

(35) 炭素繊維シートの真空含浸接着による十字溶接継手の疲労強度向上に関する研究

小沢 拓弥¹・タイ ウィサル²・中村 一史³・松井 孝洋⁴

¹学生会員 首都大学東京大学院 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: ozawa-takumi@ed.tmu.ac.jp

²学生会員 首都大学東京大学院 博士後期課程 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: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京大学院 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

⁴正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部コンポジット技術第1課
(〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1)

E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

本研究は、予防保全型の疲労対策として、真空含浸工法により炭素繊維シートを疲労き裂発生前の荷重非伝達型十字溶接継手に接着することで、疲労強度の向上を目的としたものである。基礎的な研究として、画像情報から試験体の溶接形状を再現した FE モデルを作成し、静的載荷試験より得られた応力低減を比較することで、炭素繊維シートの補強効果についての妥当性を検討した。補強試験体を作成するにあたっては、炭素繊維シートの定着長および段差の設計を行い、接着端部のはく離の評価を主応力により検討した。そして、疲労試験の結果より、疲労強度の向上と疲労寿命の延命化を確認し、応力範囲によっては疲労減の対策になり得る有効な補強方法であることを示した。

Key Words: fatigue durability, cruciform welded joints, CF sheet, VaRTM technique, bonded joint

1. 緒言

過去に建設された鋼橋の中には、交通量の増加や建設当時の疲労設計への未対応などから、多くの疲労き裂が発見されており、補修や更新時期が一時期に集中することが懸念されている。そのため、現存する鋼橋を延命化する予防保全型の疲労対策が有効であると考えられる。既存の疲労き裂発生前の対策工法¹⁾として、グラインダーで応力集中点となる溶接止端部を切削する工法や、ピーニングによって止端部に塑性変形を与えることで圧縮残留応力を導入する工法など、ビード形状や応力の改善が主に実施されている。しかし、グラインダー処理では、部材強度において問題とならないよう、母材に0.5mm²⁾までの切削を要求する、高度な施工技術が必要であり、応力の改善工法では、導入した圧縮残留応力の持続性に関して統一的な見解を得るには至っていない³⁾。また、

これらの工法が必要となる作業場所は、狭隘部が多いため作業性に影響を与える場合があることから、より簡便な工法が求められる。

このような課題に対して、軽量で高強度かつ高耐食性を有する炭素繊維シート（CFシートとよぶ）を用いた補修・補強工法は、既設鋼構造物の性能を回復または向上させるための技術⁴⁾⁵⁾の一つとして注目されている。しかし、FRP接着による溶接継手部の疲労強度の向上を目的とした研究開発は国内外でも検討例⁶⁾⁸⁾は少なく、その効果が十分に明らかにされているとはいえない。これは、溶接ビード部への接着は、形状が複雑で、定量的な評価が難しいことが主な要因と考えられる。一方、航空分野で多用されている図-1に示すような真空含浸工法は、液体樹脂を真空吸引してFRPを成形するため、溶接ビード部等の不陸のある面に合わせて接着できる特徴がある。この工法を鋼構造物の補修・補強に応用すること

が提案され、研究開発が行われている。先行研究では、複雑な形状である断面欠損した鋼桁端部の補修を対象に、真空含浸による CFRP の成形・接着を試みた結果、十分な性能回復の効果であることが確認されている^{9,12)}。また、VaRTM成形を応用したCFシート接着により面外ガセット溶接止端部を補強すれば、疲労耐久性が大幅に向上することも確かめられている^{13,14)}。

そこで、本研究では、予防保全型の疲労対策として、真空含浸工法によりCFシートを疲労き裂発生前の荷重非伝達型十字溶接継手に接着することで、疲労強度の向上を目的としたものである。本工法の妥当性を検討するにあたり、画像情報から試験体の溶接ビード部を再現したFEモデルによるFE解析、および、静的引張試験を実施した。そして、CFシートの端部はく離を考慮し、疲労試験を実施することで、溶接止端部の疲労強度の向上を検証する。

2. 試験片の設計と真空含浸工法による補強方法

(1) CFシートを5層接着した場合の定着長

本研究で使用した試験体の概要を図-2に示す。試験体を製作するにあたり、CFシートを5層接着した場合に必要な定着長を検討した。定着長とは、CFRPを鋼部材に接着すると、接着剤を介して鋼部材の断面力がCFRPへ徐々に伝達され、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に必要なCFRPの長さである。

文献4)より、鋼板の応力が合成断面として計算される値に収束する程度を η とすれば、 η が1以上で1に近い値の場合、CFRPの定着長 l は、式(1)で定義される。

$$l \geq \frac{1}{c} \cosh^{-1} \left(\frac{2}{\eta - 1} \cdot \frac{E_c A_c}{E_s A_s} \right) \quad (1)$$

ここで、 E_s および E_c はそれぞれ鋼部材およびCFRPの弾性係数 (MPa)、 A_s および A_c はそれぞれ鋼部材およびCFRPの断面積 (mm²) である。係数 c は式(2)で算出される。

$$c = \sqrt{\frac{b_e \cdot G_e}{t_e} \cdot \left(\frac{2}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right)} \quad (2)$$

