

CFRP 接着補修におけるはく離が 疲労き裂の進展速度に及ぼす影響

俣野 厚志¹・中村 一史²・タイウィサル³・松井 孝洋⁴

¹学生会員 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 博士前期課程2年
(〒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 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: hnaka@tmu.ac.jp

³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
(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)

E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

⁴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)

Ttakahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

鋼部材を CFRP 接着で補修する場合、接着層のはく離が課題であり、補修効果に影響を及ぼすと考えられている。本研究では、面内ガセット溶接継手に初期き裂を与え、真空含浸法を応用して CFRP 接着した後、ビーチマーク法による疲労試験を行ってき裂進展状況を観察した。その結果、き裂進展に伴って接着層からはく離が生じ、補修効果が低下することが示唆された。また、疲労試験中に接着層のはく離状況を超音波探傷法で観察したところ、き裂進展に伴ってはく離範囲も広がる様子が確認された。計測画像をもとに接着層のはく離をモデル化した FEM 解析にて応力拡大係数を算出し、実験値と比較した。その結果、はく離を考慮することで、応力拡大係数が実験値に近づくこと、き裂進展速度が実験値とよい一致を示すことが確かめられた。

Key Words: debonding, crack propagation, CFRP, repair, fatigue

1. はじめに

鋼構造物の疲労き裂に対する補修方法は、高力ボルトによるあて板の添接補修により、抵抗断面を増加させ、損傷部の発生応力の低減を図るのが一般的である。しかしながら、狭隘部でのボルト孔の穿孔、ボルトの締付けには作業空間の確保が必要となり、ハンドリングが悪い場合がある。一方、FRP（強化繊維プラスチック）をき裂が生じた鋼板に接着して補修する場合、ボルトによる取付けが不要であり、現場での作業性に優れる。また、FRP は、鋼と比べて比重が小さいため、死荷重はほとんど増化しない。

これらの理由から、近年、鋼部材の補修・補強に FRP が使用され始めている。特に、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（CFRP）を適用した事例が報告されている¹⁾²⁾。

しかしながら、CFRP 接着により補強する場合、鋼材に荷重が作用すると、接着接合の端部に応力集中が生じ、接着接合部からはく離が進展して、補修・補強の効果が低減することが懸念される。特に、疲労き裂補修の場合、き裂の開口を抑えるため、き裂直上に CFRP を接着するが、き裂先端を含むき裂前縁の接着接合部に応力集中が生じ、き裂先端付近からはく離することが知られている。接着接合部のはく離は、CFRP による架橋効果を低減させ³⁾、CFRP の応力負担も低減し、き裂進展速度が増加することになる。

そこで、本研究では、CFRP 接着による疲労き裂補修において、接着接合部のはく離が疲労き裂の進展速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、面内ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂を対象に、検討を行った。はじめに、過年度の検討⁴⁾により、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。

所定の初期き裂長さに対して、目標とするき裂進展寿命の設定にあたっては、面内ガセット溶接継手の疲労強度等級に基づいて設定し、それを満足する CF シートの積層数を検討するとともに、疲労試験を行って、その妥当性を検証した。また、疲労試験中に、CFRP 表面からフェーズドアレイ超音波探傷器を用いて、接着接合部を垂直探傷し、CFRP のはく離範囲を把握した。その結果を踏まえて、FEM モデルを作成し、数値解析を行って、CFRP のはく離が応力拡大係数に及ぼす影響を検討した。

2. 試験体と補修方法

(1) 試験体の作製

疲労き裂の多くは溶接継手の止端部を起点に発生することが多いことから、本研究では、疲労強度等級が小さい面内ガセット溶接継手を対象とした。図-1 に示すように、ガセットプレートと母材の溶接部端部から発生した疲労き裂を想定し、CFRP 接着補修による疲労寿命の延命化を試みた。現場では、ある程度の長さまで初期き裂が進展している状態で発見されるため、本研究では、所定の初期き裂長さ a_i に対して CFRP 接着補修を行った後、疲労試験を行って、疲労き裂の進展と CFRP のはく離を計測した。

図-2 に、試験体図と CFRP 接着補修を示す。試験体は一般的な溶接構造用圧延鋼材である SM490A 材を使用し、疲労試験機の制約から、母材幅 130mm に対して掴み部の幅を 90mm とした。疲労き裂の発生箇所を限定するため、片側のガセットプレート端部に $\phi 100$ mm でフレットを設けた。片側からの初期き裂長さ a_i は 20mm とし、CFRP は試験体の中心部に、母材幅から初期き裂長さを除いた 90mm の幅で両面に配置した。溶接は、疲労き裂の発生位置周辺である面内ガセット端部周辺のみとし、完全溶け込み溶接とした。

