

面外ガセット溶接継手から発生した疲労き裂の CFRP 接着による進展寿命の遅延効果の検証

東京都立大学大学院 学生会員 ○林駿佑, 正会員 中村一史 宇都宮大学 正会員 タイウィサル
三井海洋開発 坪川毅彦 東レ 正会員 松井孝洋

1. はじめに

近年, 炭素繊維を強化材とする CFRP は, 高強度かつ高耐食性であること, 軽量で現場での施工性に優れることから, 鋼構造物の補修・補強に適用されている. 例えば, FPSO (Floating Production Storage and Off-loading system) をはじめとする浮体式生産設備は長期間にわたる供用期間から疲労損傷の発生が顕著であり, 狭隘な作業スペースおよび火器の使用が困難な環境から, 適切な補修方法が求められている. 本検討では, 典型的な疲労き裂発生箇所として, 面外ガセット溶接継手に着目し, 溶接止端から発生した疲労き裂に対して, 真空含浸工法を応用した CFRP 接着による疲労き裂の補修を試みた. 補修後のき裂進展寿命が面外ガセットの疲労強度等級を満たすための CFRP の必要量を解析的に算定するとともに, 疲労き裂の補修効果と CFRP の数量の妥当性を疲労試験により検証した.

2. き裂進展寿命の評価と CFRP の必要数量と検討

本研究では, 汎用有限要素解析プログラム Msc Marc/Mentat 2019 により, 図-1 に示す試験体を対象に 3 次元弾性解析を行った. CF シートは一体化された CFRP と仮定し, 材料の異方性と繊維の配向方向を考慮して解析を行った. 鋼材と CFRP の間の接着層は, 鋼材表面から法線方向に 0.5mm の均一な樹脂厚さの接着層でモデル化した. 材料物性値は, 表-1 に示した通りである. 解析モデルは, 溶接止端部中央から片側あたりのき裂長さ a が 35mm から 60mm の区間において, 5mm 毎にき裂を与えて作成し, 試験体の端部に一様な引張応力を作用させて, き裂先端の応力拡大係数を求めた. 厚さ方向は要素を 10 分割し, 各節点の応力拡大係数を求め, その平均値で評価した. 鋼種は SM400 であり, 表-1 に, 本解析で用いた材料物性値を示す.

図-2 に, 応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=119.8\text{MPa}$ において, き裂長さ a が 35mm から 60mm に至るまでのき裂進展寿命 (N_{35-60}) と CF シートの積層数の関係を示す. き裂進展寿命の推定値は, 応力拡大係数を用いてパリス則により求めた. 無補修試験体の N_{35-60} の値は, 約 37,000 回であり, CF シート積層数の増加とともに N_{35-60} の値は増加することがわかる. 積層数が 5 層で, 米国船級協会 (ABS) が規定する面外ガセット溶接継手の疲労強度等級 (F2) における繰返し回数 10 万回 (応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=119.8\text{MPa}$) を満足することから, 接着する CF シート積層数は 5 層とすることとした.

図-1(c) に, CF シートの中心から端部までの配置図を示す. CF シートを 5 層接着した場合に必要な定着長は, 表-1 に示す材料物性値を用いて文献 2) より算定すると, 51mm であり, 本研究では 60mm とした. CF シートのはく離を防止するため, その端部に段差を設けた. 段差の設計は, 含浸接着樹脂 (AUP40) の疲労限と予測される主応力の限界値 ($\Delta\sigma_{ep,lim}=24.3\text{MPa}$) に基づき, 各接着層の主応力がそれ以下になるような段差長とした. その結果, 段差長は各層で 10mm とした.