ここで、 t_e および b_e はそれぞれ接着剤の厚さ (mm) および幅 (mm) である。 G_e は接着剤のせん断係数 (MPa) である。

以上の計算式と表-1に示す物性値から、CFシートを5層接着した場合、定着長 l は37mmとなった。

(2) CFシートの端部はく離の検討

鋼部材に接着されたCFシート端部に急激な断面変化がある場合、高いせん断応力と垂直応力が生じるため、

その端部からはく離が生じる場合がある。本研究では、CFシート端部の段差設計を行い、CFシートの接着層に生じる主応力を求めることで、疲労破壊しない主応力の限界値を検討した。本研究で設計した段差の概念図を図-3に示す。

a) 理論に基づく主応力の算出方法

接着剤に生じる主応力 σ_{pe} の理論値は、式(3)より算出される⁴⁾。

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2} \right)^2 + \tau_e^2} \quad (3)$$

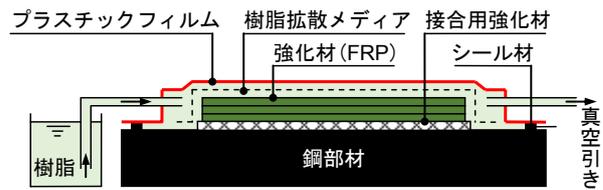


図-1 真空含浸工法によるCFRPの成形・接合の概念図

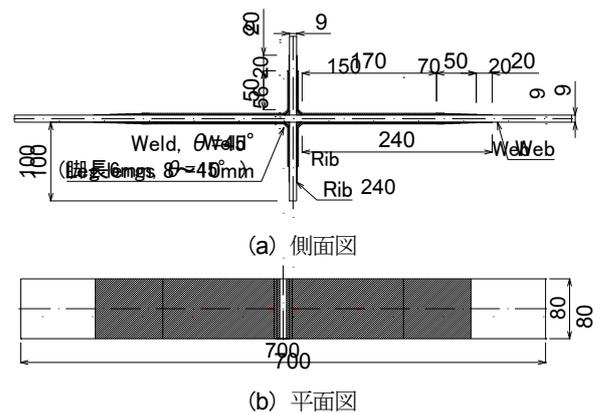


図-2 試験体の概要

表-1 材料物性値

料	項目	記号	単位	値
鋼材 (SM400)	縦弾性係数	E_s	MPa	205,000
	幅	b_s	mm	80
	厚さ	t_s	mm	9
	断面積	A_s	mm ²	720
CFシート (高強度)	縦弾性係数	E_c	MPa	245,000
	幅	b_c	mm	80
	厚さ	t_c	mm	0.167
	積層数	n	-	5
接着剤 (AUP40)	断面積	A_c	mm ²	133.6
	繊維体積含有率	V_f	-	0.50
	横弾性係数	G_e	MPa	1,234
	幅	b_e	mm	80
接着剤 (E258R)	厚さ	t_e	mm	0.4
	収束度合い	η	-	1.01
	縦弾性係数	E_{E258R}	MPa	3,600
ガラス繊維 (CSM)	厚さ	b_{E258R}	mm	0.181
	縦弾性係数	E_{CSM}	MPa	18,750
ガラス繊維 (CSM)	厚さ	b_{CSM}	mm	0.143

ここで、 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。せん断応力 τ_e と垂直応力 σ_{ye} の値については、軸力を受ける部材の収束式(式(4)、式(5))から計算した。

$$\tau_e = \frac{c}{2b_c} (1 - \xi_0) P \quad (4)$$

$$\sigma_{ye} = \frac{1}{2} (2\omega - c) t_c \tau_e \quad (5)$$

ここで、 P は軸力(N)、係数 ω および応力低減率 ξ_0 は式(6)および式(7)から算出した。

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{b_c E_e}{4t_e} \cdot \frac{1}{E_c I_c}} \quad (6)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_c A_c / (E_s A_s)} \quad (7)$$

そして、 Id は式(8)から算出した。

$$I_c = \frac{b_c t_c^3}{12} \quad (8)$$

b) FEモデルによる主応力の算出方法

主応力 σ_{pe} のFE解析値は、図-4で示すような各段差を考慮したFEモデルから、鋼材に近いCFシート1層目の中心で生じるせん断応力 τ_e および垂直応力 σ_{ye} を求め、式(3)より算出する。ここでの各段差モデルとは、段差なし、ありで、それぞれガラス繊維のチョップドストランドマット(CSMとよぶ)およびCFシートを考慮したモデル(Nt-CSM, Ot-CSMとよぶ)、段差なし、ありでそれぞれE258R, CSMおよびCFシートを考慮したモデル(Nt-E258R-CSM, Ot-E258R-CSMとよぶ)である。なお、ここで示す主応力 σ_{pe} の値は、母材の公称応力 σ_{st} で無次元化している。FEモデルは、汎用有限要素解析プログラムMsc Marc 2018にて、平鋼の上に各接着層を積層し、最小要素寸法が接着層を板厚方向に2分割できる約0.07mmでメッシュ分割して作成した。要素は、4節点4辺形の平面ひずみ要素を用い、拘束条件は、モデルの1/4の対称性を考慮している。図-5に、一例として、作成したFEモデル(Nt-E258R-CSM)を示す。

c) 理論とFE解析による主応力の比較

表-2に、理論値(Nt-theとよぶ)と各段差モデルより算出した1層目のCFシート接着層の主応力を比較したものを示す。まず、段差なしのCSMおよびCFシートを考慮したモデルと理論値を比較すると、理論値を基準とした主応力の差異は、9.80%となった。差異の要因として、理論値の計算では、CSMを考慮していないため、主応力 σ_{pe} の値がFE解析値よりも低い値で算出されたと考えられた。次に、段差なしのCSMおよびCFシートを考慮したモデルと、段差なしのE258R, CSMおよびCFシートを考慮したモデルを比較すると、両者はほぼ一致している。したがって、プライマーとして用いるE258R(ユニシ)は、接着層の主応力への影響が小さいことを確認で

