

S2-5-3

鋼鉄道橋用き裂検知表面材の基本特性

[土] ○坂本 達朗, [土] 田中 誠,

江成 孝文, 鈴木 実 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Basic Study on Surface Material for Searching Fatigue Crack for Railway Steel Bridge

Tatsuro Sakamoto, Member, Makoto Tanaka,

Takafumi Enari, Minoru Suzuki (Railway Technical Research Institute)

One of the serious problems about railway steel bridges is fatigue crack. So It is important to devise a method for detecting easily fatigue crack generated in railway steel bridges. We developed an electrically conductive coating material in which electrically conductive pigment is added. When fatigue crack generates in steel bridges, value of electric resistance of the electrically conductive coating material on the steel bridge surface increases. The result of development of an appropriate electrically conductive surface material and the evaluation of the basic characteristic are presented in the report.

キーワード：導電性、き裂、塗料、鋼構造物、保守

Keyword: Electrically conductive, Fatigue crack, painting, Steel structure, Maintenance

1. はじめに

鋼構造物の安全に関わる重大な劣化の一つに、鋼部材における疲労き裂の発生および進展が挙げられる。現在の鋼構造物の保守点検における最も一般的な手法は目視点検である。目視点検には測定装置が不要であり、簡便な手法といった長所がある。しかしながら、疲労き裂を発見した時点では多額の費用を要する補修・補強作業を必要とするような状態までき裂が進展している可能性が高い。従って、目視検査と同程度の簡便な方法によって疲労き裂を早期に発見でき、補修にかかるコストを少なくするような保守点検が望ましいと考えられる。その一つに導電性材料を用い、き裂発生時の電気特性変化を活用するき裂検知方法が有望と考えられる。本稿では安価で、き裂発生時の抵抗値の変化を測定する導電性表面材の開発と、鋼構造物への適用可能性についての評価試験を行った結果を報告する。

2. 導電性表面材の特性

2.1 配合と基本特性

鋼構造物のき裂検知を行う場合、検知材導電性材料の長期耐久性が求められる。そこで、鋼構造物の防食を目的とした防食塗料との併用が可能な、導電性材料を顔料とした

塗膜状表面材で検討した。この場合、鋼構造物に適用されている防食塗膜と同程度の特性（硬さ、伸びなど）を有する必要がある。そこで樹脂部分には防食塗料で実績のあるエポキシ樹脂を用いることとした。また、薄膜での使用となるため、体積抵抗率の低い導電性顔料が必要となる。導電性顔料には金属粉末、炭素系材料、導電性ポリマーなどが挙げられる。ここでは炭素系材料を用いた導電性表面材についての検討結果を示す。表1に、検討した炭素系材料の主な特性を示す。

表1 炭素系顔料の主な特性

種	体積抵抗率 [Ω・cm]	比重	かさ密度 [g/cm ³]	価格
カーボンブラック	0.2	2.26	0.09	安
純カーボン	～0.01		0.07	高
導電性カーボン繊維			0.2	

備考1：体積抵抗率および比重は、化学便覧などの文献値、かさ密度は粉末試料での実測値

備考2：価格は炭素材料間の相対比較

2.2 体積抵抗率の測定

体積抵抗率の測定には、ダンベル型に成型した導電性表面材を用いた。成型には、図1に示すようにマグネットシート(180×100×1mm)をJIS K 6251(加硫ゴムの引張り試験方法)に規定するダンベル状1号試験片打抜き型で

打抜き、枠として用いた。測定方法には、試験片の抵抗値の範囲より図2に示す直流4端子法、交流4端子法を適宜選択した。直流4端子法には定電流電源装置（㈱菊水電機製、PAX35-10）、ゼロシャント電流計（㈱北斗電工製、HM-103）、マルチメータ（㈱アドバンテスト、R6871E）を用い、交流4端子法にはシンセサイザ（㈱エヌエフ回路社製、WF1943）、ロックインアンプ（㈱エヌエフ回路社製、LI5640）を用いた。

