

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・堀井 久一⁴

¹学生会員 東京都立大学 都市環境科学研究科都市基盤環境学域大学院 博士前期課程 1 年
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: takahashi-kyosuke@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学 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

³宇都宮大学 助教 社会基盤デザイン学科 (〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)
E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

⁴正会員 コニン株式会社 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

鋼部材の性能回復としての鋼板あるいはFRPによる当て板接着工法では、設計・照査における接着接合部のはく離の評価が課題である。特に、繰返し荷重に対するはく離強度のデータが少ないことから、疲労設計の基準なども確立されていない。そこで、鋼板に当て板を、エポキシ樹脂接着剤を用いて接着した試験体を作製し、それに繰返し板曲げ荷重を加え、はく離の発生および進展の計測を行った。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と繰返し荷重で整理することで、S-N線図を整理し、曲げ疲労特性の評価を精度よく行うことができた。また、引張荷重を受ける際の実験例と比較を行った結果、同様の傾向が見られたことから、作用力によらない評価ができる可能性が示唆された。

Key Words : patching plate, adhesive joints, debonding, fatigue strength, bending action

1. はじめに

鋼部材の性能回復の方法として、損傷部に鋼板やCFRPを接着する接着接合が注目され、適用され始めている^{1)~4)}。接着接合のメリットは、円孔等の欠損がないため、追加部材による応力集中を回避できること、接合面積が大きく、伝達荷重によって生じる接着接合部の発生応力が小さくなること、構造用接着剤を用いた場合、接着接合部の剛性が高くなること、金属に比べて軽量の樹脂を接合材料としているため、接合部が軽量になること、疲労寿命を長くすることができることなどが挙げられる^{2)~5)}。一方、接着接合のデメリットは、脆性的に破壊する場合が多いこと、引張作用（接着面に対して垂直方向の作用）のはく離に対する強度が著しく低いこと、供用時における湿温度変化等の環境変化による影響を受けて劣化する場合があること、空隙の存在により強度が低下する等が挙げられる²⁾。その中でも、接着接合部のはく離が大きな問題となる。はく離は当て板の接着端部の接着層の内部に、せん断応力とピール応力と呼ばれる垂直応力が同時に作用し、作用力の増加とともに、それ

らの応力のはく離の限界値を超えることで発生すると考えられており²⁾、種々の研究が行われている。その中でも、接着接合部の静的なはく離強度に関しては、多くの研究事例^{6)~8)}がある。土木学会では、はく離強度を評価するための試験方法・はく離の判定方法などが提案されている⁹⁾。海外では、主応力を用いたはく離のガイドラインが定められている^{9)~11)}。他方、繰返し荷重を受ける際のはく離の研究例^{12)~16)}はまだ十分ではなく、疲労設計に用いる疲労強度等級や基準なども定められていないのが現状である。研究事例として、引張荷重を受ける際の疲労耐久性を評価した事例¹⁴⁾があるものの、曲げ作用を受ける接着接合部に関しては、実物大の試験体を対象に、接着接合の適用性を評価するために、疲労試験を行った事例¹³⁾はあるが、疲労耐久性を定量的に評価した事例はなく、疲労設計に用いるための基礎データが得られていない。

そこで本研究では、板曲げ疲労試験を行うことで、曲げ荷重を作用させた際の接着接合部のはく離強度を評価し、接着接合部の疲労耐久性を明らかにすること、疲労の進展寿命を明らかにすること、引張荷重に基づいた疲

疲労試験の結果（S-N線図）と比較し、疲労強度を作用力に依存せずに統一的に評価にすることを目的として実験的に検討を行った。また、二つの接着剤を対象に実験を行うことで、接着剤によらない疲労強度の評価ができるかについても検討を行った。

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

図-1のように、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とはく離が発生する。また、既往の研究⁴⁾では、主応力が一定値を超えることでと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。

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

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⁴⁾の評価式によって計算される。

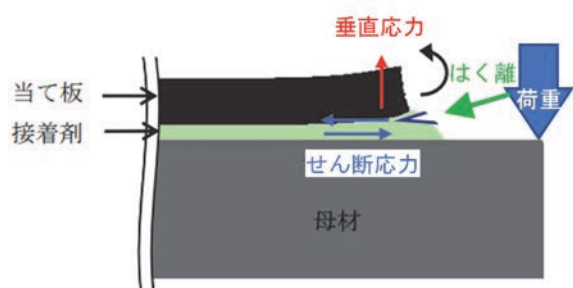


図-1 接着端部近傍に発生するせん断応力と垂直応力の概念図

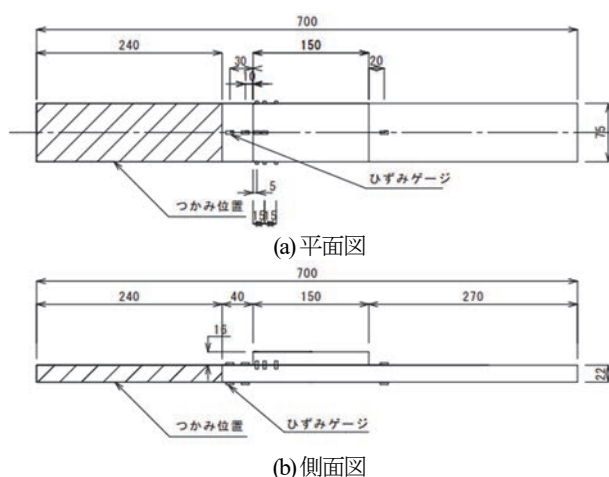


図-2 試験片寸法とひずみゲージ位置

(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-2に示すような、平鋼板（700×75×22mm）の片面に、当て板の鋼板（150×75×16mm）を、2種類の2液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤（コニシE250、E258R：厚さ0.4mm）で接着したものを試験片とした。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。静的とはく離強度の載荷条件は、既往の実験結果⁴⁾から、当て板端部の接着接合部での主応力がE250とE258Rでそれぞれ110.0N/mm²、40.0N/mm²ではく離すると仮定した。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¹³⁾¹⁴⁾を参考に、マイクロ스코プによる方法、当て板上面のひずみゲージによる方法を事前に検討した。マイクロ스코プによる方法では、試験片が15Hzで加振されることから、画像が不鮮明となり、はく離の進展を観測できない場合があった。当て板上面のひずみゲージによる方法では、本検討では当て板厚さ16mmと厚いことから、ひずみの値が微小であり、はく離の判定が困難であった。そのため、本研究では、図-3のように当て板側面にひずみゲージを