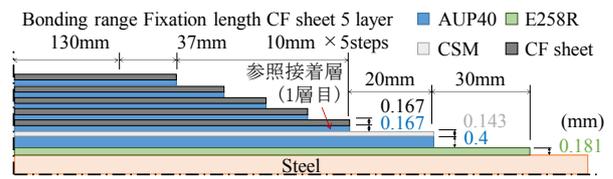


図-3 段差の概念図

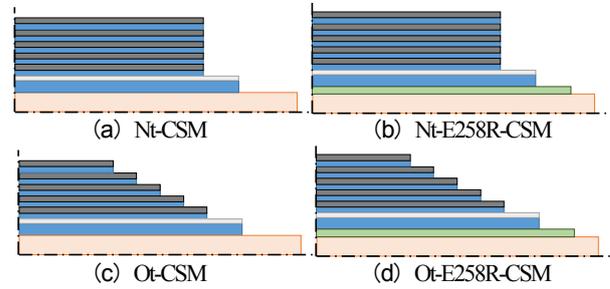


図-4 各段差モデルの概要

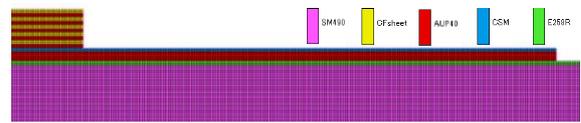


図-5 FEモデルの概要 (Nt-E258R-CSM)

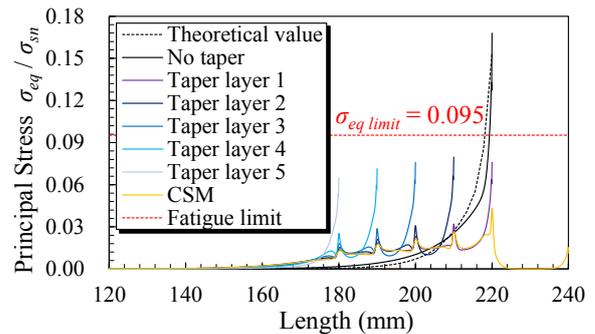


図-6 理論値と Nt-CSM, Ot-CSM モデルの主応力の比較

表-2 1層目のCFシート接着層での主応力の比較

モデル名	段差の有無	主応力($\sigma_{eq} / \sigma_{st}$)
Nt-the	無し	0.153
Nt-CSM	無し	0.168
Nt-E258R-CSM	無し	0.164
Ot-CSM	有り	0.076
Ot-E258R-CSM	有り	0.077

きる。

続いて、図-6に、段差あり、なしのCSMおよびCFシートを考慮したモデルより得られた主応力 σ_{pe} の比較を示す。段差あり、なしのCFシート接着層の1層目の公称応力 σ_{st} に対する主応力 σ_{pe} の比は、約1/2の低減率を示していることが確認できる。

d) CFシート端部から疲労破壊しない主応力の限界値

接着接合の疲労強度に関する研究¹⁵⁾より、静的には離強度の30%が疲労限となる評価基準が得られており。本研究で用いる含浸接着樹脂(Toray ACE AUP40)の実験値¹³⁾に基づけば、疲労限界度の最大主応力 $\sigma_{eq \text{ limit}}$ は

24.3MPaとなる。以上の値から、疲労試験の際に想定している最大公称応力255MPaで無次元化すると0.095となるため、設定した最大公称応力以下であればCFシート端部からはく離しないものと予測される。

(3) 真空含浸工法による補強方法

施工手順は、図-7に示すグラインダー処理、表面処理、プライマー塗布、CSMおよびCFシートの設置、真空含浸の順で行った。施工の詳細は、以下の通りである。

a) グラインダー処理

図-6 (a)では、端部からの疲労き裂の発生を防ぐため、グラインダーを用いて端部から 10mm の位置まで切削して、滑らかに仕上げた。

b) 表面処理

図-6 (b)では、ブラスト面形成動力工具とディスクサンダーを用いて錆や黒皮などを除去し、アセトンを用いて表面の油分や汚れがない状態にする。なお、無補強試験体では、図-6 (b)の処理までとする。

c) プライマー塗布

図-6 (c)では、鋼材表面の錆防止と CF シートとの接着性を向上させるために、粘度の高い 2 液性常温硬化型エポキシ樹脂である E258R を用いてプライマーの塗布を行った。プライマーの分量は、平面部では200g/mm²、溶接ビード部では止端部での施工不良による接着剤の未充填の対策として半径 20mm の円弧が作成できる分量で行った。

d) CSM および CF シートの設置

図-6 (d)では、CF シートは一方向材であるため、CF シートの強化方向が試験体の軸方向に配向され、かつ図-3で検討した段差となるように設置した。また、電気化学作用による腐食を防止するため、鋼材と CF シートの間に 1 層の CSM を設置した。