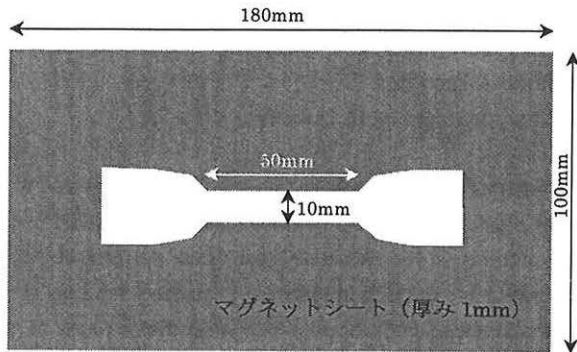
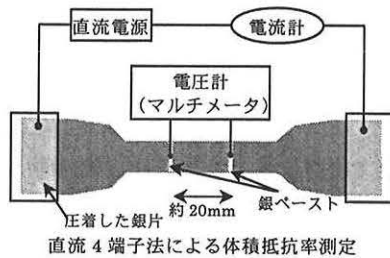
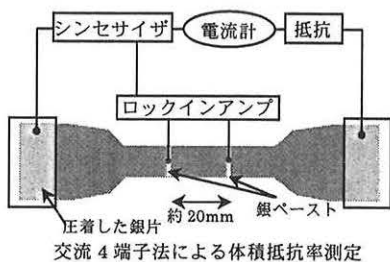


図1 試験片作製の枠



直流4端子法による体積抵抗率測定



交流4端子法による体積抵抗率測定

図2 4端子法による抵抗測定

導電性表面材の配合として、顔料にはカーボンブラック、純カーボン、導電性カーボン繊維粉砕物を用いた。樹脂は液状エポキシ樹脂または固形エポキシ樹脂を用い、樹脂／顔料割合を変えて作製した。

(1) 乾燥条件が電気抵抗に与える影響の検討

導電性表面材に残存する揮発成分によって体積抵抗率が変化する可能性がある。そこで揮発成分を除去する方法に

ついて検討を行った。表2にカーボンブラックと液状エポキシ樹脂を用いて作製した樹脂／顔料割合の異なる試料の乾燥行程を、表3には乾燥過程における試料の抵抗値を示す。これより、1回目の測定から比較して、室温放置後、真空乾燥後の抵抗値は何れの試験片においても減少した。また、4, 5回目の抵抗値は大きな変化が見られないことから、溶剤の揮発成分はほぼ除去されたと考えられる。この際、真空乾燥後の抵抗値に僅かな増加（3回目と4回目）が見られた。これは真空乾燥後の吸湿の影響と考えられる。以上から、大気中での抵抗測定における試験片の養生条件として、抵抗値の変化が見られなくなる5回目の測定条件、すなわち20日間真空乾燥を行い、更に24日間室温で放置とした。

表2 乾燥行程と抵抗測定時期

行程	測定
室内放置3日後	1回目
室内放置7日後	2回目
室内放置14日後に60℃に調整した真空乾燥器で20日間連続乾燥	3回目
室内放置18日後	4回目
室内放置24日後	5回目

表3 乾燥過程における塗膜の抵抗値（Ω）

1回目	2回目		3回目		4回目		5回目	
	抵抗	比%	抵抗	比%	抵抗	比%	抵抗	比%
①	600	395	66	170	28	233	39	240
②	1100	852	77	480	44	500	45	500
③	1330	1000	75	590	44	636	48	640
④	2470	1690	68	970	39	1050	43	1050
⑤	3680	2410	65	1200	33	1280	35	1290
⑥	5230	3830	73	2100	40	2330	45	2350

試験片組成（樹脂／顔料 wt%）①:377, ②:565, ③:713, ④:949, ⑤:1160, ⑥:1360

(2) 樹脂／顔料割合と体積抵抗率

図3～5にそれぞれの顔料で作製した導電性表面材の樹脂／顔料割合における体積抵抗率の測定結果を示す。傾向として、何れの場合においても顔料の割合が大きいくほど体積抵抗率が減少することが確認された。ただしカーボンブラックの場合は樹脂／顔料割合が168質量%、純カーボンと導電性カーボン繊維粉砕物の場合では樹脂／顔料割合が30質量%前後において、乾燥後の導電性表面材の塗膜表面に細かい割れが発生し、健全な塗膜が得られなかった。健全な塗膜が得られた表面材での体積抵抗率の下限値は、何れの顔料においても約 $2\Omega\cdot\text{cm}$ であった。この結果を踏まえて、炭素系材料において最も安価であるカーボンブラックを用いることとした。