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
当て板 (SM490Y)	204.7	0.30	377.1	557.2
母材 (SM490Y)	202.5	0.29	379.5	545.4
接着剤 (E258R)	3.6	0.34	-	-
接着剤 (E250)	2.6	0.34	-	-

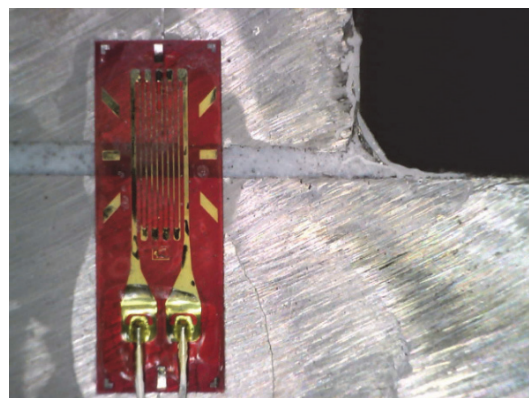


図-3 ひずみゲージの設置状況

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。

図-4に、当て板側面の接着層に生じるひずみ計測の概略図を示す。ひずみの計測には、ゲージ長3mmのひずみゲージを用いた。0.4mmの接着層を跨いで垂直にひずみゲージを設置する場合、それ以外の2.6mm部分では、鋼材のひずみが計測される。鋼材に生じる垂直ひずみは、接着剤に生じる垂直ひずみに比べ十分に小さいため、式(2)で評価されるひずみ ε_e を接着剤に生じるひずみとした。

$$\varepsilon_e = \frac{l \times \varepsilon - l_s \times \varepsilon_s}{l_e} \approx \frac{l \times \varepsilon}{l_e} \quad (2)$$

ここに、 ε ：ひずみゲージによる計測値

ε_s ：鋼材に発生するひずみ

ε_e ：接着剤に発生するひずみ

l ：ひずみゲージのゲージ長（mm）

l_s ：鋼の厚さ（mm）

l_e ：接着剤の厚さ（mm）

3. 静的試験によるはく離荷重の検討

検討対象の2種類の接着剤（コニシE250、E258R）の静的はく離荷重を把握するため、当て板接着された鋼板の板曲げ載荷試験を行った。

(1) 実験シリーズ

表-2に、実験シリーズを示す。鋼板母材（22mm）に、厚さ16mmの当て板を、接着剤E250、E258Rを用いて接着した試験片（各3体）を準備する。接着剤の厚さは0.4mm程度になるよう調整した。図-2に、試験片とひずみゲージの設置位置を示す。

(2) 試験片の作製と実験方法

鋼板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）を用いてブラスト処理を行った。アセトンによる脱脂後、2種類の接着剤で当て板を接着した。当て板と接着剤の厚さは、直径0.4mmのガラスビーズを用いて0.4mmに管理した。養生の温度と時間は、それぞれ約40℃、24時間とした。さらに、当て板側面の接着層にひずみゲージを設置することから、ディスクグラインダーを用いて、図-5のように側面に段差がないように仕上げた。

図-6、図-7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、精密万能曲げ試験機（Shimadzu AutoGraph AG-100）を用いて、変位制御（載荷速度：3mm/min（E258R）、1mm/min（E250））に

より載荷を行った。試験装置から出力される、荷重、変位、試験体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、はく離の挙動をとらえること、ひずみゲージによるはく離進展観測の整合性を確認するため、マイクロスコープ（サンコーDino-Lite Premier2 S Polarizer：倍率200倍）を用いて、1秒間隔で連続的に接着端部の静止面を撮影した。

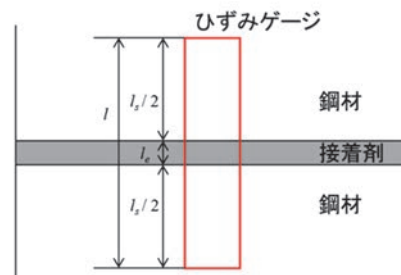


図-4 当て板側面の接着層に生じるひずみ計測の概略図

表-2 実験シリーズ

試験片名	接着剤	鋼当て板の厚さ t_f (mm)	接着剤の厚さ t_e (mm)	試験片数
E250	E250	16	0.4	3
E258R	E258R	16	0.4	3



