

# 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

タイ ウィサル<sup>1</sup>・小沢 拓弥<sup>2</sup>・譚 暢<sup>3</sup>・中村 一史<sup>4</sup>・松井 孝洋<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>正会員 日揮プラントイノベーション株式会社  
(〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-6-6)  
E-mail: tan.chang@jgc.com

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>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

面外ガセット溶接継手の溶接止端部は、構造的な応力集中の影響を強く受けるため、しばしばき裂が発生する。本研究では、面外ガセット溶接止端部の応力低減と疲労強度の向上を目的として、真空含浸(VaRTM)工法により炭素繊維シート(CFシート)を接着する補強方法とその効果を解析的、実験的に検討した。解析では、画像情報から立体モデルを作成し、CFシート接着による応力集中の低減効果を検討した。実験では、CFシート端部からのはく離防止を検証して段差の設計をはじめ、応力範囲をパラメータとして疲労試験を実施した。その結果、23層の積層接着による補強では、解析と試験の比較より、ホットスポット応力の値はほぼ一致すること、止端部の先端応力は約33%低減することから、十分な効果があるといえる。また、溶接ビードにCFシートを密着して接着すれば、面外ガセット溶接継手部の疲労強度の向上と疲労寿命の延命化に大きく寄与することが確かめられた。

**Key Words :** *strengthening and repair, welded joints, fatigue durability, VaRTM technique, CF sheet*

## 1. はじめに

既設鋼橋の疲労損傷は、都市部の高架橋で多発しており、その対策が急務となっている。既往の研究では、疲労き裂発生後の対策としてFRP接着の適用が多数検討<sup>1,2)</sup>されており、その補修効果が示されてきた。社会基盤構造物の効率的な維持管理が求められているなか、予防保全型の対策が推奨されている。疲労き裂発生前の対策工法についても検討しておく意義は大きいと考えるが、その対策工法は、グラインダ仕上げやピーニング等、ビード形状の改善を中心とした工法<sup>3)</sup>がほとんどであり、

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<sup>4)~6)</sup>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。

最近、航空機の構造部材や、風力発電設備のブレード等の製作で多用されている、真空含浸工法<sup>7)</sup>、任意の大型FRP構造物を高品質に成形できる特徴がある。真空含浸工法とは、強化材をプラスチックフィルム等で封入して、真空吸引した後に、液状樹脂を注入・含浸して硬化させて、FRPを成形する技術である(図-1)。この工法を鋼構造物の補修・補強に応用することが提案<sup>8)~11)</sup>され、研究開発が行われている。

そこで本研究では、この工法の適用範囲を拡大し、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の発生前の溶接継手部に接着して補修する新工法を提案するものであり、その妥当性、有用性を実験・解析により検証することを目的としたものである。さらに、既設鋼橋への実用化を視野に入れ、予防保全型の疲労対策としてCFRP接着による補強設計法を構築することを目的としたものである。

本研究で対象とした溶接接合部は、面外ガセット溶接継手であり、一般的な鋼鉄桁橋で多用されている継手形式である。継手の止端部の疲労強度向上に着目し、実験・解析により検討を行った。本研究において、参照用の無補強試験体と炭素繊維シート接着試験体（補強試験体）を用意し、①止端形状のモデル化・応力低減効果と②疲労耐久性の評価により疲労強度向上の評価を行った。

## 2. 止端形状のモデル化と応力低減効果の検討

### (1) 止端形状のモデルの作成方法および検証

止端形状が構造的な応力集中に影響を及ぼすため、デジタル一眼レフカメラ（Nikon D7200）で様々な角度から撮影された、約70枚の画像情報からモデルを生成させ（図-2）、汎用CADソフトウェア群（Autodesk Remake, Autodesk Meshmixer, Autodesk 123D design）および汎用有限要素解析プログラム（Msc. Marc2013）を用いて、要素寸法が約0.3mmの精緻な立体モデルを作成した（図-3）。なお、モデル化の精度を確認するために、キーエンス製3D形状測定機VR-3000を用いて立体的な計測を行い、FEMモデルと比較した。図-4に、止端部の軸方向断面と幅方向断面の計測結果を比較した例を示す。画像情報からのモデル化した形状は高精度の3D形状測定機による計測結果とほぼ一致することが確かめられた。

