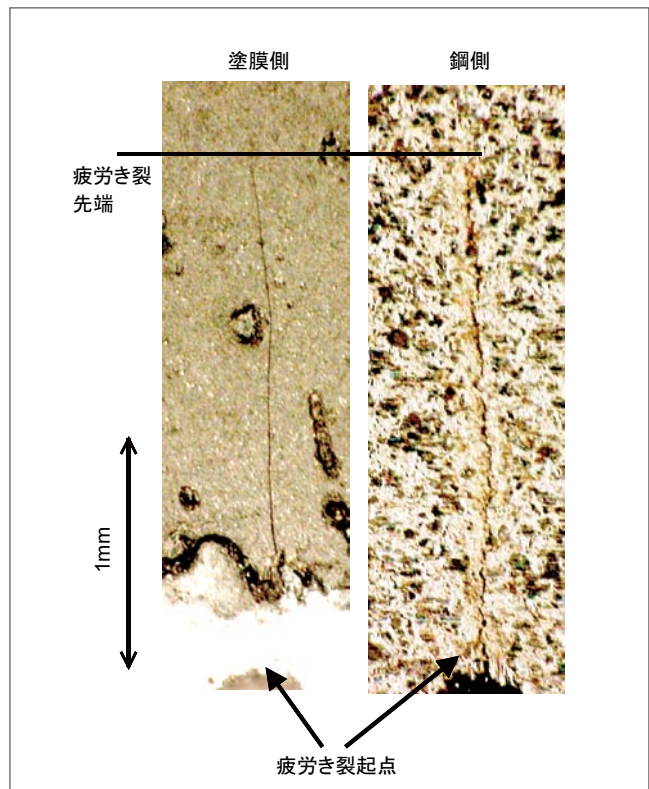


図5 導電性塗膜のき裂に対する追従性

そのため、温度変化に伴う導電性塗膜の熱膨張や、湿度変化に伴う樹脂の吸水により、凝集体の接触状況が変化することが、電気特性の変化した要因だと推測されます。この現象を解明するには、樹脂と凝集体の界面状態を把握するための調査（凝集体のぬれ性や、分散状態、膨張係数など）を行う必要があります。

開発した導電性塗料について、日本の通年での温湿度変化を考慮した場合の抵抗変化を測定した結果、最大で30%程度変化することが分かりました。従って、き裂検知を精度良く行なうためには、温湿度の影響を補償する必要があります。そこで、構造上疲労き裂が進展しない個所に導電性塗料を塗布し、これを参照用として抵抗値を比較することにしました。図6に、恒温恒湿装置内に導電性塗料を塗布した試験鋼板を2つ設置し、1日の温湿度変化を模擬した場合の抵抗値比を示します。その結果、抵抗値比の変化割合は2%程度でした。この方法を用いることで、温湿度による抵抗値変化を補償することが可能になりました。

(2) き裂検知システムの設計

図7に、き裂検知システムのイメージを示します。疲労

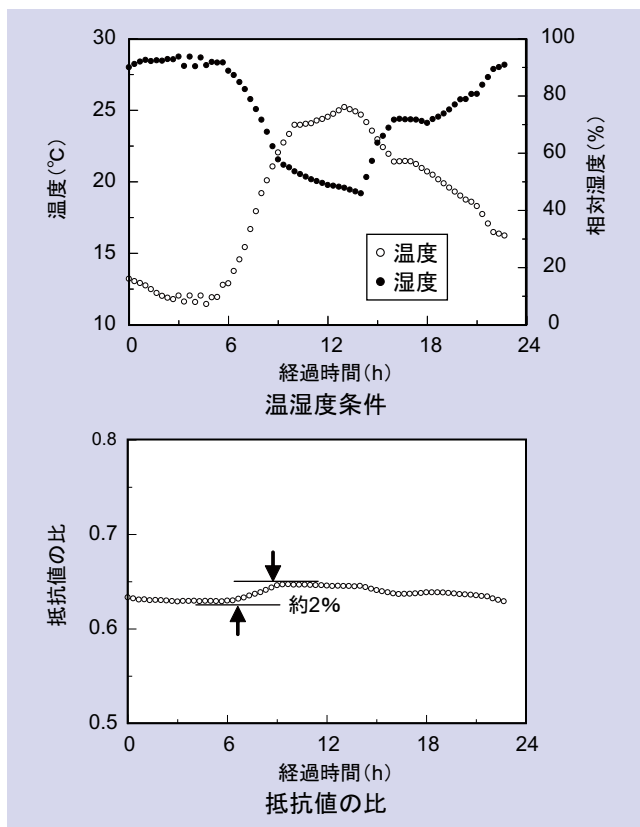


図6 2つの導電性塗膜の抵抗値比

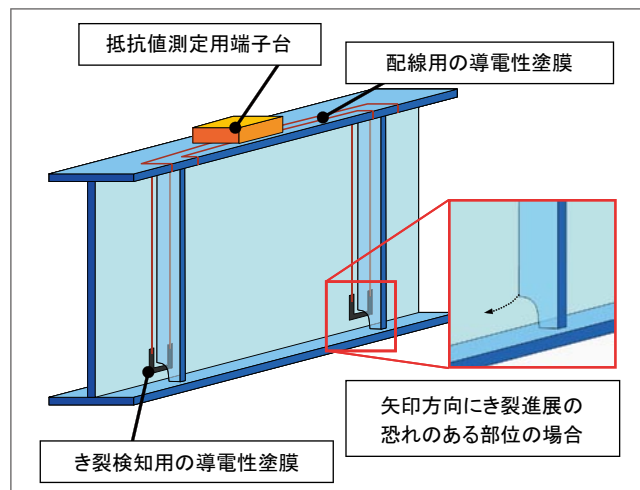


図7 き裂検知システムのイメージ

き裂の発生個所は、橋りょう構造の詳細調査によって予測することが可能ですので、通常全般検査では目視困難な重要部位に導電性塗料をあらかじめ塗布しておきます。そして、確認の容易な検査通路付近等に端子台を設置し、各個所の状況について抵抗値変化からモニタリングを行ないます。

なお、端子台と導電性塗料を結ぶ配線についても、導電性塗料を適用することを想定しています。帯幅が狭く、長距離で塗布しても測定精度に影響しない程度の抵抗値となるように配合を検討した結果、導電性顔料に銀系のフレーク状顔料を用いるのが適当と判断しました。カーボンブラックを用いた導電性塗料よりもコスト高となりますが、使用量が少ないため、施工費用全体のコストからすると大幅なコスト増にはなりません。また、配線用の導電性塗料も塗装系に組み込むことができるので、配線部分についても長期耐久性が期待できます。電気特性についても、き裂検知用導電性塗膜と同様の耐久性評価試験を行ない、問題ないレベルであることを確認しています。

おわりに

鋼鉄道橋の疲労き裂が発生・進展していることを検知可能な導電性塗料と、その塗料を用いた疲労き裂の検知システムの概要について紹介しました。今後は実橋りょうへの試験施工を行ない、施工性や作業性等を検証した上で、疲労き裂検知システムの改良を行なう予定です。低コストで、今後の鋼鉄道橋の維持管理に有用なシステムを構築することで、鉄道の安全安定輸送に貢献していきたいと考えています。 [RRR]