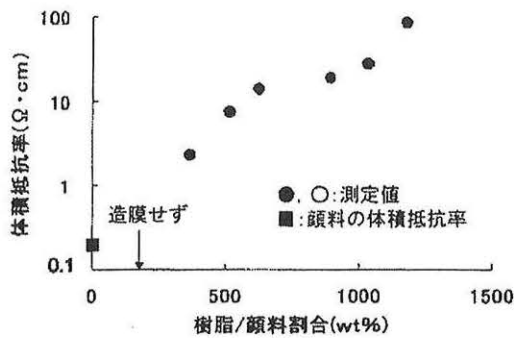


図3 樹脂／顔料割合と体積抵抗率の関係
カーボンブラック／液状エポキシ樹脂

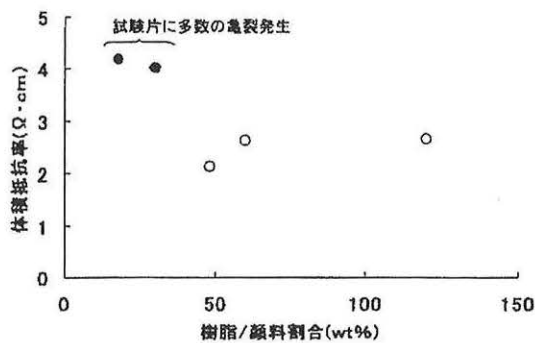


図4 樹脂／顔料割合と体積抵抗率の関係
純カーボン／固形ポキシ樹脂

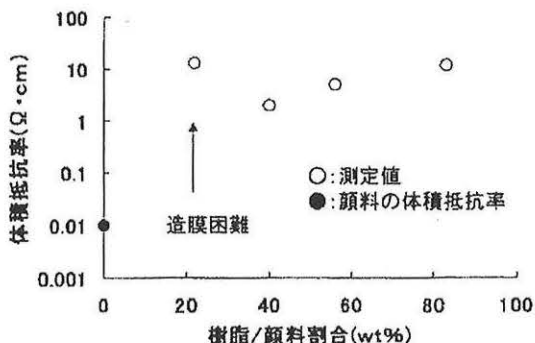


図5 樹脂／顔料割合と体積抵抗率の関係
導電性カーボン繊維粉砕物／液状エポキシ樹脂

2.3 人工傷導入によるき裂検知機能の検討

実用での状態を考慮し、電極間の間隔が広い状況での、電極間に発生したき裂の長ささと抵抗値の関係を検討した。試験片は、900×300×3mm のフレキシブル板にエポキシ樹脂塗料を 10～20μm となるように塗布した。導電性表面材は長さを 720mm とし、幅を 1, 5, 7, 10, 50, 100, 150, 300mm となるように変えて帯状に塗布した。厚みは全て乾燥膜厚が約 60μm となるようにした。端子接触部は表面材端部から 10mm 離れた位置とし、抵抗測定は 4 端子法を用いた。き裂はカッターによる人工傷とし、帯の中央に長辺の一端から導入した。図 6 に、試験片の概略図を示す。

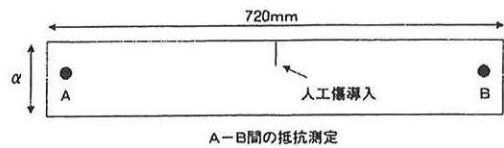


図6 き裂検知検討用試験片の概略図

図 7 に帯幅 50mm の試験片における、人工傷長ささと抵抗値の増加量の関係を示す。これより、人工傷長さの増大に伴って導電性表面材の抵抗値が指数関数的に増加していることが分かった。