e) 真空含浸の状況

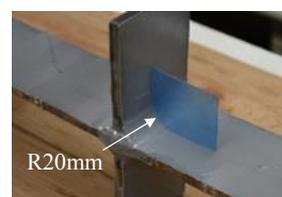
図-6 (e)では、樹脂硬化後に設置した資材の取り外しを容易にするため、5 層目の CF シート上部（最外層）にピールプライを設置した。そして、その上部に樹脂の流動性を確保するため、樹脂拡散メディアを 3 層設置した。その後、樹脂の含浸範囲をシーラントテープで囲い、樹脂引き用ホース 2 本を母材端部側、真空引き用パイプ 1 本をリブ側にそれぞれ設置し、バギングフィルムで封入した。真空ポンプを用いて吸引する際には、十分な真空度が確保されていることを確認し、樹脂引き用パイプから 2 液性常温硬化型エポキシ樹脂 (AUP40) を吸引した。真空吸引による含浸時間は、樹脂の可使用時間内（約 45 分）として、含浸完了後にはパイプの端部をバイスプライヤーで締め切った。その後、硬化するまで投光器を使用し約 40 度の温度管理のもと 12 時間養生した。また、真空含浸は母材面に対して片面ずつ行うものとした。



(a) グラインダー処理



(b) 表面処理



(c) プライマー塗布 (E258R)



(d) CSM および CF シートの設置



(e) 真空含浸の状況

図-7 グラインダ処理と真空含浸工法の施工手順



(a) 無補強試験体



(b) 補強試験体

図-8 静的試験のセットアップ

表-3 実験に用いた鋼板の物性値

鋼種	SM400
降伏強度 (MPa)	293
引張強度 (MPa)	453
破断伸び (%)	29
弾性係数 (MPa)	205,000

3. 静的載荷によるCFシート接着の応力低減

(1) 静的引張試験の条件

電気油圧サーボ式材料強度試験機（島津サーボパルサ EV200kN）を使用して、222MPa の静的な引張応力を加えた。応力の参照位置は、溶接止端からできるだけ近い箇所として、止端から 1mm の位置、止端部の構造的な応力集中の影響を受けない箇所として、止端部から 86mm 離れた位置とした。ひずみゲージのゲージ長は 1mm である。補強試験体を製作する際には、ひずみゲージを埋め込んで真空含浸工法を行った。図-8 に、静的試験のセットアップ、表-3 に、本実験で使用する鋼板の物性値を示す。

(2) 止端形状を再現した FE モデルの作成方法

溶接部の止端形状は、構造的な応力集中に大きく影響を及ぼすため、画像情報から試験体の止端形状を再現した FE モデルにて実験の妥当性を検証することとした。止端部をデジタル一眼レフカメラ（Nikon D7200）で 360 度方向から約 90 枚撮影し、その画像情報から汎用 CAD ソフトウェア群（Autodesk Recap Photo, Autodesk Meshmixer）を使用して、図-9 に示す 2 次元の FE モデルを生成した。既往の研究では、画像情報からモデル化した形状と形状測定機を用いて立体的な計測を行った場合の計測結果との差異は、約 2% であることが確認されている¹⁴⁾。そして、メッシュは、止端部の要素寸法が約 0.01mm、止端から離れるにしたがって要素寸法が 0.2mm となるように分割した。

CF シートのモデル化は、図-3 で検討した各接着層の厚さを用いている。また、母材と付加物の間の接合面は、3.5mm の未溶着部分を考慮している。要素は、4 節点 4 辺形の平面ひずみ要素を用い、拘束条件は、モデルの 1/4 の対称性を考慮している。作用応力は、実験と同じ引張応力 222MPa を載荷する。

(3) 静的載荷と FE 解析による応力低減の比較

図-10 に、FE モデルから得られた溶接止端周辺の荷重軸方向の応力 σ_x のコンタ図を示す。なお、応力値は、各材料の材料物性値に対する表示としている。無補強モデル（FEM-Un.とよぶ）の応力分布と、補強モデル（FEM-Re.とよぶ）を比較すると、補強モデルでは CF シートを接着したことにより、高応力域が無補強モデルより緩和されていることが確認できる。

図-11 に、実験と FE モデルから得られた溶接止端から軸方向への応力分布を、表-4 に、実験と FE モデルから得られた応力集中係数の比較をそれぞれ示す。FE 解析値の評価は、ゲージ長が 1mm であったため、実験の測定位置から ± 0.5 mm の範囲の値の移動平均としている。

