

(22) VaRTMで当て板が接着された鋼板の接着接合部の曲げ疲労強度に関する実験的検討

高橋 京祐¹・中村 一史²・タイ ウィサル³・松井 孝洋⁴・堀井 久一⁵

¹学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 博士前期課程2年
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: matano-atsushi@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 准教授
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 宇都宮大学 地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 助教
(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)

E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

⁴正会員 東レ株式会社 ACM 技術部 (〒103-8666 東京都日本橋室町 2-1-1)

Ttakahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁵正会員 コニシ株式会社 大阪研究所 研究開発第4部 (〒538-0053 大阪市鶴見区鶴見 4-7-9)

E-mail: horii-hisakazu@bond.co.jp

補修方法における当て板接着工法では、繰返し荷重を受ける際のはく離疲労強度のデータはまだ少なく、疲労設計法が確立されていない。本研究では、真空含浸工法（VaRTM）を応用して、鋼板またはCFRPを鋼板に接着した試験体を作製し、それらの試験体に繰返し荷重を加え、はく離とその進展を計測した。その結果、静的試験時のはく離時の主応力に対する疲労試験時の主応力範囲の比で整理することで、*S-N* 線図を作成し、それらから曲げ疲労特性を精度よく評価することができた。また、過去に実施された曲げ載荷および引張載荷による実験と比較を行った結果、類似の傾向が見られたことから、接着剤、作用力および接着方法によらない評価ができる可能性が示唆された。

Key Words: *patching plate, VaRTM, debonding, fatigue, bending action*

1. はじめに

経年劣化による鋼部材の損傷への対策が進められる中で、損傷部分にCFRPや鋼板を接着接合する当て板補修が注目されている^{1)~4)}。接着接合の利点として、補修対象の長寿命化やボルト等の接合部材を用いないことから、接合部の応力集中の回避や軽量化などが挙げられる³⁾⁵⁾。一方、欠点として、湿温度変化の影響を受けて劣化すること、脆性的に破壊しやすいこと、接着接合部ではく離が発生することが挙げられ³⁾、特にはく離の適切な評価が課題となっている。そのような背景から、国内外でははく離に関する多くの研究事例があり^{6)~14)}、海外では接着剤に生じる主応力を用いたガイドライン^{15)~17)}や、土木学会では接着強度に関する試験・評価方法⁴⁾が示されるなど、はく離に関する実用的な評価が進んでいる。

一方、繰返し荷重を受ける際のはく離特性に関する研究データが少なく、接着接合部の疲労設計法はまだ確立されていない。

そこで過年度には、接着接合部の曲げ疲労試験を行い、疲労試験の結果を静的試験のはく離時の主応力に対する主応力範囲の比と繰返し回数で整理することで、疲労はく離強度の評価式を示した¹⁴⁾。この検討では引張試験との事例¹¹⁾と比較を行うことで、2つの接着剤・作用力に関しては統一的に評価できることが示された。さらに、接着接合には、種々の接着剤・接着方法が用いられることから、それらへの適用性を検証するとともに、より多くのデータの蓄積が必要である。

そこで本研究では、大掛かりな設備を必要としないこと、一度に多積層の炭素繊維シートを成形・接着できること、立体成形が容易であることなどの特徴を有する、

真空含浸工法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM) を応用した接合方法に着目し, それによって接着接合した試験体を対象に検討を行った. 具体的には, VaRTM を応用して当て板 (CFRP 板, 鋼板) を接着接合した試験体を用いて板曲げ疲労試験を行うことで, 接着接合部の曲げ疲労強度を評価すること, 接着接合部の疲労耐久性やはく離の進展寿命を明らかにすること, さらに, 過去の研究事例と比較し, 当て板, 接着剤, 接合方法に依存せず, 統一的な評価ができるかどうかを検討することを目的とした.

2. 接着接合部の評価方法と試験片の設計

(1) 当て板端部の接着層に生じる主応力とはく離荷重

母材に力が加えられると当て板端部の接着剤には, 垂直応力とせん断応力が発生し, 一定の値を超えるとはく離が発生する. また, 文献18)の検討事例では, 主応力が一定値を超えることではく離が発生することが確かめられている. よって, 本研究では, 主応力を用いて, 試験片の設計, 及び疲労強度の評価を行うこととした. 主応力 σ_{pe} は, 次式より算出される¹⁸⁾.

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (1)$$

ここに, 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.

さらに, 曲げモーメントを受ける場合, 当て板端部における接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は, 文献19)の評価式によって計算される値を用いる.

(2) 試験片と材料特性

当て板と鋼板の接着接合部における疲労耐久性を検討するために, 図-1に示すような, 鋼板 (母材, 700×75×22mm) の片面に, 鋼当て板 (150×75×16mm) またはCFシート (150×75×0.217mm, 40層) をVaRTM成形によって接着したものを試験片とした. また, 含浸用接着樹脂には, エポキシ樹脂 (AUP40T1) を用いた.

試験片の設計にあたっては, 鋼材の弾性範囲内ではく離が発生すること, 4章で検討する疲労耐久性では, 疲労試験に, 偏心モータの振動を利用するため, 疲労試験の条件である15Hzで共振しないように試験片の設計を行った. また, 当て板の長さは, 荷重測定用のひずみゲージを設置すること, 試験装置の制限から決定される最大長さを考慮して, 150mmとした. 表-1に, 鋼板, 接着剤の材料物性値を示す.

(3) はく離とその進展挙動の評価方法

はく離進展の観測方法には, 既往の研究¹⁴⁾を参考に, 当て板側面にひずみゲージを設置することで, はく離進展の観測を行った. はく離の判定方法は, 計測されたひずみの値が計測限界 (20000×10^{-6}) に達したときの荷重をはく離荷重とし, 5mm位置でのはく離を初期はく離 (はく離の発生) と定義した. なお, 接着厚さは, 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) 層とした. これは, 当て板の材料がCFRPの場合, 接着層の計測が困難であったためであり, 炭素繊維シート (CSM) 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, 接着厚さは0.36mmとした.