### (2) 補強方法

試験体は、鋼板（1,020×100×9mm）の両面に面外ガセット（140×100×9mm）がすみ肉溶接で接合されている。試験機に制約があるため、つかみ部分を幅75mmに設計した。なお、ホットスポット応力の算出には $0.4t \sim 1.0t$ 法（ $t$ : 板厚）を採用した。図-5に、補強範囲およびひずみゲージ位置を示す。補強試験体では、図-6に示すように、下地処理、プライマー塗布、炭素繊維（Carbon Fiber: CF）シートの仮止め、副資材の設置、真空含浸、仕上げの手順である。CFシートを23層接着させることとし、一般部の応力低減率 $\xi$ の理論値は33.8%であった。

#### a) 下地処理とプライマー塗布

下地処理には、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た。その後、アセト

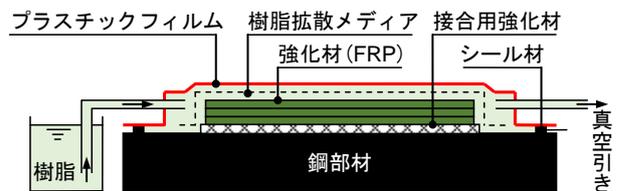


図-1 真空含浸工法による鋼部材へのCFRPの成形・接合の概念図



図-2 画像情報モデル

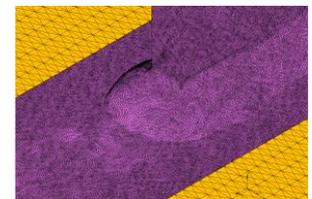
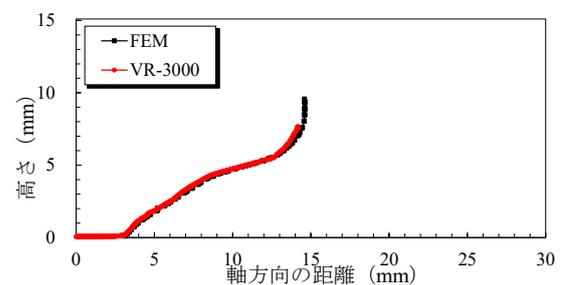
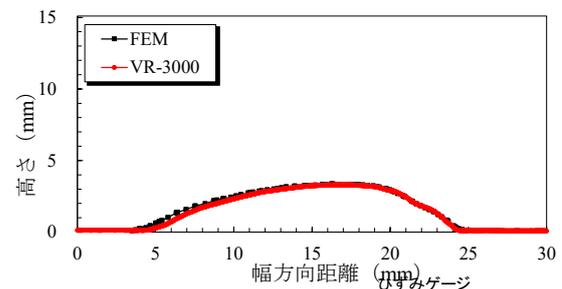


図-3 解析モデル

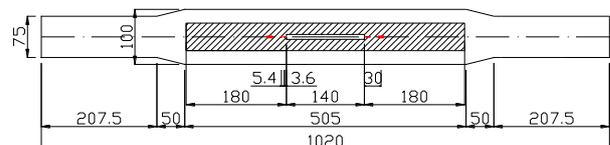


(a) 軸方向

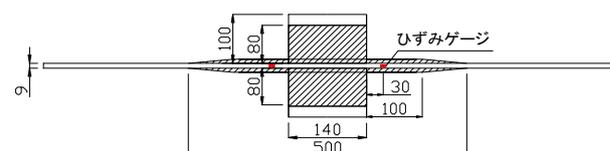


(b) 幅方向

図-4 モデル化の精度の比較



(a) 平面図



(b) 側面図

図-5 面外ガセット溶接継手と補強案（単位：mm）

ンを用いて表面を清掃し、油分や汚れのない状態とした。下地処理後の鋼材表面の錆防止と炭素繊維シートとの接着性を向上させるため、プライマー（Toray ACE

AUP40)を塗布した。プライマーの塗布は、鋼材表面に錆の発生や汚れがないように、下地処理後、速やかに行った(図-6(a))。

#### b) CFシートの設置

CFシートは一方方向材であり、試験体軸方向に設置した。電気化学作用による腐食を防止するため、初層(鋼材とCFシートの間)に1層の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。また、樹脂を含浸しやすくするために、ガラス繊維のチョップドストランドマット(CSM)を、CFシートを5層積層するごとに1層挿入した(図-6(b))。