(2) CFRP の設計手順

本研究では、真空含浸工法 (VaRTM) を応用した CFRP 接着方法を適用した⁹⁾。本工法は、真空状態にしたフィルム内に炭素繊維シートを設置し、含浸接着樹脂を兼用する接着剤を真空吸引して、硬化、接着する方法である。本工法は、複雑な形状の部材にも施工可能であること、CFRP 成型と接着を同時に行えること、部材表面に均一に CFRP を成形できるといった利点がある。本検討では、含浸接着樹脂には、2 液性エポキシ樹脂 (AUP40T1) を使用し、接合用強化材としてガラス繊維のチョップドストランドマット (CSM) を用いた。

CFRP の必要積層数は、初期き裂 $a_i=20$ mm から所定のき裂長さ a_p になるまでの繰返し回数 (疲労き裂進展寿命)

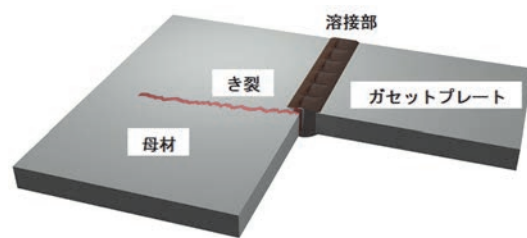


図-1 面内ガセット溶接継手から発生した疲労き裂の概念図

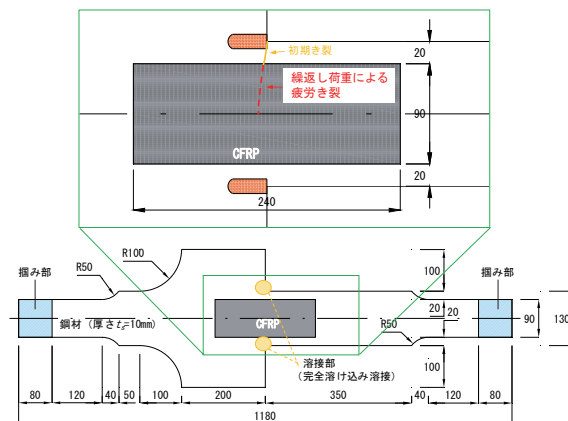


図-2 試験体図と CFRP 接着補修

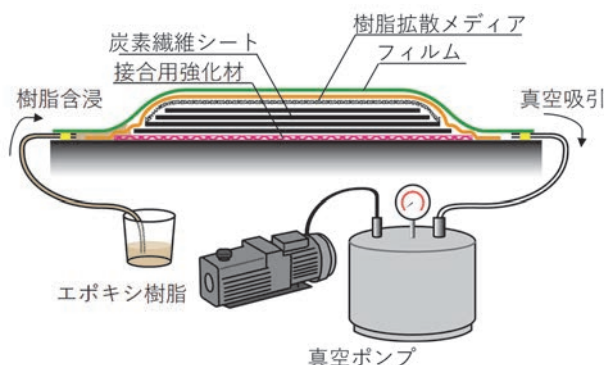


図-3 真空含浸を応用した CFRP 接着の概念図

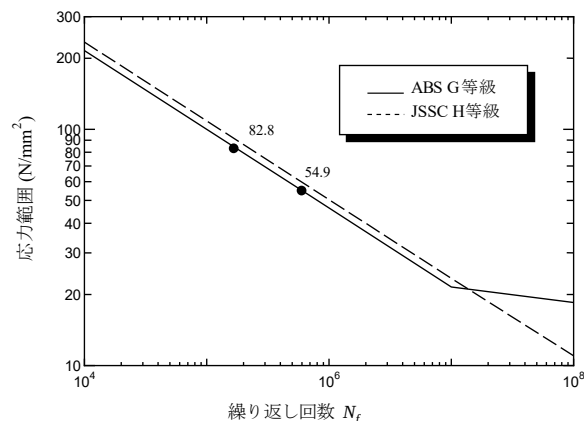


図-4 疲労強度等級

N_p が、面内ガセット溶接継手の疲労強度等級 N_f を上回るように設計を行った。過年度の研究⁹⁾の継続性の観点から、所定のき裂長さ a_p は 40mm とした。図-3 に、面内ガセット溶接継手の疲労強度等級曲線を示す。対象の疲労

強度等級は、アメリカ船級協会（American Bureau of Shipping, 以下 ABS）の G 等級や、日本鋼構造協会（JSSC）の H 等級が挙げられるが、ABS では、洋上などで使用することから環境条件が厳しいため、安全側の値を採用している。そこで、本研究では疲労強度等級 N_f の採用値として ABS の疲労強度曲線を採用した。

CFRP 積層数は、以下の手順で行った。まず、母材断面積を基準として求めた公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ を決定した。本検討では公称応力範囲 $\Delta\sigma_n=82.8\text{N/mm}^2$, 54.9N/mm^2 とした。続いて CFRP の設計断面積と弾性係数から、1 層あたりの剛性を求めた。次に、CFRP 補修後にき裂が進展しても接着層のはく離は生じないと仮定し、文献 3) の提案式から求めた応力拡大係数を用いて、各応力範囲の疲労き裂進展寿命 N_p を求めた。ここで、疲労き裂が $a_f=20\text{mm}$ から $a_p=40\text{mm}$ まで進展する繰返し回数 N_{p20-40} は、応力拡大係数範囲とパリス則に基づいて、次式より算定される。

