

(17) 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

林 駿佑¹・中村 一史²・タイ ウィサル³・坪川 毅彦⁴・松井 孝洋⁵

¹学生会員 東京都立大学大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hayashi-shnsuke@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域・准教授
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hayashi-shnsuke@ed.tmu.ac.jp

⁴正会員 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科・助教
E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

⁴三井海洋開発株式会社 CTO・常務執行役員

⁵正会員 東レ株式会社 ACM技術部・主席部員

本研究は、CFRPを用いた鋼構造物の補修方法の開発を目的としたもので、橋梁や船舶における、典型的な疲労き裂の発生箇所として、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継手の疲労強度等級を満たすためのCFRPの必要数量を解析的に算定するとともに、疲労き裂の補修効果と解析の妥当性を疲労試験により検証した。疲労試験では、母材厚19mmの面外ガセット溶接継手試験体を使用し、ビーチマーク法を用いてき裂長さ35mmから60mmまでの繰返し回数を計測した。疲労試験の結果から、補修試験体は既定の疲労強度等級を満足すること、CFRP接着によりき裂の進展寿命が遅延することが確かめられた。

Key Words : *out-of-plane gusset, crack propagation life, CFRP, weld residual stress, repair*

1. はじめに

浮体式生産設備（Floating Production Storage and Offloading system, FPSO）は、洋上で石油・ガスを生産、タンクに貯蔵、輸送タンカーへの積出を行う設備で、一般に既設の大型タンカーを改造・転用して、20年以上にわたり洋上で継続して使用される。タンク内では、オイルやバラスト水（海水）の入れ替えで、著しい腐食環境にあること、また、外洋の波浪に伴う繰返し荷重が生じることから、鋼部材に断面欠損、疲労き裂が生じている。一方、洋上における船体の補修という観点では、補修要員の確保やタンク内への資機材搬入などの制約を受けることが多い。このような状況から、十分な対応が難しく、強度要件を下回る状況が発生している¹⁾。

従来の補修工法では、鋼材による当て板溶接や部材の取替による補修が行われている²⁾。しかしながら、溶接による補修は、安全のために隣接するタンク全てをガス

フリーにする必要があり、オペレーション継続に大きな障害が生じるとともに多大なコストが発生する。また、資機材搬入の問題により制約を受けることがあり、対応が遅れることもある。

このような状況から、資機材の搬入が容易で、火気工事を伴わず、少人数・短工期で施工可能な新しい補修法の開発が求められている。その解決策として、真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下VaRTM）を応用した炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic, 以下CFRP）接着による補修工法に着目した。炭素繊維シート（以下、CFシート）は軽量かつ高強度などの特徴があり、近年では、鋼、コンクリート部材の補修材料として適用されてきた^{3,4)}。

VaRTMでは、施工時に火気工事を伴わないこと、大掛かりな設備を必要としないことなど、従来の補修工法にはない優れた特徴があるものの、実構造物への適用性は十分に示されていない。

そこで本検討では、船体構造における、疲労き裂の標準的な補修方法の開発を目的として、面外ガセット継手の溶接止端部から発生する疲労き裂を対象に、炭素繊維シートをVaRTMにより成形・接着することで、き裂進展の遅延効果を疲労試験により検証した。

2. 面外ガセット溶接継手試験体と材料特性

(1) 試験体の設計

図-1 に、面外ガセット溶接継手の試験体を示す。試験体の母板（450×200×19mm，SM400A）の両面は、面外ガセット（300×150×19mm，SM400A）がすみ肉溶接で接合されている。また、試験機に制約があるため、つかみ部分の幅は400mmとした。

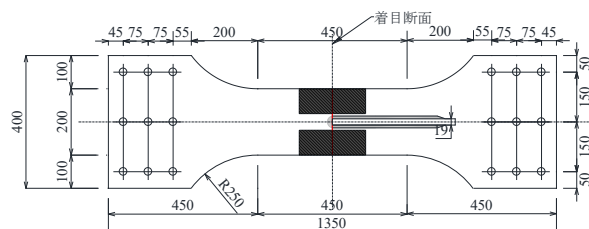
本検討では、対象とする面外ガセット溶接止端から初期き裂 a_i が発生した状態を想定して、初期き裂 a_i を予め疲労試験により導入した上で、CF シートを積層接着して補修した。さらに疲労試験を行って、補修後のき裂進展の遅延を検討した。

図-2 に、米国船級協会（ABS）の定める水中の面外ガセット継手の疲労強度曲線⁹⁾を示す。本検討では、公称応力範囲 $\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$ および 55.4MPa において、き裂さ a_p が 35mm から 60mm まで進展する際のき裂進展寿命 N_{p3560} が、CF シートを積層接着することで疲労強度等級を満足することを補修による延命化の目標とした。

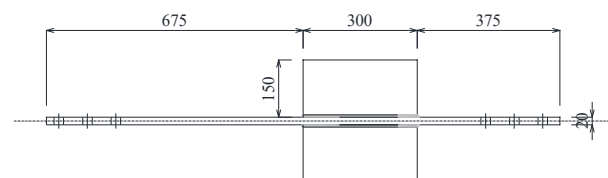
(2) 補修材料の選定と材料特性

図-3に、VaRTMを応用したCFRP接着補修の概念図を示す。VaRTMとは、鋼材（成形型）の上に積層したCFシートなどの繊維強化材を、プラスチックフィルム等で封入し、真空吸引した後に液状樹脂を注入・含浸して硬化させることでFRPを成形する技術である。

