

溶接残留応力と接着副資材の有無が CFRP 接着補修された溶接継手のき裂進展速度に及ぼす影響

東京都立大学大学院 学生会員 ○俣野厚志, 正会員 中村一史
宇都宮大学 正会員 タイウヰサル 東レ 正会員 松井孝洋

1. はじめに

本研究は、疲労損傷を受けた鋼構造物を対象に、高強度・高弾性である CFRP を用いた補修工法の開発を目的としたものである。CFRP が接着された鋼部材の疲労き裂進展速度は、接着接合部のはく離進展の影響や溶接等により生じた残留応力の状態によって異なると考えられる。そこで、はく離進展に及ぼすと考えられる副資材の有無および溶接残留応力の有無を組み合わせた試験体をそれぞれ作製し、き裂進展速度に及ぼす影響を比較した。

2. CSM を使用しない真空含浸工法の開発

CFRP を真空含浸 (VaRTM) により鋼材と成形・接着する場合、樹脂の含浸を促す副資材として、ガラス繊維のチョップドストランドマット (CSM) を使用するが、き裂進展に伴ってはく離することが懸念された。そこで、CSM を用いずに含浸接着樹脂が含浸するように、プライマー (エポキシ樹脂接着剤 E258R) 表面に溝を設け、含浸接着樹脂を VaRTM で含浸させる方法 (CSM 無) を検討する。含浸接着樹脂には、常温硬化型二液性エポキシ樹脂 (AUP40) を使用した。

プライマー表面の溝は、メッシュ状のメディアをプライマーの塗布直後に設置し、プライマーの硬化後にメディアを取り除くことで作製した。メディアを除去できる状態のプライマーの硬化時間は、事前に検討したところ、室温 27°C で約 6 時間であった。図-1 に、副資材の相違による含浸接着樹脂の含浸状況 (養生後、17 時間経過) を示す。プライマーに溝を設けた場合、CSM を設置した場合と同様にフィルム内全体に樹脂が含浸すること、樹脂の含浸速度も同程度であることを確認した。

図-2 に、CSM 無の試験体 (NC ケース) と CSM 有の試験体 (C ケース) それぞれにおける CFRP と鋼材の接着部の断面画像を示す。図はマイクロスコープを使用して観察した画像である。NC ケースでは接着層部分に黒い斑点が均等間隔で確認され、プライマー表面にできた溝に含浸接着樹脂が含浸している様子がわかる。断面の観察では含浸接着樹脂とプライマーの間に、空隙は生じておらず、CSM 無でも VaRTM によって鋼材表面に CFRP の成形・接着が可能であることがわかった。

3. 試験体と疲労試験の条件

本検討では、面内ガセット溶接継手の止端部から母材中心方向に向かって初期き裂を 20mm 導入し、CFRP を VaRTM で成形接着して補修後、一定振幅で繰返し荷重を載荷する方法で疲労試験を行った。図-3 に、使用した試験体と CFRP 補修の概念図を示す。初期き裂は、継手端部から 5mm まで切欠きを設けた後、き裂長さが 20mm になるまで疲労試験を行って導入した。表-1 に、試験体の材料特性を、表-2 に、試験条件をそれぞれ示す。応力範囲 $\Delta\sigma_m$ は 2 ケース (82.3, 54.9N/mm²) とした。溶接残留応