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

K_I : 架橋応力とガセットプレートの影響を考慮した応力拡大係数

a : き裂長さ

C, m : 材料定数

材料定数 C, m は、無補修の試験体の疲労試験結果から、 $C=2.0 \times 10^{-11}$, $m=3.06$ と同定された。以上から CFRP 積層数を求めたところ、全公称応力範囲において CF シートは 4 層で既定の疲労強度等級を N_f を満足した。

(3) CFRP 端部処理と疲労試験方法

図-5 に、CFRP 端部の概念図を示す。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 6) に基づいて、CFRP の定着長を検討した。その結果、CFRP の必要定着長は 54mm となった。以上から、補修区間を 36mm として、CFRP 半長さは 90mm とした。図-6 に、CFRP 接着の状況を示す。

鋼板に接着された CFRP のはく離強度は、CFRP の端部処理の影響を大きく受けることが知られている。そこで、CFRP 端部に段差を設け、端部に集中するせん断応力と垂直応力を低減する。段差長は、FEM 解析から、接着剤の最大主応力による評価を行って決定した。接着接合部の静的引張試験の結果と文献 7) の接着接合部の疲労耐久性の評価から、本検討で基準とする疲労限度の最大主応力は 12N/mm^2 とした。その場合、各層 10mm 段差を設けることで接着剤の最大主応力を満足した。

表-1 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	σ_s	N/mm^2	301.2
CF シート (CFRP としての物性値)	弾性係数 (x)	E_x	N/mm^2	220,000
	弾性係数 (y)	E_y	N/mm^2	10,000
	弾性係数 (z)	E_z	N/mm^2	10,000
	ポアソン比 (xy)	ν_{xy}	—	0.3
	ポアソン比 (yz)	ν_{yz}	—	0.01
	ポアソン比 (zx)	ν_{zx}	—	0.01
	せん断弾性係数 (xy)	G_{xy}	N/mm^2	84,615
	せん断弾性係数 (yz)	G_{yz}	N/mm^2	4,950
	せん断弾性係数 (zx)	G_{zx}	N/mm^2	4,950
GF チョップド ストランドマ ット (CSM)	弾性係数	E_c	N/mm^2	18,750
	ポアソン比	ν_c	—	0.3
	せん断弾性係数	G_c	N/mm^2	7,212
エポキシ樹脂 接着剤 E258R	弾性係数	E_p	N/mm^2	3,600
	ポアソン比	ν_p	—	0.34
	せん断弾性係数	G_p	N/mm^2	1,343
含浸接着樹脂 AUP40T1	弾性係数	E_m	N/mm^2	3,430
	ポアソン比	ν_m	—	0.39
	せん断弾性係数	G_m	N/mm^2	1,234

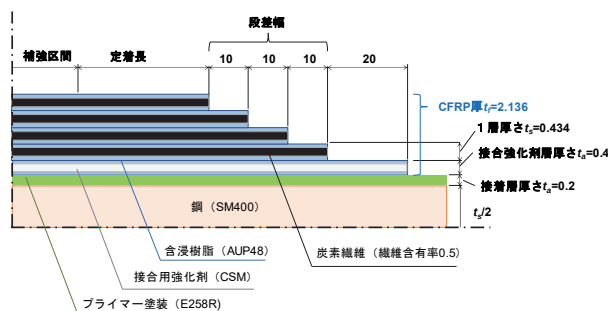


図-5 定着部概念図



図-6 CFRP 接着の状況

疲労試験機は、島津サーボパルサ（動的容量：200kN）を使用した。初期き裂は、端部から 20mm 位置にエナメル線を用いて断線検知させ、き裂長さをコントロールし

た。断線検知ではき裂発生方向を特定する必要があり、かつ片側貫通き裂とするため、疲労試験前に初期切欠きを導入した。初期切欠きは糸鋸（刃幅 0.4mm）を用いて軸直角方向に 2mm 設けた。

表-2 に、試験条件を示す。本検討では全試験において、応力比 R は 0.1 とした。本試験ではビーチマーク法を用いた。ビーチマークは、試験中に全振幅応力範囲の半分の応力範囲で繰返し载荷することで、疲労き裂の進展と停滞が線のように見えるものである。CFRP 補修後は、き裂長さが確認できなくなるため、破断後にき裂断面のビーチマークを観察することでき裂進展速度を評価した。

3. 接着接合部のはく離の観察とモデル化

(1) 超音波探傷法による観察

接着接合部のはく離をモデル化するため、疲労試験中の接着剤のはく離範囲を観察することとした。はく離範囲の観察には、超音波探傷法（UT）を使用することとした。UT 法は CFRP が接着された状況でも、部材内部の傷（接着層のはく離）を観察できる。本検討では、はく離状況を面的に観察するため、振動子が多数連続したフェーズドアレイ用探傷子と、エンコーダを用いたリニアスキャンを行った。観察には ZETEC 製 TOPAZ32 のフェーズドアレイ超音波探傷器（PA）を使用した。