図-5 当て板と母材の側面の仕上げ

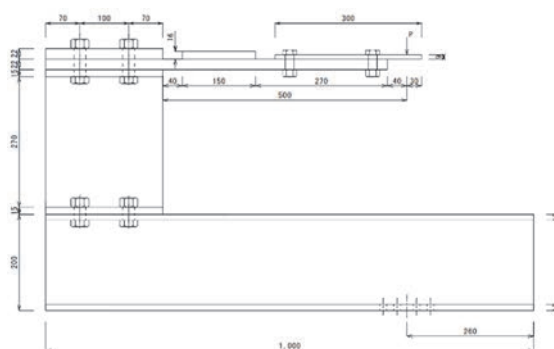


図-6 静的試験のセットアップ

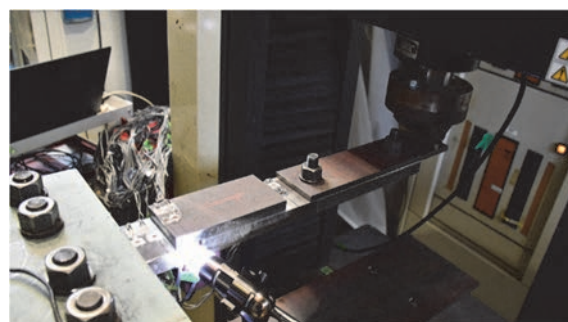


図-7 静的試験の状況

(3) 接着接合部の静的強度の評価

図-8に、当て板側面に設置されたひずみゲージによって計測された接着剤に生じるひずみと荷重の関係を示す。また、図中には、従来のはく離判定法と比較を行うため、E258Rの試験体のみ、当て板上面の端部から5mm位置に配置したひずみゲージの値が0になった荷重を点線で示している。なお、側面のひずみゲージの値は、先に進展し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を示す。目視判定では、マイクロ스코プの画像より評価した。各方法によるはく離荷重を比較すると、試験体によりばらつきがみられるものの、側面のひずみが計測できなくなった荷重と上面のひずみがゼロになった荷重に近いこと、側面での判定の方が、はく離荷重が低く評価されることがわかる。理由として、はく離が側面から発生するためと考えられる。また、画像によるはく離荷重と側面でのはく離荷重を比較するとほぼ同様の結果が得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。

さらに、2つの接着剤の特徴としては、初期の挙動は類似の傾向を示すが、E258Rは、E250に比べ、はく離に至るまでのひずみが大きく非線形となり、粘弾性の挙動を示すことがわかる。また、はく離荷重を比較すると、E250、E258Rでそれぞれ1550.3N、3332.9Nであり、E258Rが約2.1倍となっている。これは、図より接着剤の粘弾性

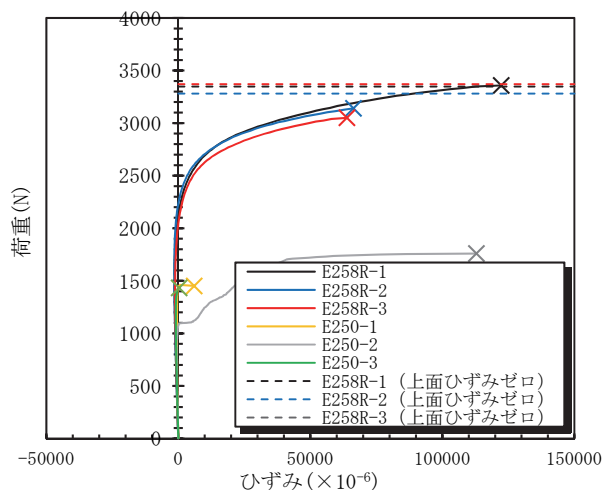


図-8 端部から5mm位置での接着剤に生じるひずみと荷重の関係

表-3 各判定方法でのはく離荷重

	ひずみゼロ時 (N)	側面のひずみ 判定時 (N)	目視判定時 (N)
E258R-1	3347.8	3284.8	3102.4
E258R-2	3280.6	3151.6	3114.0
E258R-3	3370.4	3064.2	2815.2
平均値	3332.9	3166.9	3010.5
E250-1	-	1451.2	1451.2
E250-2	-	1767.0	1767.0
E250-3	-	1432.6	1432.6
平均値	-	1550.3	1550.3

の挙動の差異がはく離強度に影響していると考えられた。

次に、はく離の進展状況について確認する。図-9、表-4に、はく離進展の計測結果を示す。本研究では、ひずみゲージを5mm、15mm、30mm位置に設置することではく離進展の観測を行った。計測結果、E258Rでは、端部から徐々にはく離が進展すること、E250では、5mm位置ではく離の発生と同時に、50mm位置まではく離が一気に進展することがわかった。

(4) 破壊形式

図-10に、E258R、E250の静的試験における破壊形式を示す。図の右側が固定端で、はく離が最初に生じる箇所である。E258Rでは、当て板と母材の両面に接着剤が付着しており、接着層内での破壊（凝集破壊）であるといえる。一方、E250では、当て板のみに接着剤が付着していることから母材と接着層での界面破壊と判定された。なお、それぞれ3体とも同様の破壊形式であった。

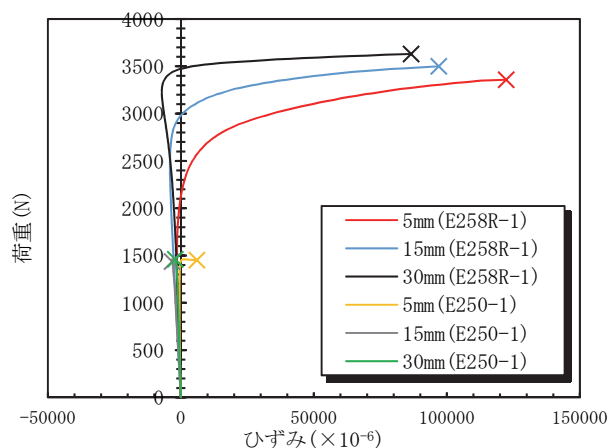
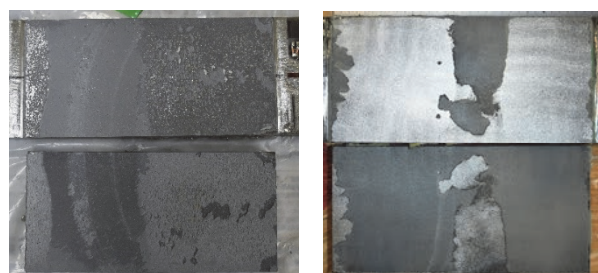