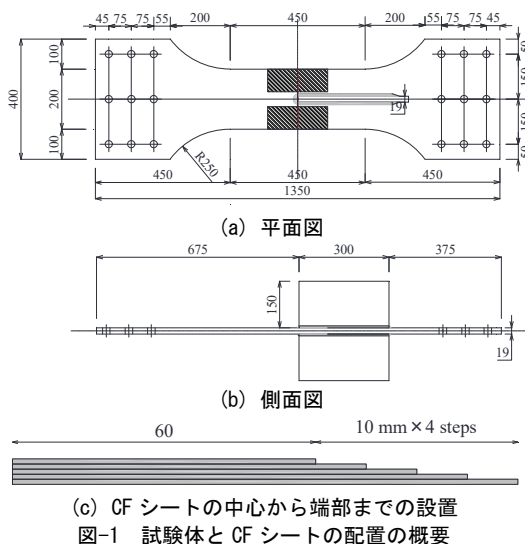


図-1 試験体と CF シートの配置の概要

表-1 材料物性値

材料	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_{tu} (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比	厚さ t (mm)
鋼材 (SM400)	245	400	205	0.3	19
CF シート (中弾性)	—	3,400	440	0.34	0.217
CFRP	—	3,400	220	0.34	0.434
CSM	—	97.1	18.75	0.37	0.143
含浸接着樹脂 (AUP40)	—	43.3	3.43	0.39	0.5

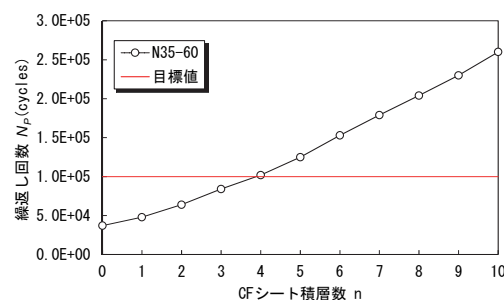


図-2 CF シート積層数と繰返し回数 N_{35-60}

キーワード 面外ガセット, 疲労き裂, 補修, CFRP, 真空含浸 (VaRTM)

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 大学院 TEL.042-677-1111 内線(4564)

3. 真空含浸工法を応用した CFRP の接着方法と試験条件

図-3 に、真空含浸 (VaRTM) による CFRP 接着の状況を示す。鋼材の下地処理、プライマー塗布、CF シートと副資材の設置、真空含浸および仕上げの順に行い、補修後、24 時間 40℃ で加温養生した。

油圧サーボ式疲労試験機 (容量: 750kN) を用いて、静的および繰返し引張応力を与えた。応力の参照位置は、止端部の構造的な応力集中の影響を受けない箇所 (止端部から 150mm 離れた位置) とし、補修体ではコバ面とし、ひずみゲージ (ゲージ長 3mm) により計測した。各試験体の静的引張試験 (各 3 回の平均値) の結果の一部として、公称引張応力 133.1MPa におけるひずみは、無補修体の 480×10^{-6} に対し、補修体で 354×10^{-6} であることから、CFRP によるひずみの低減率は 0.738 となる。これは、文献 2) で示される応力低減率 ξ_0 の 0.731 とほぼ一致することから、CFRP の補修効果は理論通りであるといえた。

4. 疲労試験による CF シート補修効果の検討

図-4 に、各試験体のビーチマーク、表-2 に、ビーチマークにより計測された初期き裂長さを示す。初期き裂長さ $a_i=35\text{mm}$ 付近では、表裏のガセット、溶接止端の位置のずれにより、4 箇所のき裂長さにばらつきが生じたものの、平均値として、ほぼ初期き裂が導入されることを確認した。図-5 に、 $\Delta\sigma_{sn}=119.8\text{MPa}$ におけるき裂長さ a と繰返し回数の関係を示す。疲労試験の全てのケースで、繰返し回数は、解析結果に対して、増加している。これは、溶接止端部から発生した表面き裂が完全な貫通き裂となるまでに繰返し回数を要したこと等が考えられた。

図-6 に、面外ガセット溶接継手の疲労強度等級 (F2) と各試験体の進展寿命 N_{35-60} の関係を示す。ここで、各試験体の進展寿命 N_{35-60} は、き裂長さ a が 35mm から 60mm まで進展するまでの繰返し回数を、ビーチマークより算出した。図より、進展寿命 N_{35-60} は、無補修試験体では、いずれのケースでも面外ガセット溶接継手の疲労強度等級 F2 を下回ることで、また、補修試験体では、いずれのケースも F2 を満足することから、CF シートの積層数は妥当であるといえた。なお、OPG09_R ($\Delta\sigma_{sn}=54.4\text{MPa}$) は疲労試験を継続中であり、進展寿命は延びる可能性がある。