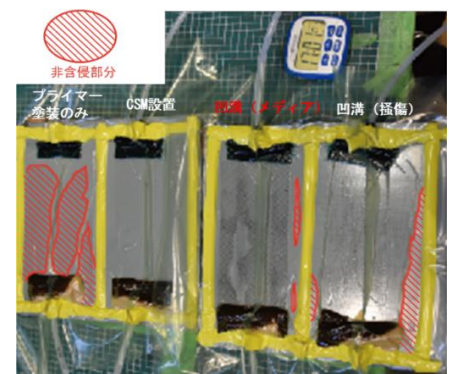
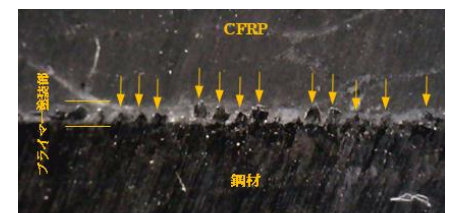
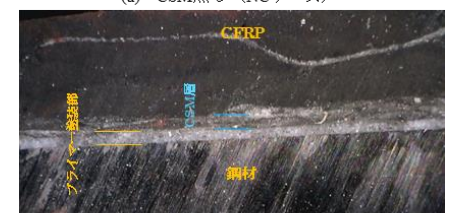


図-1 副資材ごとの含浸接着樹脂の含浸状況



(a) CSM無し (NCケース)



(b) CSM有り (Cケース)

図-2 CSM 有無における接着層の断面画像

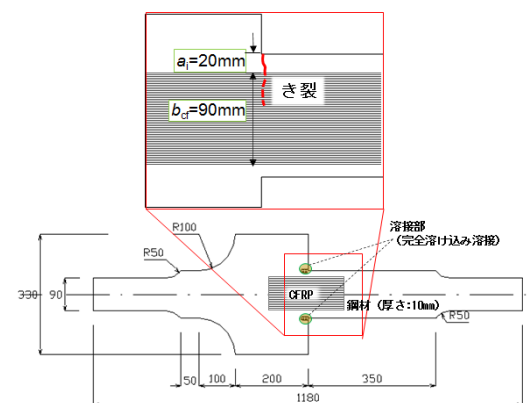


図-3 試験体の一般図と CFRP 補修の概念図

キーワード 面内ガセット, き裂進展, CFRP, 溶接残留応力, 補修
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)

力の検討は、焼鈍処理を施した試験体を作製した。焼鈍処理試験体の焼鈍温度は $625 \pm 25^\circ\text{C}$ とし、冷却は炉玲 80°C/h 以下に設定した¹⁾。図-4 に、切断法による残留応力の計測結果を示す。計測には、切断時の摩擦熱を抑えるために糸鋸(刃幅 0.4mm)を用いて、初期切欠きと同じ位置から幅方向とした。焼鈍処理によって、溶接残留応力が除去されていることがわかる。

疲労試験のケースは、表-2 より、各応力範囲において溶接残留応力の有無、VaRTM 時の CSM 有無で計 8 ケースとした。疲労試験には、島津サーボパルサ(動的容量: 200kN)を使用した。き裂の進展は、疲労試験中にビーチマーク法を併用することで計測した²⁾。

4. 検討の結果と考察

図-5 に、各ケースでのき裂長さに対するき裂進展速度を示す。赤いプロット点は焼鈍処理試験体(NR ケース)の、黒いプロット点は溶接試験体(R ケース)のき裂進展速度である。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=82.3\text{N/mm}^2$ では R ケースにおいて CSM 有の試験体がき裂長さ 40mm 付近から進展速度増加に転じている一方、CSM 無の試験体はき裂が進展するにつれ進展速度は減少している。これは CSM 有無によるはく離進展の違いと考えられ、き裂長さ 40mm 付近で大きくはく離が進展したものと考える。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$ ではいずれもき裂進展速度が減少し、き裂進展速度の変化に関して大きな差はないことがわかる。これらのことから、大きい応力範囲において CSM を使用する場合、はく離しやすくなる可能性があると考えられる。また、R ケースと NR ケースの違いを見ると、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$ では、R ケースにおいてき裂長さ 80mm 付近でき裂進展速度が急激に減少していることがわかる。これは、CFRP による応力分担で、溶接残留応力の再配分が抑えられ、き裂先端が圧縮残留応力の領域に到達したことによるものと考えられる。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=82.3\text{N/mm}^2$ ではそのような現象は確認されず、はく離の影響が大きいことで、圧縮残留応力の領域に達する前に破断したと考える。