#### c) 副資材の設置と真空含浸の状況

硬化後に資材の取り外しを容易にするため、最外層のCFシートには、ピールプライを設置した。次に、樹脂の流動性を確保するために、樹脂拡散メディアを3層設置した。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、それらをバギングフィルムで封入した(図-6(c))。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(AUP40)を吸引した。真空含浸は、片面ずつ行った。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、硬化するまで養生した(室温約20°C, 24時間)。なお、含浸接着樹脂は、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6.1~9.6dPa・sであった。真空吸引による含浸時間は、樹脂の可使時間内(約1時間)とした。

#### d) 仕上げ状態

バギングフィルム、ピールプライ等の副資材の除去後、硬化した余分な含浸接着樹脂と端部処理(テーパ状)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-6(d))。

### (3) 解析条件

解析モデルは、図-7に示すように、対称性を考慮して、長手、高さ方向に対称軸とした1/4モデルとした。表-1に、材料物性値を示す。

#### (4) 静的試験による応力集中の低減効果

引張荷重を100kNで静的引張試験を行った。わずかに長手方向の面外に初期たわみを有する試験体であるため、同断面における2つのビード止端部で得た試験結果を平均化し、それを解析と比較した。図-8に、溶接止端から軸方向への応力分布を示す。図より、補強の有無にかかわらず、ビード止端部から3.6mmと9mmの応力は実験値と解析値でほぼ一致した。また、補強効果については、ホットスポット応力が実験では28.8%の低減に対し、解

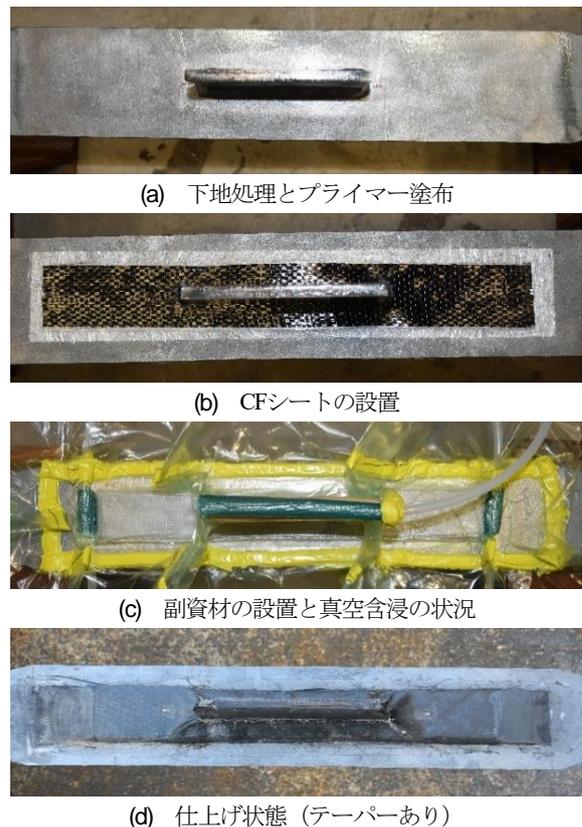


図-6 積層CFシートによる補修の状況

表-1 材料物性値

材料	鋼板 (SM400)	含浸接着樹脂 (AUP40)	CFシート (高強度タイプ)
降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	293	-	-
引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	453	332	3,400
破断伸び $\delta$ (%)	29	-	-
弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	205	2	245
厚さ $t$ (mm)	9	0.5	7.7

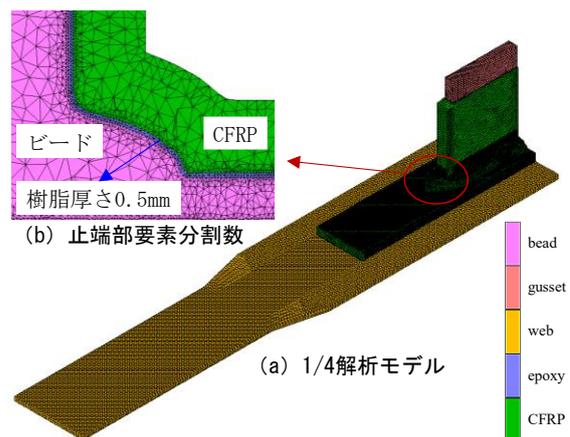


図-7 解析モデル (接着層均一厚さ0.5mm)

析では25.3%である。表-2に、ホットスポット応力の公称応力に対する応力集中係数および解析による溶接止端の応力集中係数を示す。実験および解析で算出したホットスポット応力の差異はほとんどないこと、また、溶接止端部の応力集中係数は33.9%低減し、CFシートの剛性

