

CFRP 接着接合部の曲げ疲労特性に関する実験的検討

東京都立大学大学院 学生会員 ○高橋京祐, 正会員 中村一史
宇都宮大学 正会員 タイウィサル コニシ 正会員 堀井久一

1. はじめに

当て板接着による補修・補強では、はく離に対する疲労耐久性の評価が設計上の課題であり、疲労設計法の確立が急務となっている．本研究では、板曲げ疲労試験を行うことで、CFRP 接着接合部の疲労耐久性を評価するとともに、既往の研究¹⁾²⁾と比較することで、当て板の材料・作用力によらず、統一な評価方法の確立を目指して、実験的な検討を行った．

2. 実験の概要

作用側の応力範囲は、静的荷重によるはく離時の主応力 σ_{pe_db} に対する疲労試験時の主応力範囲 $\Delta\sigma_{pe}$ の比²⁾で整理するため、静的載荷試験と疲労試験の両方を行った．試験体は、鋼板（SM490Y）に当て板となる CFRP（中弾性タイプの炭素繊維シート 40 層）を真空含浸（VaRTM）により接着して、作製した．含浸接着樹脂には、常温硬化型二液性エポキシ樹脂（AUP40T1）を使用した．図-1、表-1 に、試験体の寸法、材料物性値をそれぞれ示す．なお、接着厚さは、計測が困難であったため、含浸接着樹脂層とガラス繊維のチョップドストランドマット（CSM）層を接着層とみなし、炭素繊維シートの設計厚さ 0.217mm、繊維体積含有率 50%、CSM の設計厚さ 0.143mmであることを考慮して、0.36mmとした．CFRP の厚さは平均値で 16.9mm であり、既往の研究で対象とした鋼当て板（16mm）とほぼ同じ寸法・剛性とした．また、図-2 に示すように、CFRP 端部は切削加工を行った．

静的試験は、精密万能試験機（容量 100kN）を用いて、変位制御（3mm/min）にて、はく離が 30mm 進展するまで載荷を行った．
疲労試験は、振動疲労試験機を用いて行った．図-3 に、セットアップ図を示す．当て板端部に生じる主応力範囲は、試験体の曲げひずみを計測することで算出した．試験パラメータは、当て板端部に生じる主応力範囲がはく離時の主応力の 30、50、70%となるように設定した．疲労試験の条件は、室温（14～18℃）、応力比 $R=0.1$ 、載荷速度 15Hz とし、2/1000 秒間隔で載荷中のひずみを動ひずみ測定装置（キーエンス社製、NR-600）で計測した．

はく離の評価方法として、当て板側面の端部から 5mm 位置に当て板、母材間の接着剤を跨いでひずみゲージ（ゲージ長 3mm）を設置し、接着剤に生じる垂直ひずみを計測してはく離を定義した．また、端部から 15、30、50、70mm の位置にひずみゲージを設置することで、はく離の進展を観測した．

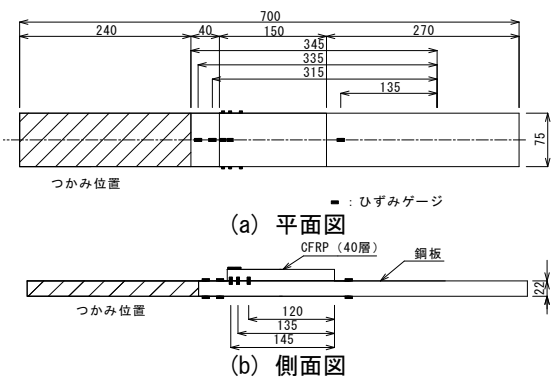


図-1 試験体の寸法

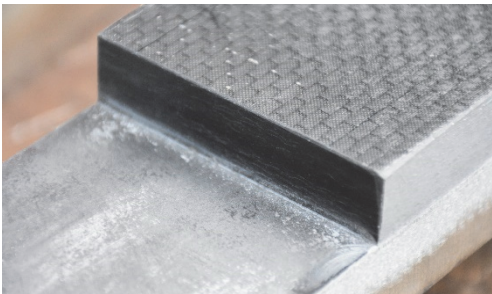


図-2 CFRP が接着された端部の機械切削の状況

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	厚さ (mm)
炭素繊維シート	440,000	-	2400	0.217
母材 (SM490Y)	209.8	393.6	541.1	22
接着剤 (AUP40T)	3430	-	12	-

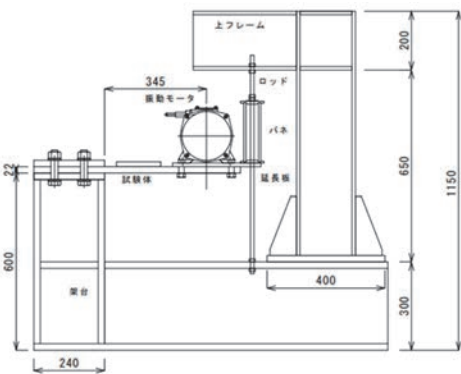


図-3 疲労試験のセットアップ図

表-2 静的試験の結果

試験体 番号	はく離時の主応力 (MPa)		
	5mm 位置	15mm 位置	30mm 位置
1	102.6	136.7	160.4
2	96.6	125.0	147.4
3	102.0	135.2	173.5
平均値	100.4	132.3	160.4

キーワード CFRP 接着、曲げ、はく離、疲労、補修
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL.042-677-1111 内線（4564）

3. 試験結果と考察

静的試験結果の一部として、表-2 に、各位置におけるはく離時の主応力を示す。試験結果から、はく離時の主応力を 100.4MPa とした。また、進展寿命はややばらつきが見られるものの試験体ごとのばらつきが少ないことがわかる。なお、図-4 のように破壊形式は CSM 層での破壊（凝集破壊）であった。