一般に、CFシートは、積層数が増えると作業効率に影響するため、本検討では中弾性タイプを用いることとした。中弾性タイプは、強度と弾性係数のバランスに優れること、弾性係数が高いCFシートの中でも取り扱い時や加工時に損傷しにくいことなどの特徴がある。繊維強化材とプラスチックフィルムの間には、含浸接着樹脂の流動性を確保するための樹脂拡散用網状シート（以下、メディア）や硬化後、資材を取り外すためのはく離シート（以下、ピールプライ）を使用する。また、含浸接着樹脂の流動性の確保と鋼材とCFシートとの間に電食の防止のため、接合用強化材として、鋼材とCFシートの上にガラス繊維のチョップドストランドマット（以下、CSM）を使用する。表-1に、検討に用いた材料物性値を示す。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-1 面外ガセット溶接継手試験体（単位：mm）

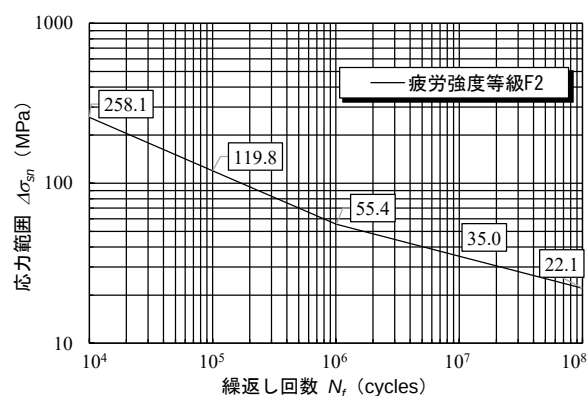


図-2 ABSの定める海水中の面外ガセット溶接継手の疲労強度等級F2

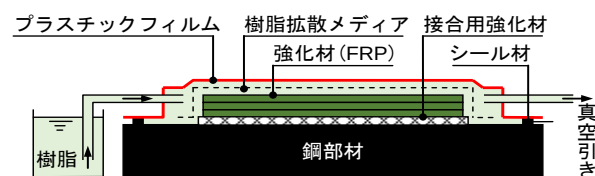


図-3 VaRTM技術による鋼部材へのCFRPの成形・接合の概念図

表-1 検討に用いた材料物性値

材料	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E (GPa)	せん断弾性係数 G (GPa)	ポアソン比	厚さ t (mm)
鋼材 (SM400)	245	205	—	0.3	19
CFシート (中弾性)	—	440	183	0.2	0.217
CFRP	—	$E_1=213$	$G_{12}=3.7$	$\nu_{12}=0.24$	0.434
	—	$E_2=124$	$G_{23}=1.3$	$\nu_{23}=0.28$	—
	—	$E_3=124$	$G_{31}=3.7$	$\nu_{31}=0.24$	—
CSM	—	25.0	9.6	0.3	0.118
含浸接着樹脂 (AUP40)	—	3.4	1.3	0.28	0.5
プライマー (E258R)	—	4.5	1.7	0.34	0.181

3 積層CFシートによる補修とき裂進展寿命の予測

(1) 積層CFシートによる定着長の検討

中弾性タイプのCFシートの定着長は、後述するように、5層、11層接着した場合に必要な長さを検討した。文献⁹⁾では、CFRPを鋼部材に接着した場合、接着剤を介して鋼部材の断面力がCFRPへ徐々に伝達されるため、断面力の分担が合成断面に対する値とほぼ一致するまでのCFRPの長さを定着長としている。

本研究では、文献⁹⁾に基づいて、表-1の材料物性値を用い、CFRPの定着長を検討した。その結果、CFシートの必要定着長は、5層接着した場合、51mm、11層の場合、79mmとなった。それらを踏まえ、実験では、それぞれ60mmおよび100mmと決定した。

(2) CFRPの端部はく離の検討

CFRP 端部からはく離を防止するための段差の設計では、接着剤の最大主応力による評価を採用した。理論計算と解析的検討により CFRP 端部における接着接合部の応力を算定して、端部はく離が発生しないための設計を行った。また、接着層のモデル化には、図-4 に示すように、接着層と CSM を考慮しており、各層の厚さは、含浸接着樹脂 (AUP40) 層で 0.5mm, CSM で 0.118mm, CFシートおよびCFシート接着層で 0.217mmとしている。なお、CSMの弾性係数はCFシートに比べて小さいため、本検討では、CSMは接着層と見なして検討した。

a) 含浸接着樹脂に生じる主応力の計算

本検討では、接着端部の接着剤に生じるせん断応力、垂直応力から計算される主応力を用いて、接着接合部の疲労強度を評価することとした。主応力 σ_{pe} は、次式より算出される。