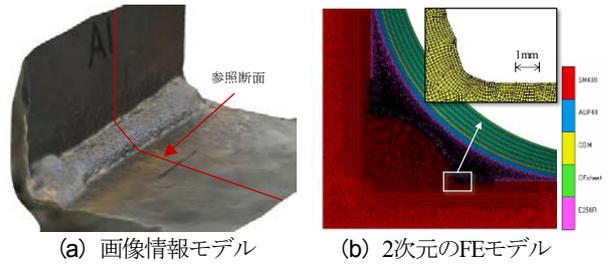


図-9 試験体の溶接形状を再現したモデル

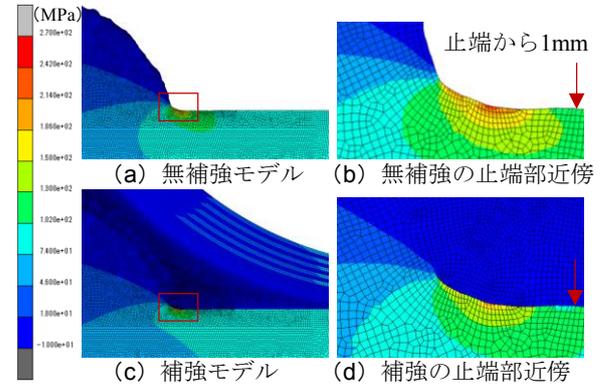


図-10 荷軸方向の応力 σ_x のコンタ図

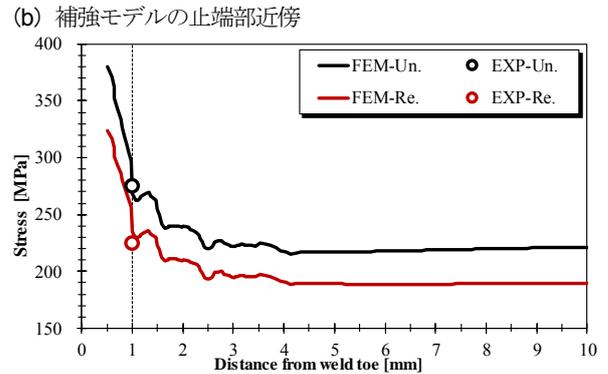


図-11 溶接止端から軸方向への応力分布

表-4 溶接止端における応力集中係数の比較

止端からの距離 (mm)	無補強(Un.)			補強(Re.)		
	EXP	FEM	差異(%)	EXP	FEM	差異(%)
1	1.23	1.21	1.92	1.01	1.06	4.75
86	1.05	1.00	4.78	0.88	0.83	6.73

表-5 溶接止端における応力低減係数の比較

止端からの距離(mm)	応力低減係数		
	EXP	FEM	差異 (%)
1	0.816	0.872	6.73
86	0.843	0.825	2.07

はじめに、表-4 より、止端部の影響を受けない 86mm の位置では、式(7)で示した応力低減係数 $\xi=0.818$ が実験と FE 解析値ではほぼ一致することから、CF シート積層による補強効果が理論通りであることが確認できる。次に、図-11、表-4 より、無補強試験体の実験値（EXP-Un.とよぶ）を基準とした FE 解析値との応力の差異は、1mm の位置で 1.92%、86mm の位置で 4.75% とほぼ一致した。補強試験体の実験（EXP-Re.とよぶ）を基準とした FE 解析

値との応力の差異は、1mm の位置で 4.78%、86mm の位置で 6.73%とほぼ一致した。

表-5 に、実験と FE モデルから得られた応力低減係数の比較を示す。溶接止端部の応力低減係数の差異は、実験値を基準とすると 1mm の位置では、6.73%とほぼ一致することが確認できた。数%の差異の要因は、試験体の長手方向に、面外の初期たわみを有するためと考えられた。

4. CF シートが接着された疲労耐久性の検討

(1) 疲労試験の条件

表-6 に、試験名と試験条件を示す。無補強・補強試験体を製作し、公称応力範囲 σ_{sr} をパラメータとして疲労試験を行った。公称応力範囲 σ_{sr} は、疲労試験機の载荷限界値を考慮して、無補強試験体では 150, 180, 200 および 230MPa の 4 ケース、補強試験体では 180, 200 および 230MPa の 3 ケースとした。応力比 R は、全ケースで 0.1 とした。

(2) 疲労試験による疲労耐久性の検討

図-12、表-7 に、公称応力範囲と破断までの繰り返し回数の関係、実験シリーズと疲労試験結果をそれぞれ示す。図-13 に、各応力範囲 $\Delta\sigma_{sr}$ での補強試験体の破断面を示す。図-12 より、本研究で用いた無補強試験体と文献 6) で検討されている試験体の結果を比較すると、両者

は良好な一致を示していることがわかる。そして、CF シートを 5 層接着した補強試験体 (CWC-6R180) は、応力範囲 $\Delta\sigma_{sr}$ が 180MPa でも繰り返し回数 1000 万回まで疲労破壊しないことが確認できた。

続いて、応力範囲が 200MPa での無補強 (CWN-3R200)

表-6 試験片名と試験条件

試験片名		公称応力範囲 $\Delta\sigma_{sr}$ (MPa)	载荷速度 f (Hz)
無補強	CWN-1R150	150→180	15
	CWN-2R190	190	15
	CWN-3R200	200	15
	CWN-4R230	230	10
補強	CWC-5R230	230	10
	CWC-6R180	180→230	15→10
	CWC-7R200	200	15

