

(18) 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

俣野 厚志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: matano-atsushi@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学 大学院 准教授 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: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 宇都宮大学 助教 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科
(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)
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 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 2-3-10)
E-mail: Takehiko.Tsubokawa@modec.com

⁵正会員 東レ株式会社 ACM 技術部 (〒103-8666 東京都日本橋室町 2-1-1)
E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

本研究では、面内ガセット溶接継手から発生する疲労き裂に着目し、CFRP接着による疲労き裂進展寿命の遅延化、および圧縮側の溶接残留応力によってき裂進展が遅延する効果を実験的・解析的に検討した。疲労試験はビーチマーク法を用いて行い、き裂長さ20mmから40mmにおける繰返し回数を計測した。CFRPは真空含浸工法 (VaRTM) により鋼材と接着させた。溶接残留応力は切断法による計測とFEMを用いた溶接シミュレーションを行い、実験の妥当性を確認した。疲労試験の結果から、補修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。さらに、残留応力を考慮した解析から、CFRP接着により圧縮側の溶接残留応力の開放が抑制されることで、き裂の進展速度が遅延する挙動を明らかにした。

Key Word: in-plane gusset, crack, CFRP, weld residual stress, repair

1. はじめに

車両交通、波浪などの繰返し荷重を受ける鋼部材では、疲労耐久性が課題となる。疲労き裂の補修方法として、一般には、当て板を溶接接合またはボルト接合にて添接されるが、施工には、添接のための火器や重機をはじめ、当て板の運搬・設置のための設備などが必要となることから、狭隘な環境や火器の使用が困難な場合、大きな制約を受ける。これに対して、FRP 接着による補修工法は、FRP が軽量で現場でのハンドリングがよいこと、接着接合では重機などは不要となることから、現場施工で大きな利点がある。近年、鋼部材の補修・補強に、軽量、高強度・高弾性で、耐腐食性に優れる炭素繊維強化プラス

チック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, 以下、CFRP) を用いた接着工法が適用され始めている¹⁾²⁾。

本研究は、面内ガセット溶接継手から発生する疲労き裂の進展寿命を延命化する補修方法の開発を目的としたものである。補修方法として、真空含浸工法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM) を応用して CFRP を鋼部材に成形・接着する方法を採用した。この工法は、大掛かりな機材を必要とせず、多積層の炭素繊維シート (以下、CF シート) を一度に短工期で施工ができる特徴がある。

しかしながら、VaRTM により成形接着された CFRP が、面内ガセット溶接継手から発生した疲労き裂の進展速度を抑制する効果は検討されていない。

一方、溶接部から発生した疲労き裂は、その残留応力の影響を受けるため、き裂進展速度に及ぼす影響が検討されている³⁾。き裂進展経路に予めCFRP接着する場合、き裂進展に伴って残留応力が変化する可能性があるため、CFRP接着による残留応力の影響も考慮する必要がある。

そこで本研究では、面内ガセット溶接継手から発生した疲労き裂を対象に、CFRP接着によるき裂進展寿命の延命効果を疲労試験により検討した。さらに、CFRP接着後のき裂進展挙動の予測とそのメカニズムを把握するために、熱弾塑性解析とき裂進展解析を行って、疲労試験結果と比較した。

2. CFRP 接着補修によるき裂進展の抑制効果

(1) き裂進展の遅延による補修設計の考え方

実構造物において、一般に、点検等により疲労き裂が検出されるのは、溶接止端からある程度、き裂が進展した場合が多い。例えば、定振幅でき裂が発生したと仮定し、き裂が検出された時の初期き裂長さを a_i 、その時の繰返し回数を N_i とする。さらに、繰返し荷重の作用によって進展したき裂長さを a_p 、その時の繰返し回数の増加分を N_p とすれば、合計の繰返し回数 N は次式となる。

$$N = N_i + N_p \quad (1)$$

図-2 に、疲労き裂進展抑制による CFRP 補修の考え方を示す。き裂の進展を完全に停止させる恒久的な対策として、CFRP 接着工法を適用する場合、必要とする積層数が増大し、CF シートの配置、コストの点で困難となる場合がある。そこで本研究では、点検等で検出される初期き裂長さ a_i から所定のき裂長さ a_p までの進展を、設計供用期間中に許容し、その繰返し回数（以下、き裂進展寿命） N_p が、対象とする溶接継手の疲労強度等級における破壊時の繰返し回数 N_f 以上となることを、補修の設計条件とした。延命化された繰返し回数 N_p が N_f 以上となれば、実質的には、設計時に相当するまで疲労寿命を回復させることになる。

補修対象は、施工環境に大きな制約がある、浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備（Floating Production, Storage and Offloading system, 以下 FPSO）を想定している。特に FPSO の設計供用期間は約 20 年とされており、その船体構造は、既設の大型タンカーを改造、転用して、使用されていることから経年劣化も早く、効率的な補修方法が求められている。

図-3 に、補修対象の面内ガセット溶接継手の疲労強度曲線を示す。図中には、アメリカ船級協会（American Bureau of Shipping, 以下 ABS）の G 等級に加え、日本鋼構造協会（JSSC）の H 等級を併記している。本研究では、対象とする応力範囲 $\Delta\sigma_m$ （疲労強度の繰返し回数 N_f ）は、

