

第I部門

## 疲労 (3)

2023年9月14日(木) 13:30 ~ 14:50 I-3 (広島大 東広島キャンパス総合科学部講義棟 K107)

## [I-85] 超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料が施された面外ガセット溶接継手部の疲労き裂の検出とその進展挙動

Detection and propagation behavior of fatigue cracks in out-of-plane welded gusset joints coated with ultra-thick solvent-free ceramic epoxy resin paint

\*横山 直弘<sup>1</sup>、中村 一史<sup>2</sup>、野上 健太<sup>3</sup>、政門 哲夫<sup>3</sup> (1. 川田工業株式会社、2. 東京都立大学大学院、3. 日本エンジニアリング株式会社)\*Naohiro Yokoyama<sup>1</sup>, Nakamura Hitoshi<sup>2</sup>, Nogami Kenta<sup>3</sup>, Masakado Tetsuo<sup>3</sup> (1. KAWADA INDUSTRIES, Inc., 2. Tokyo metropolitan University, 3. Japan Engineering Corporation)

キーワード：超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料、疲労き裂、塗膜割れ、面外ガセット溶接継手、き裂検出

ultra-thick solvent-free ceramic epoxy resin paint, fatigue crack, painting crack, out-of-plane welded gusset joint, crack detection

鋼橋では、超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料（以下、超厚膜塗料）が小規模な塗り替えで適用されている。超厚膜塗料は、セラミック入の強固なエポキシ樹脂塗料であるため、き裂発生時に塗膜割れが生じない懸念がある。そこで本研究では、超厚膜塗料の塗膜割れ発生の検出とその進展特性の把握を目的として、超厚膜塗料が塗布された面外ガセット溶接継手試験体を対象に疲労試験を行った。その結果、超厚膜塗料は、従来の水性塗料と同様に、疲労き裂の発生で塗膜割れが生じ、疲労き裂に追従して塗膜割れが進展することがわかった。また、応力範囲によらず、超厚膜塗料の方が、水性塗料に比べて、早い段階で塗膜割れを検出することができた。

## 超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料が施された面外ガセット溶接継手部の疲労き裂の検出とその進展挙動

川田工業 正会員○横山直弘，東京都立大学 正会員 中村一史  
日本エンジニアリング 野上健太，正会員 政門哲夫

### 1. はじめに

急速施工が求められる鋼橋では，下塗り，中塗りを1工程で可能で，かつ750 $\mu\text{m}$ 以上の厚塗りが可能な超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料（以下，超厚膜塗料）が小規模な塗り替えて適用されている．超厚膜塗料は，セラミック入の強固なエポキシ樹脂塗料であるため，き裂発生時に塗膜割れが生じない懸念があり，き裂の発生・進展の見逃しから，き裂損傷の検出が遅れる恐れがある．そこで本研究では，超厚膜塗料の塗膜割れ発生を検出とその進展特性の把握を目的として，超厚膜塗料が塗布された面外ガセット溶接継手試験体を対象に疲労試験を行った．

### 2. 試験体と実験の概要

図-1 に，検討対象の面外ガセット溶接継手と塗料の塗布範囲を示す．塗膜割れの検証には，超厚膜塗料に，従来型の水性塗料を加え，両者を試験体の溶接継手部に塗布した後，ビーチマーク法による疲労試験を実施することで，塗膜割れの検出を試みるとともに，疲労き裂の進展との関係を実験的に検証した．表-1 に，試験体の鋼板，超厚膜塗料，水性塗料の機械的性質，表-2 に，疲労試験のパラメータを示す．試験体名称の数字は，塗料ごとの通し番号であり，それぞれ検討した順に番号を付した．

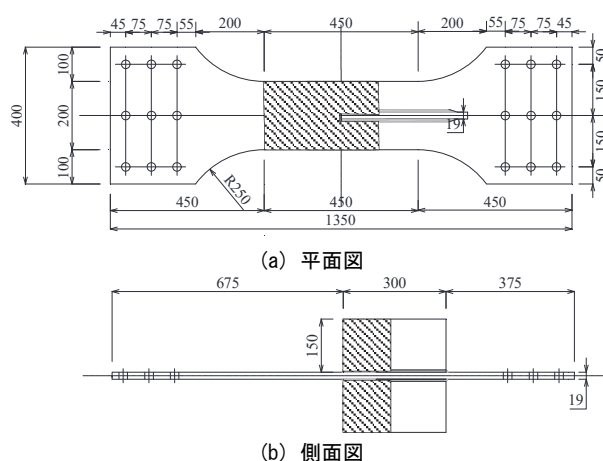


図-1 面外ガセット溶接継手試験体と塗料の塗布範囲

### 3. 塗装工程と疲労試験の方法

図-2 に，面外ガセット溶接継手試験体への塗装工程とセットアップ状況を示す．鋼材の下地処理後，超厚膜塗料は1層，水性塗料は3層の塗装を行い，塗装後3日間，40 $^{\circ}\text{C}$ で加温養生した．