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (1)$$

ここに、 τ_e は接着剤に生じるせん断応力、 σ_{ye} は接着剤に生じる垂直応力である。当て板が両面に接着された鋼板に軸方向力 P が作用する場合、当て板端部の接着層に生じるせん断応力 τ_e と垂直応力 σ_{ye} は次式で計算される。

$$\tau_e = \frac{c}{2b_f}(1-\xi_0)P \quad (2)$$

$$\sigma_{ye} = \frac{1}{2}(2\omega - c)t_f\tau_e \quad (3)$$

ここに、

- b_f : 当て板の接着幅 (mm)
- t_f : 当て板の厚さ (mm)
- I_f : 当て板の断面二次モーメント (mm⁴)
- h : 接着層の厚さ (mm)

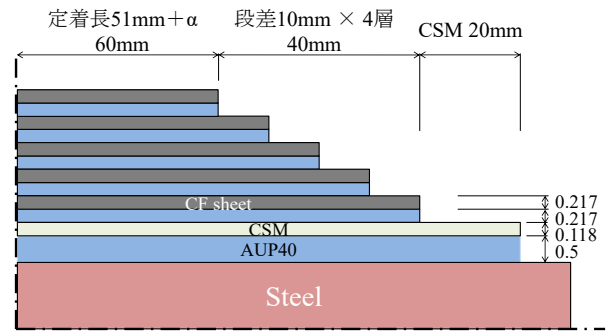


図-4 CFシート、CSMおよび接着層の段差の概念図

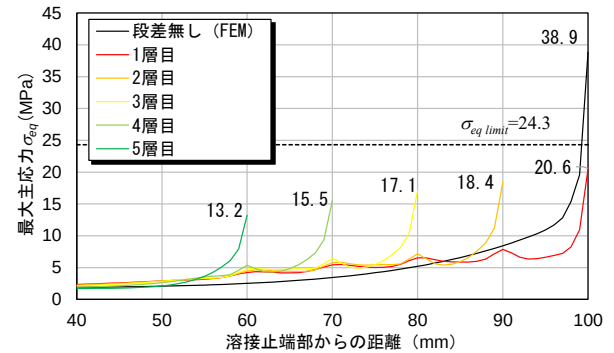


図-5 段差モデルにおける最大応力分布図 ($\sigma_{eq}=133.1\text{MPa}$)

E_e : 接着層の弾性係数 (MPa)

$$\omega = 4 \sqrt{\frac{b_f E_e}{4h} \cdot \frac{1}{E_f I_f}} \quad (4)$$

P : 軸方向力 (N)

b) FEM解析を用いた主応力の計算

積層CFシートの中の接着剤を考慮した解析モデルを作成し、汎用有限要素解析プログラム (Msc. Marc/Mentat 2019) を用いて解析を行った。解析方法は、平面ソリッド要素による線形弾性解析とし、メッシュ分割は1mm×1mmとし、接着層は厚さ方向に2分割した。積層構成と仮定した段差、材料物性値は、図-4、表-1に示した通りである。

図-5に、疲労試験における最大公称引張応力 $\sigma_{eq}=133.1\text{MPa}$ が作用した際、各接着層に生じる主応力分布図を示す。なお、疲労限界度の主応力 $\sigma_{pe\text{ limit}}$ は、引張試験に基づいたはく離強度の30%と定義し、 $\sigma_{pe\text{ limit}}=24.3\text{MPa}$ ⁷⁾とした。図より、段差なしの接着端部の接着剤に生じる主応力は、疲労限界度の主応力を超えるため、疲労によるはく離が懸念される。一方、10mmの段差をCFシートに与えたモデルの主応力は、各接着層に生じる主応力は、疲労限界度の主応力以下であること確認でき、本研究では、段差10mmと設定した。

なお、本検討は、CFシートが5層のケースであるが、CFシートが11層のケースについても疲労限度の主応力以下であることを別途確認している。

(3) き裂進展寿命予測の算定条件

初期き裂長さ a_i から所定のき裂長さ a_p までの繰返し回数（き裂進展寿命） N_p は、応力拡大係数範囲 ΔK とパリヌ則に基づいて、(5)より求めた。

$$N_p = \int_{a_i}^{a_p} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (5)$$

ここに、

N_p : き裂進展寿命 (cycles)

a_i : 初期き裂長さ (mm)

a_p : 所定のき裂長さ (mm)

C : 材料定数 1.5×10^{-11}

m : 材料定数 2.75

ΔK : 応力拡大係数範囲 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)

式(5)において、 C および m は実験により決定される材料定数である。本研究では、文献⁸⁾の平均設計曲線の値を準用することとした。

(4) モデル化と応力拡大係数の計算方法

本検討では、CFRP 接着により補修された試験体の応力拡大係数は、FEM 解析により求めることとした。また、無補修試験体では、有限幅の影響を考慮した次の補正式より評価した。引張応力 σ_w を受ける有限幅板において、中央貫通き裂 $2a$ に生じる応力拡大係数は式(6)より算定できる。

$$K = F_w \sigma_{sn} \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

ここに、

K : 応力拡大係数 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)

F_w : 補正係数

σ_{sn} : 公称引張応力 (MPa)

a : き裂長さ (mm)

