

繰返し温度変化を受ける塗膜の剥離寿命評価に関する基礎的検討

(株)高速道路総合技術研究所 ○正会員 岩井 将樹, 正会員 服部 雅史
(株)四国総合研究所 非会員 西森 修次, 正会員 坂口 聡彦

1. はじめに

高速道路における鋼橋の防食において、防食下地を無機ジンクリッチペイントとした塗装系が標準的に用いられている。その塗装系に図1に示すような塗膜剥離が生じることがある。この塗膜剥離は、繰返しの温度変化に伴う塗膜の膨張・収縮による内力が無機ジンクリッチペイント層の凝集破壊を引き起こすことが主要因¹⁾とされており、この内力の低減を目的に線膨張係数を鋼材に近づけた塗料（以下、剥離抑制型塗料）が開発されている。既往の研究では、この剥離抑制型塗料が凝集破壊を抑制する効果を、繰返し温度変化を与える促進試験（以下、ヒートサイクル試験）により示した検討がある²⁾。また、筆者らは、剥離抑制型塗料が無機ジンクリッチペイント層の局部応力を低減させることを弾性有限要素解析により力学的に示した³⁾。今回、この剥離抑制型塗料の適用範囲の設定にあたり、塗膜の剥離に対する寿命（以下、剥離寿命）を評価する方法を検討するため、ヒートサイクル試験において無機ジンクリッチペイント層の凝集破壊が発生するまでの期間（以下、凝集破壊の発生寿命）と無機ジンクリッチペイント層の局部応力との関係を整理した。



図1 塗膜剥離の例

2. ヒートサイクル試験

鋼板に塗装を施した試験片を用いたヒートサイクル試験を実施した。試験片の形状を図2に示す。試験片には「#」の形にカットを2か所付与した。塗膜構成を表1に示す。以降は各試験片を表1の試験片番号で呼ぶ。表1のA～Kは表2に示す材料と対応する。試験片番号1～13は新設塗装系や補修塗装系を施したもので、試験片番号14～22は下塗塗料を重ねたものある。温度範囲は、50～-30℃（ $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ）、50～-20℃（ $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$ ）、50～-10℃（ $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ ）、50～0℃（ $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ ）の4パターンとした。データの総数は176か所（塗膜構成22×カット数2×温度帯4パターン）である。一定のサイクル数毎にカット部周辺の変状の発生及び進展を目視で確認し、標準的な塗膜構成である試験片番号1にすべての温度範囲で変状が発生した時点（1,000サイクル）で終了した。

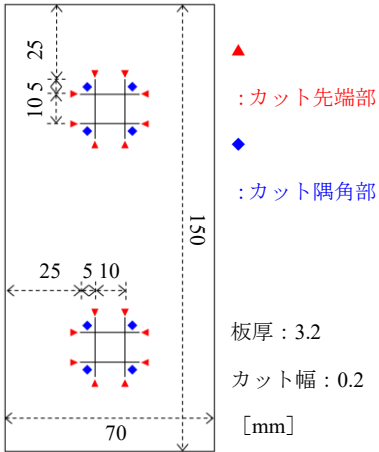


図2 試験片の形状と寸法

表1 試験片の塗膜構成

試験片 番号	塗膜層（膜厚〔μm〕）													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	K (75)	A (120)	D (30)	E (25)										
2					F (60)	F (60)	I (30)	J (25)		F (60)	F (60)	I (30)	J (25)	
3														
4		B (120)												
5					G (60)	G (60)	I (30)	J (25)		G (60)	G (60)	I (30)	J (25)	
6														
7		C (120)												
8					H (60)	H (60)	I (30)	J (25)		H (60)	H (60)	I (30)	J (25)	
9														
10		A (120)												
11					G (60)	G (60)	I (30)	J (25)		G (60)	G (60)	I (30)	J (25)	
12														
13														
14														
15		F (60)	F (60)											
16				F (60)	F (60)									
17														
18		G (60)	G (60)											
19				G (60)	G (60)			G (60)	G (60)					
20														
21		H (60)	H (60)											
22				H (60)	H (60)			H (60)	H (60)					

表2 試験片の塗膜構成

種別	材料名	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	線膨張係数 [×10 ⁻⁶ /℃]
A 強溶剤形	厚膜型エポキシ樹脂	4,300	0.3	3.7
	剥離抑制型変性エポキシ樹脂	5,600	0.3	2.3
	高遮断剥離抑制型変性エポキシ樹脂	4,300	0.3	2.8
	中塗 ふっ素樹脂	5,100	0.3	3.8
B 弱溶剤形	上塗 ふっ素樹脂	4,100	0.3	7.5
	変性エポキシ樹脂	4,500	0.3	4.1
	剥離抑制型変性エポキシ樹脂	7,800	0.3	2.5
	高遮断剥離抑制型変性エポキシ樹脂	4,300	0.3	2.9
C 素地	中塗 ふっ素樹脂	2,700	0.3	6.5
	上塗 ふっ素樹脂	900	0.3	8.5
K	防食下地 無機ジンクリッチペイント	18,000	0.3	3.4
L	素地 鋼板	206,000	0.3	1.2

キーワード 鋼構造物, 防食塗装, 塗膜剥離, 応力解析
連絡先 〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1 道路研究部 橋梁研究室 TEL 042-791-1943