118.3 (6.0×10^4) , 100 (1.0×10^5) , 54.9 (1.0×10^6) MPa の 3 水準とした。

補修時の初期き裂長さ a_i は 20mm とした。また、面内ガセットプレートが添接された試験体の疲労試験から、片側貫通き裂が発生するため、対象とする初期き裂は片側のみとした。さらに、き裂進展を許容するき裂長さ a_p は、本検討の範囲では 40mm とした。

(2) き裂進展に伴う CFRP への残留応力の再配分

き裂先端に作用する残留応力は、き裂の進展に伴い再配分されることが知られている⁴⁾が、その計算は複雑であるため、一般には、重ね合わせの原理⁵⁾を用いて考慮される。しかしながら、CFRP 補修時にも重ね合わせの原理で残留応力設計を行うことが妥当であるか検証する必要がある。

溶接残留応力は、溶接部近傍では、大きな引張の残留応力になるのに対し、溶接部から離れた位置では、自己釣り合いのため、圧縮の残留応力となる。き裂が進展すると、き裂開口部の残留応力は開放と自己釣り合いを繰返し、き裂先端は常に引張の残留応力が作用する。

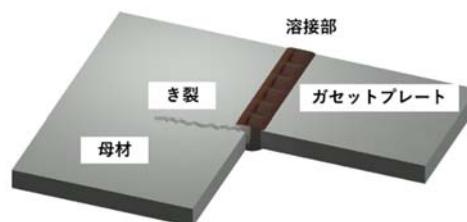


図-1 面内ガセット溶接継手から発生した疲労き裂の概念図

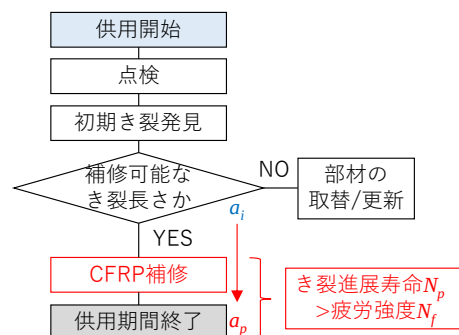


図-2 疲労き裂進展抑制による CFRP 補修の考え方

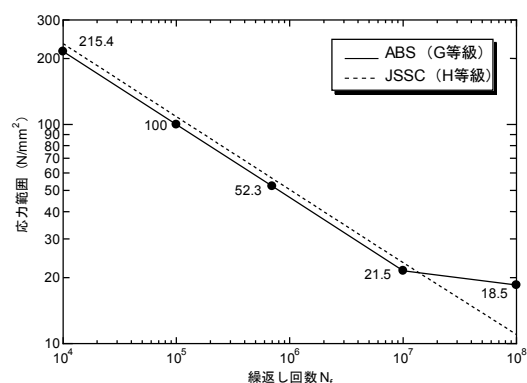


図-3 ABS (G 等級) と JSSC (H 等級) の疲労強度曲線

一方、き裂進展速度は、パリス則からその応力範囲に応じて変化する。したがって、引張残留応力が常に生じている場合、応力範囲は変わらないため、式(1a)に示すように、応力拡大係数範囲に影響しない。しかしながら、圧縮残留応力が作用する場合、応力範囲が小さくなる傾向になり、式(1b)に示すように、応力拡大係数範囲が低下すると考えられる⁹⁾。

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{min} \quad (\text{引張残留応力場}) \quad (1a)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} + K_r \quad (K_r < 0, \text{圧縮残留応力場}) \quad (1b)$$

ここに、 ΔK_{eff} は有効応力拡大係数範囲、 K_{max} は最大応力拡大係数、 K_{min} は最小応力拡大係数、 K_r は圧縮残留応力により生じる応力拡大係数である。

CFRP 接着による補修では、当て板補修と同様に、CFRP が鋼板の作用応力の一部を分担することで、き裂先端に作用する応力が低減され、き裂進展が抑制される。CFRP 接着補修の場合、き裂進展に伴って、解放されるき裂先端の引張残留応力は、CFRP によって分担されることが考えられる。この場合、き裂進展に伴う残留応力の解放、再配分が抑えられ、圧縮残留応力が作用する領域にき裂が進展する状況が想定される。以上のことからき裂進展速度がさらに低下することが期待される。

3. 試験体と残留応力のモデル化

(1) 試験体

図4 に、面内ガセット溶接継手試験体を示す。ガセットプレートと母材は突合せ溶接されるが、面内ガセットの片側からのき裂進展に着目するため、溶接部は片側的一部分（溶接長 20mm、脚長 6mm）とした。き裂進展の非着目側では、ガセットプレートに $\phi 100$ mm のフィレットを設け、き裂の発生を防止した。母材の幅は 130mm、ガセットプレートは 100mm×200mm とし、板厚は 10mm とした。試験体は SM400 材を用いて作製し、レーザー加工により切り出している。鋼材の材料特性は、JIS Z 2241 に準拠した 1 号試験片を作製し、引張試験を行って、算出した。その結果、降伏点は 301.2 N/mm²、引張強度 429.5 N/mm²、ヤング係数 205.2 kN/mm²、ポアソン比 0.29 であった。

(2) 切断法による残留応力計測

面内ガセット溶接継手試験体の残留応力を把握するために、切断法⁹⁾にて計測を行った。本検討では糸鋸（刃幅 0.4mm）を用いて手動で切断を行い、切断時の摩擦熱をほとんど発生させないように留意して計測を行った。

