

炭素繊維シートの真空含浸による非荷重伝達型十字溶接継手の補強について

首都大学東京大学院 学生会員 ○小沢 拓弥, 学生会員 タイ ウィサル, 正会員 中村 一史
東レ 正会員 松井 孝洋

1. 緒言

近年、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の一つとして、軽量で高強度かつ高耐食性を有する炭素繊維シート（CFシートと称す）を用いた補修・補強工法が注目されている。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（VaRTM と称す）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。そこで、本研究では、荷重非伝達型十字溶接継手を対象に、VaRTM 施工により CF シートを積層接着して、静的な引張りを受ける時の溶接止端部の応力集中を把握する。そして、画像情報から試験体の溶接形状を再現した FEM モデルにて実験の妥当性を検証する。

2. 試験体の設計と炭素繊維シートの定着長の検討

本研究で、使用した試験体の概要を図-2 に示す。試験体を作製するにあたり、CF シートを 10 層接着した場合に必要な定着長を検討した。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が、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 の長さを定着長とされている。文献 1)より、CFRP の定着長 l を算定すると、表-1 に示す材料物性値から、CF シートを 10 層接着した場合、定着長は 43mm となった。

3. 真空含浸工法による補強方法と試験条件

VaRTM による施工手順は、図-3 に示すように、下地処理、プライマー塗布、CF シートと副資材の設置、真空含浸および仕上げの順に行った。そして、図-3 に示す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、100MPa 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、5mm 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。なお、各試験体に対して静的引張試験は、5 回ずつ行い平均値を比較する。表-2 に、実験に用いた鋼板の物性値を示す。

4. 試験体の止端形状を再現した FEM モデル

汎用有限要素解析プログラム Msc Marc 2018 により、試験体の溶接

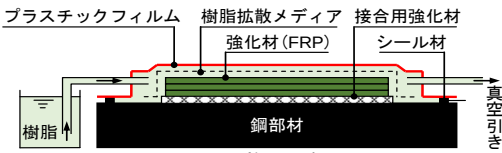


図-1 VaRTM 施工の概要図

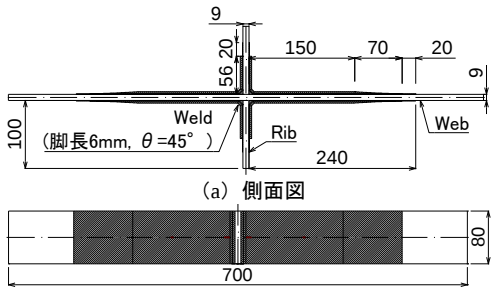
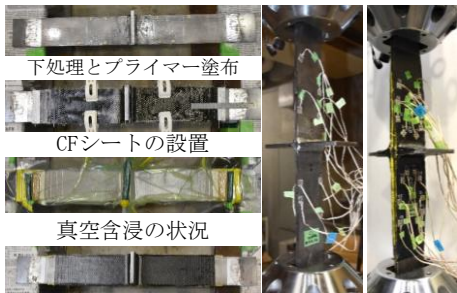


図-2 試験体の概要

表-1 材料物性値

材料	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	0.33
	積層数	n	-	10
接着剤 (AUP40)	断面積	A_c	mm ²	3.34
	縦弾性係数	G_e	MPa	1,234
	幅	b_e	mm	80
	厚さ	t_e	mm	0.4
チョップド ストランド マット (CSM)	収束度合い	η	-	1.01
	縦弾性係数	-	MPa	18,750
	幅	-	mm	80
	厚さ	-	mm	0.143
	積層数	-	-	1



(a) VaRTM による補強 (b) セットアップ
図-3 CF シートの接着手順

表-2 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

キーワード キーワード 十字溶接継手, 応力集中, 真空含浸工法, 炭素繊維シート, 接着接合
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 大学院 TEL.042-677-1111 内線(4564)

止端部を再現した FEM モデルにて実験値と比較を行うこととした。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-4 に示す 2 次元 FEM モデルを生成した。なお、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²⁾。ここで、止端部の要素寸法は約 0.01mm であり、止端から離れるにしたがって要素寸法が 0.2mm となるようにメッシュ分割した。また、CF シートのモデル化には、接着剤とチョップドストランド（ランダムに配置した短ガラス繊維、CSM と称す）を考慮しており、各層の厚さは、CSM 接着層で 0.4mm、CSM で 0.143mm、CF シートおよび CF シート接着層で 0.167mm としている。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 100MPa を載荷する。