試験では図3に示すような、カット先端部からの割れやカット隅角部からの塗膜剥離が生じた。予め付与したカットの影響を考慮し、割れは0.2mm、塗膜剥離は0.5mmまで進展したことをもって発生と判断した。これらの変状は温度範囲が大きいほど、塗膜の総厚が厚いほど早期に発生した。また、剥離抑制型塗料を用いた試験片では変状の発生が遅延あるいは抑制された。この傾向から、割れも塗膜剥離も無機ジंकリッチペイント層の凝集破壊に起因するものと考えた。変状が発生した121か所（全体の68.8%）の内、111か所で割れが先行し10か所で塗膜剥離が先行した。一方で、割れと塗膜剥離の相互のメカニズムは解明できなかった。そこで、凝集破壊の発生寿命は、最も早期に変状が発生した時点のサイクル数とし整理した。なお、塗膜剥離部の残存膜厚は概ね10 μ mで、凝集破壊は鋼板表面付近で生じていた。



図3 試験片の変状の様子
(試験片番号3, $\Delta T=70^\circ\text{C}$)

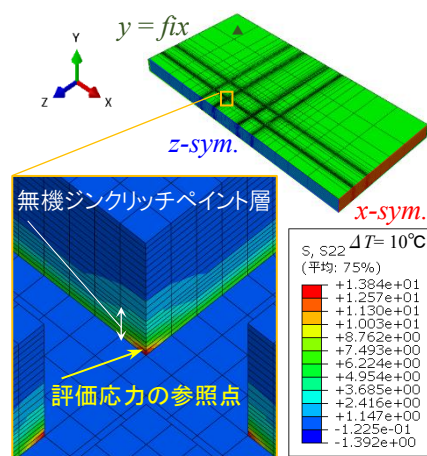


図4 解析モデルと応力の参照点

3. 弾性有限要素解析

ヒートサイクル試験における無機ジंकリッチペイント層に生じる局部応力を推定するため弾性有限要素解析を実施した。使用した解析ソフトは汎用3次元有限要素解析ソフトAbaqus 2021である。解析モデルはヒートサイクル試験の試験片を再現した。解析モデルを図4に示す。対称性を考慮して1/4モデルとしている。要素には温度-変位連成モデルの8節点Solid要素を用いた。なお、着目する無機ジंकリッチペイント層の膜厚方向の要素分割数及び要素サイズは、全ての解析モデルで同じとした。解析に用いた鋼材や塗膜の物性値は表2に示すとおりである。カット隅角部の鋼板から膜厚方向に1要素分（約10 μ m）離れた節点を参照点とし、温度変化に対応する膜厚方向応力の変化量を評価応力範囲として抽出した。評価応力範囲の値を図5に示す。同じ塗料を用いた試験片間では塗膜の総厚が厚いほど値が大きい。また、剥離抑制型塗料を用いた試験片では評価応力範囲の値が低減された。これらの傾向は既往の研究成果³⁾と一致している。さらに、評価応力範囲の値が大きな試験片番号ほど、ヒートサイクル試験における凝集破壊の発生寿命が短い傾向が確認できた。

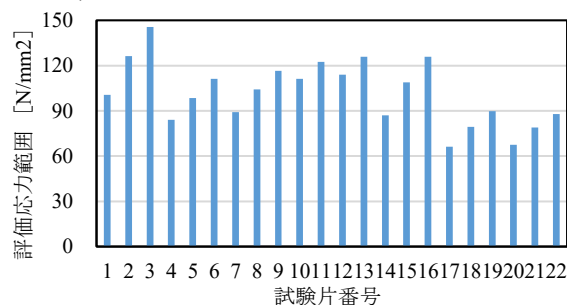


図5 評価応力範囲 ($\Delta T=80^\circ\text{C}$)

4. 評価応力範囲と剥離寿命の関係

弾性有限要素解析により求めた評価応力範囲とヒートサイクル試験における凝集破壊の発生寿命の関係をS-N線図に整理した。結果を図6に示す。評価応力範囲と凝集破壊の発生寿命には相関があるといえる。サイクル数に対して最小二乗法を用いて得た近似曲線、ばらつきが正規分布に従うと仮定したときの非超過確率97.7%の曲線を併せて示している。評価応力範囲が求められればこれらの曲線により剥離寿命を評価できる可能性がある。

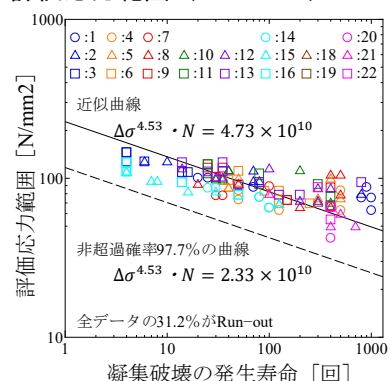


図6 S-N線図

5. まとめ

繰返しの温度変化による無機ジंकリッチペイント層の凝集破壊が生じるまでの期間は、温度変化により生じる無機ジंकリッチペイント層の膜厚方向応力と相関がある。今後は、実環境における温度変化をこの関係に適用し、実橋における剥離寿命の推定を試みる。

参考文献 1) 西森修次：塗膜剥離を抑制する新型変性エポキシ樹脂塗料の開発，（一社）日本橋梁鋼構造塗装技術協会 Structure Painting, Vol.47, 2019/2) 西森修次，大捕秀基，坂口聡彦：線膨張係数に着目した塗料の新仕様提案，（一社）日本鋼構造協会，第42回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，2019/3) 服部雅史，西森修次，坂口聡彦：構造解析を用いた塗膜の剥離評価に関する基礎的検討，（一社）日本鋼構造協会，第44回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，2021