比に基づく応力低減率 $\delta$ とほぼ一致することがわかった。

### (5) 溶接止端部近傍のCFシートの接着状況

VaRTMによるCFシートの接着状況を確認するために、補強試験体を軸方向に切断した。図-9に、溶接止端部の接着状況と実際の接着状態を考慮した解析モデルを示す。溶接ビード止端部には、樹脂リッチ層あるいはボイド（未含浸）が部分的に生じており、CFシートが止端形状に密着していないことがわかる。そこで解析により、それらの影響を確認することとした。図-10に、溶接止端部の各接着状態における応力分布を示す。補強モデルにおいて、止端部近傍に樹脂リッチ層を有する場合、樹脂厚さ均一及び樹脂未含浸の方に対し、先端応力が約3%変化したが、それ以外の応力性状はほぼ同じであり、密着していなくても応力低減の効果は変わらないことがわかった。

## 3. 疲労耐久性の評価

### (1) 疲労試験条件

表-3に、疲労試験のシリーズと試験条件を示す。試験シリーズにおいて、公称応力範囲 $\Delta\sigma_r$ をパラメータとして、無補強、補強試験体の疲労試験を行った。2章で述べたように、理論計算により、33.8%のCFシート接着による応力低減を目標とし、23層のCFシートをVaRTMで成形接着した補強試験体を準備した。テーパ処理については、別途、検討した結果から考察する。

疲労試験機には、電気油圧サーボ式材料強度試験機（島津サーボパルサEV200kN）を使用した。鋼板の公称応力範囲は、疲労試験機の容量を考慮して、100, 120, 150, 180MPaの4ケースとした。応力比 $R$ は、全ケースで0.1とした。載荷速度 $f=10\text{Hz}$ で疲労試験を行った。荷重の波形は正弦波とし、動ひずみ測定器（キーエンス製NR-600）を用い、5/1,000秒間隔で載荷中の荷重、変位および各ひずみの値を測定した。一連の疲労試験は室温で行った。本研究では、はく離進展の計測方法は、ビーチマーク法と断線検知法（試験体中心から両側25mmの位置で設置）を導入して計測を行った。なお、各試験において、疲労試験を行う前に、3回以上の静的引張試験を行った。図-11に、静的・疲労試験のセットアップを示す。

### (2) 疲労試験の結果

表-4に、実験シリーズと疲労試験の結果を示す。表より、補強試験体において、段差の有無を問わずCFシート端部には、界面はく離（T1：層間はく離）が確認できた。そこで、はく離の発生を防止するために、CFシート端部の段差の設計を行った。また、高い応力範囲

表-2 溶接止端における応力集中係数の比較

比較項目	補強	無補強	補強/無補強
実験によるHSS	1.01	1.42	71.1%
解析によるHSS	1.04	1.39	74.8%
解析による先端応力	1.83	2.75	66.0%