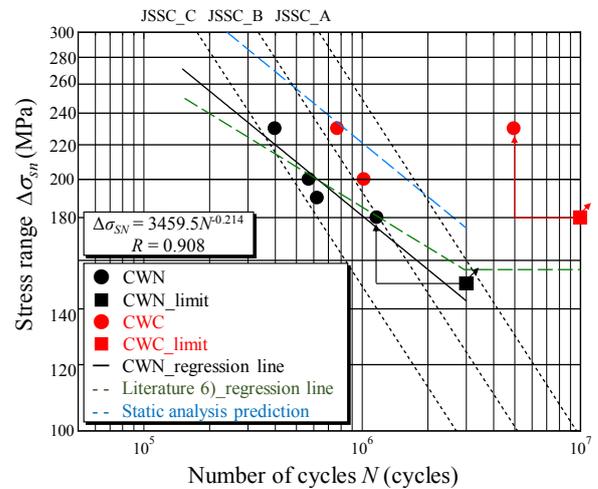


図-12 公称応力範囲と破断までの繰り返し回数の関係

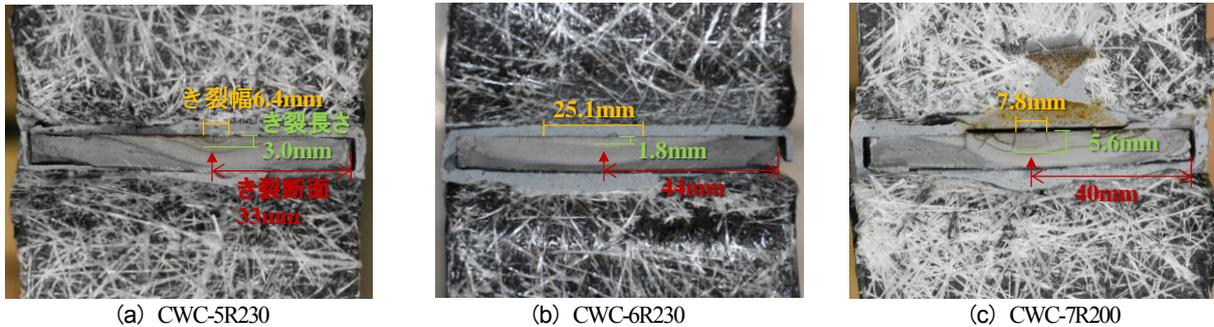


図-13 補強試験体の破断面

表-7 実験シリーズと疲労試験結果

試験片	試験 No.	$\Delta\sigma_{sr}$ (MPa)	繰り返し回数 (回)	き裂先端の応力低減係数	繰り返し回数の予測値 (回)	破壊形式	備考
無補強	CWN-1R150	150	>3,000,000	-	-	-	疲労限
	CWN-1R180	180	1,168,020	-	-	止端き裂	No.1 を再利用
	CWN-2R190	190	622,257	-	-	止端き裂	
	CWN-3R200	200	570,000	-	-	止端き裂	
	CWN-4R230	230	398,600	-	-	止端き裂	
補強	CWC-5R230	230	769,681	0.824	832,626	止端き裂	止端部はく離
	CWC-6R180	180	>10,000,000	0.815	-	-	疲労限
	CWC-6R230	230	4,957,178	0.815	832,626	止端き裂	No.7 を再利用
	CWC-7R200	200	1,019,136	0.802	1,599,871	止端き裂	止端部はく離

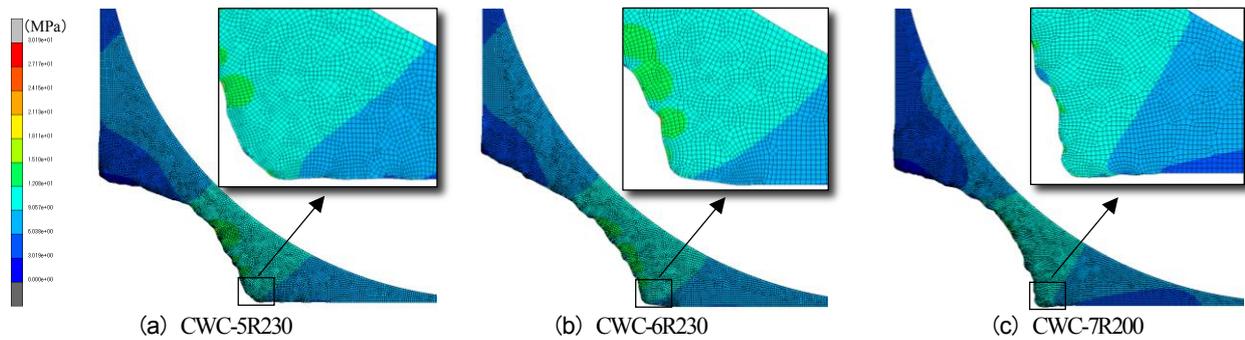


図-14 補強試験体の破断面

および補強試験体（CWC-7R200）の破断回数を比較すると、それぞれ約57万回および約102万回となり、疲労寿命は約2倍となることが確認できた。次に、応力範囲が230MPaでの無補強（CWN-4R230）および補強試験体（CWC-5R230）の破断回数を比較すると、それぞれ約40万回および約76万回となり、同様に疲労寿命は約2倍となることが確認できた。しかしながら、補強試験体（CWC-6R230）との疲労寿命を比較すると、無補強に対して繰り返し回数は約12倍となり、同じ応力範囲230MPaでも繰り返し回数が異なった。

(3) 静的荷重より求めた疲労寿命の予測値

図-12、表-7に、静的荷重によるFEモデルから算出した疲労寿命の予測値を示す。この予測値は、前章で検討した止端形状を再現した画像情報モデルより、図-13で示したき裂位置を参照断面として、止端部の応力集中点における応力低減係数を算出し、無補強の回帰線に乗じて求めた。なお、応力低減係数は、3体のき裂断面の平均値から求めた。

まず、応力範囲 $\Delta\sigma_n$ が200MPaおよび230MPaでの破断回数の予測値を算出すると、それぞれ約160万回および約83万回となった。疲労試験による繰り返し回数と、FEモデルから算出した予測値による繰り返し回数を比較すると、補強試験体（CWC-6R230）では、静的荷重時に比べて疲労試験時での補強効果はかなり高い傾向にあることがわかった。一方で、補強試験体（CWC-5R230、CWC-7R200）では、静的荷重時と疲労試験時で同様の補強効果が得られていた。両者の疲労寿命が大きく異なる要因として、溶接止端部におけるはく離による影響および止端部でのき裂進展の相違による影響が考えられた。