ひずみの計測には, 一軸ひずみゲージ (ゲージ長3mm) を用いた. 0.4mmの接着層を跨いで垂直にひずみゲージを設置し, 接着剤に生じるひずみに接着厚さを乗じることによって相対変位とした¹⁴⁾.

3. 静的試験によるはく離荷重の検討

(1) 実験シリーズ

表-2に, 実験シリーズを示す. 平鋼板 (母材, 厚さ

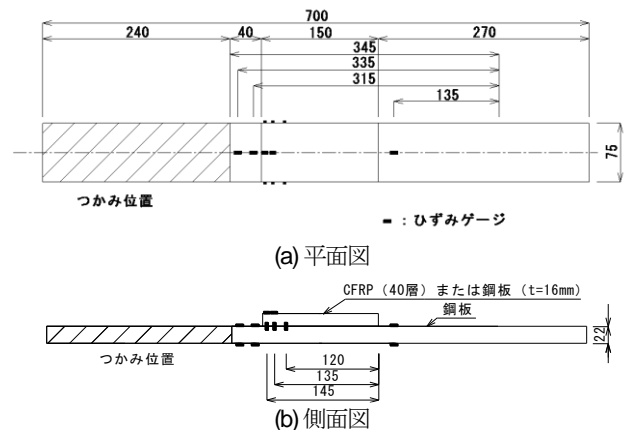


図-1 試験片図とひずみゲージ位置

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 (N/mm ²)	厚さ (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
当て板 (SM490Y)	209,800	16	433.6	550.1
母材 (SM490Y)	209,800	22	393.6	541.1
接着剤 (AUP40T1)	3,430	-	-	12
炭素繊維シート	440,000	0.217	-	2,400

表-2 実験シリーズ

試験片名	当て板	鋼当て板の厚さ t_p (mm)	接着剤の厚さ t_e (mm)	試験片数
CFRP	CFRP	16	0.4	3
Steel	SM490Y	16	0.4	3

22mm) に、厚さ16mmの鋼当て板または、CFシート40層をVaRTMを応用し、含浸接着樹脂を用いて接着した試験片（各3体）を用意した。試験片図とひずみゲージの設置位置は、図-1に示した通りである。

(2) VaRTMによる試験片の作製と実験方法

図-2に、VaRTMによるCFRP接着の概念図を示す。鋼材の接着面の素地調整は、ブラスト面形成動力工具（ブリストルブラスター）を用いて1種ケレン相当の表面処理を実施した。アセトンによる脱脂後、接着性を向上させるためプライマー（E258R）を塗布した。その後、さらにアセトンによる脱脂を実施し、母材の上にガラス繊維チョップドストランドマット（CSM）と当て板（鋼板またはCFシート）を設置した。その上にピールブライとメディアを設置後、バギングフィルムとシーラントテープを用いて密閉を行った。密閉後は真空ポンプを用いて、含浸用接着樹脂（AUP40T1）の吸引を行った。樹脂の含浸の完了後、樹脂を完全に硬化させるため、養生（40°C、24時間）を行った。図-3に、養生の状況を示す。

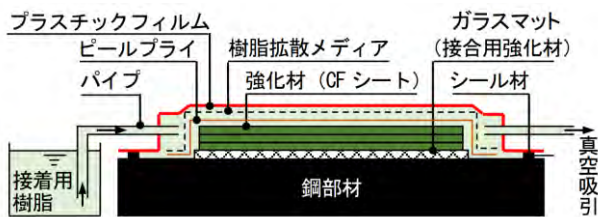


図-2 VaRTMによるCFRP接着の概念図

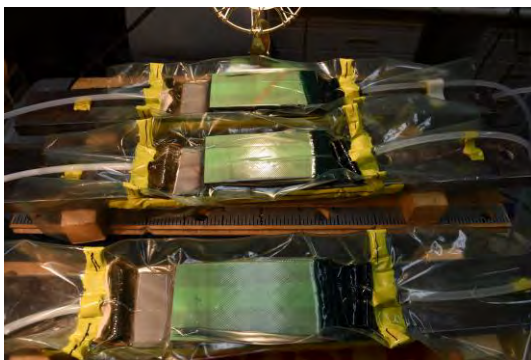


図-3 含浸後の養生の状況

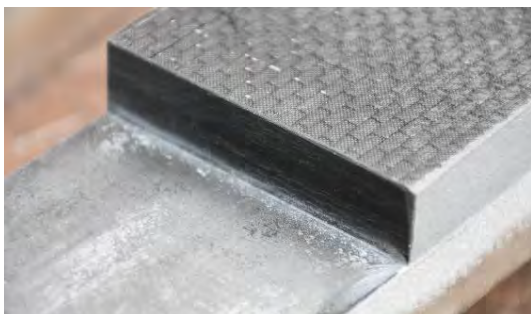


図-4 CFRPが接着された端部の機械切削の状況

養生後は、バギングフィルムやメディア等の副資材を除去した。また、余分な接着剤をベルトサンダー、ディスクグラインダーを用いて除去し、仕上げを行った。また、CFRPの当て板の場合、あらかじめ大きめのCFシートで成形を行って、適切な寸法とするために、機械切削による仕上げを行った。図-4に、仕上げ後の状況を示す。

図-5、図-6に、試験片のセットアップ図、静的試験の状況を示す。曲げ試験には、精密万能試験機（島津製作所製 AutoGraph AG-100）を用いて、変位制御（載荷速度：3mm/min）により載荷を行った。試験装置から出力される、荷重、変位、試験片に設置したひずみを、静ひずみ測定装置（東京測器研究所製、TDS-540）を用いて、1秒間隔で計測を行った。また、はく離の挙動を捉えて、ひずみゲージによるはく離進展の評価との整合性を確認するため、顕微鏡（サンコーDino-Lite Premier2 S Polarizer：倍率 200 倍）を用いて、接着端部の静止画を1秒間隔で撮影した。