図 8 には帯幅がそれぞれ異なる導電性表面材についての、人工傷長ささと抵抗値の増加量の関係を示す。帯 1mm、3mm、5mm の試験片については導入できる人工傷の長さを精度よく調整できなかったため、帯幅の半分の長さの傷の 1 点のみとした。これより、帯幅 1mm で人工傷が 0.5mm の場合には抵抗値が 10kΩ 近く増大し、帯幅 3mm で人工傷が 1.5mm の場合には数 kΩ の抵抗値増加になった。また、帯幅 10mm 以上の試験片については、何れの幅の長さにおいても、人工傷の長さが増加するに伴って抵抗値が増大した。以上より、き裂を検知したい部位に適した帯幅を選定して抵抗値の測定を行うことで、き裂進展をモニタリングできる可能性が示唆された。

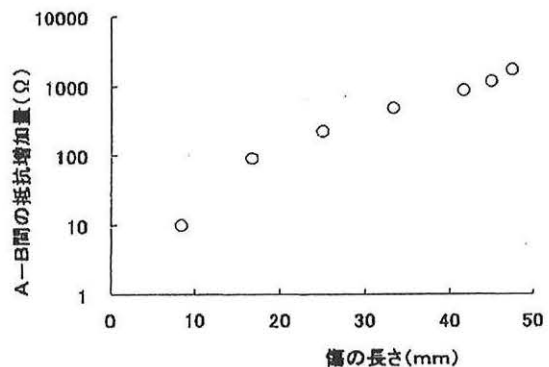


図7 帯幅 50mm における傷の長ささと抵抗値の増加量の関係

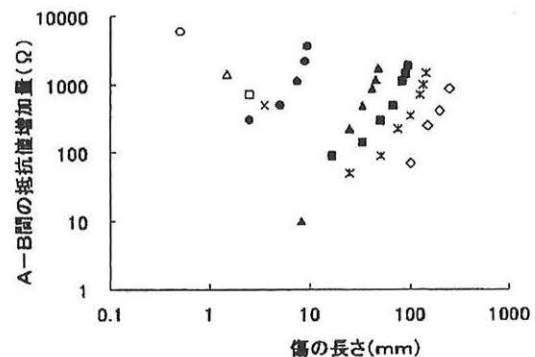


図8 幅が異なる試験片における傷の長ささと抵抗値の増加量の関係

〔帯幅 ○:1mm, △:3mm, □:5mm, ×:7mm, ●:10mm, ▲:50mm, ■:100mm, *:150mm, ◇:300mm〕

2.4 疲労き裂によるき裂検知機能の検討

カッターを用いて導入した人工傷は、鋼材の疲労き裂の開口幅と比較して広いことが想定される。そこで、2.3 で得られた結果が疲労き裂においても成立するかを検証するため、き裂が進展する鋼材での抵抗値測定を行った。ただし鋼橋の疲労き裂進展速度は年間でも約数 mm～数十 mm と考えられ、検証に多くの時間を要するため、疲労試験機を用いた促進試験で検討した。

疲労試験機には島津製の疲労試験機を使用した。試験片には、400×60×1.6mm の SS400 (SS41) 鋼板を用いた。鋼板上への導電性表面材塗布方法に関しては、実際の鋼構造物への適用を考慮しながら検討を行った。すなわち、長期耐久性の観点から、導電性表面材のみの単独塗膜ではなく、鋼橋の防食塗装と組み合わせた複合塗膜においても試験を行う必要がある。そこで鋼板上に下塗り塗料としてエポキシ樹脂塗料を 216×20mm の寸法で塗布し、その上に導電性表面材を同寸法で塗布したものと、導電性表面材の上から更に水系塗料を塗布したものの 2 種類を用意した。表 4 に試験片別の塗装方法の概略を示す。この際、端部には抵抗測定のため銀ペーストを塗布したため、水系塗料は導電性表面材端部までは塗布していない。試験片の長辺中央部には深さ約 2mm、角度 90 度の切れ込みを入れて応力集中部位を作製し、き裂を特定の部位から発生するようにした。図 9 に概略図を示す。