図-9 接着剤に生じるひずみと荷重の関係

表-4 はく離進展の計測結果

	主応力 (N/mm²)		
	5mm	15mm	30mm
E258R-1	119.0	122.5	131.2
E258R-2	111.9	118.9	125.0
E258R-3	111.1	120.5	126.9
平均値	114.0	120.6	127.7
E250-1	44.6	44.6	44.6
E250-2	53.7	61.2	61.2
E250-3	43.5	43.5	43.5
平均値	47.3	49.8	49.8



(a) E258R (凝集破壊) (b) E250 (界面破壊)

図-10 静的試験における破壊形式

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、当て板をエポキシ樹脂で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¹⁷⁾を用いる。この試験機は、片持ち状の試験体に、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程度の载荷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载荷速度を自由に変わること、片持ち状の試験体に作用させることで小さい荷重で十分な载荷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（8～16℃）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、30～80%程度となるように、当て板端部での応力範囲がそれぞれ35, 60, 70, 85, 90, 115, 140, 160, 180N/mm²となるようにパラメトリックに設定した。疲労試験の条件

表-5 実験シリーズと試験条件

接着剤	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
E250	16	15	14.2-34.9	8
E258R	16	15	25.2-87.2	18

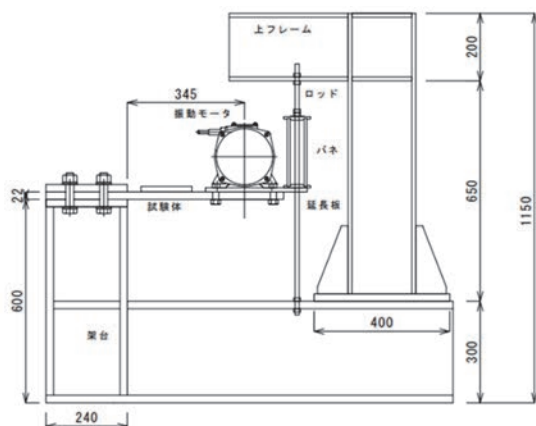


図-11 疲労試験のセットアップ

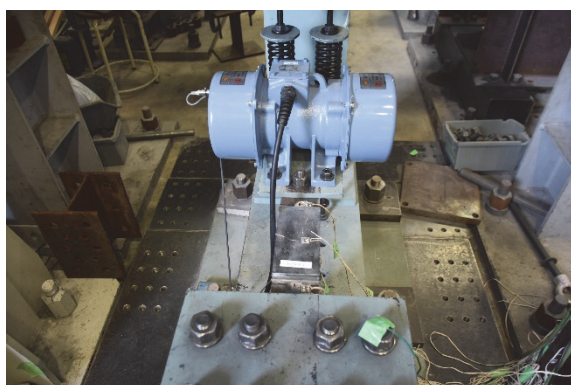


図-12 疲労試験の状況

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。当て板端部に作用する応力範囲は、ひずみゲージから計測された曲げひずみを用いて評価した。

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回数をはく離とした。また、初期はく離は5mm位置でののはく離とし、一部試験体では15mm, 30mm, 50mm, 70mmにひずみゲージを設置することで、はく離の進展を検討した。

(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-13、図-14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。図により、初期はく離の発生後、はく離の進展は速いが、はく離が進むにつれて、進展速度が遅くなることがわかる。これは、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ことによるものである。

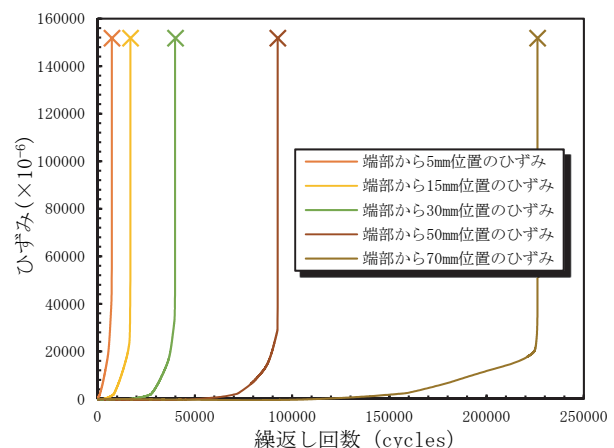


図-13 はく離進展の計測結果

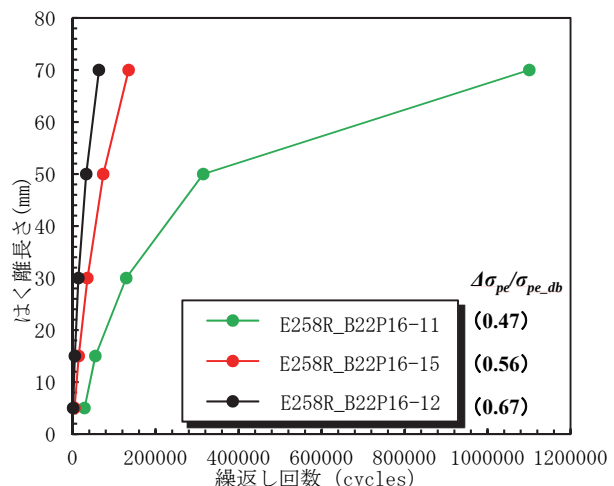


図-14 繰返し回数とはく離進展長さの関係

(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。試験片No.17では、はく離進展が非常に遅いため、1000万回を疲労限とし、試験を終了した。また、試験片No.18では、疲労限である1000万回でもはく離が発生しなかったが、試験を継続したところ、約1900万回で初期はく離の発生が確認され、その後、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、疲労試験の終了後、当て板を母材からはがし、はく離面の観察を行った。図-15に、疲労試験における破壊形式を示す。図-15 (a)より、E258Rの全ての試験片は、接着層内での凝集破壊であった。一方、図-15 (b), (c)より、E250では、接着層と鋼材の界面破壊、