(3) 接着接合部の静的強度の評価

図-7に、当て板側面に設置されたひずみゲージ（端部から5mmの位置）によって計測されたひずみから換算した相対変位と荷重の関係を示す。なお、側面のひずみゲージの値は、先に破壊が生じた面を採用している。表-3に、各判定方法におけるはく離荷重とその時の主応力を示す。目視判定では、顕微鏡の画像より評価した。目視判定の一例として、図-8に、はく離判定時の画像（試験片CFRP-3、2655.2N時）を示す。

各方法によるはく離荷重を比較すると、やや画像による判定のほうが早い傾向にあるが、ほぼ同様の結果が得

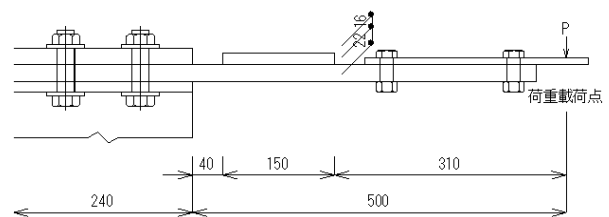


図-5 静的試験のセットアップ



図-6 静的試験の状況

られていることから、はく離の挙動を精度よく捉えているといえる。

2つの当て板の特徴として、図-7より、どの試験体も

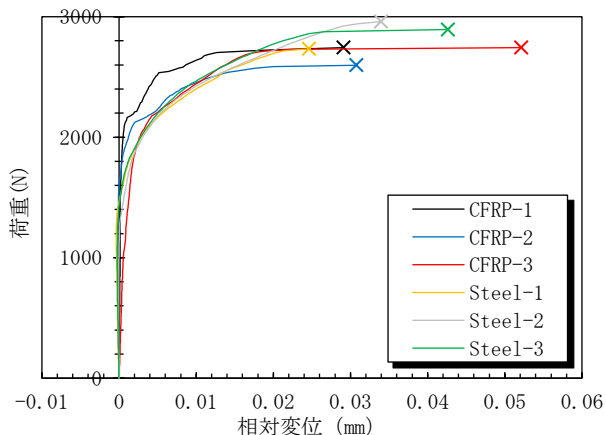


図-7 端部から5mm位置の接着剤に生じる相対変位と荷重の関係

表-3 各判定方法でのはく離荷重と主応力

試験片	側面のひずみ判定時	目視判定時
CFRP-1	2774.8/102.6	2715.8/100.4
CFRP-2	2613.0/96.6	2455.6/90.8
CFRP-3	2758.0/102.0	2655.2/98.2
CFRPの平均値	2715.3/100.4	2608.9/96.5
Steel-1	2752.0/109.3	2680.8/106.5
Steel-2	2979.0/105.7	2866.8/101.7
Steel-3	2909.0/97.3	2718.2/90.9
Steelの平均値	2880.2/104.1	2755.3/99.7

注) はく離荷重 (N) / 主応力 (MPa) を表す

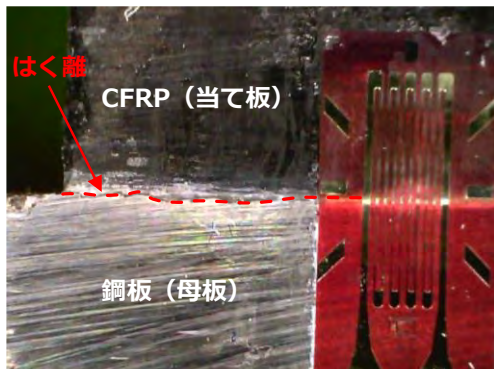


図-8 はく離判定時の画像 (試験片: CFRP-3, 2655.2N時)

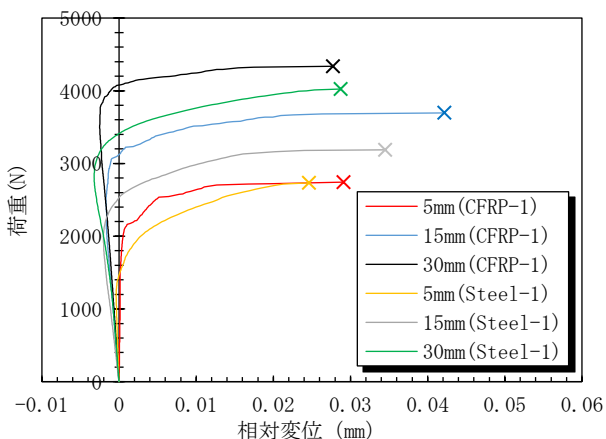


図-9 接着剤に生じる相対変位と荷重の関係

かなり近い挙動になっていることがわかる。そのため、初期はく離の特性としてはほぼ同様といえる。

次に、はく離の進展状況を考察する。本研究では、前述したように、ひずみゲージを端部から5, 15, 30mm位置に設置することではく離を観測している。図-9, 表-4に、端部からの各位置におけるはく離荷重とその時の主応力を示す。計測結果、当て板が鋼板の時に比べ、CFRPの時のほうが進展が遅いことがわかる。このことから、当て板の材質の違いは、初期はく離よりもはく離進展に影響を与えることが考えられる。また、端部から離れるほどはく離荷重が増加することから端部から徐々にはく離が進展することがわかる。なお、はく離荷重が増加する理由は、端部から離れた位置ほど作用曲げモーメントが小さくなるためである。