(4) FEモデルによる溶接止端部でのはく離の検討

図-14に、各補強試験体のFEモデルから得られたE258R層における溶接止端周辺での荷重軸方向の応力 σ_x のコンタ図を示す。なお、FEモデルは、前節で作成したき裂断面でのモデルを使用し、応力値は、各材料の材料物性値に対する表示としている。また、はく離の評価は、E258Rの引張強度である30.19MPaとしている。図-14

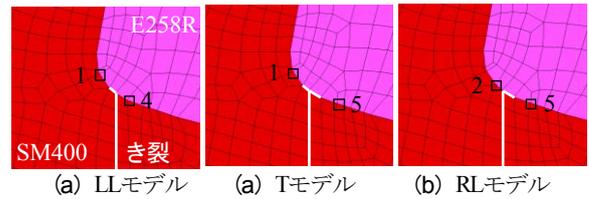


図-14 CWC-6R230におけるき裂モデル

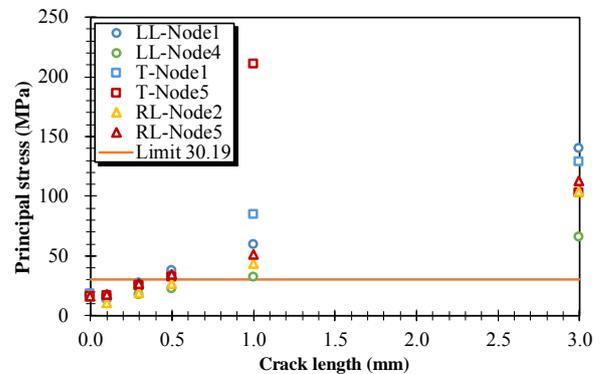


図-15 CWC-6R230におけるき裂長さとの主応力の関係

より、全ての補強試験体でE258Rの引張強度以下であることから、はく離しないことが確認できた。

続いて、一例として補強試験体（CWC-6R230）における破断面でのFEモデルから、応力集中点にき裂を設けることにより、接着剤に生じる主応力を算出し、き裂進展とはく離の関係を確認した。図-15に、き裂を再現したFEモデルを示す。き裂モデルは、接着剤と鋼材の境界面がリブ側に進展するき裂（LLモデル）、リブ側と軸方向側に進展するき裂（Tモデル）、軸方向側のみに進展するき裂（RLモデル）を考えた。き裂長さは、板厚方向に0mm、0.1mm、0.3mm、0.5mm、1.0mm、3.0mmとした。図-15に、それぞれのき裂モデルより算出したき裂長さとの主応力の関係を示す。応力の参照位置は、き裂箇所では応力集中の起点となるため、その一つ隣の節点より比較することとした。き裂長さが1mmまで進展すると全てのき裂モデルで止端部からはく離することが確認できた。以上より、1mm程度のき裂進展後に止端部ではく離が生じることが予測される。

(5) 破断面におけるき裂進展の相違の検討

図-13に、各応力範囲 $\Delta\sigma_n$ での補強試験体の破断面に

おけるき裂長さとき裂幅を示す。静的載荷時と疲労試験時で同様の補強効果が得られていた補強試験体 (CWC-5R230, CWC-7R200) と、疲労試験時に補強効果が高い傾向にあった補強試験体 (CWC-6R230) でのき裂長さを比較すると、補強試験体 (CWC-6R230) では、き裂幅が大きくそれぞれのき裂が繋がるまでに時間を要したことが考える。同様にして、き裂長さを比較すると、補強試験体 (CWC-6R230) では、き裂長さが小さいことから、前節で検討したき裂長さが 1mm に到達するまでに時間を要したことが考えられる。以上より、き裂進展の相違から疲労寿命が大きく異なると考えられる。

5. 結言

本研究では、真空含浸工法による 5 層の CF シートを荷重非伝達荷重非伝達型十字溶接継手に接着して補強し、その妥当性、有用性を実験および FE 解析により検証した。得られた結果を下記に示す。

- (1) CF シートを 5 層接着した補強試験体、止端部形状を模擬した FE モデルと理論値の応力低減係数を比較すると、両者はほぼ一致することから、補強効果は理論通りであるといえた。
- (2) 適切な段差を設けた CF シート 5 層において、公称応力範囲 180MPa まで、繰返し回数 1000 万回までであれば、端部からはく離が生じないことが確かめられた。
- (3) 公称応力範囲 230MPa での無補強 (CWN-4R230) および補強試験体 (CWC-6R230) の破断回数を比較すると、疲労寿命は約 12 倍となること、疲労強度等級は A 等級以上に相当することが確認できた。
- (4) 破断面の FE モデルから求めた止端部での応力集中点による補強効果と、疲労試験での CF シート接着による補強効果を比較した。その結果、補強試験体 (CWC-6R230) では、静的載荷時に比べて疲労試験での補強効果はかなり高い傾向にあることがわかった。

一方、補強試験体の疲労寿命は、大きくばらつく結果となった。その要因について、き裂進展に伴う溶接止端部におけるはく離による影響および止端部でのき裂進展の相違による影響があることが考えられ、解析的な検討を行った。その結果、以下のことがいえた。