式(6)中の補正係数 F_w は、有限幅の影響を考慮した中央貫通き裂の補正係数で、それぞれ式(7)、(8)である。

$$F_w = \left(1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4\right) \sqrt{\sec \frac{\pi\xi}{2}} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{2a}{b_s} \quad (8)$$

ここに、

a : き裂長さ (mm)

b_s : 鋼板の幅 (mm)

CFシート接着による応力低減は次式⁹⁾より求められる。

$$\sigma_{sR} = \frac{E_s}{E_s t_s + 2E_f \frac{b_f}{b_s - 2a} t_f} \sigma_{sn} \quad (9)$$

図-6に、補修試験体の応力拡大係数を計算するために作成した解析モデルを示す。解析モデルは、対称性を考慮した1/4モデルとした。要素は四面体要素で、線形弾

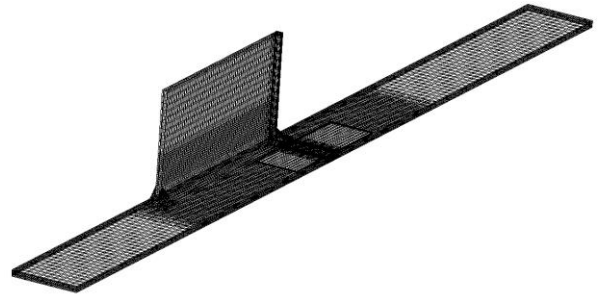


図-6 対称性を考慮した 1/4FEMモデル

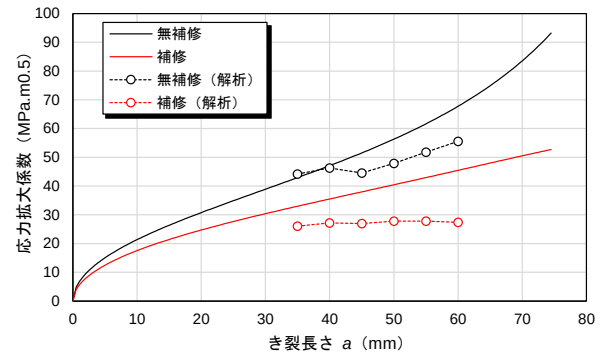


図-7 き裂長さ と 応力拡大係数の関係

性解析とし、汎用有限要素解析プログラム (Msc. Marc/Mental2019) を適用した。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のき裂長さ a が、35mmから60mmの範囲で、5mmごとにき裂長さ a を変えた解析モデルを7ケースを作成し、公称引張応力 σ_w を与えることで、き裂先端の応力拡大係数を求めた。応力拡大係数の解析値の精度は、要素分割の細かさに影響されるため、き裂先端の最小要素寸法は0.5mmとした。また、母板の厚さ方向は、要素を10分割し、各節点において応力拡大係数を求め、その平均値をき裂長さに応じた応力拡大係数として評価した。

図-7に、公称応力範囲 $\Delta\sigma_w=119.8\text{MPa}$ における応力拡大係数を比較して示す。図より、FEM解析結果の解析値は、式(6)による理論値と比較して値が小さくなっていることがわかる。FEM解析では、面外ガセットによる構造的な応力集中と溶接箇所の熱の影響を考慮しており、実構造物に近い値といえるため、本検討では面外ガセットの応力拡大係数として、解析値を用いてき裂進展寿命の計算を行うこととした。

(5) き裂進展寿命の予測

図-8に、応力範囲 $\Delta\sigma_w=119.8\text{MPa}$ 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_{p35-60}) とCFシートの積層数の関係を示す。なお、き裂進展寿命の推定値は、式(5)より求めた。

図より、無補修試験体の N_{p35-60} の値は約37,000回であるのに対して、CFシートの積層数の増加とともに N_{p35-60} 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 $\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$) 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。

なお、応力範囲 $\Delta\sigma_r=55.4\text{MPa}$ においては、積層数11枚で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100万回 (応力範囲 $\Delta\sigma_r=55.4\text{MPa}$) を満足することから、接着するCFシート積層数は11層とすることとした。

4. 真空含浸工法による補修方法と静的試験による検討

(1) 真空含浸工法による補修試験体の作製

下地処理には、ブラスト面形成動力工具を用いて錆や黒皮などを除去した。下地処理後の鋼材表面からの発錆の防止とCFシートとの接着性の向上のため、プライマー (コニシ E258R) を塗布した。プライマーの塗布は、鋼材表面に発錆や汚れが生じないように、下地処理後、速やかに行った。

CFシートは一方向材であり、試験体の軸方向に設置した。また、鋼材の腐食防止と樹脂の流動性の確保の目的で、CSMを設置した。すなわち、電気化学作用による鋼材の腐食を防止するため、初層 (鋼材とCFシートの間) に1層CSMを設置した。