(4) 破壊形式

図-10に、CFRP-1, Steel-1の静的試験における破壊形式を示す。図中の左側が固定端側で、はく離が最初に生じる箇所である。荷重の増大により、はく離は当て板の途中まで進展するが、はく離しない範囲がある。試験後、スクレーパーで強制的にはく離させた。その領域を黄色の破線で示す。破壊形式を確認したところ、両条件すべての試験体において図-10のような両面にCSMが付着していた。本検討では、CSM層も接着層とみなしていることから接着層内での凝集破壊であるといえた。また、図-7, 図-9で、ひずみの変化に凹凸が確認される。これは、ガラス繊維がランダムに配置されたCSM層で、はく離が進展することが要因であると推察される。

4. 疲労試験による耐久性の検討

(1) 試験条件と実験シリーズ

静的曲げ試験片と同様の条件で、当て板をVaRTMを応用して接着した鋼板の試験片を用意した。表-5に、疲労試験のシリーズと試験条件を示す。疲労試験機には振動疲労試験機²⁰⁾を用いる。この試験機は、片持ち状の試験片に、加振機(偏心振動モーター)を用いて繰返し荷重を発生させることができる。試験機の特徴は、最大で20Hz程度の増減速度で疲労試験を行うことができること、モーターの偏心おもりを調節することによって荷重を変えられること、インバータ制御により増減速度を自由に変わること、片持ち状の試験片に作用させることで小さい荷重で十分な増減能力を有することなどが挙げられる。

図-11, 図-12に、試験機のセットアップ図、疲労試験の状況を示す。疲労試験は、室温(14~32℃)で行い、作用荷重は、静的にはく離するときの荷重に対して、30、

50, 70%程度となるように, 当て板端部での応力範囲がそれぞれ60, 100, 150N/mm²として, パラメトリックに設定した. 疲労試験の条件は, 応力比 $R=0.1$, 载荷速度15Hzですべての試験を行った. ひずみは, 動ひずみ測定装置(キーエンス製, NR-600)を用い, 2/1000秒間隔(500Hz)で計測した. 図-13に, 応力範囲の算出方法を示す. 当て板端部に作用する応力範囲は, その位置にひずみゲージを設置できないため, 荷重測定のために設置した3箇所(150, 20, 135)のひずみゲージから計測された曲げひずみを用い, 内挿して算定した.

はく離進展の計測方法は, 静的試験と同様に, ひずみゲージを側面に設置し, ひずみの値が測定限界を超えたときの繰返し回数をはく離と定義した. また, 初期はく離は5mm位置でのはく離とし, 15, 30, 50, 70mmにひずみゲージを設置することで, はく離の進展とその時の繰返し回数を検討した.

表-4 当て板端部からの各位置におけるはく離荷重と主応力

試験片	当て板端部からの距離		
	5mm	15mm	30mm
CFRP-1	2774.8/102.6	3695.2/136.7	4336.8/160.4
CFRP-2	2613.0/96.6	3380.4/125.0	3987.0/147.4
CFRP-3	2758.0/102.0	3656.0/135.2	4691.4/173.5
CFRPの平均値	2715.3/100.4	3577.2/132.3	4338.4/160.4
Steel-1	2752.0/109.3	3206.2/127.3	4036.4/160.3
Steel-2	2979.0/105.7	3436.8/122.0	3986.8/141.5
Steel-3	2909.6/97.3	3423.6/114.4	4630.0/154.8
Steelの平均値	2880.2/104.1	3355.5/121.3	4217.7/152.2

注) はく離荷重 (N) / 主応力 (MPa) を表す

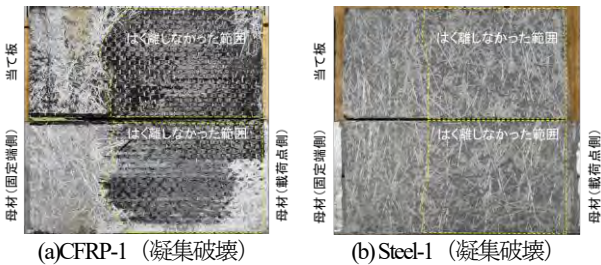


図-10 静的試験における破壊形式

表-5 実験シリーズと試験条件

当て板の材質	当て板の厚さ t_p (mm)	振動数 f (Hz)	主応力範囲 $\Delta\sigma_{pe}$ (N/mm ²)	試験片数 N
CFRP	16	15	30.0-70.8	7
Steel	16	15	23.9-64.6	6