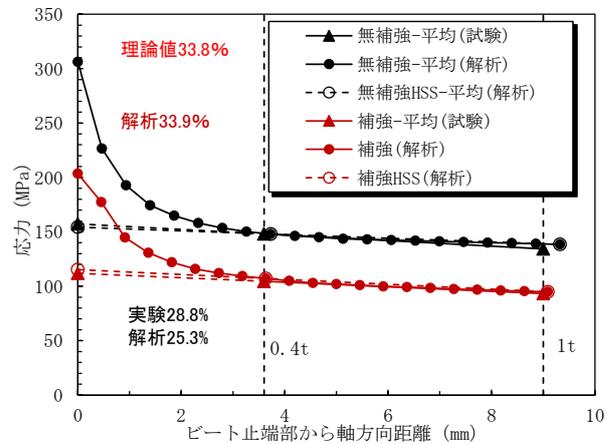


図-8 溶接止端から軸方向への応力分布

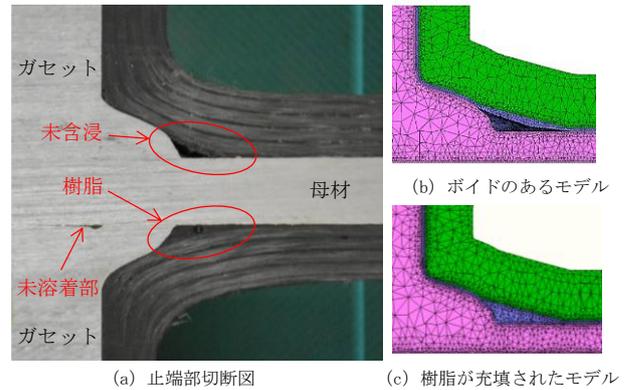


図-9 溶接止端部の接着状況とモデル化

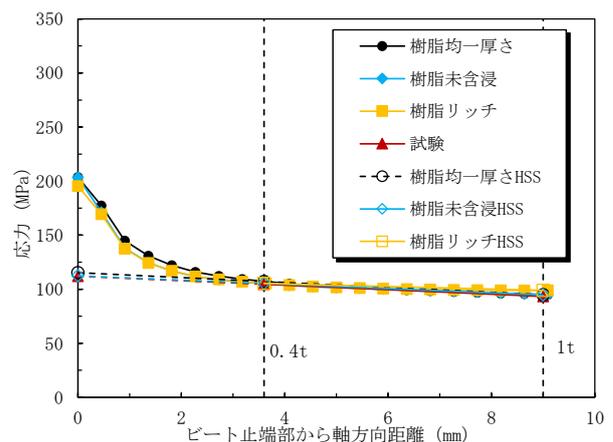


図-10 溶接止端部の各接着状態における応力分布

( $\Delta\sigma_r=150, 180\text{MPa}$ ) では、試験体の急断面変化部から破断するケースが確認された（一部、断面補強を行った）。これは、試験体の課題であり、断面の変化部の仕上げの精度を上げることで改善できる。

### (3) CFRP端部の段差の設計

テーパの設計では、接着剤の最大主応力による評価を採用し、VaRTM工法による接着接合部のはく離強度を調べ、理論計算と解析検討で端部の応力照査を行った。対象とした試験体は、鋼板の両面に鋼当て板をVaRTM工法で接着したものとした。静的引張試験の結果により、最大主応力の平均値は38.8MPaとなり、静的はく離強度の30%が疲労限という評価基準<sup>12)</sup>から、本検討の疲労限界の最大主応力を11.6MPaとした。そこで、理論計算と解析検討により、最大主応力が11.6MPa以下という条件で、段差の設計を行った。図-12、図-13に、提案した段差モデルと段差端部に生じる最大主応力（1層目の最大値：9.7MPa）の結果を示す。なお、T2は提案した段差モデルである。

### (4) 疲労試験による疲労耐久性の評価

図-14に、公称応力範囲と破断までの繰返し回数の関係を示す。無補強の試験体は黒、補強試験体は赤で示している。図より、段差がない補強試験体では、はく離が発生しているが、疲労限となり、止端部への影響が小さいと考えられる。適切なテーパを有するCFシートの接着により、シート端部からはく離は生じないことがわかった。また、CFシートを23層接着した場合、高い応力範囲の $\Delta\sigma_r=180\text{MPa}$ では、繰返し回数は、無補強で22万回、補強後で817万回となり、疲労寿命が大きく（約37倍）改善されること、 $\Delta\sigma_r=150\text{MPa}$ までは、繰返し回数1000万回までは疲労破壊しないことが確かめられた。

### (5) はく離範囲の評価

一部の補強試験体では、CFシートのはく離が生じたため、フェーズドアレイ超音波探傷装置（Zetec製TOPAZ32）を用いて、はく離の検出を試みた。図-15に、GPeC23-100におけるはく離損傷検出の一例を示す。コンタ図は、超音波エコーの波高値を示しており、ガセツ

表-3 溶接止端における応力集中係数の比較

比較項目	補強	無補強	補強/無補強
実験によるHSS	1.01	1.42	71.1%
解析によるHSS	1.04	1.39	74.8%
解析による先端応力	1.83	2.75	66.0%



(a) 無補強 (b) 補強  
図-11 静的・疲労試験のセットアップ

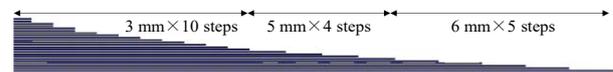


図-12 CFシートの段差のモデル化

ト部分の周辺で波高値に変化が見られることから、この領域ではく離が生じている可能性が高いことがわかった。しかしながら、CFシート端部のはく離が検出されていない。これはCFシートに段差が設けられており、CFシ