または界面破壊と凝集破壊が混合した破壊形式であった。

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-16、図-17に、表-6に示したE250、E258Rの初期はく離寿命、30mmまでのはく離寿命および25mmの進展寿命を整理したS-N関係を示す。図より、疲労寿命を主応力範囲で整理した場合、E258Rでは一定の傾向が見られ、評価可能であるといえるが、E250では、ばらつきが大きく、評価が困難であるといえる。

(2) はく離時の主応力に対する主応力範囲の比($\Delta\sigma_F/\sigma_{F,th}$)で評価した疲労強度

図-18、図-19、図-20に、接着剤E250、E258Rの初期はく離寿命、30mmまでのはく離寿命、25mmの進展寿命を

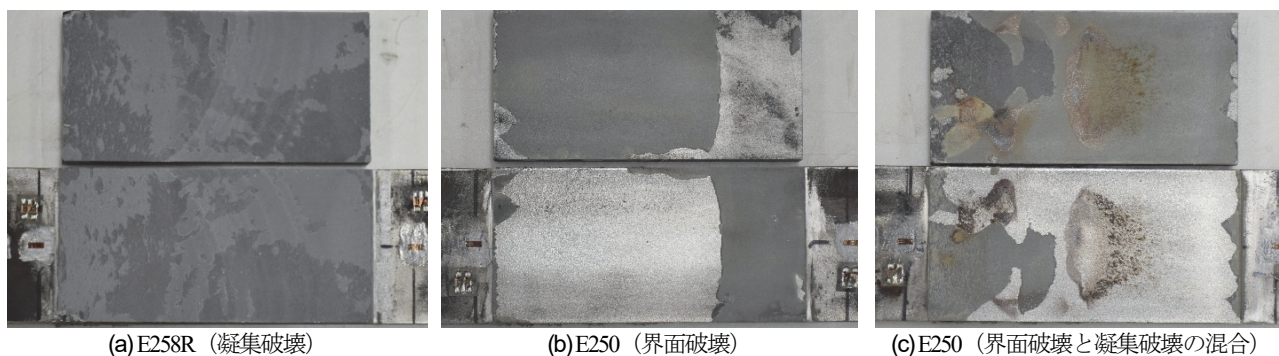


図-15 疲労試験における破壊形式

表-6 E258Rにおける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	試験片 No.	$\Delta\sigma_F$ (N/mm ²)	繰返し回数 (cycles)						備考
			N_1 0～5mm	N_2 0～15mm	N_3 0～30mm	N_4 5～30mm	N_5 0～50mm	N_6 0～70mm	
E258R B22P16-2	1	82.4	910	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-3	2	31.9	2,967,683	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-4	3	65.3	10,031	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-5	4	43.9	187,645	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-6	5	87.2	377	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-7	6	60.2	29,248	62,271	183,327	150,833	—	—	
E258R B22P16-8	7	51.6	247,363	702,470	1,767,342	1,517,342	—	—	
E258R B22P16-9	8	37.7	4,817,297	—	—	—	—	—	
E258R B22P16-10	9	44.4	501,433	2169,061	5,054,443	4,553,010	—	—	
E258R B22P16-11	10	54.1	28,655	55,013	129,463	100,807	315,082	1,100,668	
E258R B22P16-12	11	76.6	1,383	5,607	14,033	12,650	32,912	63,641	
E258R B22P16-13	12	76.6	1,446	6,873	16,879	15,433	31,492	77,108	
E258R B22P16-14	13	63.0	6,839	25,371	44,681	37,842	92,558	226,206	
E258R B22P16-15	14	63.8	4,799	14,897	35,785	30,986	74,112	135,106	
E258R B22P16-16	15	53.0	17,058	82,345	171,478	154,420	381,192	905,887	
E258R B22P16-17	16	87.0	457	529	1,864	1,407	6,018	32,637	
E258R B22P16-19	17	30.0	8,100,262	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	1000万回で停止
E258R B22P16-20	18	25.2	19,330,752	—	—	—	—	—	初期はく離後停止
E258R B22P16-1	19	29.1	9,111	18,999	32,539	23,428	57,498	75,071	
E258R B22P16-2	20	14.2	1,696,484	2,877,804	5,274,178	3,577,694	9,071,147	—	
E258R B22P16-3	21	34.9	1,146	3,180	8,551	7,405	16,357	24,511	
E258R B22P16-4	22	23.7	170,617	201,647	259,195	88,578	381,039	1,046,206	
E258R B22P16-5	23	24.8	45,818	65,752	91,948	46,130	147,423	474,403	
E258R B22P16-6	24	34.0	112,209	776,785	1,580,051	1,467,842	6,578,596	6,589,573	
E258R B22P16-7	25	15.0	47,887,900	—	—	—	—	—	疲労限
E258R B22P16-8	26	24.7	33,285	34,200	36,441	3,156	41,632	52,162	

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。E250においては、主応力範囲で整理した場合には、評価が困難であったが、図より、 $\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db}$ と繰返し回数の関係で整理することで、初期はく離の疲労寿命の場合、決定係数0.93と高い精度で整理することができた。また、この方法では、今回用いた二つの接着剤においては、接着剤によらず接着接合部の疲労強度を精度よく評価することができることがわかった。また、図より、0～5mmの疲労寿命と比べると、0～30mmの疲労寿命や5～30mmに進展寿命のばらつきが大きいこともわかる。理由としては、接着厚さの違いやこの後考察する破壊形式の違いなどが原因として考えられる。