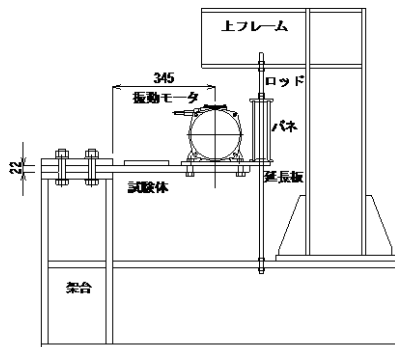


図-11 疲労試験のセットアップ

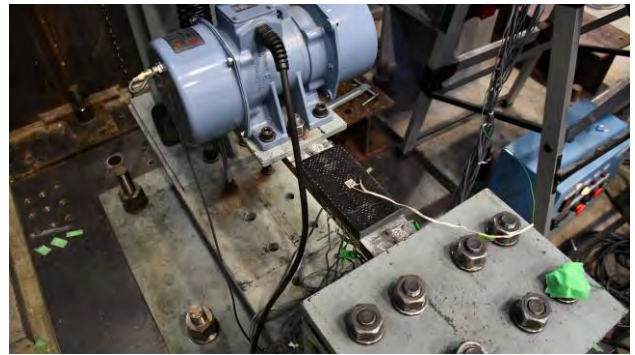


図-12 疲労試験の状況

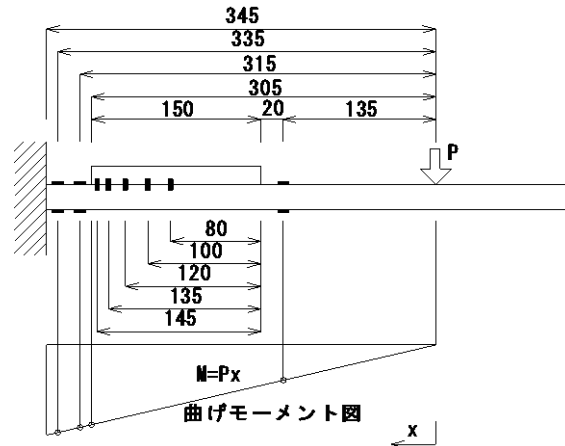


図-13 応力範囲の算出

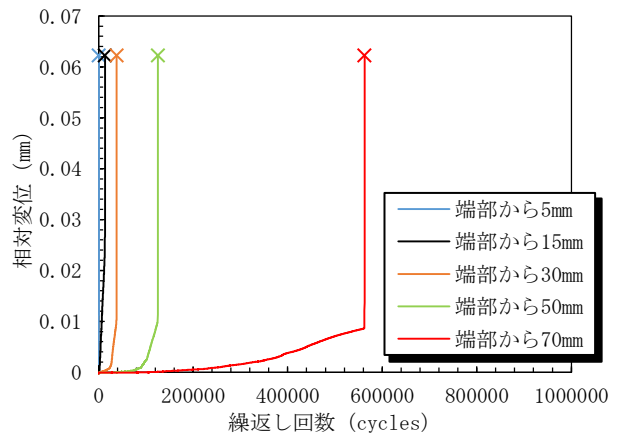


図-14 CFRP-5における相対変位と繰返し回数の関係

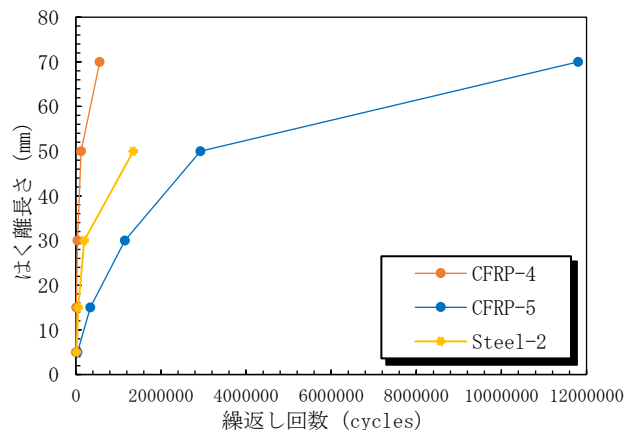


図-15 はく離長さ と 繰返し回数の関係

(2) はく離進展特性

接着端部の側面に設置したひずみゲージから、はく離進展を計測した。図-14、図-15に、はく離進展の計測の一例を示す。時系列で計測されるひずみ振幅のうち、ここではひずみの最大値で整理した。なお、後述する図-15において、Steel-2では1000万回载荷しても70mmまではく離が進展しなかったため、70mmのプロットを省略した。図より、初期はく離の発生後からはく離が進むにつれて、はく離の進展速度が遅くなるのがわかる。これは、前述したように、はく離の先端が载荷点に近づくほど曲げモーメントによる作用応力が徐々に小さくなるためである。また、当て板の材料の相違として、CFRPと鋼板で比較を行うと、50mmまでは類似の挙動を示すが、50mm以降の進展で大きな差異があることがわかった。

(3) はく離強度と繰返し回数の関係

表-6に、初期はく離寿命0～5mm、はく離長さ0～30mmおよびはく離長さ5～30mmの進展寿命をそれぞれ示す。また、CFRP-3では、疲労限と仮定した1000万回でもはく離が発生しなかったため、疲労試験を終了した。CFRP-4, 7, 9, Steel-1, 2, 4では、はく離進展が非常に遅かったため、1000万回（CFRP-7では3000万回）で疲労試験を終了した。

(4) 破壊形式

疲労試験では、静的試験と同様に、当て板が母材から完全にはく離するまでには至らなかった。そこで、破壊形式を確認するため、試験終了後、スクレーパーを用いて当て板をはがし、はく離面の観察を行った。図-16に、疲労試験における破壊形式を示す。破壊形式を確認したところ、すべての試験体において、図-16のような凝集破壊（接着層と見なしたCSM層内での破壊）が観察された。

5. 接着接合部の疲労強度の評価

(1) 主応力範囲による疲労強度の評価

図-17、表-6に、接着剤AUP40T1において、はく離長さが、0～5mmまで（初期はく離）の繰返し回数、0～30mmまでの繰返し回数および5～30mmまでの繰返し回数で整理した $S-N$ （主応力範囲 $\Delta\sigma_{re}$ と繰返し回数 N_p ）関係を示す。図より、 $S-N$ 関係を主応力範囲で整理した場合、はく離長さの評価範囲に関わらず、CFRP、鋼板ともに一定の関係が見られた。また、当て板の材質による傾向の違いはそこまで見られなかったが、やや鋼板のほうが疲労強度が低くなる傾向にあった。