図-7 に、PA で観察した、繰返し回数ごとの結果を示す。画像は鋼材内部に超音波が到達し、反射したものをデジタル処理したものである。色が黄色に近いほど超音波が強く検出されたことを示す。画像の白い部分は、接着層ではく離が生じ、超音波が鋼材内部まで届かずに検出できなかったため白く表示されたと考えられる。なお、図中のき裂長さは、ビーチマークから算出した長さであり、縮尺を合わせて赤い実線で示している。PA 画像のき裂先端はき裂長さとほとんど一致していたため、白い部分がはく離範囲であると断定した。PA の観察結果から、繰返し回数が増加するほどはく離範囲が広がっていることがわかる。また、き裂先端から三角形にはく離範囲が広がっていることが確認された。

(2) はく離範囲のモデル化

FEM 解析ではく離をモデル化するにあたり、はく離範囲を単純化して検討を行うこととした。PA 画像からはく離範囲がき裂先端を頂点として三角形に広がっていることから、本検討でははく離の境界線を直線と仮定し、き裂長さとはく離範囲の関係性を求めた。はく離範囲の決定方法は、UT 画像からき裂先端を特定し、ビーチマークから求めたき裂中央の位置で、左右のはく離面の境界を繋げた長さをはく離長さとした。図-8 に CFRP

表-2 疲労試験の条件

試験体名	応力範囲 (N/mm ²)	補修の有無	き裂進展の目標 回数 N_{2040}
N83-C1	82.8	×	33,000
N83-C2	82.8	×	33,000
R4-83-C1	82.8	○	167,000
R4-83-C2	82.8	○	167,000
N55-C1	54.9	×	113,000
N55-C2	54.9	×	113,000
R4-55-C1	54.9	○	1,050,000
R4-55-C2	54.9	○	1,050,000

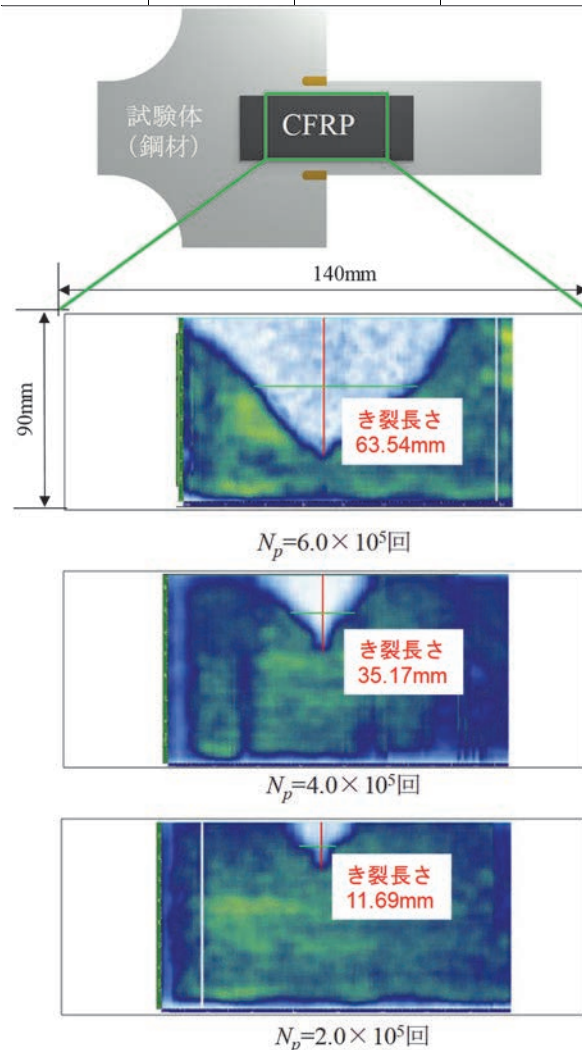


図-7 超音波探傷画像 ($\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$)

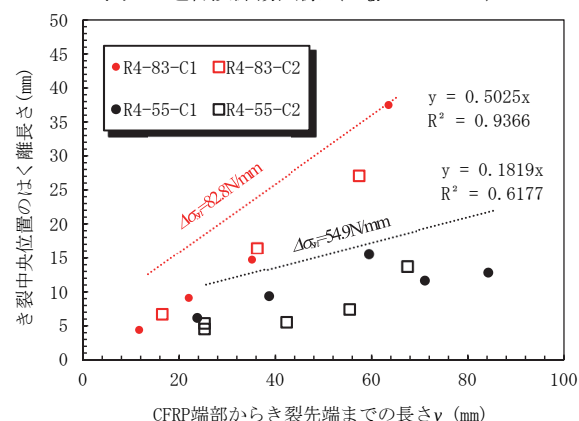


図-8 き裂進展に伴うはく離範囲の関係

端部からき裂先端までの長さ y (き裂長さ $a=20\text{mm}$) とはく離範囲の関係を示す。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=82.8\text{N/mm}^2$ では y とはく離範囲はほとんど直線的な関係を示している一方、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$ では試験体によってばらつきが見られたが、概ね線形的な関係が見られた。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$ でばらつきが大きい理由として、接着層に作用するせん断荷重が小さいことから、接着層内部の不均一性が大きく影響したものとする。