ひずみゲージは、部材の表裏両面と端部に設置した。溶接残留応力の分布特性に配慮して、溶接部に近い止端部ではひずみゲージの設置間隔を 5mm とし、試験体中心

に近いほど、設置間隔を大きくした。ひずみゲージの設置には、ブラスト面形成動力工具（ブリストルグラスター）を用いて表面処理を行った。糸鋸による切断とひずみ計測は、想定されるき裂進展と同様に切断し、所定の切断長さごとに計測を行った。

(3) FEM 解析によるモデル化と解析条件

切断法による計測結果の妥当性の検証と溶接残留応力を考慮したき裂進展解析を行うため、FEM 解析を行った。使用した汎用有限要素解析プログラムは Msc. Marc/Mentat 2019 であり、ソリッド要素で解析モデルを作成した。図5 に、FEM 解析モデルを示す。き裂先端の応力拡大係数を算定するため、最小要素サイズは 0.25mm とした。また、

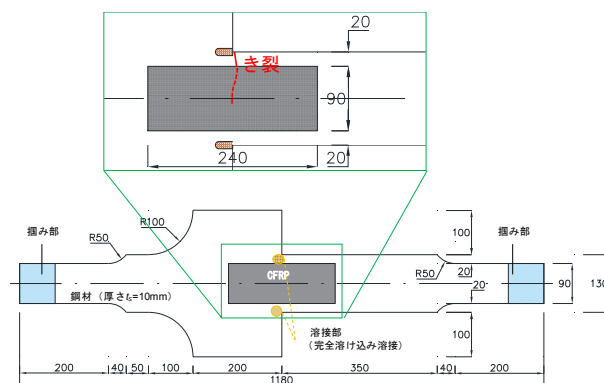


図4 試験体図

表-1 試験体諸元

試験体名	応力範囲 (MPa)	補修の有無	き裂進展の予測回数 N_{pred}
N118	118.3	○	11,000
R4-118	118.3	×	60,000
N100	100	○	17,000
R4-100	100	×	108,000
N55	54.9	○	113,000
R4-55	54.9	×	1,050,000

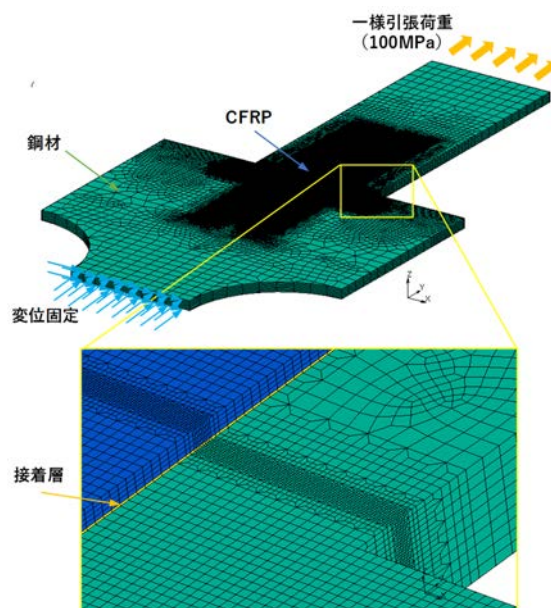


図5 FEM 解析モデル

CFRP と接着層もそれぞれソリッド要素でモデル化した。表-2 に引張試験から算出した各材料物性値を示す。鋼材の弾性係数は、引張試験の結果から 205kN/mm^2 とし、ポアソン比は 0.3、降伏強度は 320N/mm^2 とした。なお、降伏後はバイリニア型とし、弾性係数は $E/100$ とした。接着層は厚さ 0.2mm とした。弾性係数、ポアソン比はエポキシ樹脂接着剤 (E258R) の材料物性値を採用し、鋼材と CFRP どちらにも節点共有させた。

a) 面内ガセットプレートを考慮した応力分布

図-6 に、 100MPa の引張応力を作用させた時のき裂直上と一般部における軸方向の応力分布を示す。図より、き裂直上では、両端部でガセットプレートによる構造的な応力集中が生じることがわかる。また、試験体の中央部付近では、一般部に比べて応力が小さくなるが、これは、ガセットプレートが作用荷重を分担することによる影響と考えられる。そこで、ガセットプレートによる補正係数を Y_i として、公称応力 σ_n を補正することとした。補正係数 Y_i は、図の垂直応力 σ_y を公称応力 σ_n で除した分布を 6 次の多項式で近似して算出された次式で表した。

$$Y_i = -5.81 \times 10^{-7} a + 2.45 \times 10^{-4} a^2 + 6.92 \times 10^{-10} a^3 - 2.00 \times 10^{-7} a^4 - 1.52 \times 10^{-13} a^5 + 4.95 \times 10^{-11} a^6 + 0.814 \quad (2)$$

ここで、 a はき裂長さ (mm) である。

b) 熱弾塑性解析による溶接シミュレーション

表-3 に、熱弾塑性解析に用いたパラメータを示す。熱源の形状はガウス熱分布とした。鋼材の比熱、熱膨張係数等は鋼材の種類による差異はほとんどないと考え、解析プログラムの設定値を用いた。溶接後は、雰囲気温度の状態で 1 時間自然冷却させ、鋼材表面温度が 20°C 付近になることを確認した。