最外層のCFシートには、ピールプライを設置した。ピールプライは、テフロンを主原料とした、はく離シートであり、硬化後に、CFシート上に設置される副資材の除去を容易にするためのものである。次に、ピールプライの上に、樹脂拡散メディアを3層設置した。樹脂拡散メディアは、ポリエチレン製のメッシュシートであり、樹脂の流動性を確保するために設置される副資材である。樹脂の含浸範囲をシーラントテープで囲った後、樹脂引き用ホース2本をCFシート端部側に、真空引き用パイプ1本を面外の上側にそれぞれ設置して、それらをプラスチックフィルム (バギングフィルム) で封入した。真空ポンプを用いて吸引する際、十分な真空度が確保されていることを確認後、樹脂引き用パイプから含浸接着樹脂 (Toray ACE AUP40T1) を吸引した。樹脂の含浸の完了後、パイプの端部をバイスプライヤーで締め切り、硬化するまで約40°Cで24時間加温養生した。なお、含浸

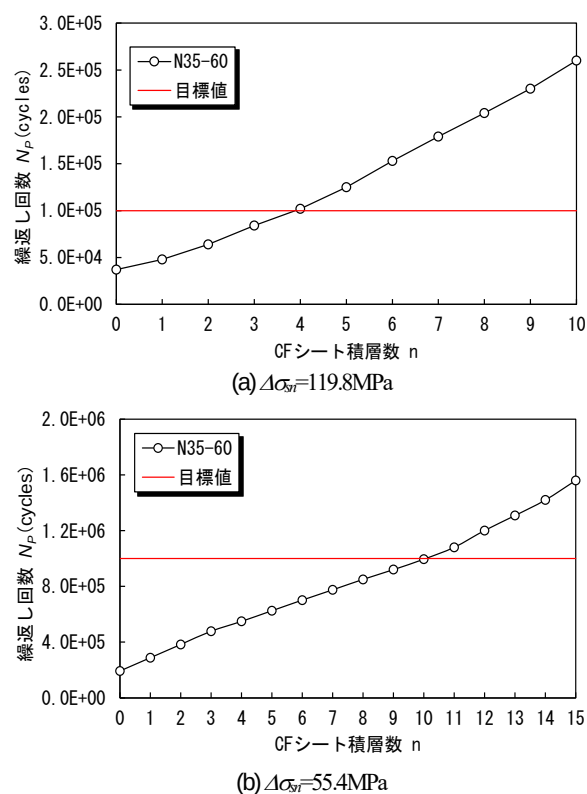


図-8 CFシートの積層数と繰返し回数 N_{p35-60} の関係

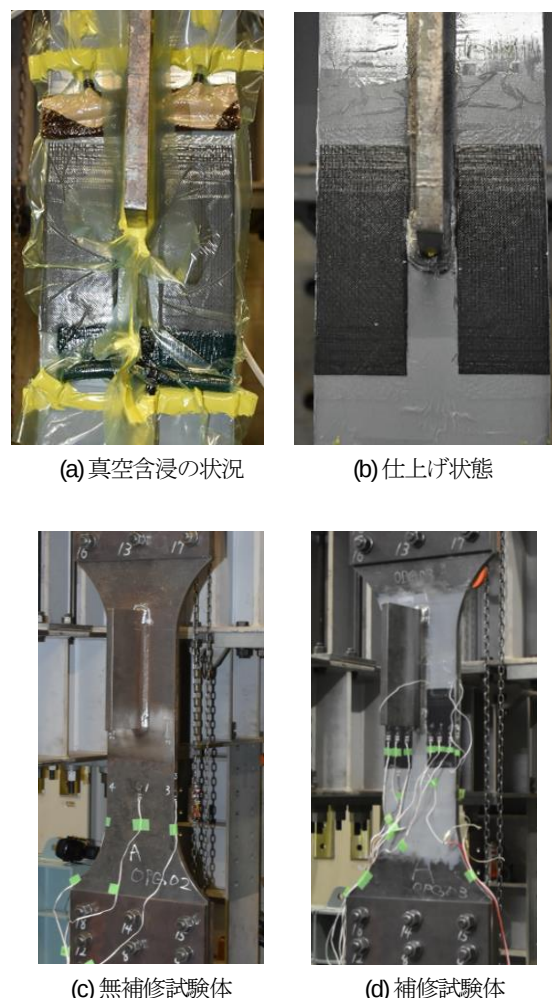


図-9 VaRTM の状況とひずみゲージの取り付け

接着樹脂は、プライマーと同じ、2液性常温硬化型エポキシ樹脂である。樹脂の粘度は $5.0\text{dPa}\cdot\text{s}$ であった。真空吸引による含浸時間は、樹脂の可使用時間内（約1時間）とした。全てのプラスチックフィルム、ピールプライ等の副資材の除去後、鋼板の表面に硬化した余分な含浸接着樹脂は、ベルトサンダーとディスクグラインダーを使用し、仕上げを行った。図-9に、副資材の設置と真空含浸の状況、ひずみゲージの取り付け状況を示す。

(2) ひずみゲージの設置位置と計測方法

図-10に、ひずみゲージの設置位置を示す。無補修試験体においては、公称応力を確認するために、面外ガセット溶接部の構造的な応力集中の影響のない位置として、溶接止端部より150mmの位置の鋼材表面とコバ面にそれぞれ配置した。補修試験体においては、応力低減を確認するためにコバ面に2箇所、ひずみの低下によるき裂進展を確認するためにCFシート上に12箇所、CFRPのはく離を確認するために、CFRP端部に2箇所置した。