4. 接着層のはく離を考慮した応力拡大係数の評価とき裂進展速度に及ぼす影響

(1) 解析モデルの作成とはく離範囲の決定

本検討では有限要素法解析 (FEM) を用いて、ソリッド要素 (六面体一次) によるモデルを作成した。図-9に、解析に用いた FEM モデルと要素分割図を示す。解析には、汎用有限要素法解析ソフトウェア Marc/Mentat 2019 を使用した。本検討では片側き裂を対象とするため、掴み部以外を全てモデル化した。

境界条件は、端部の3方向変位固定と、長手方向に公称引張応力範囲の大きさ分、各節点に引張集中荷重を載荷し、疲労試験と同じ荷重条件とした。き裂進展解析には、VCCT を使用し、き裂先端のエネルギー解放率から応力拡大係数を算出した。なお、精度向上のためき裂先端部周辺の要素サイズは $0.03\text{mm}\times 0.03\text{mm}$ とした。さらに本検討では接着層のはく離をモデル化するため、プライマー塗布で使った E258R (厚さ 0.2mm) と、含浸接着樹脂 (AUP40T1) と CSM の複合した接着層 (厚さ 0.343mm) をそれぞれモデル化した。

はく離範囲のモデル化には、要素の非アクティブ化を利用して、はく離範囲の接着層の要素を取り除くことで、各き裂長さに対するはく離を再現した。はく離範囲は、実験から求めた結果より、二等辺三角形と近似した。はく離範囲の決定の際基準とした、CFRP 端部からき裂先端までの長さ y を N 等分した点 i でのはく離長さ d_i を式 (3) で表す。

$$d_i = (0.023\Delta\sigma_{sn} - 0.898)y_i \quad (3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{sn}$: 公称応力範囲 (N/mm^2)

y_i : CFRP 端部から点 i までの長さ (mm)

本検討では応力範囲が2ケースのみであるため、応力範囲をパラメータとした線形式とした。

き裂長さ $a_p=52\text{mm}$ 、き裂中央位置のはく離長さ $d_i=9.46\text{mm}$ におけるはく離範囲 (応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=54.9\text{N/mm}^2$) で接着層要素を取り除いたものを図-9に合わせて示す。解析は、①引張荷重の載荷、②要素のスプリット (指定

した6面体要素面の周りの節点を二重節点に変更)、③接着層のはく離範囲の非アクティブ化の手順で行った。非アクティブとする要素は以下の手順で決定した。まず、前項で求めたき裂長さとはく離範囲の関係 (図-8) から、き裂先端を起点としてはく離境界線を定めた。次に、境界線と重なる要素を確認し、表面積の半分以上がはく離範囲に含まれていれば、はく離範囲内の要素と決定した。最後に、はく離範囲内の要素を解析の最後に非アクティブ化するように指定し、解析を行った。

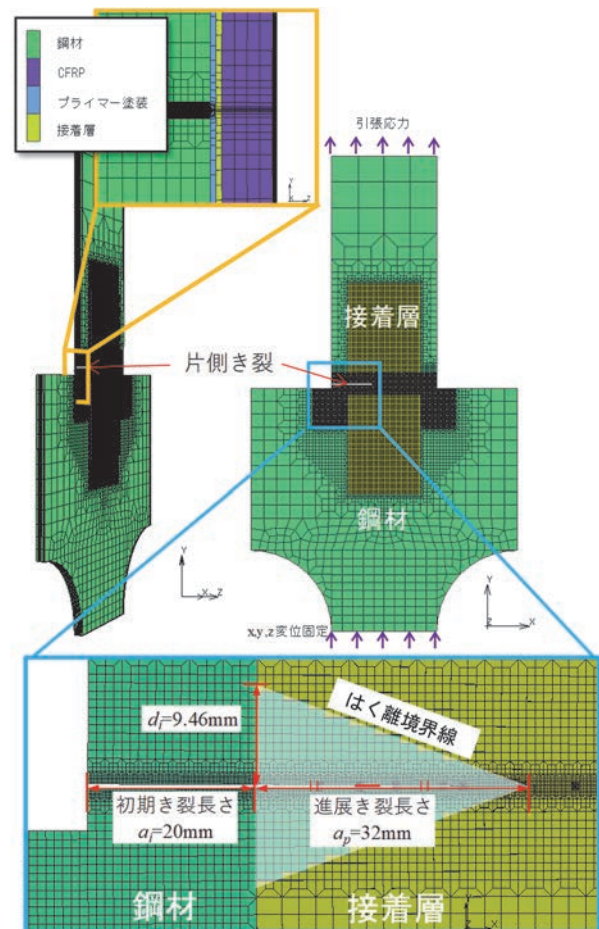


図-9 解析モデルと非アクティブ化した要素 (き裂長さ $a_p=52\text{mm}$ 、き裂中央位置のはく離長さ $d_i=9.46\text{mm}$ の一例)

