炭素繊維シートの真空含浸接着による面外ガセット溶接継手の疲労強度向上に関する研究

首都大学東京	学生会員	○タイ	ウィ	サル
首都大学東京	学生会員		謂	11 暢
首都大学東京	正会員	F	中村	一史
東レ株式会社	正会員	木	公井	孝洋

1. はじめに

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(以下,VaRTM 工法)は,任意の大型繊維強化プラスチック(FRP)構造物を高品質に成形できる特徴がある.VaRTM 工法とは,

炭素繊維シート(以下, CF シート)に代表される強化材をプラスチックフィルム
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¹⁾され,研究開発が行われている.
本研究は,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,
VaRTM 工法により CF シートを疲労き裂の発生前の溶接継手部に接着
して補強する新工法を提案することを目的としたものである.

2. 試験片と補強方法

対象となる試験体は、鋼鈑桁橋で典型的な面外ガセット溶接継手であ る.本研究において、参照用の無補強試験体とCFシート接着試験体(補 強試験体)を用意し、疲労強度向上の評価を行った.図-2に、面外ガ セット溶接継手試験体の寸法とVaRTM工法によりCFシートの補強案 を示す.鋼板(1020×100×9mm)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.試験機の制限があるため、つか み部分を幅75mmに設計した.表-1に、鋼材とCFシートの材料特性を 示す.図-3(a)に、VaRTM工法によるCFシート補強の施工状況を示す. VaRTM工法によるCFRP接着の手順は、まず、接着範囲を含むVaRTM 資材を配置する範囲の下地処理を行う.次に、プライマーを塗布し、硬 化後にCFシート、VaRTM資材を仮固定する.さらに、真空ポンプを 用いて、真空含浸により、CFシートに含浸接着樹脂(Toray ACE AUP40) を含浸させる.真空ポンプを停止後、硬化するまで養生する.

3. 疲労試験条件

図-3(b)に、疲労試験のセットアップを示す.表-2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、公称応力範囲ムosn 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.理論計 算により、33%の CF シート接着による応力低減を選択し、その時の CF シートの積層数として、23 層の補強試験体を準備した.テーパー処理 については、別の評価結果から考察する.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=10Hz で疲労試験を行った.

プラスチックフィルム
樹脂拡散メディア
接合用強化材

強化材(FRP)
シール材

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・
・

・

図-1 真空含浸工法による成形・接合の概念図



図-2 面外ガセット溶接継手と補強案

表-1 材料特性

材料	鋼材①	鋼材②	CF シート (中強度タイプ)
降伏強度 σ _y (MPa)	293	285	-
引張強度 σ _{tu} (MPa)	453	443	3400
破断伸び δ(%)	29	29	-
弹性係数 E(GPa)	205	206	245



図-3 VaRTM 工法の施工と試験セットアップ

表-2 疲労試験のシリーズと試験条件

討除休	テーパー	公称応力範囲	応力比	載荷速度	試験
叶说大 144	処理	$\Delta \sigma_{sn}$ (MPa)	(Pa) R		体数
無補強	無補強 – 100, 120, 150, 180			10	4
補強	なし	100	0.1	10	1
		100→150		10	3
	あり	120→150	0.1		
		150→180			

キーワード 接着接合,面外ガセット溶接継手,疲労耐久性,VaRTM 技術,積層 CF シート補強

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: 042-677-2783 E-mail: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

6 mm×5 steps

試驗	食シリーズ	試験 No.	CF シート数	テーパー処理	$\Delta \sigma_{sn}$ (MPa)	繰り返し回数(回)	破壞形式	備考
無補強	GPcN-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⇒断面補強
補強	GPeC-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⇒断面補強
	GPiC-180T2	12	23	あり T2	180	427,408	_	No.11 再利用,断面変化部破断

表-3 実験シリーズと疲労試験の結果

4. 疲労試験結果とテーパーの設計

表-3に、試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 ($\Delta \sigma_{sn}=150$, 180MPa) では、試験体の急断面変化部から破断する ケースが確認できた(一部,断面補強を行った).この課題に関して は、急断面変化部の仕上げを再検討する必要がある.テーパーの設 計の検討では、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 部の設計を行った.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 2から、本検討の疲労限界度の最大主応力を 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-4, 図-5 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.

5. 疲労耐久性

図-6に、公称応力範囲と破断までの繰り返し回数の関係を示す. 図中には、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、適切な段差を設けていない補強試験体(T1)では、はく離が 発生しているが、はく離が生じても繰り返し回数は増加しているこ



3 mm×10 steps 5 mm×4 steps

図-6 疲労強度の評価

とがわかる.はく離は端部から徐々に進展するため、止端部には影響が小さいことが考えられる.適切な段差(T2) を有する CF シートの接着によれば、シート端部からのはく離は生じないこと、また、CF シートを 23 層接着した 場合、高い応力範囲(*Δσsn* =150MPa)までは、繰り返し回数 1000 万回までは疲労破壊しないことがわかった.

6. まとめ

以上のことから,提案した工法は,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,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. 参考文献

- 1) 小林洸貴,近藤諒翼,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 部材による鋼桁端 部の補修・補強に関する検討,土木学会,第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集,pp.63-1-63-8,2017.11
- 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、 第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, pp.61-1-61-8, 2017.11