溶接シミュレーション結果として、図-7 に、溶接後雰囲気温度で自然冷却させた後の応力分布を示す。コンタ図は母材軸方向の垂直応力で表示している。図より、溶接部に残留する引張の応力と、溶接部周辺に圧縮側の残留応力分布域が生じていることがわかる。

c) 初期き裂発生後の CFRP 接着を考慮した応力解析

応力解析では、CFRP 接着による補修は、初期き裂を導入した後に実施されるため、無補修の状態から補修後までの一連の応力解析を行った。その際、CFRP は、初期き裂が導入されるまでは非アクティブとして無補修の状態を考慮している。

(4) 溶接残留応力の計測結果とモデル化

図-8 に、切断法により計測された残留応力を示す。図中には、熱弾塑性解析により得られた残留応力分布を併記している。切断法では、一般部でも残留応力の計測を行ったところ、平均 20MPa 程度の一様な圧縮残留応力が

生じていることが確認された。この圧縮残留応力は、鋼材のレーザー加工時に生じる熱影響によるものと考えられた。そこで、き裂直上の残留の応力計測結果を補正した。なお、図-8 のき裂直上の計測結果は、補正後の値である。図より、計測結果は、FEM 解析結果とよい一致を

表-2 材料物性値

材料	項目	記号	単位	値
SM400	弾性係数	E_s	N/mm^2	205,200
	ポアソン比	ν_s	—	0.29
	降伏強度	y_s	N/mm^2	301.2
CFRP	弾性係数 (90°)	E_r	N/mm^2	10,000
	ポアソン比 (0°)	ν_r	—	0.3
	ポアソン比 (90°)	ν_r	—	0.01
	せん断弾性係数	G_r	N/mm^2	169,231
	弾性係数	E_c	N/mm^2	18,750
CSM	ポアソン比	ν_c	—	0.3
	せん断弾性係数	G_c	N/mm^2	7,212
	弾性係数	E_p	N/mm^2	3,600
E258R	ポアソン比	ν_p	—	0.34
	せん断弾性係数	G_p	N/mm^2	1,280
	弾性係数	E_m	N/mm^2	3,430
AUP40	ポアソン比	ν_m	—	0.39
	せん断弾性係数	G_m	N/mm^2	1,234

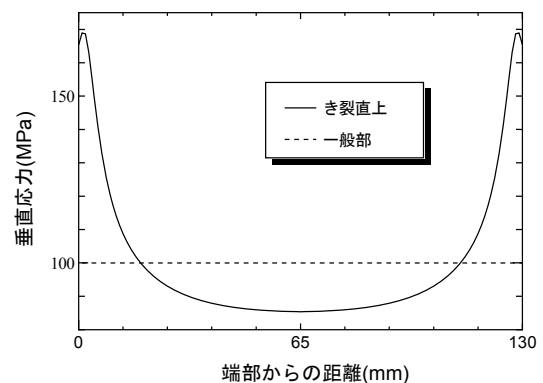


図-6 $\sigma_n=100\text{MPa}$ における垂直応力分布

表-3 溶接シミュレーションに用いたパラメータ

諸元	単位	値	
溶接速度	mm/s	4	
溶接ビードの融点	℃	1200	
降伏強度	N/mm ²	320	
熱伝達係数	N/mm ² /s/℃	0.025	
加熱時間	s	10	
冷却時間（自然冷却）	h	1	
ガウスモデルパラメータ	<i>a</i>	mm	5
	<i>b</i>	mm	5
	<i>q</i>	mm	1
	<i>c</i>	mm	8

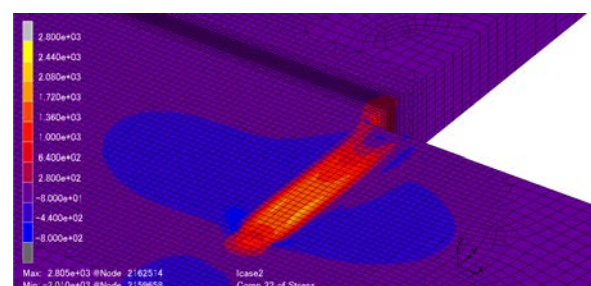


図-7 溶接シミュレーション結果

示すことがわかり、計測された溶接残留応力は妥当であると判断された。

CFRP接着後のき裂進展解析に用いる溶接残留応力 σ_r は、切断法によって計測された応力分布を6次の多項式で近似して算出された次式で表した。

$$\begin{aligned}\sigma_r = & -2.50 \times 10^{-15} a + 2.43 \times 10^{-2} a^2 \\ & + 2.28 \times 10^{-18} a^3 - 1.51 \times 10^{-5} a^4 - 4.29 \times 10^{-22} a^5 \\ & + 6.41 \times 10^{-9} a^6 - 57.32\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 a はき裂長さ (mm) である。

4. CFRP 接着の補修設計

(1)CF シート積層数の決定

CF シートの積層数は、設定した3水準の応力範囲 $\Delta\sigma_r$ に対し、疲労き裂が20mmから40mmまで進展する際の繰返し回数(き裂進展寿命) N_{p20-40} を満足するように決定する。その際、CFRPがき裂の開口を抑えようとするこ

とで生じる架橋応力を考慮するため、文献9)の提案式を適用した。

溶接残留応力 σ_r は、計測結果から求めた式(2)を用いた。応力拡大係数範囲は、残留応力が引張側か圧縮側かによって異なるため、式(1)を用いてそれぞれ算出した。

$$N_{p20-40} = \int_{a_{40}}^{a_{20}} \frac{1}{C \Delta K_I^m} \Delta a \quad (4)$$