疲労試験中の荷重、変位およびひずみ計測には、動ひずみ測定器（キーエンス、NR-600）を用い、疲労試験の載荷速度（2～4Hz）に対して、サンプリング周波数100Hzで計測した。

(3) 静的引張試験と応力低減の効果の検討

CFシートによる応力低減を確認するために、引張荷重を505.8kN（引張応力 $\sigma_{\text{引}}=133.1\text{MPa}$ ）として静的引張試験を行った。

CFシートの積層数は5層（積層CFシートの厚さ $t_f=2.2\text{mm}$ に相当）とした。一般部の応力低減率 ξ_0 の理論値は(10)で計算され、0.731となる。

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_f A_f / (E_s A_s)} \quad (10)$$

図-11に、鋼板一般部表面の軸方向ひずみを示す。無補修、補修体いずれの実験値も、理論値に近いひずみが計測されていることがわかる。図より、引張応力133.1MPaまでの範囲では、いずれの試験体においても線形にひずみが増加していることがわかる。また、無補修の試験体の最大ひずみ 480×10^{-6} に対し、補修の試験体の最大ひずみは 354×10^{-6} であり、CFシートによる応力低減率 ξ_0 は0.738となる。これは(10)で求めた応力低減率0.731とほぼ一致することから、VaRTMによるCFシート接着によって、理論通り応力低減できることが確かめられた。

5. CFRP接着された溶接接手部の疲労耐久性の検討

(1) 疲労試験の条件と実験パラメータ

3章で示した試験体を対象に、破断まで繰返し荷重を

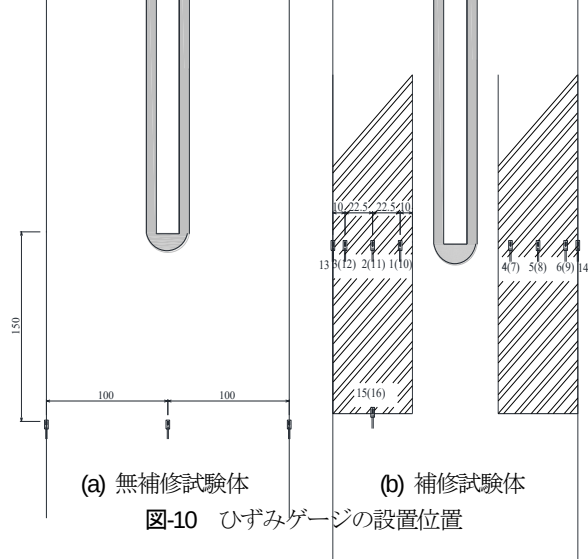


図-10 ひずみゲージの設置位置

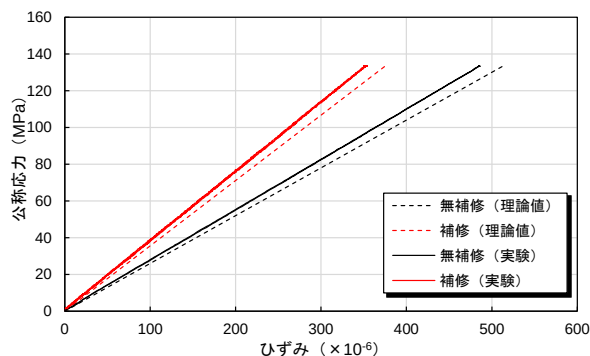


図-11 引張応力とひずみの関係

表-2 実験シリーズ

試験体名	積層数 n	最大応力 $\sigma_{\text{max}}(\text{MPa})$	最小応力 $\sigma_{\text{min}}(\text{MPa})$	応力範囲 $\Delta\sigma(\text{MPa})$	応力比 R	載荷速度 $f(\text{Hz})$
OPG02_N	-	133.1	13.3	119.8	0.1	2
OPG03_R	5	133.1	13.3	119.8	0.1	2
OPG04_N	-	133.1	13.3	119.8	0.1	2
OPG06_N	-	61.6	6.2	55.4	0.1	4
OPG08_N	-	61.6	6.2	55.4	0.1	4
OPG09_N	11	61.6	6.2	55.4	0.1	4
OPG10_R	5	133.1	13.3	119.8	0.1	2



(a) 無補修体 ($\Delta\sigma_{\text{引}}=119.8\text{MPa}$, OPG04_N)
(a) OPG02



(b) 補修体 ($\Delta\sigma_{\text{引}}=119.8\text{MPa}$, OPG03_R)

図-12 ビーチマーク

表-3 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 a_i (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
OPH10_R	119.8	39.5	35.8	37.0	34.1	36.6

表-4 実験シリーズと疲労試験の結果

試験体	実験シリーズ	積層枚数	$\Delta\sigma_r$	繰返し回数 (回)			破壊形式
			MPa	試験開始～ N_{35}	試験開始～ N_{60}	$N_{35} \sim N_{60}$	
OPG02	無補修	—	119.8	108,118	135,235	27,117	貫通き裂
OPG04		—	119.8	104,902	137,557	32,655	貫通き裂
OPG03	補修	5	119.8	115,391	230,196	114,805	貫通き裂
OPG06	無補修	—	55.4	999,502	1,456,113	456,611	貫通き裂
OPG08		—	55.4	950,000	1,117,543	167,543	貫通き裂
OPG09	補修	11	55.4	>1,000,000	>1,000,000	>1,000,000	疲労限
OPG10		5	119.8	9,114	266,973	257,829	貫通き裂