5. 溶接止端部の応力集中係数の実験結果と FEM 結果の比較

図-5 に、FEM 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. と称す）の応力分布と、補強モデル（FEM-Re. と称す）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-6 に、実験と FEM 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-3 に、実験と FEM 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。FEM 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 $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲の値の移動平均としている。はじめ

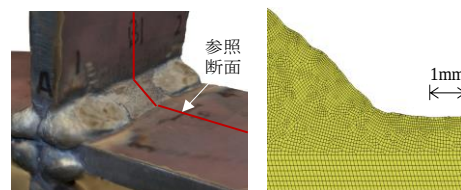
に、表-3 より、止端部の影響を受けない 86mm の位置では、文献 1) で検討されている応力低減係数 $\xi_0 = 0.693$ が実験と FEM 値でほぼ一致することから、CF シート積層による補強効果が理論通りであることが確認できる。次に、図-6、表-3 より、無補強試験体の実験（EXP-Un. と称す）と FEM 値の応力の差異は、1mm の位置で 1.41%、5mm の位置で 5.20%、86mm の位置で 0.33% とほぼ一致した。補強試験体の実験（EXP-Re. と称す）と FEM 値の応力の差異は、1mm の位置で 5.06%、5mm の位置で 11.58%、86mm の位置で 2.13% であり、5mm の位置を除いてほぼ一致した。表-3 より、溶接止端部の応力低減係数は、1mm の位置で 6.39%、5mm の位置で 6.07% であり、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。

6. 結言

本研究では、VaRTM 工法による 10 層の CF シートを荷重非伝達型十字溶接継手に接着して補強し、静的な引張りを受ける時の溶接止端部の応力集中を実験と FEM により検討した。その結果、CF シートを 10 層積層した補強試験体と、止端部形状を模擬した FEM モデルの応力低減係数を比較すると、止端から 1mm、5mm の位置では約 6% の差異があり、ほぼ一致した。そして、86mm の位置では理論値の応力低減係数 ξ_0 と実験値および FEM 値とでほぼ一致することから、補強効果が理論通りであった。

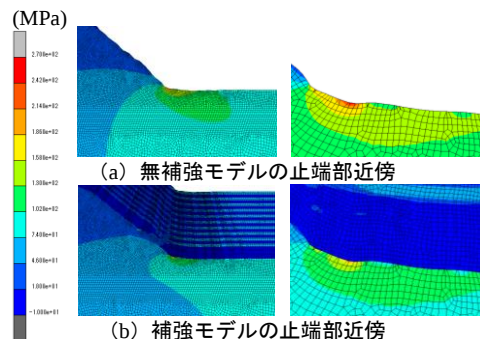
参考文献

- 1) 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
- 2) タイウィサル, 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, 第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.103-109, 2018.11



(a) 画像情報モデル (b) 2次元 FEM モデル

図-4 試験体の溶接形状を再現したモデル



(a) 無補強モデルの止端部近傍 (b) 補強モデルの止端部近傍

図-5 荷重軸方向の応力 σ_x のコンタ図

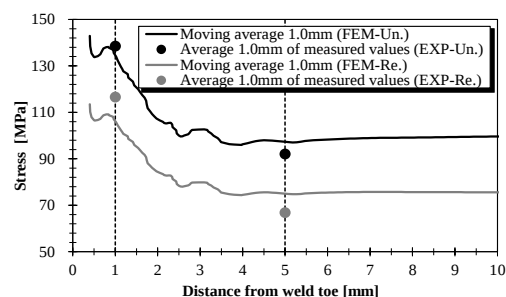


図-6 溶接止端から軸方向への応力分布

表-3 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.)		応力低減係数		
	EXP	FEM	EXP	FEM	EXP	FEM	差異 [%]
1	1.39	1.41	1.16	1.11	0.841	0.788	6.39
5	0.92	0.97	0.67	0.75	0.726	0.770	6.07
86	1.00	1.00	0.69	0.71	0.692	0.709	2.46