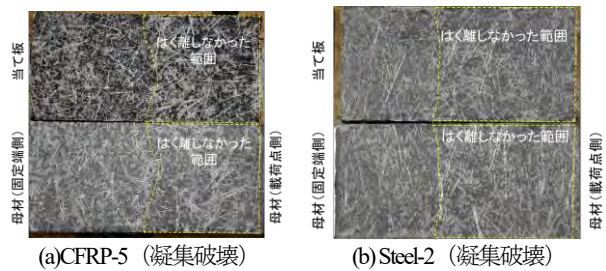


図-16 疲労試験における破壊形式

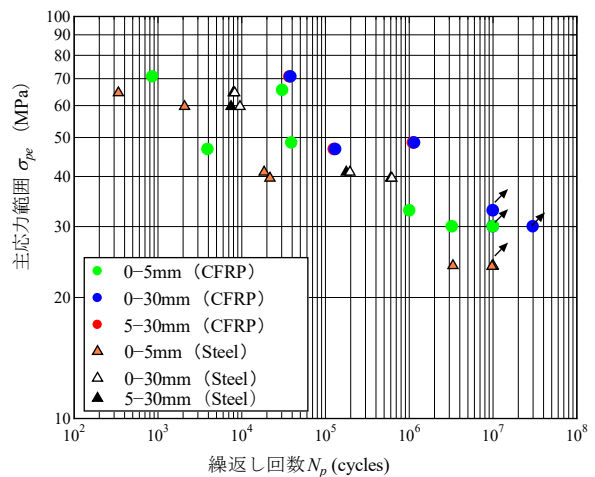


図-17 主応力範囲と繰返し回数の関係

表-6 作用応力とはく離寿命（各はく離長さに至るまでの繰返し回数）

実験シリーズ	主応力範囲 $\Delta\sigma_{re}$ (N/mm ²)	繰返し回数 (cycles)						破壊形式
		N_1 0～5mm	N_2 0～15mm	N_3 0～30mm	N_4 5～30mm	N_5 0～50mm	N_6 0～70mm	
CFRP-1	65.5	30,674	-	-	-	-	-	凝集破壊
CFRP-3	30.0	10,000,000	10,000,000	10,000,000	-	10,000,000	10,000,000	(疲労限)
CFRP-4	46.7	3,941	15,904	131,046	127,105	10,000,000	10,000,000	凝集破壊
CFRP-5	70.8	862	13,616	38,283	37,421	125,609	562,713	凝集破壊
CFRP-6	48.5	39,375	338,197	1,154,744	1,115,369	2,925,728	11,804,217	凝集破壊
CFRP-7	30.0	3,245,059	30,000,000	30,000,000	-	30,000,000	30,000,000	凝集破壊
CFRP-9	32.9	1,010,847	6,605,419	10,000,000	-	10,000,000	10,000,000	凝集破壊
Steel-1	23.9	9,703,636	10,000,000	10,000,000	-	10,000,000	10,000,000	凝集破壊
Steel-2	41.0	18,461	52,414	195,646	177,185	135,0085	10,000,000	凝集破壊
Steel-3	64.6	337	1,263	8,258	7,921	33,770	2,589,151	凝集破壊
Steel-4	24.0	3,321,337	10,000,000	10,000,000	-	10,000,000	10,000,000	凝集破壊
Steel-5	39.6	21,711	108,106	619,298	597,587	3,042,097	3,075,391	凝集破壊
Steel-6	59.7	2,077	3,543	9,531	7,454	31,519	163,897	凝集破壊

(2) はく離時の主応力に対する主応力範囲の比 ($\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe,db}$)

図-18, 図-19, 図-20に, 接着剤AUP40T1の初期はく離の繰返し回数, 0~30mmまでの繰返し回数, 0~30mmまでの繰返し回数を主応力比 (静的曲げ試験で得られたはく離時の主応力に対する疲労試験で行った主応力範囲の比: $\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe,db}$) で整理したS-N関係を示す。

それらの結果, 主応力範囲で整理した場合と同様に, 一定の傾向が見られ, 初期はく離の疲労寿命の場合, 決

定係数が0.81となり, 高い精度で推定することができた。また, この方法では, 当て板を変えても高い決定係数であったことから, 当て板によらず接着接合部の疲労強度を精度よく評価できることがわかった。さらに, 図より, 0~5mmの繰返し回数と比べると, 0~30mmの繰返し回数, 5~30mmの繰返し回数にばらつきが大きいこともわかる。理由として, 通常と接着接合に比べるとプライマー塗布による影響から接着面の厚さが均一になりにくく,