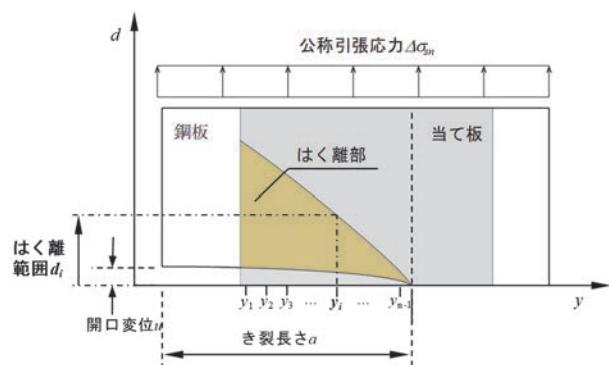


図-10 はく離範囲の定義

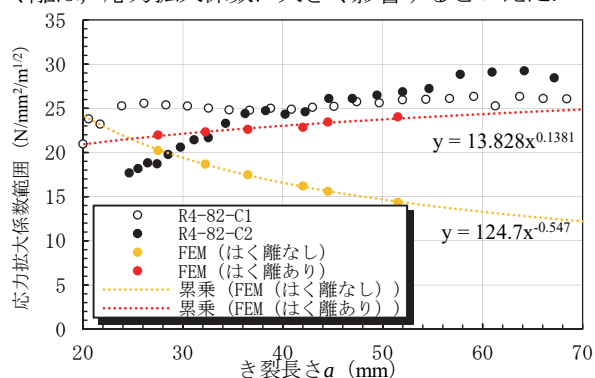
(2) はく離が応力拡大係数に及ぼす影響

図-11に、実験値とFEM解析による応力拡大係数の比較を応力範囲別にそれぞれ示す。実験値は、各応力範囲で2ケースずつ示す。FEM解析では、き裂長さ $a=27\text{mm}$ ~ 52mm までの応力拡大係数を算出したが、それ以外のき裂長さにおける値は、累乗近似で算出した。近似式は係数 p 、 q を用いて式(2)のように表す。ここで a はき裂長さ(mm)である。

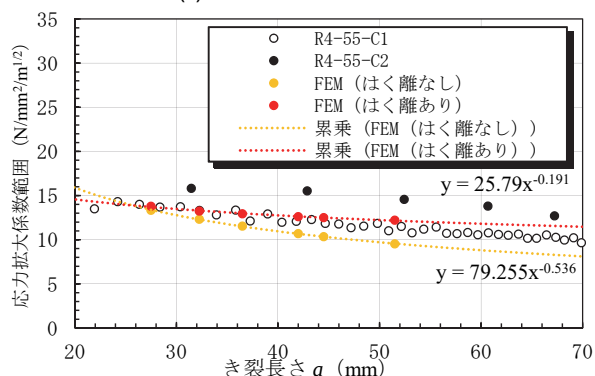
$$y = pa^q \quad (2)$$

表-3に、累乗近似した近似式の各係数を示す。実験値から応力拡大係数を求める方法は、式(1)より、材料定数 C 、 m と、求める部分のビーチマーク間隔を繰返し回数で算術平均したき裂進展速度 $\Delta a/\Delta N$ から算出した。解析値は、はく離を考慮しない場合と、はく離範囲の要素を取り除いた場合でそれぞれ検討し、き裂先端の厚さ方向に分布するエネルギー解放率(モードI)の平均値とした。

実験値は、2つの試験体でばらつきがあるものの概ね傾向は同じであることがわかる。解析値は、いずれの応力範囲とも、はく離を考慮しない場合、き裂が長くなるほど、実験値よりも応力拡大係数が小さくなる傾向が見られた。特に、応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$ では、実験値はき裂が長いほど応力拡大係数は増加し、はく離を考慮しない場合の解析値と差異が生じた。一方、はく離を考慮する場合、実験値と概ね一致しており、解析結果より、はく離は、応力拡大係数に大きく影響するといえた。



(a) 応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$



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

図-11 実験値とFEM解析で求めた応力拡大係数の比較

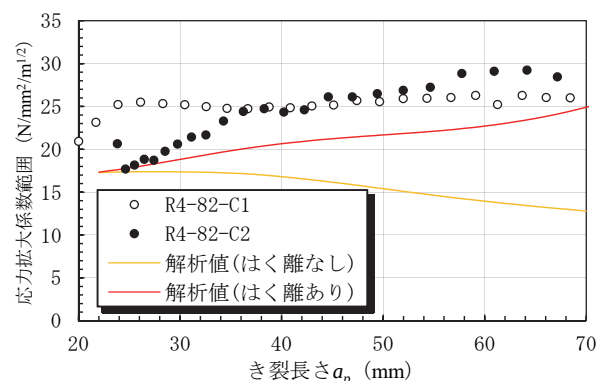
(3) はく離を考慮した応力拡大係数の算定方法

FEM解析での検討に加えて、応力拡大係数の理論計算から求めた解析値での検討も行った。CFRPの架橋効果を考慮した応力拡大係数算定式³⁾に、はく離範囲を考慮する式を加え、解析値を算出した。計算に使用したパラメータは表-1の通りである。その際、はく離によってき裂の開口が大きくなるため、補正係数 $F_3=1.12$ を算定式に乗じた⁸⁾。はく離範囲はPA画像からまとめた結果(図-8)に基づいて、式(3)を用いて算定式に導入した。