表 4 各試験片の塗装種

	①	②
下塗り 1	変性エポキシ樹脂	
下塗り 2	導電性表面材	
	(端部に銀ペースト塗布)	
中塗り	—	水性エポキシ塗料
上塗り	—	水系ウレタン塗料

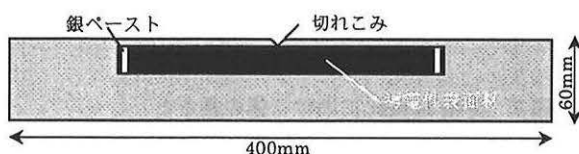


図 9 疲労き裂進展用試験片の概略図

疲労試験条件は、き裂発生部位の断面積と引張り荷重より算出される応力によって調整した。応力範囲は SS400 における弾性域の 70～80% を最大の応力とし、き裂の発生が検知されるまでは 0.05～17MPa で 20Hz の繰り返し荷重をかけ、き裂発生後は 0.05～16MPa に変更した。き裂長さの測定は、導電性表面材に進展した長さについてノギスを用いて測定した。抵抗値の測定は、マルチメータによる 2 端子法を用い、端部の銀ペースト間を測定した。なお、それぞれの測定は試験を一旦中断し、応力のかからない状態でを行った。

図 10、11 にそれぞれの試験片のき裂長さと抵抗値増加量の関係を示す。何れの試験片においても、き裂長さの増

加に伴って抵抗値は指数関数的に増加したことから、導電性表面材の上から防食塗料を塗り重ねた場合においても、導電性表面材の電気特性が損なわれないことが示された。また、2.3 で得られた抵抗値変化と同様の傾向が見られたことから、人工傷における試験結果は疲労き裂においても成立することが示唆された。

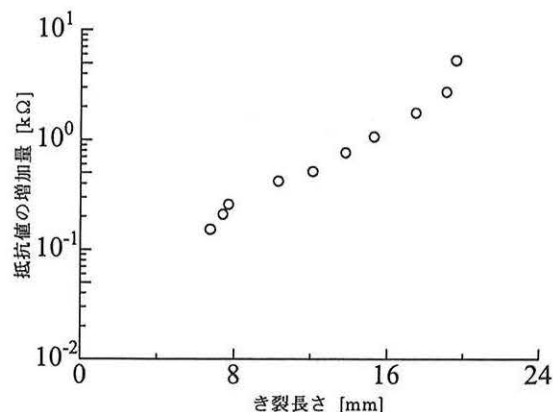


図 10 試験片①の疲労き裂長さと抵抗値増加量の関係

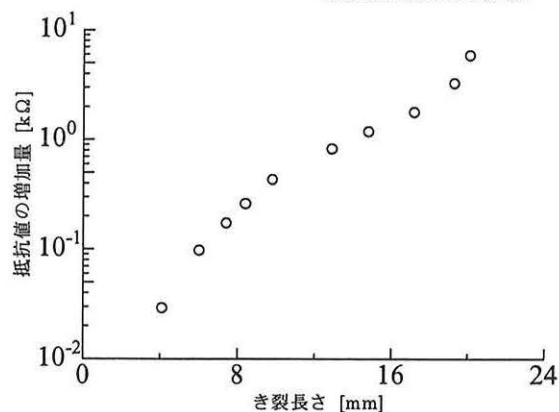


図 11 試験片②の疲労き裂長さと抵抗値増加量の関係

3. おわりに

鋼鉄道橋における疲労き裂検知のため、炭素系顔料を用いた導電性表面材の電気特性について検討を行った。その結果、表面材上のき裂進展によって抵抗値が増加し、き裂検知の可能性が得られた。今後は実施工条件においてのき裂検知性能を検証する必要がある。その一つとして実橋梁を用いた疲労試験を行い、更に狭い開口幅のき裂に対しても同様の結果が得られるかを現在検討中である。

文献

- ・特許公開 2005-181109 亀裂監視材及び亀裂監視システム
- ・特許公開 2005-181108 亀裂監視材及び亀裂監視システム
- ・特許公開 2005-179501 導電性塗料、導電性塗膜、亀裂監視用塗料及び亀裂検出用塗膜