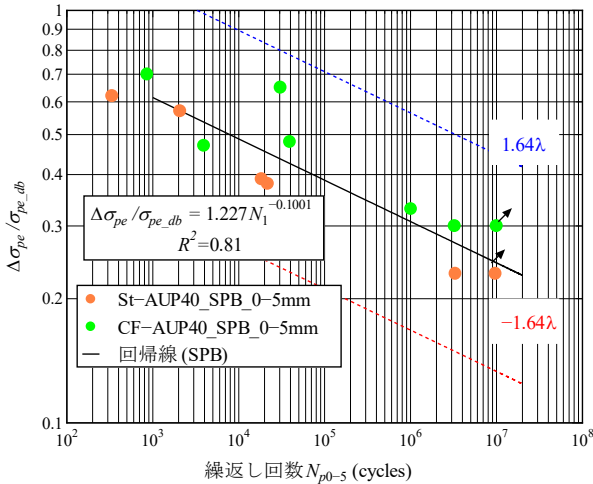


図-18 0~5mmの繰返し回数

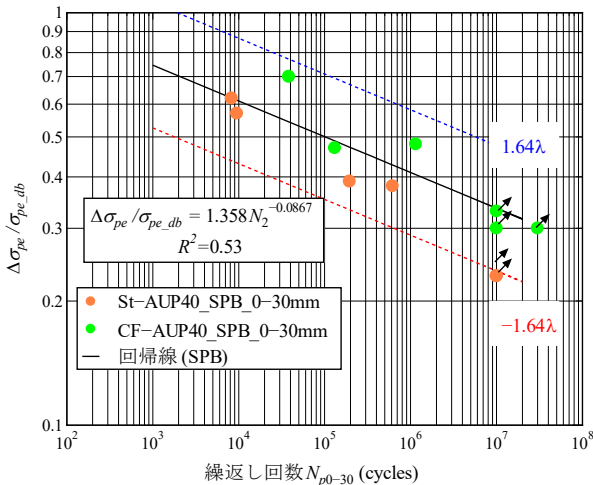


図-19 0~30mmの繰返し回数

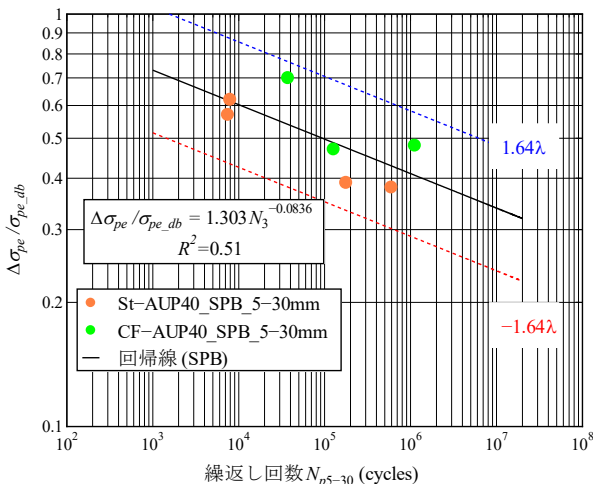


図-20 5~30mmの繰返し回数

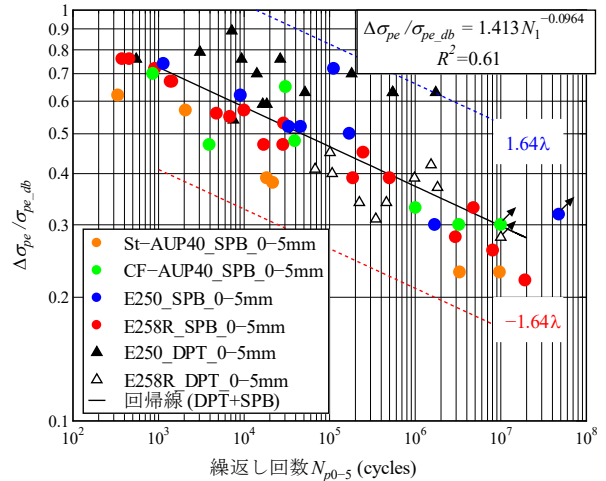


図-21 0~5mmの繰返し回数 (曲げ・引張の比較)

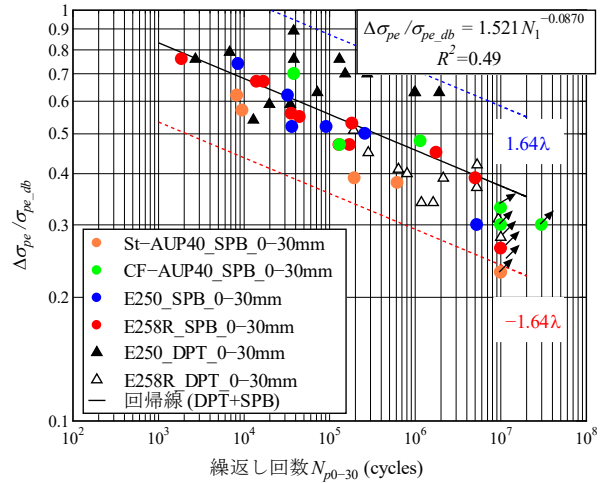


図-22 0~30mmの繰返し回数 (曲げ・引張の比較)

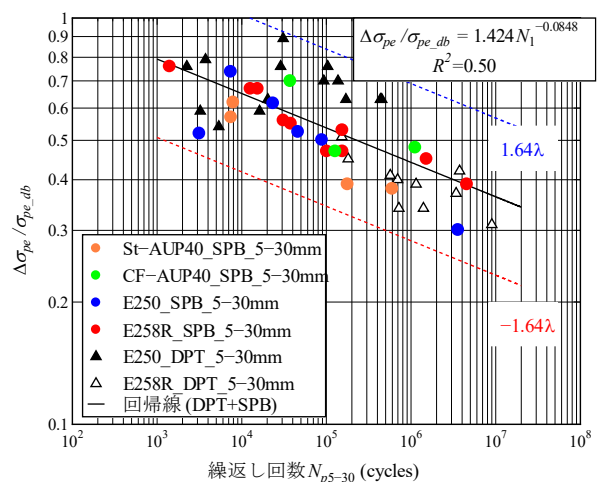


図-23 5~30mmの繰返し回数 (曲げ・引張の比較)

進展寿命のばらつきに影響しているのではないと考えられる。

また、疲労強度の評価を行うため、回帰線と標準偏差による整理を試みた。実線は回帰線、点線は標準偏差による評価基準 $\pm 1.64\sigma$ を表している。これは、複合構造標準方書による材料強度の特性値²¹⁾(特性値を下回る確率を5%、正規分布と仮定し、係数 k を1.64とする)を準用している。標準偏差による評価では、範囲内には収まることが確かめられた。なお、各疲労寿命については、はく離時の主応力に対する主応力範囲の比で整理した回帰線を式(2)~(4)に示す。

$$\Delta\sigma_{pe} / \sigma_{pe_db}(N_1) = 1.227N_1^{-0.1001} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{pe} / \sigma_{pe_db}(N_2) = 1.358N_2^{-0.0867} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{pe} / \sigma_{pe_db}(N_3) = 1.303N_3^{-0.0836} \quad (4)$$

(3) 既往の研究のデータとの比較

接着接合部の疲労特性の妥当性の検証および引張作用と曲げ作用および異なる接着剤・接合方法での疲労特性の相違の検討を行うため、既往の研究データ^{11) 14)}との比較を行った。既往の研究では、エポキシ樹脂E250およびE258Rを用いて、両面に鋼板の当て板を接着した鋼材に繰返し引張荷重または曲げ荷重を載荷し、はく離寿命を評価したものである。引張疲労試験と曲げ疲労試験の相違として、当て板端部の接着剤に作用する垂直応力とせん断応力の比率(σ_{\perp} / τ)が異なることが挙げられる。曲げ疲労試験では1.45で、垂直応力の割合が大きく、引張疲労試験では0.73で、せん断応力の割合が大きい特徴がある。また、既往の研究との大きな違いは、接着方法が挙げられる。過去の事例では接着剤を用いて鋼当て板を接着したが、本検討では、接着層にCSMを用いてVaRTMを応用して接着を行った点に違いがある。