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 $\pm 1.64\sigma$ を表しており、複合構造標準示方書による材料強度の特性値¹⁸⁾（特性値を下回る確率を5%とし、正規分布に仮定して係数 k を1.64としている）を準用している。標準偏差による評価では、指定の範囲内には上限側の一つのデータを除いて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(3)～(5)に示す。

$$\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db}(N_1) = 1.493N_1^{-0.1044} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db}(N_2) = 1.399N_2^{-0.0817} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{pe}/\sigma_{pe_db}(N_3) = 1.192N_3^{-0.0704} \quad (5)$$

(3) 既往の研究のデータとの比較

得られた接着接合部の疲労特性の妥当性を検討する目的と、引張と曲げでの疲労特性の違いの検討を行うため、

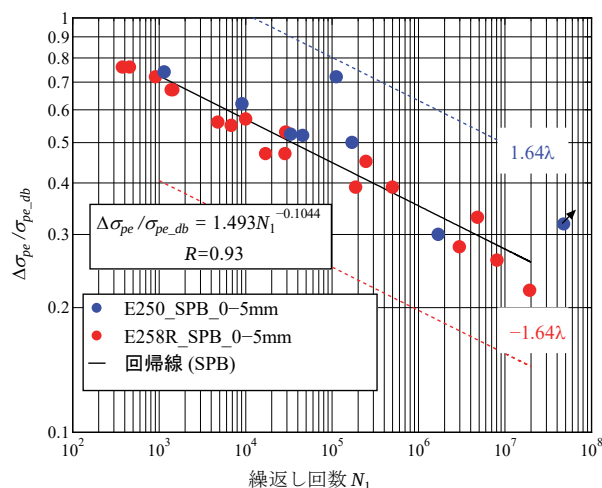


図-18 0～5mmの疲労寿命

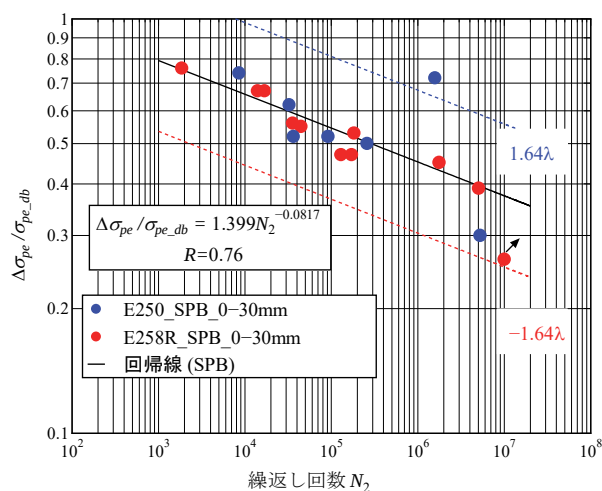


図-19 0～30mmの疲労寿命

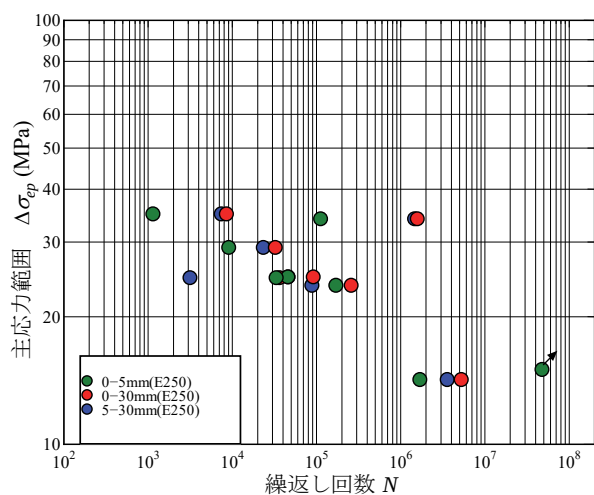


図-16 接着剤E250の疲労寿命

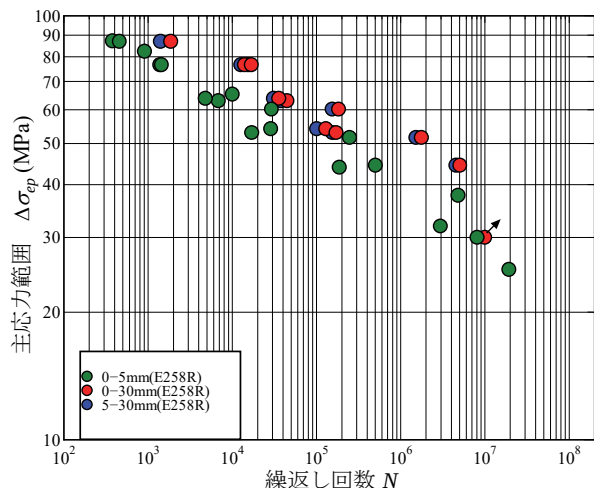


図-17 接着剤 E258R の疲労寿命

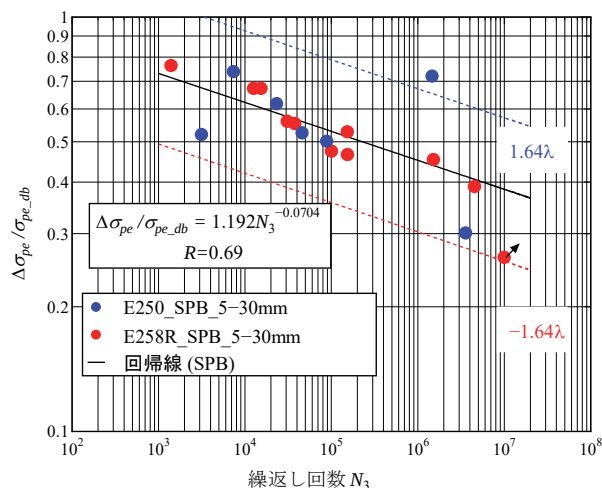


図-20 5～30mmの進展寿命

既往の研究データ¹⁴⁾との比較を行った。既往の研究では、両面に鋼板の当て板を接着した鋼材に繰返し引張荷重を載荷し、はく離寿命を評価したものである。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、引張試験と曲げ試験の結果では、同様の傾向が見られ、初期はく離寿命、進展寿命の両方において決定係数が0.71以上であることから、作用力によらず接着接合部の