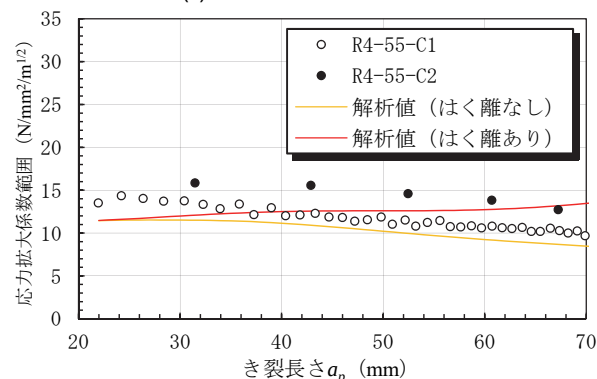
き裂直上では、両端部でガセットプレートによる構造的な応力集中が生じ、反対に試験体の中央部付近では、一般部に比べて応力が小さくなる。応力拡大係数算定式にガセットプレートによる応力集中を考慮するため、補正係数を導入する必要がある。そこで、ガセットプレートによる補正係数を Y_1 として公称応力 σ_n を補正した⁴⁾。補正係数 Y_1 は、FEM解析で求めた無補修体の垂直応力 σ_y を公称応力 σ_n で除した分布を6次の多項式で近似して算出された次式で表した。

表-3 FEM解析で求めた応力拡大係数近似式

応力範囲	はく離考慮	係数 p	係数 q
82.8N/mm ²	あり	13.8	0.138
82.8N/mm ²	なし	124.7	-0.547
54.9N/mm ²	あり	25.8	-0.191
54.9N/mm ²	なし	79.3	-0.536



(a) 応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$



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

図-12 実験と解析値計算結果の比較

$$Y_1 = -5.81 \times 10^{-7} x + 2.45 \times 10^{-4} x^2 + 6.92 \times 10^{-10} x^3 - 2.00 \times 10^{-7} x^4 - 1.52 \times 10^{-13} x^5 + 4.95 \times 10^{-11} x^6 + 0.814 \quad (4)$$

ここに、 x は母材中央からの距離である。

図-12 に、各応力範囲における解析値と実験値の結果を示す。応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$ では、解析値は、はく離を考慮することで、実験値と同様に応力拡大係数が増加傾向となること、実験値と比較すると、解析値は全体的に $5\text{N/mm}^2/\text{m}^{1/2}$ 程度、応力拡大係数が小さいことがわかる。応力範囲 $\Delta\sigma_r=54.9\text{N/mm}^2$ では、はく離範囲が小さいことから、応力拡大係数の変化は実験値のばらつきに対して比較的小さいが、実験値と同様、き裂長さが増加しても応力拡大係数が $10\sim 15\text{N/mm}^2/\text{m}^{1/2}$ 程度を推移する傾向が見られた。

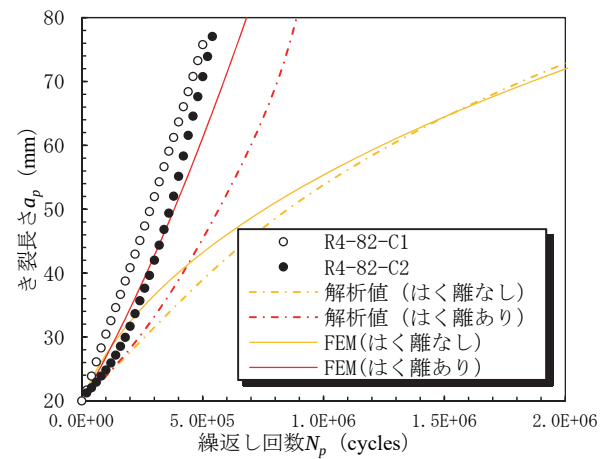
(4) き裂進展速度の比較

図-13 に、理論計算、FEM 解析から求めた応力拡大係数をそれぞれ式(1)に代入して計算された、繰返し回数 N_p とき裂長さ a の関係（き裂進展速度）を実験値のそれと比較してそれぞれ示す。応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$ では、はく離を考慮しない場合、き裂の進展に伴ってき裂進展速度が小さくなるが、はく離を考慮することでより実験値に近い結果となった。FEM 解析の結果ははく離を考慮することで実験値とよい一致を示した。理論計算から求めた結果は、実験値や FEM 解析の結果と比較すると応力拡大係数が小さいため、繰返し回数が少なく算出された。その結果、き裂長さと繰返し回数の関係では、解析値のき裂進展速度が実験値や FEM 解析よりも危険側になる結果となった。応力範囲 $\Delta\sigma_r=54.9\text{N/mm}^2$ では、はく離を考慮することで FEM、理論計算の結果はどちらも実験値に近づいたものの、実験値では、き裂長さが大きくなるほど、き裂進展速度（繰返し回数 N_p とき裂長さ a の勾配： da/dN ）が低下する挙動となるのに対し、解析結果はその様子は見られなかった。これは、はく離範囲が小さいことで溶接残留応力の解放がされず、実験値においてき裂進展速度が低減したと考えられた。