材料定数 C , m は、無補修の試験体の疲労試験結果から、 $C=2.0 \times 10^{11}$, $m=3.06$ とした。

所定の疲労強度の繰返し回数 N_f を満足するように CF シートの積層数を決定したところ、はく離が生じないと仮定した場合、4層以上であれば、3水準の応力範囲に対する疲労強度を満足することが確かめられた。本検討では、CF シート4層で検討を進めることとした。

(2)CFRP の定着長、段差の設計

CF シートの定着長は、4層接着した場合に必要な長さを検討した。文献1)では、CFRPを鋼部材に接着した場合、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1)に基づいて、表2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54mmとなった。それらを踏まえ、実験では、60mmと決定した。

CFRPのはく離強度は、端部処理の影響を大きく受けることから、CFRPを積層接着する場合、端部に段差を

設けることで接着層の応力を低減し、はく離を防止できる。段差長は、FEM解析を用いて接着樹脂の主応力から決定した。CFシートの厚さは0.434mm、解析モデルは平面ソリッド要素を用いて作成し、118.3MPaの引張応力を一様に作用させた。段差の設計では、接着剤の最大主応力による評価を行った。接着剤の静的引張試験の結果から、最大主応力は38.8MPaであり、疲労限は主応力範囲の30%という評価基準¹⁰⁾から、本検討で基準とする疲労限度の最大主応力は12MPaとした。図-10に10mm段差を設けたモデルのFEM解析における接着樹脂の最大主応力

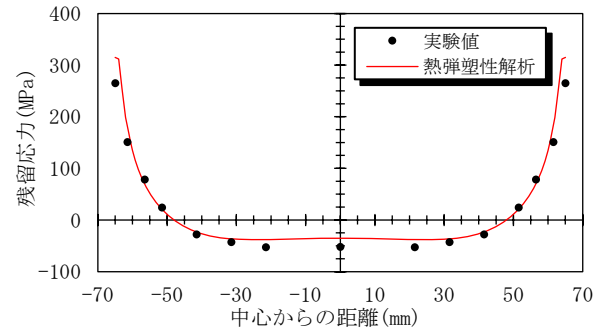


図-8 切断法による残留応力の計測結果と解析結果の比較

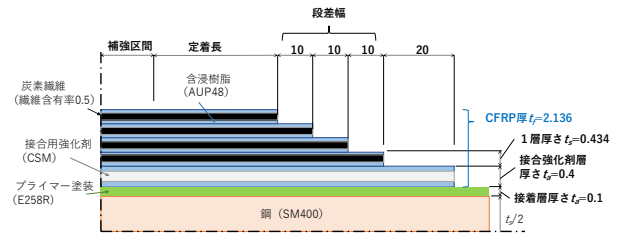


図-9 CFRP 定着部の概念図

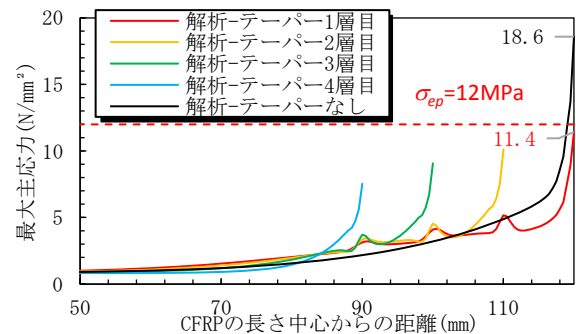


図-10 段差モデルでの最大主応力分布図 ($\Delta\sigma_r=100\text{MPa}$)

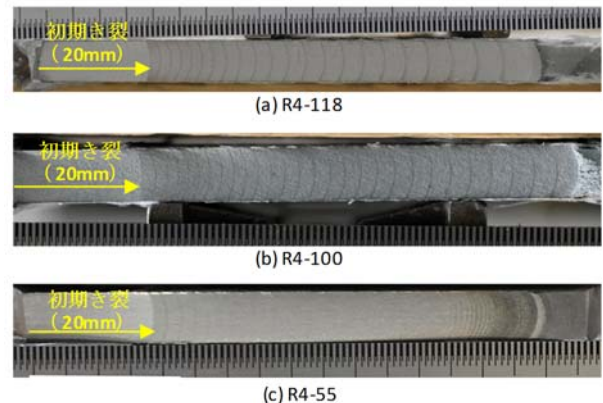


図-11 き裂断面のビーチマーク

分布図を示す（最大値：1層目 11.4MPa）。CFRPに10mm段差を設けることで、接着樹脂ははく離強度を満足することがわかった。

5. 疲労試験と考察

(1) 実験条件

疲労試験機は、島津サーボパルサ（動的容量：200KN）を使用した。き裂先端の過荷重による疲労寿命の増加を防ぐため、初期き裂導入時の応力範囲は、補修後の疲労試験と同じ応力範囲とした。