5. まとめ

VaRTM 工法で CFRP 補修した鋼部材の疲労き裂進展速度を、溶接残留応力の有無と CSM の有無による影響を考慮して比較した。その結果、CSM 無でもプライマー表面に溝を設けることで VaRTM 工法でも樹脂の含浸が可能であることがわかった。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$ の場合、き裂先端が圧縮残留応力の領域に達することで CSM の有無に関わらず進展速度が低下することが示唆された。また、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=82.3\text{N/mm}^2$ で、CSM 有の場合、はく離の進展により、き裂進展速度が速くなること、CSM 無ではそれが抑制されることが確かめられた。

参考文献

- 1) 大内田久, 岩崎勤: 溶接構造物の応力焼鈍と残留応力, 日立評論, Vol.41, No.8, pp.103-108, 1959.
- 2) 俣野厚志, 中村一史, タイウィサル, 坪川毅彦, 松井孝洋: 面内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, 第 14 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.18-1-18-8, 2020.

表-1 材料特性

材料名	鋼材 (SM400)	CF シート	接着剤 (AUP40T)
弾性率 E_s (N/mm ²)	205,000	440,000	3,430
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	305	-	-
引張強度 (N/mm ²)	-	2,400	12
厚さ t (mm)	10	0.217	-

表-2 疲労試験の条件

試験体名	応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ (N/mm ²)	溶接残留応力 有無	CSM 有無
83-R-C	82.3	○	○
83-R-NC	82.3	○	×
83-NR-C	82.3	×	○
83-NR-NC	82.3	×	×
55-R-C	54.9	○	○
55-R-NC	54.9	○	×
55-NR-C	54.9	×	○
55-NR-NC	54.9	×	×

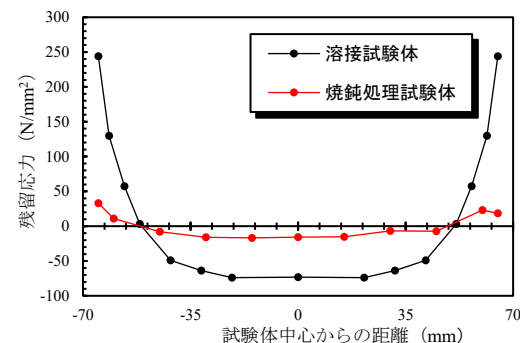
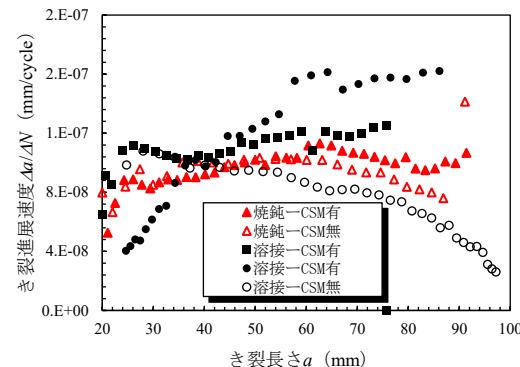
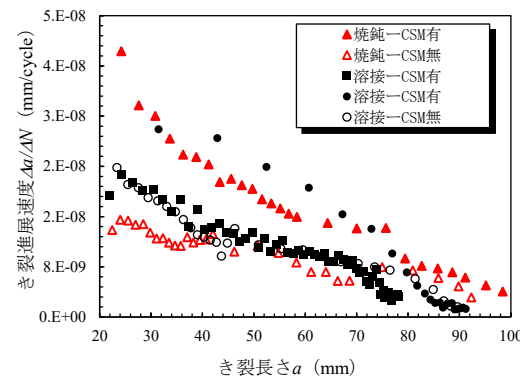


図-4 切断法による溶接残留応力計測結果



(a) 応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=82.3\text{N/mm}^2$



(b) 応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$

図-5 き裂長さとき裂進展速度の関係