疲労試験結果の一部として、図-5 に、相対変位と繰返し回数の関係を示す。なお、相対変位は、接着剤の厚さ方向に生じるひずみから変位に換算して算出した²⁾。図より、繰返し回数の増加とともにひずみ振幅が上昇すること、また、ひずみの値が増加し続けると、急上昇し計測不能になることがわかる。このひずみの急変部ではく離が生じることを、別途、マイクロスコープによる観察から確認している。本検討では、ひずみの値が急上昇した時の繰返し回数をその位置ではく離発生時と定義した。また、端部から 30mm の位置では、ひずみの上昇が、不規則になることがわかる。これは、ガラス繊維がランダムに配置されている CSM 層の影響と考えられた。表-3 に、各はく離長さに対する繰返し回数を示す。なお、図を略したが、疲労試験における接着接合部の破壊形式は、すべての試験体で凝集破壊であった。

図-6 に、静的試験時の主応力 σ_{pe_db} に対する疲労試験時の主応力範囲 $\Delta\sigma_{pe}$ の比 $(\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db})$ とはく離長さ 5mm までの繰返し回数 $N_{p0.5}$ の関係をそれぞれ示す。図中には、引張载荷の疲労試験の事例¹⁾と曲げ载荷の疲労試験の事例²⁾を併記し、比較を行った。

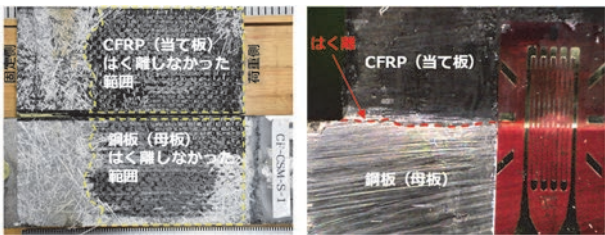
図より、試験体数は少ないものの、はく離長さが 5mm までの疲労寿命において、既往の疲労試験のデータと同じ傾向であることがわかる。さらに、既往の疲労試験結果の 95%信頼区間に、実施した疲労試験結果のデータが収まっていることから、CFRP の接着接合部においても、文献²⁾で提案された疲労強度の評価式で、はく離に対する疲労寿命を評価できることが確かめられた。なお、曲げ疲労試験では、試験体 No.3 では、1000 万回の繰返し荷重を与えても初期はく離が生じなかったため、疲労限とした。また、試験体 No.4 では、はく離長さ 30mm 以上で、はく離の進展が遅くなったことから 1000 万回で疲労試験を停止した。

4. まとめ

本研究では、CFRP 接着接合部の疲労耐久性を評価することを目的として、曲げ疲労試験を行い、その結果を S-N 線図で整理した。その結果、試験体数は少ないものの、従来の疲労試験と同様の傾向が見られた。また、既往の疲労試験と比較を行ったところ、評価式の範囲に収まることが確かめられた。このことから、当て板、接着剤の種類・作用力によらず、精度よく評価することができる可能性が示された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 高橋京祐, 中村一史, タイウィサル, 堀井久一: 当て板と鋼板の接着接合部の疲労強度とはく離進展特性に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (複合構造論文集), 2023. (印刷中)



(a) はく離面（試験後） (b) 側面
図-4 静的载荷試験におけるはく離の状況 (No. 1)

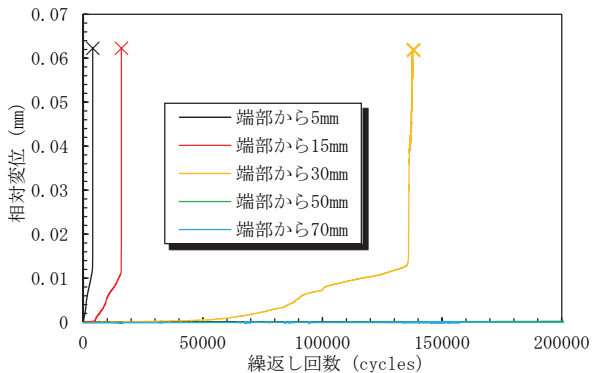


図-5 ひずみ振幅と繰返し回数の関係（試験体 No. 4）

表-3 各はく離長さに対する繰返し回数 (cycles)							
No.	$\Delta\sigma_{pe}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db}$	繰返し回数 (cycles)				
			5mm	15mm	30mm	50mm	70mm
1	65.5	0.65	30674	-	-	-	-
3	30.5	0.30	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
4	46.7	0.47	3941	15904	131046	10000000	10000000

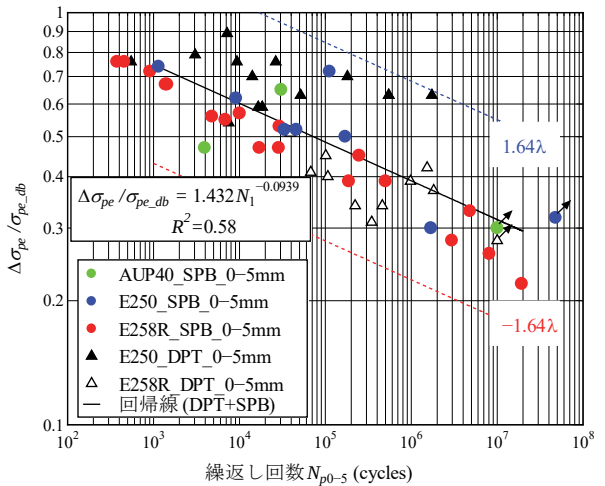


図-6 はく離長さ 5mm まで（初期はく離）の疲労寿命