疲労試験では、ビーチマーク試験を併用し、試験後に導入された疲労破壊の破面の数量とき裂長さの計測により、き裂長さとし繰返し回数の関係を整理した。

CFRPはVaRTMを応用して、鋼材表面に成形、接着した。鋼材の表面は、ブラスト面形成動力工具を用いて、表面処理し、プライマーを塗布した。CFシートと鋼材の間の含浸接着樹脂の流動性を確保するため、ガラス繊維のチョップドストランドマット（CSM）を設置した。プライマーにはエポキシ樹脂接着剤（E258R）を、含浸接着樹脂には、エポキシ樹脂（AUP40T1）を用いた。さらに、4層のCFシートを配置後、プラスチックフィルムで資材を覆い、真空吸引により、含浸接着樹脂を導入した。養生条件は、40℃で24時間程度である。

(2) 実験結果と考察

図-11に、疲労試験で破断した断面のビーチマークの状況を示す。き裂は左側から右に向かって進展しており、き裂中の縞模様は半振幅振動によるビーチマークである。まず、応力範囲 $\Delta\sigma_r=118.3\text{MPa}$ 、100MPaでは、き裂の進展に伴って、進展速度が増加していることがわかる。一方、 $\Delta\sigma_r=54.9\text{MPa}$ では、き裂の進展とともに、ビーチマークの間隔が小さくなり、最後の方は目視で確認できないほど、き裂の進展速度が低下していることがわかる。

図-12に、引張応力 σ_r が100MPaと54.9MPaにおけるき裂長さとし繰返し回数の関係を示す。理論値は、残留応力を考慮しない場合の応力拡大係数である。FEM解析結果は残留応力を初期応力として導入したモデルと、残留応力を考慮しないモデル両方で解析を行い、それぞれ実線、破線で表す。FEM解析ではき裂先端でのエネルギー解放率から応力拡大係数を算出した。残留応力は20mm-40mmで引張側であり、40mm以降で圧縮側となる。残留応力を考慮しないモデルでは、FEM解析結果と理論値で概ね一致した。残留応力を考慮したFEM結果は、考慮しないモデルと比べ、応力拡大係数が引張残留応力場では増加し、反対に圧縮残留応力場では減少した。

図-13に、き裂進展に伴う残留応力分布の変化を示す。

CFRP補修を行った解析モデルと無補修の解析モデルで、無荷重載荷時の残留応力分布を比較している。図より、無補修の解析モデルでは、き裂進展に伴って残留応力の再配分が生じること、また、CFRP補修した解析モデルでは、残留応力分布はほとんど変化がないことがわかる。これはCFRPが残留応力の解放を防止していることによると考えられる。これらのことから、 $\Delta\sigma_r=54.9\text{MPa}$ で、き裂進展速度が急激に減少した要因は、圧縮残留応力場でき裂が進展したためであると考えられた。

図-14に、CFRP補修した試験体におけるき裂長さとし繰返し回数の関係を示す。図中には、3水準の応力範囲に対して、実験値と解析値を比較している。これらの図より、全ての応力範囲において、き裂長さ20～40mmでは、理論値と実験値は概ね一致していることがわかる。しかしながら、き裂長さ40mm以上において、応力範囲

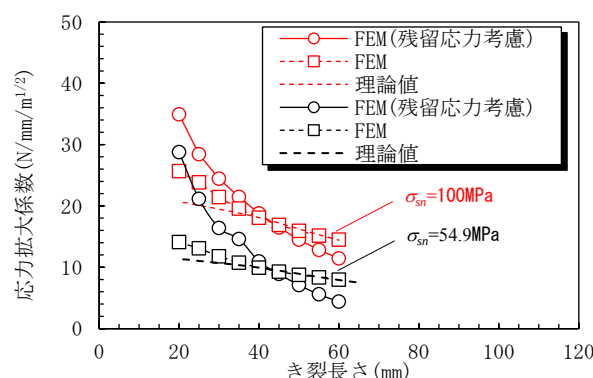
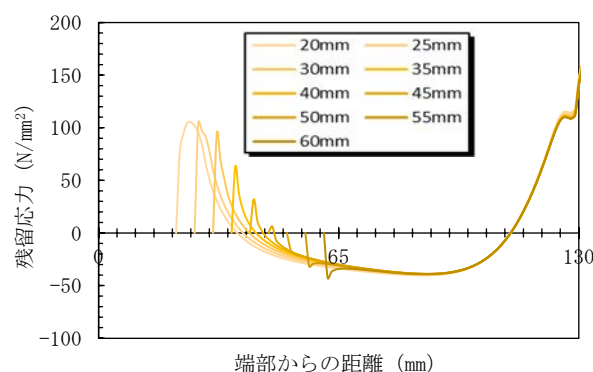
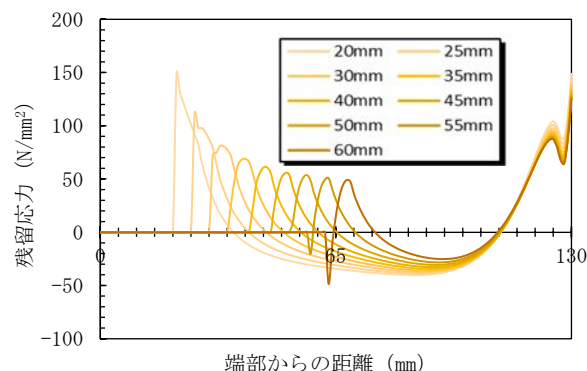