試験は，油圧サーボ式疲労試験機（容量：750kN）を用いて，静的および繰返しの引張応力を与え，ビーチマーク法による疲労試験を実施した．応力比  $R$  は0.1とした．塗膜割れの検出には，マイクロスコープ（サンコー Dino-Lite Premier2 S Polarizer）による目視観察，断線検知法，浸透探傷試験，磁粉探傷試験を用いた．塗膜割れが断線検知法にて検出されるまでは，全振幅の応力範囲で繰返し载荷を行った．塗膜割れ発生の確認後は，塗膜割れの進展を確認するため，断線検知のための導線を再設置して，所定の応力範囲で繰返し载荷を行った．疲労試験は，試験体の破断まで行った．

### 4. 塗膜割れ，疲労き裂の検出と進展特性

実験結果の一部として，図-3 に，超厚膜塗料および水性塗料を施した試験体のビーチマークの一例を示す．いずれの試験体においても，片側の止端からき裂が発生，進展し，初期の段階では，水平方向に長い扁平の楕円形状であった．これは，

表-1 材料物性値

材料	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E$ (GPa)	引張強さ $\sigma_{ur}$ (MPa)	ポアソン比	厚さ $t$ (mm)
鋼材(SM400)	245	205	—	0.3	19
超厚膜塗料	—	1.40	38~48	—	0.75
水性塗料	—	1.1~1.8	35~44	—	0.10

表-2 疲労試験のパラメータ

試験体名	塗料	応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	応力比 $R$	载荷速度 $f$ (Hz)	繰返し回数 間隔(cycles)
OPG-E1	厚膜	100	0.1	2	5,000
OPG-W1	水性			2	5,000
OPG-E2	厚膜	1		1,000	
OPG-W2	水性	1		1,000	



(a) 下地処理 (b) 塗装後の状況 (c) セットアップ  
図-2 試験体の塗装工程とセットアップ状況

キーワード 超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料，疲労き裂，塗膜割れ，面外ガセット溶接継手  
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL.042-677-1111 内線 (4564)

き裂発生初期段階では、溶接止端に沿って複数のき裂が発生し、これらが重なり、1つの半楕円形状を形成するためである。き裂長さの半長が20mm以降では、溶接ビード部の応力集中が小さくなり、長さ方向の進展が遅くなり、板厚方向の進展が早くなることで、き裂形状が徐々に円形に近づくことがわかる<sup>3)</sup>。いずれの試験体においてもき裂長さの半長が35mmに至る直前で貫通き裂となり、限界き裂長(半長で約60mm)に至り破断することがわかる。また、図中には、塗膜割れが検出された時の長さPCを併記している。き裂長さと一致していることがわかるが、詳細は後述する。

図-4に、 $\Delta\sigma_{sn}=100\text{MPa}$ におけるき裂長さの半長と繰返し回数の関係を示す。実験による $N_{p35-60}$ は、いずれの試験体においてもFE解析(ana)と計算(cal)から算出した $N_{p35-60}$ と概ね一致すること、また、き裂長さが長い範囲( $a_p=45\text{mm}$ 以上)では、き裂進展速度が速くなり、解析値や計算値は、実験値から外れることがわかる。

図-5に、溶接止端からの塗膜割れの検出状況を示す。断線検知により疲労試験を停止後、目視観察、浸透探傷試験により破線の範囲で塗膜割れを検出することができた。

表-3に、塗膜割れ、疲労き裂の検出時の繰返し回数、図-6に、 $\Delta\sigma_{sn}=100\text{MPa}$ における塗膜割れ、き裂長さの半長と繰返し回数の関係をそれぞれ示す。表-3は、塗膜割れが検出された時の半長とその時の繰返し回数を示しており、図-3に、その位置(PC)を併記している。応力範囲に関わらず、超厚膜塗料の試験体の方が、限界き裂長(60mm)に対して、繰返し回数が小さいうちに塗膜割れを検出することができた。図-6からも、超厚膜塗料の試験体の方が、水性塗料の試験体と比べて、塗膜割れ、き裂長さともに小さい範囲から検知できること、塗膜割れ、疲労き裂は類似の進展特性であることがわかる。

5. まとめ

本検討では、超厚膜無溶剤系セラミックエポキシ樹脂塗料の疲労損傷に伴う塗膜割れを検証するため、塗料を塗布した面外ガセット溶接継手の疲労試験を行った。その結果、超厚膜塗料は、従来の水性塗料と同様に、疲労き裂の発生で塗膜割れが生じ、疲労き裂に追従して塗膜割れが進展することがわかった。また、応力範囲によらず、超厚膜塗料の方が、水性塗料に比べて、早い段階で塗膜割れを検出することができた。