表-4 実験シリーズと疲労試験の結果

実験シリーズ	試験体 No.	積層数 n	テーパ処理	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	繰返し回数 (回)	破壊形式	備考	
無補強	GPeN-100	1	0	-	100	1,035,243	止端き裂	
	GPgN-120	8	0	-	120	813,559	止端き裂	
	GPdN-150	6	0	-	150	213,447	止端き裂	
	GPfN-180	7	0	-	180	216,722	止端き裂	断面変化部破断⇒補強
補強	GPaC-100N	2	23	なし	100	>10,000,000	界面はく離	疲労限
	GPaC-100T1	3	23	あり T1	100	>10,000,000	層間はく離	疲労限
	GPhC-120T2	9	23	あり T2	120	>10,000,000	-	疲労限
	GPaC-150T1	4	23	あり T1	150	346,506	層間はく離	No.3 再利用, 断面変化部破断
	GPhC-150T2	10	23	あり T2	150	3,604,008	-	No.9 再利用, 断面変化部破断
	GPiC-150T2	11	23	あり T2	150	>10,000,000	-	疲労限, 断面変化部破断⇒補強
	GPiC-180T2	12	23	あり T2	180	427,408	-	No.11 再利用, 断面変化部破断
	GPjC-180T2	13	23	あり T2	180	8,174,794	止端き裂	補強

ートの厚さが変化することから、評価が困難であるためであると判断された。

#### 4. まとめと今後の課題

CFシート接着による面外ガセット溶接止端部の補強について、実験的、解析的に検討した結果、次のことがいえた。

- (1) 画像情報から作成した立体解析モデルの形状の誤差は、精緻な計測結果と比べて、約2%であり、溶接止端部の解析モデルは十分な精度を有しているといえる。
- (2) CFシート接着による補強では、解析と試験の比較より、ホットスポット応力の値はほぼ一致すること、止端部の先端応力は約33%低減し、十分な効果があることがわかった。
- (3) CFシートは止端部に十分に密着していないが、それを考慮した解析モデルの結果から、止端部に接着状態が応力低減に及ぼす影響は小さいことが確かめられた。
- (4) 適切な段差を設けた場合、CFシート23層で、公称応力範囲150MPa、繰返し回数1000万回までは、接着層の端部はく離、止端からの疲労き裂が生じないことが確かめられた。
- (5) テーパー形状が適切でないとはく離が生じたが、はく離の有無にかかわらず、応力低減の補強効果は同等であること、また、補強試験体では、着目点以外の疲労破壊となり、補強された溶接止端部はA等級以上に相当することがわかった。

以上のことから、面外ガセット溶接継手部に、真空含浸によりCFシートを積層接着すれば、疲労耐久性を大幅に向上できることが確かめられた。その効果は、CFシートの軸剛性に依存し、止端部の応力低減によることが示された。したがって、応力範囲によっては、疲労限の対策になり得るといえ、有効な補強方法であるといえた。今後、疲労試験データの蓄積と、FEM解析による定量的な評価を行うこと、また、様々なディテールに対する疲労試験を実施することで、疲労限となるための補強の設計法を構築する予定である。

**謝辞：**本研究の一部は、JSPS科研費 JP17K06538の助成を受けて実施された。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会編：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 05，2012.6

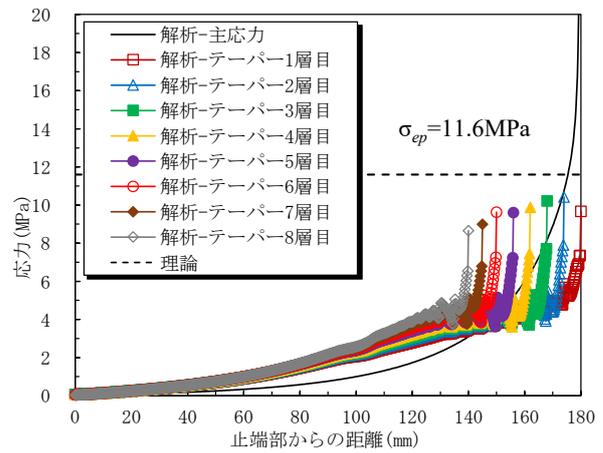


図-13 段差モデルにおける最大応力分布図 ( $\Delta\sigma_r=150\text{MPa}$ )