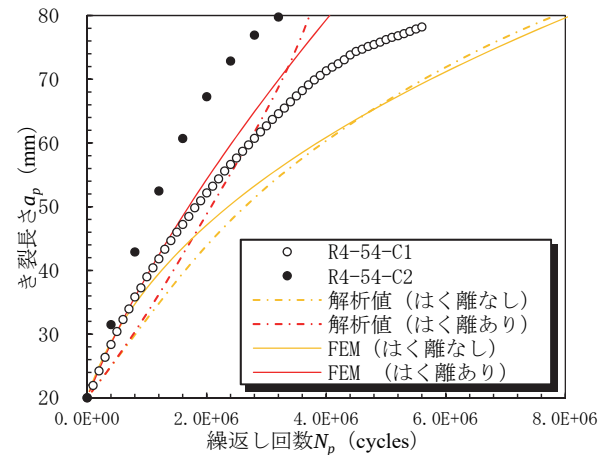
5. まとめ

面内ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂を CFRP 補修し、CFRP のはく離範囲の計測から、FEM 解析モデルを作成し、その解析結果より、応力拡大係数、き裂進展速度を実験値と比較した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 疲労試験中に CFRP 表面からフェーズドアレイ超音波探傷法で垂直探傷することで、はく離進展の状況を評価することができた。はく離範囲はき裂先端から、



(a) 応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$



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

図-13 繰返し回数 N_p とき裂長さ a の関係

三角形状に広がっていることが確認された。

- (2) はく離範囲の計測結果に基づいて、き裂長さとはく離長さの関係を評価した結果、概ね線関係にあることがわかった。応力範囲 $\Delta\sigma_r=82.8\text{N/mm}^2$ では線形性が強いこと、応力範囲 $\Delta\sigma_r=54.9\text{N/mm}^2$ ではばらつきが大きいことがわかった。これは、接着接合部に作用する応力が小さいことによる影響と考えられる。
- (3) 実験値との比較を行うため、はく離長さとき裂長さの線形式を求め、FEM 解析にてはく離を考慮したモデルを作成し検討した。その結果、はく離を考慮した場合の応力拡大係数は、実験値と同様の傾向が見られ、接着層のはく離の影響がき裂進展解析に大きく影響することがわかった。
- (4) はく離を考慮した FEM 解析から求めた応力拡大係数より、き裂進展速度を算出して実験値と比較した。その結果、どちらの応力範囲でも実験値とよい一致がみられた。しかしながら、応力範囲 $\Delta\sigma_r=54.9\text{N/mm}^2$ では、実験値で確認されたき裂長さの増加に伴うき裂進展速度の急な低下が見られなかった。
- (5) 理論計算から求めたき裂進展速度では、増加傾向が実験値に近づき、考慮しない場合と比べき裂進展速

度の増加を確認できたが、応力範囲 $\Delta\sigma_f=82.8\text{N/mm}^2$ では全体的に応力拡大係数が実験値よりも小さいことで、き裂進展速度は危険側の評価となった。

今後は、き裂長さとはく離範囲の関係を他の応力範囲でも確認するとともに、溶接残留応力の影響を考慮した場合の検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宣央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.710-720, 2012.
- 2) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, pp.239-249, 2001.
- 3) 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: 当て板接着補修されたき裂を有する鋼板の応力拡大係数, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.798-807, 2013.
- 4) 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, 2021.
- 5) 小林洸貴, 近藤諒翼, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: 真空含浸工法を応用した CFRP 接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.5, pp.II_20-II_31, 2017.
- 6) 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.
- 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.II_56-II_66, 2018.
- 8) 野田尚昭, 荒木清, Erdogan Fazil: 片側き裂を有する二層複合板の応力拡大係数, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.537, pp.1102-1109, 1991.

(Received August 26, 2022)

EFFECT OF ADHESIVE DEBONDING IN CFRP REPAIR ON FATIGUE CRACK GROWTH RATE

Atsushi MATANO, Hitoshi NAKAMURA, Visal THAY, Takahiro MATSUI

In this study, in-plane gusset welded joints were repaired with CFRP using VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding), and then fatigue tests using the Beach Mark method were conducted to observe its crack propagation. The debonding of the adhesive layer was observed by ultrasonic testing during the fatigue test, and it was confirmed that the debonding area expanded as the crack propagated. Based on the observed images, the stress intensity factor was calculated by FEM analysis that modeled the debonding area, and was compared with the experimental values. As a result, it was confirmed that the debonding area differs depending on the adhesive layer material, and that the crack growth rate calculated by the FEM analysis results considering the debonding were close to the experimental values.