5. まとめ

本検討では初期き裂が発生した面外ガセット溶接継手の CFRP 接着補修による性能回復を目的として、実験的、解析的な検討を行った。

その結果、き裂長さ a が 35mm から 60mm までに進展する繰返し回数 N_{35-60} において、米国船級協会の疲労強度等級 F2 相当の進展寿命 N_p を満足するために必要な中弾性タイプの CF シートの積層数は 5 層であること、また、応力範囲 119.8MPa および 55.4MPa の疲労試験結果より、CF シートによる補修試験体の繰返し回数 N_{35-60} は、F2 等級を満足することが確かめられた。今後、疲労試験を継続して、データの蓄積を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：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。
- 2) 複合構造委員会編：FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案)，土木学会，2018.7

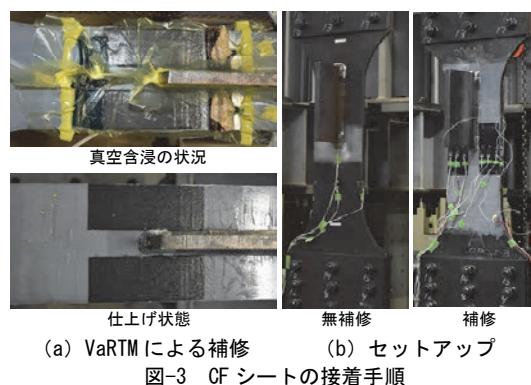


図-3 CF シートの接着手順

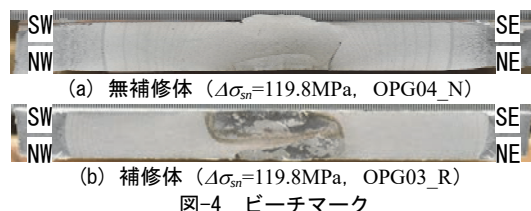


図-4 ビーチマーク

表-2 初期き裂長さのまとめ						
試験体名 (無補修 N, 補修 R)	応力範囲 (MPa)	初期き裂長さ (mm)				
		SE	NE	SW	NW	平均
OPG02 N	119.8	41.2	33.3	40.1	30.3	36.2
OPG03 R	119.8	36.6	26.1	41.2	40.8	36.2
OPG04 N	119.8	33.6	38.8	31.7	36.0	35.0
OPG06 N	55.4	42.0	38.8	27.8	33.5	36.5
OPG08 N	55.4	64.8	75.3	37.7	51.2	51.2
OPG09 R	55.4	35.0	32.0	40.0	40.0	36.7

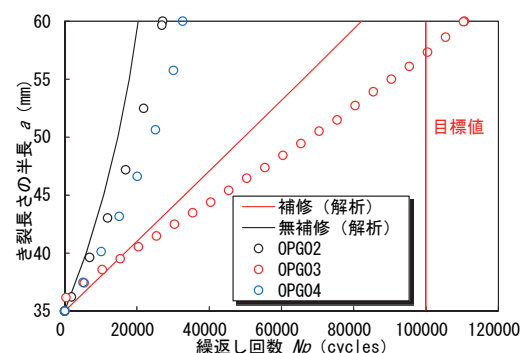


図-5 き裂長さ a と繰返し回数 N_p の関係 ($\Delta\sigma_{sn}=119.8\text{MPa}$)

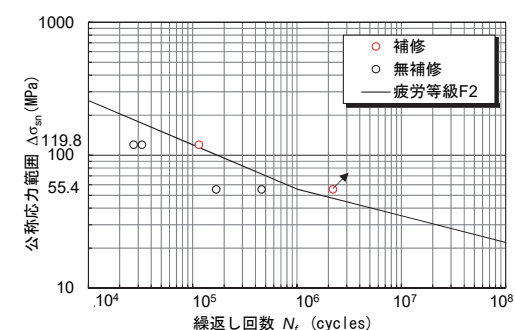


図-6 応力範囲と繰返し回数 N_{35-60} の関係