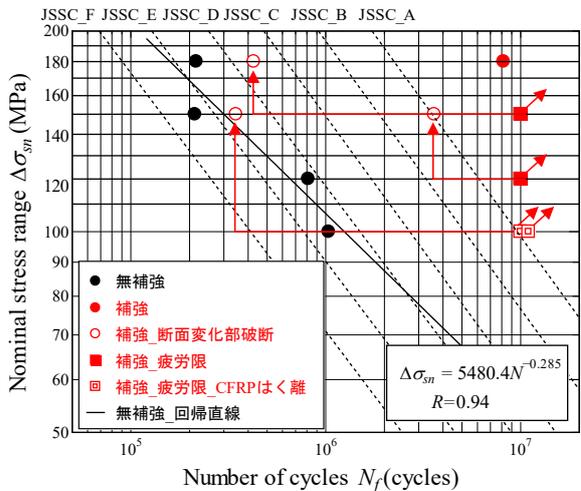


図-14 疲労強度の評価

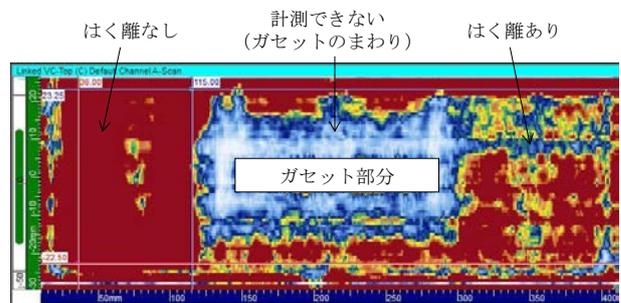


図-15 超音波装置によるはく離損傷検出の一例 (GPc23-100)

- 2) 土木学会複合構造委員会編：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 09，2013.11
- 3) 土木学会鋼構造委員会編：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造シリーズ 22，2013.12
- 4) Chen, T., Yu, Q. Q., Gu, X. L. and Zhao, X. L.: 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, Issue 01, pp.179-194, 2012.
- 5) Chen, T., Yu, Q. Q., Gu, X. L. and Zhao, X. L.: 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.

- 6) Alemdar, F., Matamoros, A., Bennett, C., Gonzalez, R. B. and Rolfe, S. T.: Use of CFRP Overlays to Strengthen Welded Connections under Fatigue Loading, *ASCE, Journal of Bridge Engineering*, 17 (3), pp.420-431, 2012.
- 7) Takeda, F., Nishiyama, S., Hayashi, K., Komori, Y., Suga, Y. and Asahara, N.: Research in the application of the VaRTM technique to the fabrication of primary aircraft composite structures, *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review*, Vol.42 No.5, 2005
- 8) 近藤諒翼, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大: VaRTM 成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する実験的検討, 土木学会, 第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, pp.192-201, 2015.11
- 9) 小林洗貴, 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, 2017.5
- 10) 小林洗貴, 近藤諒翼, タイウイスル, 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.II\_44-II\_55, 2018.5
- 11) 松山晃大, 佐藤潤, タイウイスル, 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.II\_67-II\_80, 2018.5
- 12) タイウイスル, 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, 2018.5

## IMPROVEMENT OF FATIGUE DURABILITY IN WELDED GUSSET JOINTS BY CARBON FIBER SHEETS USING VARTM TECHNIQUE

Visal THAY, Takumi OZAWA, Chang TAN, Hitoshi NAKAMURA and Takahiro MATSUI

Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) as a composite fabricating technique can be used to apply carbon fiber (CF) sheets on cracked steel structures. This paper deals with the fatigue durability of typical welded gusset joints in steel bridges strengthened by externally bonded CF sheets using VaRTM technique. The strengthened operation work have been proven to be very efficient and convenient even on complex shapes of structures due to the flexibility of this method. Perfectly close contact particularly between weld beads and the CF sheets provides a great advantage on reduction of the high stress concentration which is usually occurred at the fillet weld toe at the end of gusset plate. The reduction of stress concentration at weld toe was analytically investigated, where the 3D FEM models were simulated from a number of image data taken from actual experimental specimens by digital camera. The target specimens of welded gusset plates were fabricated and subjected to cyclic load. The fatigue tests of two types of specimens, non-strengthened and strengthened specimen using VaRTM technique in the parameters of number of layers of CF sheets, have been conducted and strengthened effects have been evaluated under applied stress ranges experimentally. The result shows that the fatigue durability of welded gusset joints strengthened by CF sheets using VaRTM technique can be remarkably improved.