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。さらに、接着剤別では、E258Rの場合、引張試験と曲げ試験の両方ではばらつきが少ないこと、また、E250の場合、引張、曲げの両試験で、ばらつきが大きいこともわかった。

(4) 破壊形式

破壊形式がはく離に及ぼす影響を考察するため、破壊

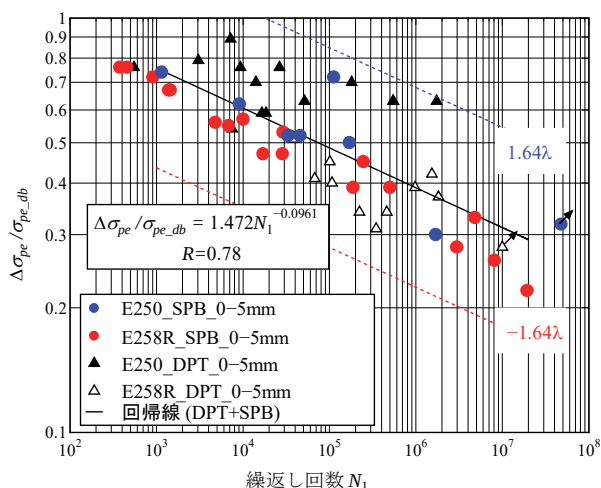


図-21 0~5mmの疲労寿命 (比較)

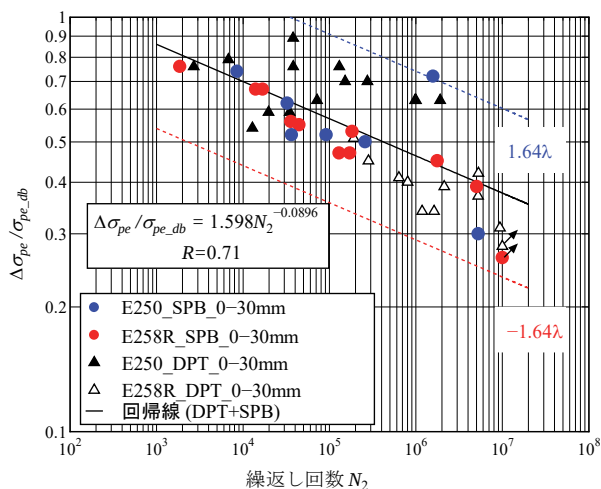


図-22 0~30mmの疲労寿命 (比較)

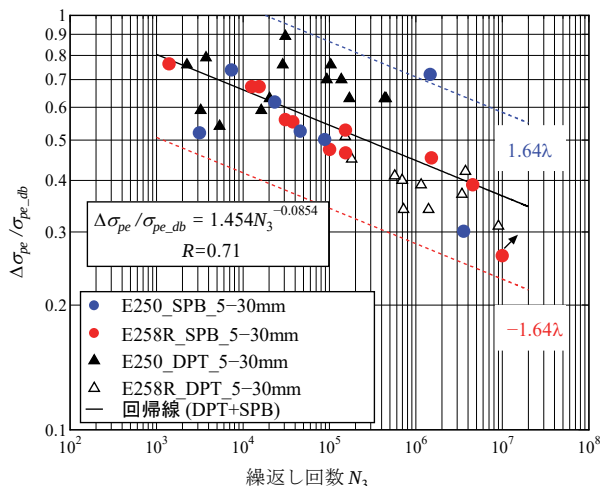


図-23 5~30mmの進展寿命 (比較)

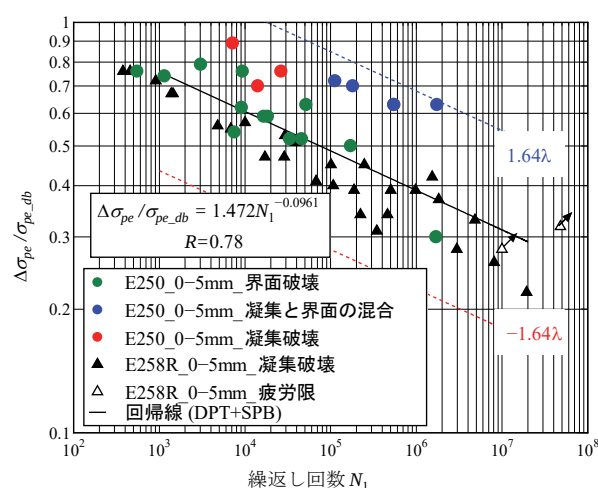


図-24 0~5mmの疲労寿命 (破壊形式分布)

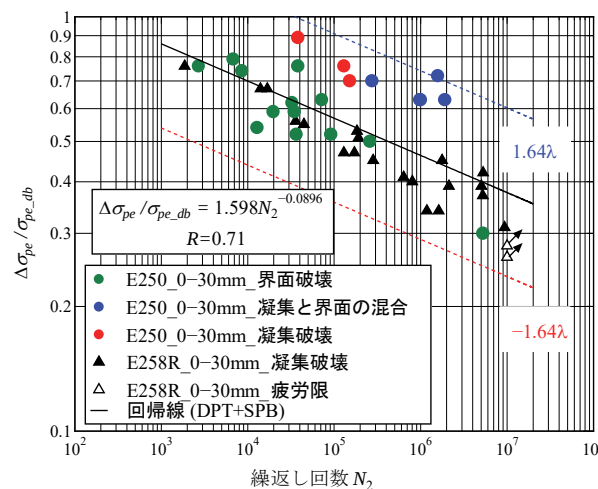


図-25 0~30mmの疲労寿命 (破壊形式分布)