参考文献

- 1) 林駿佑, 中村一史, タイウィサル, 坪川毅彦, 松井孝洋: 面外ガセット溶接継手から発生した疲労き裂のCFRP接着による補修効果に関する実験的検討, 土木学会, 第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.1-9, 2021.
- 2) 日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一, 2012年改訂版, 技報堂出版, 2012.
- 3) 小西拓洋, 横山薫, 関屋英彦, 平野秀一, 三木千壽: ガセット取付部疲労亀裂の点検管理基準の提案, 鋼構造論文集, 第27巻, 第105号, pp.43-52, 2020.

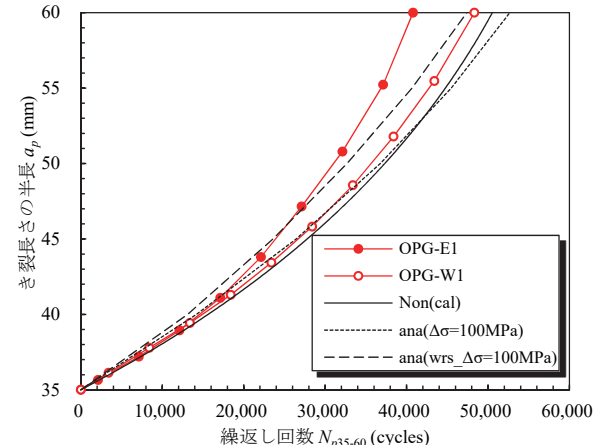
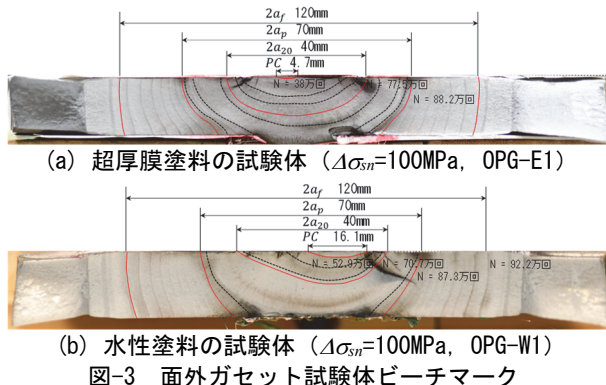


図-4 き裂長さの半長と繰返し回数の関係

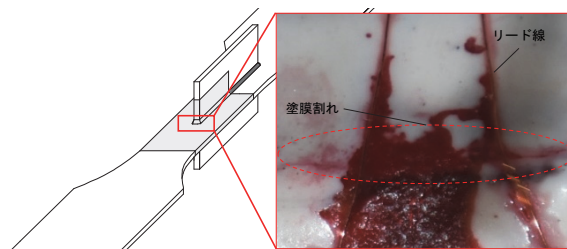


図-5 溶接止端からの塗膜割れの検出状況

表-3 塗膜割れ、疲労き裂の検出時の繰返し回数

試験体名	塗料	$\Delta\sigma_{sn}$ (MPa)	塗膜割れ時の半長 (mm)	塗膜割れ発生回数 $N_a$ (回)	き裂長さの半長 $a_p=60\text{mm}$ 発生回数 $N_p$ (回)	発生からの回数 $N_a - N_p$ (回)	寿命比 $N_a/N_p$
OPG-E1	超厚膜	100	2.3	380,524	923,676	543,152	0.41
OPG-W1	水性	100	8.1	529,319	921,951	392,632	0.57
OPG-E2	超厚膜	140	14.5	84,185	252,574	168,389	0.33
OPG-W2	水性	140	5.5	153,000	263,851	110,851	0.58

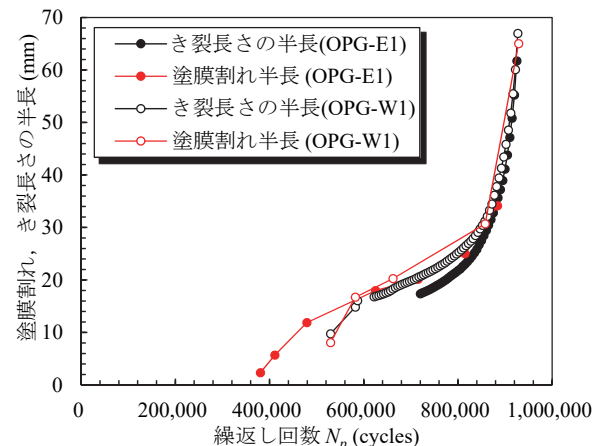


図-6 塗膜割れ、き裂長さの半長と繰返し回数の関係