図-12 き裂長さとし繰返し回数の関係



(a) 補修

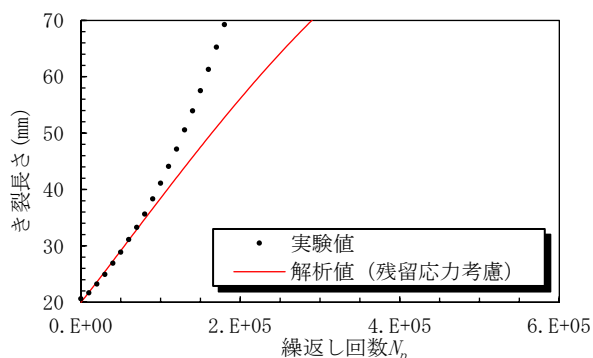


(b) 無補修

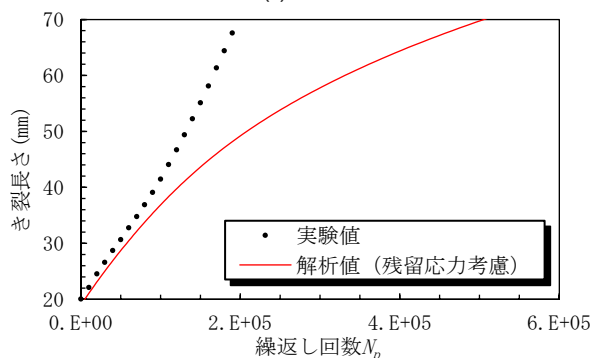
図-13 き裂進展に伴う残留応力分布の変化

$\Delta\sigma_r=118.3\text{MPa}$, 100MPa では, き裂進展速度が理論値よりも速くなる傾向が見られた. 一方, $\Delta\sigma_r=54.9\text{MPa}$ では, 残留応力を考慮した解析値によれば, き裂進展挙動は実験値と概ね一致することがわかる. 前者に関しては接着層のはく離による架橋応力の低下が考えられた. 後者では, 圧縮残留応力がき裂進展速度に影響していると考えられた.

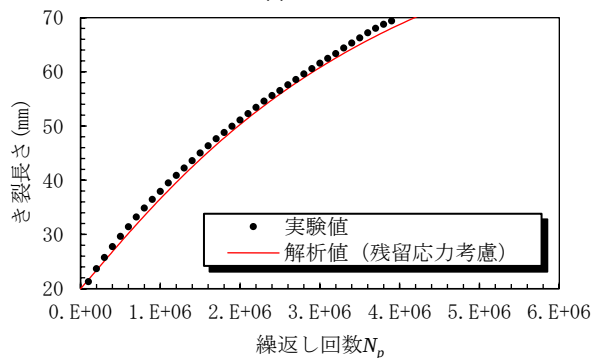
CFRP のはく離の範囲を把握するため, 試験途中の試験体を, 超音波探傷装置を用いて観察した. 使用した機器はフェーズドアレイ超音波探傷装置 TOPAZ32 であり, CFRP と鋼材の間に生じた空気層を観測した. 図-15 は, 超音波探傷による C スキャン画像であり, 赤い色に近いほど, 超音波が反射する欠陥部になる. 中央のき裂部分の近くが赤くなっていることが確認できた. 試験後の状態から, ガラス繊維部分ではく離が生じており, このような反射領域が見られたと考える. ガラス繊維部のはく離については今後詳細な検証を行ってきたい.



(a)R4-118



(b)R4-100



(c)R4-55

図-14 き裂長さと繰返し回数

(3)S-N 線図

図-16 に, き裂進展寿命 N_p に関して, ABS と JSSC の疲労強度曲線とともに示す. 黒いプロット点と赤いプロット点はそれぞれ無補修, 補修体における N_{p2040} である. また, 青いプロット点は補修体における N_{p2060} である. 本検討では対象としていないが, き裂長さ 40mm 以降の管理限界についても今後検討することを踏まえて図に示す.

まず, N_{p2040} では, 補修体は ABS の疲労強度曲線については, 一部疲労強度を下回った試験結果もあったものの, 概ね目標の繰返し回数 N_{p2040} を満足する結果が得られた. 本検討では ABS の疲労強度曲線を用いて設計を行ったが, JSSC のものでも近い結果となった. したがって CFRP の積層数は 4 層で, N_{p2040} において目標の疲労強度近くまでき裂進展寿命を回復させることができることがわかった.

次に, N_{p2060} では, ABS, JSSC どちらの疲労強度曲線を上回っていたものの, R4-100, R4-118 では N_{p2040} と大きな差が見られなかった. 応力範囲が高い領域ではく離の影響が大きくなり, 40mm 以降のき裂進展速度が急激に増加することが考えられる.