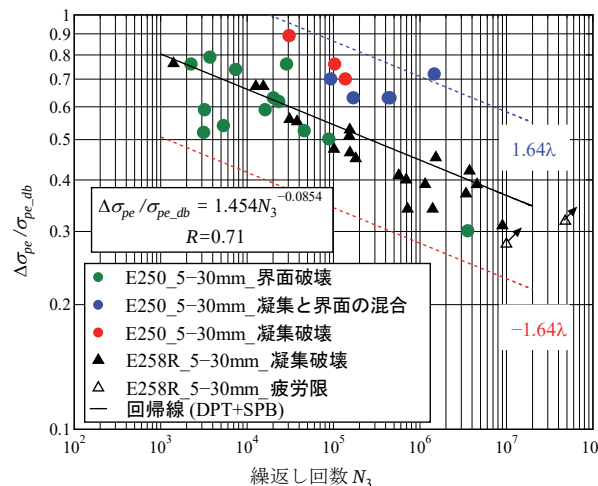


図-26 5~30mmの進展寿命 (破壊形式分布)

形式別に比較を行った。図-24、図-25、図-26に、破壊形式別に色分けした図を示す。図より、E258Rにおいては、はく離進展長さに関係なく、ばらつきが少ないことが読み取れる。これは、すべての試験片が凝集破壊によるはく離であるため、破壊形式によるばらつきが少ないといえる。一方、E250では、界面破壊の場合、E258Rと同様の傾向を示しているが、凝集破壊や凝集と界面の混合破壊の場合、強度が大きくなる傾向が見られた。これは、静的試験で用いた試験片が界面破壊であり、その結果で無次元化したためこのような結果になったと考えられる。そのため、凝集破壊による結果で無次元化することで、回帰線付近になると予想される。

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鋼板同士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が整理すれば、対象とした2種類のエポキシ樹脂接着剤において、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) 引張荷重が作用する際の疲労強度を評価した事例と合わせて比較を行ったところ、高い精度ではく離の疲労強度を整理することができ、作用力によらない評価ができる可能性が示唆された。
- (3) 試験体の多くは、母材に近い接着層内部ではく離が発生し、破壊形式が凝集破壊であった。しかし、一部試験体では、接着剤と母材の間の鋼材ではく離が発生する界面破壊が見られ、凝集破壊に比べ強度が低くなることが確かめられた。

以上のことから、曲げあるいは引張荷重の作用下で、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の統一的な評価方法が示された。なお、接着接合部の疲労設計に向けた課題として、曲げと引張においては、同様の方法で評価ができたが、ほかの作用力に対する適用性については、別途検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会腐食した鋼構造物の長寿命化のための性能回復技術検討小委員会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法，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，複合構造レポート09，土木学会，2013。
- 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，複合構造レポート05，土木学会，2012。
- 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)，複合構造シリーズ09，土木学会，2018.7
- 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，第19回応用力学シンポジウム講演概要集，pp.45-46，2016。
- 7) Shimizu M, Ishikawa T, Hattori A, Kawano H.: Failure criteria for debonding of patch plate bonded onto steel members subjected to bending. *Journal of JSCE*, pp.310-322, 2014, 2.
- 8) Bocciarelli M, Colombi P, Fava G, Poggi C. Prediction of debonding strength of tensile steel/CFRP joints using fracture mechanics and stress based criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(2):229-313, 2009.
- 9) 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.
- 10) National Research Council: Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, CNR-DT 202, 2007.
- 11) Schnerch, D., Dawood, M. Rizkalla, S. and Sumner, E.: Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, *Construction and Building Materials*, Vol.21, pp.1001-1010, 2007.
- 12) 中村一史，手塚渉太，タイウィサル：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。
- 13) 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。
- 14) タイウィサル，中村一史，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，構造工学論文集，Vol.74A，pp.56-66，2018。
- 15) Fernandez G, Vandepitte D, Usabiaga H, Debruyne S. Static and cyclic strength properties of brittle adhesives with porosity. *Procedia Structural Integrity* 2017;7:291-298.
- 16) Wang HT, Wu G, Pang YY, Shi JW, Zakari HM. Experimental study on the bond behavior between CFRP plates and steel substrates under fatigue loading. *Composites Part B* 2019; 176(1), 12 pages.
- 17) 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。
- 18) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，1994。

(Received August 26, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY ON FATIGUE STRENGTH OF ADHESIVE BONDED JOINTS UNDER CYCLIC BENDING STRESS

Kyosuke TAKAHASHI, Hitoshi NAKAMURA, Thay VISAL and Hisakazu HORII

In the method of bonding steel or FRP plate to recovery of the performance of members, the evaluation of debonding of adhesive bonded joints in design and verification is an issue. In particular, standards for fatigue design have not established because the data of debonding strength under cyclic stress is scarce. In this study, a specimen was prepared by bonding a steel patch to steel plate using epoxy resin Konishi E258R and observed debonding under cyclic bending stress. The result shows that the fatigue life of adhesively bonded joints can be evaluated in the function of principal stress ratio, the ratio of principal stress range against principal stress at debonding by bending test. Also, the result of bending test and those of tensile test can be seen similar tendency. It was suggests that we can evaluated fatigue durability independent of the working force.