図-21、図-22、図-23に、本研究における曲げ疲労試験の結果と、既往の引張疲労試験の結果を比較した図を示す。図より、過去の事例と同様の傾向が得られたこと、初期はく離寿命、進展寿命の両方において決定係数が0.49以上となることから、接着剤、接着方法、当て板に関わらず、一つの実験式で接着接合部のはく離に対する疲労特性を評価できることが確かめられた。

6. まとめ

本研究では、鋼構造物の補修・補強の疲労設計の確立に向けて、曲げ荷重が作用する際の母材(鋼板)と当て板(鋼板またはCFRP)の接着接合部の疲労耐久性を明らかにすることを目的として、実験的な検討を行った。得られた成果をまとめると次のようである。

- (1) はく離時の主応力に対する主応力範囲の比と繰返し回数の関係で整理すれば、対象とした接着剤、当て板において、はく離に対する疲労強度を精度よく評価できることがわかった。
- (2) 過去の曲げ試験や引張試験と比較を行った結果、統一的な評価を行うことができ、作用力、接着方法によらずに評価ができることが確かめられた。
- (3) 繰返し荷重による接着接合部の破壊形式は、母材に近い接着層内部ではく離が発生する凝集破壊であった。

以上のことから、VaRTMを応用して鋼板またはCFRPの当て板が接着された鋼板における接着接合部のはく離に対する疲労耐久性においても過去の事例と同様に統一的な評価ができることが示された。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会編：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，土木学会，鋼構造シリーズ 23，2014.
- 2) 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，土木学会，複合構造レポート05，2012.
- 3) 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，土木学会，複合構造レポート09，2013.
- 4) 複合構造委員会編：FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)，土木学会，複合構造シリーズ09，2018.
- 5) Nakamura, H., Yamamura, Y., Ito, H., Lin, F. and Maeda, K.: Development of pre-tensioning device for CFRP strips and applicability to repair of cracked steel members, *Advances in Structural Engineering*, Vol.17, No.12, pp.1705-1717, 2014.
- 6) 坂本貴大，石川敏之：シングルラップ接着接合の理論解析とはく離によるエネルギー解放率，土木学会論文集A2(応用力学)，72巻，2号，pp.I_653-I_662，2016.
- 7) Masaru Shimizu, Toshiyuki Ishikawa, Atsushi Hattori, Hirotaka Kawano: Failure criteria for debonding of patch plate bonded onto steel members subjected to bending, *Journal of JSCE*, Vol.2 (1), pp.310-322, 2014.
- 8) Massimiliano Bocciarelli, Pierluigi Colombi, Giulia Fava, Carlo Poggi: Prediction of debonding strength of tensile steel/CFRP joints using fracture mechanics and stress based criteria, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.76 (2), pp.229-313, 2009.
- 9) 中村一史，手塚渉太，タイウイサル：CFRP板と鋼板の接着接合部の疲労耐久性の評価，土木学会，構造工学論文集，Vol.62A，pp.906-914，2016.
- 10) 青木康素，石川敏之，河野広隆，足立幸郎：鋼床版デッキプレート上の当て板接着位置に対する疲労はく離評価，土木学会，構造工学論文集，Vol.62A，pp.514-524，2016.
- 11) 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.II_56-II_66, 2018.
- 12) G. Fernandez, D. Vandepitte, H. Usabiaga, S. Debruyne: Static and cyclic strength properties of brittle adhesives with porosity, *Procedia Structural Integrity*, Vol.7, pp291–298, 2017.
 - 13) Hai-Tao Wang, Gang Wu, Yu-Yang Pang, Jia-Wei Shi, Habeeb Muhammad Zakari: Experimental study on the bond behavior between CFRP plates and steel substrates under fatigue loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol.176, 12 pages, 2019.
 - 14) 高橋京祐, 中村一史, タイウイサル, 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.
 - 15) Cadei, J.M.C., Strafford, T.J., Hollaway, L.C. and Duckett, W.G.: Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers, CIRIA, C595, 2004.
 - 16) National Research Council: Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, CNR-DT 202, 2007.
 - 17) D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Sumner: Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, *Construction and Building Materials*, Vol.21 (5), pp.1001–1010, 2007.
 - 18) 前掲 4), pp.157–179.
 - 19) 前掲 4), p.124.
 - 20) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, Vol.14, No.55, pp.1–8, 2007.
 - 21) 大倉一郎: 鋼橋の疲労, 東洋書店, 1994.

(Received August 25, 2023)

EXPERIMENTAL STUDY ON FATIGUE STRENGTH OF ADHESIVE BONDED JOINTS OF STEEL PLATE WITH BONDED PATCH PLATE USING VARTM

Kyosuke TAKAHASHI, Hitoshi NAKAMURA, Thay VISAL, Takahiro MATSUI
and Hisakazu HORII

In the repair method of bonding plates, data on delamination fatigue strength under cyclic loading are still limited, and fatigue design methods have not been established. In this study, specimens of steel plate or CFRP bonded to steel plate were fabricated using the Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM). The specimens were subjected to cyclic loading, and delamination and its propagation were measured. As a result, $S-N$ diagrams were generated by organizing the ratio of the principal stress range in the fatigue test to the principal stress in the debonding in the static test, and the bending fatigue properties were evaluated from these diagrams with high accuracy. Comparisons with previous experiments using flexural and tensile loading showed similar trends, suggesting the possibility of evaluation independent of adhesive, working force, and bonding method.