作用させ、疲労試験を行った。まず補修前に疲労試験を行って、き裂長さ $a=35\text{mm}$ となるまで、初期き裂を試験体に導入した。初期き裂を発生させるときの荷重条件は、試験機の最大荷重である738.8kNとし、目標の初期き裂長さの手前までき裂を進展させた。さらに、目標の初期き裂長さとなるまでは、補修後の疲労試験の荷重条件に変更して、繰返し载荷を行った。

表-4に、すべての実験シリーズを示す。応力範囲は $\Delta\sigma_r=119.8, 55.4\text{MPa}$ の2通りであり、载荷速度 f はそれぞれ2, 4Hzで、応力比 R は0.1とした。試験機は島津製作所製油圧サーボ式2軸構造物試験機（動的容量：750kN）を用いた。

すべての試験体において、き裂長さと繰返し回数の関係を把握するため、ビーチマーク法を採用した。その際、作用荷重を半分とした半振幅時には、最大荷重を一定として、最小荷重を半振幅として与えた。また、片側からの回し溶接止端部から疲労き裂を発生させる目的で、その反対側の溶接部（き裂進展非着目部）では、き裂の発生を防止した。非着目側では、面外ガセットを溶接する際、回し溶接近傍では、完全溶け込み溶接とするとともに、グラインダーを用いて止端部の仕上げを行った。

(2) 疲労試験による疲労耐久性の検討

図-12に、各試験体のビーチマーク、表-3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 $a=35\text{mm}$ 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箇所の初期き裂長さにばらつきが生じたが、平均して評価すれば、所定の初期き裂長さ $a=35\text{mm}$ が導入されることが確かめられた。なお、初期き裂長さのばらつきの要因として、母板の厚さが19mmと厚いため、溶接止端から発生した表面き裂が厚さ方向に進展して貫通き裂となるまでの繰返し回数に差異が生じたことが考えられた。

図-13に、 $\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$ におけるき裂長さ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。解析では、貫通き裂で評価していることに対して、実験では、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などが要因として考えられた。

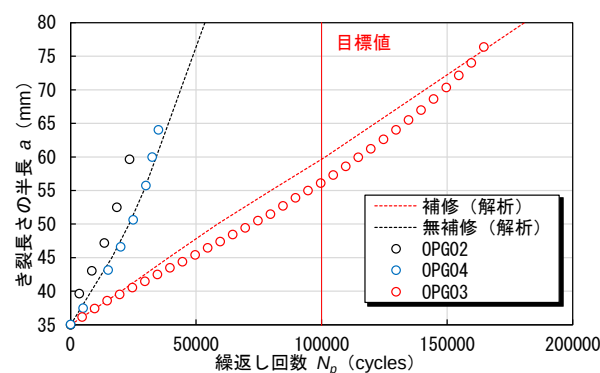
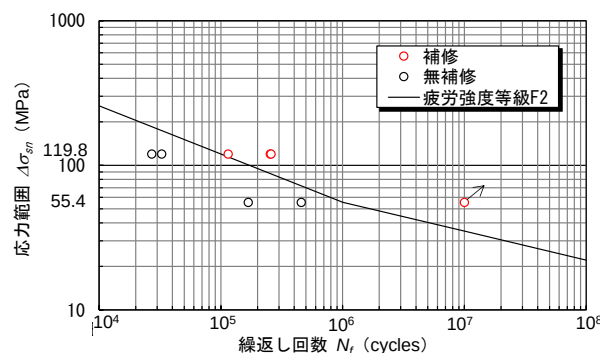
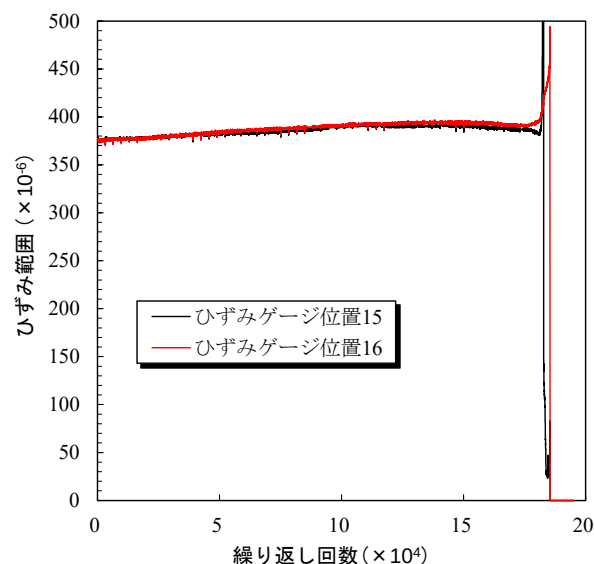
図-13 き裂長さ a と繰返し回数 N_p の関係 ($\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$)図-14 CFシート積層数と繰返し回数 N_{p560} 