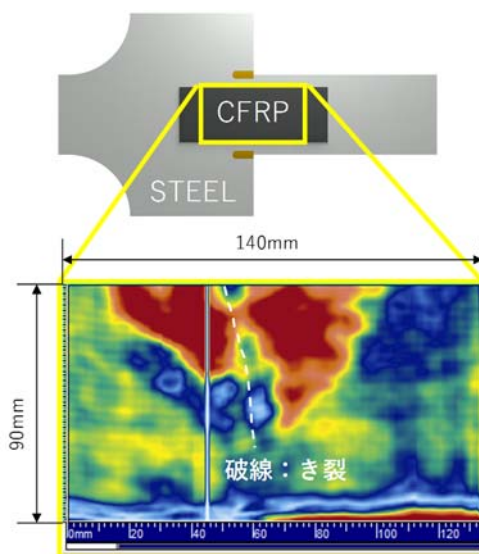


図-15 R4-55 試験体の超音波探傷試験による画像

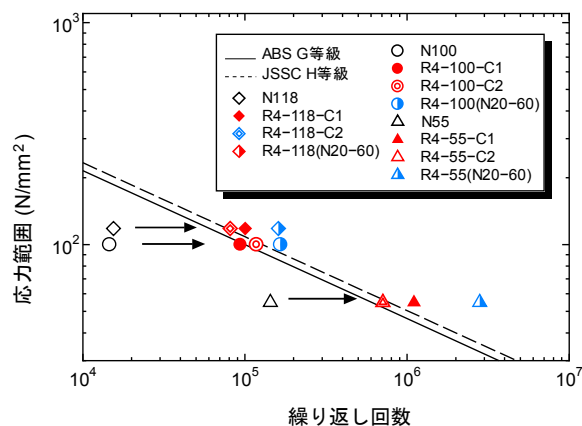


図-16 疲労試験結果

6. まとめ

面内ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂を CFRP の真空含浸工法で接着させ延命化するための実験的検討とその進展挙動を精度よく予測するため、溶接残留応力を考慮した解析的検討を行った。それらの結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 切断法により計測された残留応力は、溶接ビード付近で引張側、中央付近では圧縮応力となった。
- (2) FEM 解析を用いて溶接残留応力をモデル化したところ、実験値とよい一致が見られた。
- (3) 残留応力を考慮し CFRP を設計したところ、CF シートの積層数を4層とすることで、全ての応力範囲において概ね $N_{p0.40}$ を満足することができた。
- (5) 超音波探傷試験の観察により、ガラス繊維層付近において疲労試験中にき裂周辺からはく離が生じていると考えられた。
- (4) 応力範囲が $\Delta\sigma_f=100\text{MPa}$ 以上の場合、き裂長さが 60mm 以上において実験結果のき裂進展寿命は解析値より小さくなった。これは、はく離による影響であると考えられた。

今後の課題として、はく離と残留応力の影響を検討し、CFRP 補修後の適切なき裂進展挙動を把握していきたい。

参考文献

- 1) 複合構造委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端、複合構造レポート 09, 土木学会, 2018.
- 2) 近藤富士夫, 松井孝洋：他分野における CFRP 大型構造物成形に関する最近の話題, 土木学会, 第4回 FRP 複合構造・橋

梁に関するシンポジウム, pp.23-26, 2012.

- 3) 仁瓶寛太, 尾野英夫, 恒成利康：溶接残留応力を考慮した疲労き裂伝播寿命の推定に関する研究, 日本造船学会論文集, No.1982, Vol.152, pp.390-396, 1982.
- 4) 向井喜彦, 西村新, 金應俊, 疲労き裂の開閉口挙動に及ぼす溶接残留応力の影響に関する研究, 溶接学会論文集, No.5, Vol.1, pp.113-119, 1987.
- 5) 轟章, 小林英夫, 残留応力場の疲労き裂進展速度の予測, 日本機械学会論文集 (A編), No.54, Vol.497, pp.30-37, 1988.
- 6) 橋倉靖明, 大高正廣, 小川和夫, 高橋宏治, 安藤柱：引張残留応力場から圧縮残留応力場にき裂が伝播する場合の溶接残留応力の再配分とき裂進展挙動, JHPI, Vol.47, No.4, 2009.
- 7) 秀熊佑哉, 石川敏之：CFRP 接着鋼板における定着長不足が補強効果に与える影響, 複合構造論文集第 6 巻, No.75, Vol.5, pp.II_19-II_26, 2019.
- 8) 角谷利恵, 浅野政之：ひずみゲージ切断開放法による残留応力測定に関する解析的検討, 日本機械学会 M&M2004 材料力学カンファレンス講演論文集, pp.207-208, 2004.
- 9) 松本理佐, 竹村学, 石川敏之, 河野広隆, 平塚慶達：CFRP 板が接着された片側き裂の応力拡大係数, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol. 18), pp.I_795-I_803, 2015.
- 10) 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.II_56-II_66, 2018.

(Received September 10, 2021)

REPAIR EFFECT OF EXTERNALLY BONDED CFRP ON PROPAGATION LIFE OF FATIGUE CRACKS INITIATED AT IN-PLANE WELDED GUSSET JOINTS

Atsushi MATANO, Hitoshi NAKAMURA, Visal THAY, Takehiko TSUBOKAWA
and Takahiro MATSUI

Focusing on the fatigue cracks generated at weld joint of in-plane gusset welded joints, the delay in crack growth life due to externally bonded CFRP, and effect of the prevention of the release of welding residual compressive stress were experimentally verified. Fatigue tests were conducted, and the crack propagation life were measured from 20mm to 40mm and more on the specimen with the in-plane gusset plate using beach mark tests. The CFRP were installed using the vacuum assisted resin transfer modeling method (VaRTM). Furthermore, the welding residual stress was measured by cutting method. Finally, the experimental results and analytical results of the welding simulation based on finite element analysis were compared. As a result, the fatigue test confirmed the propagation lives of all the repaired specimens by externally bonded CFRP which satisfies the predetermined fatigue lives. The result also indicates that the CFRP bonded on the specimens with in-plane gusset plates delays the crack propagation rate. In addition, it was confirmed that the externally bonded CFRP prevents the release of the residual stress and has the effect of delaying the crack growth in the area of compressive residual stress.