- (5) 各補強試験体の破断面から FE モデルを作成し、溶接止端部近傍において、はく離の検討を行った。その結果、接着剤の応力は、全ての補強試験体で、接合部の静的はく離強度の 1/3 以下であることから、疲労によりはく離が生じる可能性は小さいといえた。

- (6) 補強試験体 (CWC-6R230) の破断面から、応力集中点にき裂を設けた FE モデルを作成し、き裂進展とはく離の関係を検討した。その結果、き裂長さが 1mm を超えた時点で、止端部ではく離が生じるものと予測された。
- (7) 各補強試験体の破断面から、き裂長さとき裂幅の比較を行った結果、補強試験体 (CWC-6R230) では有意な差があり、き裂の進展挙動が異なることから疲労寿命に差異が生じたと考えられた。

以上のことから、荷重非伝達荷重非伝達型十字溶接継手に、真空含浸により CF シートを積層接着すれば、疲労強度の向上と疲労寿命の延命化を向上できることが確かめられた。応力範囲によっては疲労減の対策になり得る有効な補強方法であることを示した。今後は、疲労試験データの蓄積と、疲労耐久性が静的強度よりも高い傾向にあることの更なる原因究明を行う。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造シリーズ 22，土木学会，2013.12
- 2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技法堂出版，2012.6
- 3) 西川 聡，大北 茂，山口 篤憲：応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性，保全学，Vol.11, No.4, pp.69-76, 2013
- 4) 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
- 5) 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 05，土木学会，2012.
- 6) 稲葉尚文，富田芳男，紫桃孝一郎，鈴木博之，岡本陽介：GFRP シート貼付によるリブ十字溶接継手の補強に関する一提案，土木学会論文集，No.798, Vol.68, pp.89-99, 2005.9
- 7) Tao Chen, Qian-Qian Yu, Xiang-Lin Gu and Xiao-Ling Zhao: Study on Fatigue Behavior of Strengthened Non-Load-Carrying Cruciform Welded Joints Using Carbon Fiber Sheets, International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 12, No. 01, pp.179-194, 2012.
- 8) Tao Chen, Qian-Qian Yu, Xiang-Lin Gu, Xiao-Ling Zhao: Fatigue Test on Out-of-Plane Gusset Welded Joints Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Materials, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS2012, CD-ROM, 6 pages, 2012.
- 9) Hitoshi Nakamura, Kouki Kobayashi, Ryosuke Kondo, Visal Thay, Yukihiro Matsumoto, Takahiro Matsui, Yutaka Ochi: Experimental Study on Repair of Section Loss in Girder End by Externally Bonded Carbon Fiber Sheets Using VaRTM, 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS2017), Singapore, pp.36-1-36-4, 2017.7
- 10) 松山晃大，佐藤潤，タイウィサル，中村一史，松本幸大，

- 松井孝洋, 越智寛: VaRTM成形を応用したCFRP部材による圧縮力を受ける鋼部材の補修・補強に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.5, pp.67-II_80, 2018.5
- 11) 小林洗貴, 近藤諒翼, タイウイサル, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRTM成形を応用したCFRP部材による鋼桁端部の補強に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.5, pp.44-II_55, 2018.5
- 12) ニヤムバヤルトウワーン, タイウイサル, 中村一史, 松井孝洋: 断面欠損を有する鋼桁端部の真空含浸で成形・接着したCFRP部材による補修・補強, 土木学会, 第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, pp.110-118, 2018.11
- 13) Visal Thay, Chang Tan, Hitoshi Nakamura, Takahiro Matsui, Fan Lin: Improvement of Fatigue Durability in Welded Gusset Joints by CF Sheets Using VaRTM Technique, 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE2018), Paris, pp.334-II-342, 2018.7
- 14) タイウイサル, 小沢拓弥, 譚暢, 中村一史, 松井孝洋: 積層した炭素繊維シートのVaRTM成形・接着による面外ガセット溶接継手の疲労耐久性の向上, 土木学会, 第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, pp.103-109, 2018.11
- 15) タイウイサル, 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
- (Received August 30, 2019)

STUDY ON IMPROVEMENT OF FATIGUE DURABILITY FOR CRUCIFORM WELDED JOINTS BY EXTERNALLY BONDED CARBON FIBER SHEETS USING VARTM TECHNIQUE

Takumi OZAWA, Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA and Takahiro MATSUI

This paper deals with the development of strengthening steel structures before the initiation of fatigue crack by externally bonded carbon fiber (CF) sheets using Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) technique on typical non-load-carrying cruciform welded joints. The strengthening work by VaRTM have been proven to be very efficient and convenient even on complex shapes of structures due to the flexibility of this method. The reduction of stress concentration at weld toe was analytically and experimentally investigated. In analytical study, finite element (FE) models were simulated from a number of image data (approximately 90 photos) taken from actual experimental specimens by digital camera. In experimental study, the target specimens of non-load-carrying cruciform welded joints were fabricated in considering the development length and taper end and subjected to static and cyclic load. In static tests, good agreement of reduction of stress concentration at weld toe between analytical and experimental results can be confirmed. In fatigue tests, significant improvement of fatigue lives of strengthened specimens have been confirmed compared to non-strengthened specimens. From this study, the proposed strengthening method by CF sheets using VaRTM technique in welded joints can be used as fatigue countermeasure in practical use.