図-15 CFシート端部のひずみと繰返し回数の関係

表-4 に、実験シリーズと疲労試験の結果を示す。本検討では、繰返し回数 1,000 万回までに疲労破壊しない場合、疲労限と判断した。疲労限と判断した、OPG09 を除いて、すべての実験シリーズにおいて止端部からのき裂発生・進展により疲労破壊したことが確認された。

図-14 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_{p3560} の関係を示す。ここで、各試験体の進展寿命 N_{p3560} 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、 $\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$ における進展寿命 N_{p3560} 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。

一方、 $\Delta\sigma_r=55.4\text{MPa}$ における進展寿命 N_{p3560} 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 を下回ることが確認できた。一方で 11 層積層した補修試験体の進展寿命 N_{p3560} は 1,000 万回を超えてもき裂が進展しないことから、溶接残留応力の影響により、応力拡大係数が疲労限に到達していることが考えられる。今後、溶接残留応力を考慮した FEM 解析を行い、より経済的な積層数を検討する予定である。

(3) CFRPの溶接止端部はく離の検討

図-15に、 $\Delta\sigma_r=119.8\text{MPa}$ において、CFRP端部に配置したひずみと繰返し回数の関係を示す。CFRPのはく離は一般的に端部から開始し、はく離が生じると、CFRPには荷重が伝達されないため、ひずみの値は0に近づくことになる。図より、繰返し回数 N_p が増えると、母板のき裂が進展する一方、ひずみの値はおおよそ一定であることが分かる。また、繰返し回数 N_p が約18万回付近でひずみの値が急変している。これは、試験体が疲労破壊するときの繰返し回数である。したがって、CFRPは、母板の疲労破壊の直前まではく離は生じないと考えられた。

6. まとめ

初期き裂が発生した面外ガセット溶接継手のCFRP接着補修による進展寿命の延命化を目的として、疲労試験により検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) き裂長さその進展範囲において、CFシート積層数をパラメータとした解析的検討から、所定の応力範囲で、疲労強度等級に相当するき裂進展寿命 N_{pl} に必

要なCFシート積層数を算定することができた。

- (2) 静的試験の結果から、VaRTMを応用したCFRP接着補修では、母板に生じるひずみは、理論値と同等のひずみまで低減されることが確認できた。
- (3) 10mmの段差を設けた場合、中弾性タイプのCFシート5層で、公称応力範囲119.8MPa、繰返し回数約18万回までは、CFRPの端部からはく離が生じないことが確かめられた。
- (4) 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_{p3560} は、所定の疲労強度等級を満足することが確かめられた。

以上のことから、面外ガセット溶接継手に、真空含浸によりCFシートを積層接着すれば、き裂進展寿命が延命化され、面外ガセット溶接継手における所定の疲労等級を満たすことが確かめられた。今後、疲労試験を継続して、データの蓄積と、溶接残留応力がき裂進展速度の及ぼす影響についてさらなる検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 三井海洋開発：「浮体式海洋石油・ガス生産設備向け洋上船体補修法に対する承認をABSより取得」
https://www.modec.com/jp/news/2020/20201223_pr_CFRP.html
2021年8月閲覧。
- 2) 丹波寛夫，橋本国太郎，田中大介，杉浦邦征：腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.60A，pp.94-104，2014.3
- 3) 杉浦江，小林朗，稲葉尚文，本間淳史，大垣賀津雄，長井正嗣，：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集F，Vol.65，No.1，pp.106-118，2009.3
- 4) 中村一史，姜威，前田研一，鈴木博之，入部孝夫，福田欣弘：CFRP板接着により補修された面外ガセット溶接継手部き裂の疲労寿命予測，構造工学論文集，Vol.57A，pp.842-851，2011.3
- 5) American Bureau of Shipping Incorporated:Guide for Fatigue Assessment Of Offshore Structures, p.19,2020
- 6) 複合構造委員会編：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術，複合構造レポート09，土木学会，2013.11
- 7) タイウィサル，中村一史，林帆，堀井久一：当て板がエポキシ樹脂で接着された鋼板の接着接合部の疲労強度の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.74，No.5，pp.56-II-66，2018.5
- 8) 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
- 9) Liu,H.,Xiao,Z.,Zhao,X.L.and Al-Mahaidi,R.:Prediction of fatigue life for CFRP-strengthening steel plates, Thin-Walled Structures Vol.47, pp.1069-1077,2009

(Received September 10, 2021)

Repair effect of externally bonded CFRP on fatigue cracks initiated at out-of-plane welded gusset joints

Shunsuke HAYASHI, Hitoshi NAKAMURA, Thay VISAL,
Takehiko TSUBOKAWA and Takahiro MATSUI

The purpose of this study is to develop a repair method for steel structures using CFRP, which has high strength and high elasticity. Focusing on out-of-plane gusset welded joints as typical fatigue cracks in bridges and ships, fatigue cracks generated from weld toes are repaired with CFRP bonding by applying the vacuum impregnation method. The required quantity of CFRP in order that the crack propagation life after repair satisfies the fatigue grade of out-of-plane gusset joint were analytically calculated. From the results of the fatigue test, it was confirmed that CFRP delayed the crack propagation life and the repaired specimen satisfies the predetermined fatigue grade