

(61) 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

タイ ウィサル¹・中村 一史²・林 帆³・堀井 久一⁴

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士後期課程 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: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京 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正会員 雲南大学 講師 都市建設・管理学院 (中華人民共和国 雲南省昆明市翠湖北路2号)
E-mail: lin-fan@ynu.edu.cn

⁴正会員 コニシ株式会社 土木建設営業本部 土木開発部 (〒東京都千代田区神田錦町2-3 竹橋スクエア)
E-mail: horii-hisakazu@bond.co.jp

本研究は、当て板接着による鋼構造物の補修・補強において、接着接合部の疲労強度の評価方法とその設計法を提案することを目的としたものである。エポキシ樹脂接着剤を用いて、鋼板に当て板を接着した接着接合部の静的引張試験・疲労試験を行って、疲労強度特性を実験的に検討した。実験では、2種類のエポキシ樹脂接着剤を用いて、鋼板の両面に、軸剛性の異なる、鋼製あるいはCFRP製の当て板を接着接合した試験片に対して、破壊まで引張力を与える静的試験および繰り返し引張力を与える疲労試験を行った。実験の結果、最大主応力に対する主応力範囲の比と繰り返し回数の関係で整理すれば、接着剤の種類によらず、接着接合部の疲労強度を精度よく評価できること、また、最大主応力に対して、主応力範囲を30%以下とすれば、十分な疲労耐久性 (10^7 回) を確保できることが確かめられた。

Key Words : adhesive joint, fatigue strength, debonding propagation, principal stress, patch plate

1. はじめに

鋼橋などのインフラ鋼構造物では、環境作用による腐食や、車両交通による金属疲労等によって、劣化が進んでおり、その適切な対策が求められている。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、当て板接着工法（鋼板接着工法または炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと呼ぶ）接着工法）¹⁾が注目されており、研究開発が活発に行われている。当て板接着工法は、繰返し荷重が作用することによる疲労き裂が生じた鋼部材の補修に適用した場合、疲労寿命を大幅に延命化できること²⁾が確かめられているが、実用化には至っていない。その理由として、接着接合部に繰返し荷重を受ける場合、疲労による接着接合部のはく離と耐久性の評価が課題となっている。疲労破壊は、厚さ0.5mm程度の非常に薄い接着剤の内部で生じるため、現象の観察や計測が難しい側面がある。

現状では、対象とする部材を適切にモデル化して、実験的に検証されており、接着接合部の静的強度に

対する検討は、比較的多く実施されている^{1), 3), 4)}。しかしながら、溶接継手部の疲労対策として当て板と鋼板の接着接合部の疲労耐久性については、これまでにいくつかの研究^{5)~8)}が行われているものの、データが少なく、疲労設計法もないのが現状である。

また、当て板の接着端部では、断面が急変するため、接着剤の応力性状としては特異点となる。接着端部の接着層の内部には、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、それらが限界値を超えるとのはく離すると考えられているが³⁾、設計に適用できる具体的な推奨値は示されていない。

さらに、接着によって補修・補強された部材の疲労耐久性を評価する場合や、再劣化によって補修・補強箇所の当て板がはく離した場合の余寿命を評価するためには、接着接合部のはく離の進展挙動とその進展寿命の推定方法について、明らかにしておく必要がある。

本研究では、当て板接着による鋼構造物の補修・補強の設計法の確立に向けて、当て板（鋼、CFRP）と鋼部材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、静的引張試験と疲労試験を行った。対象とした試験片は、板厚の異なる鋼板または積層CFRP板を2液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤を用いて、鋼板に接着接合したものであり、接着端部から進展するはく離に着目した疲労試験を実施して、疲労強度を検討した。

2. 接着接合部の評価方法と試験片の設計

(1) 接着剤に生じる主応力

前述したように、当て板端部の接着剤には、高いせん断応力と垂直応力が生じるため、その端部からはく離が進展する。本研究では、接着端部の接着剤に生じるせん断応力、垂直応力、主応力を用いて、接着接合部の疲労強度を評価することとした。主応力 σ_{ep} は、次式より算出した³⁾。

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

ここに、 τ_e は接着剤に生じるせん断応力、 σ_e は接着剤に生じる垂直応力である。せん断応力 τ_e と垂直応力 σ_e の値については、軸力を受ける部材による接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の収束式³⁾から計算した。

(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、平鋼板（500×50×9mm）の両面に、鋼板（300×50× t ， $t=4.5\text{mm}$ ，6.0mm，9.0mm，16.0mm）またはCFRP板（300×50×1.2mm（1層））を、2液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤（コニシE250とコニシE258R，厚さ0.4mm）で接着したものを実験片とした。ここで当て板の長さは、鋼板中心部の接着剤にせん断応力が生じないこと、また、疲労試験機のつかみ間隔の制限から決定される最大長さを考慮して、300mmとした。表-1に、鋼板、接着剤およびCFRP板の機械的性質を示す。なお、CFRP板の弾性係数、ポアソン比、せん断弾性係数には直交異方性を考慮している（1：長手方向，2：幅方向，3：厚さ方向）。

3. 静的試験によるはく離強度の検討

当て板接着工法で一般に用いられている接着剤（コニシE250，コニシE258R）の接着特性（接着剤に生じるせん断応力、はく離強度）を把握するために、当て板が接着された鋼板の引張試験を行った。

(1) 検討項目

着目する検討項目は、次の接着剤に生じるせん断応力とはく離強度であり、破壊までの引張試験を行って検討する。

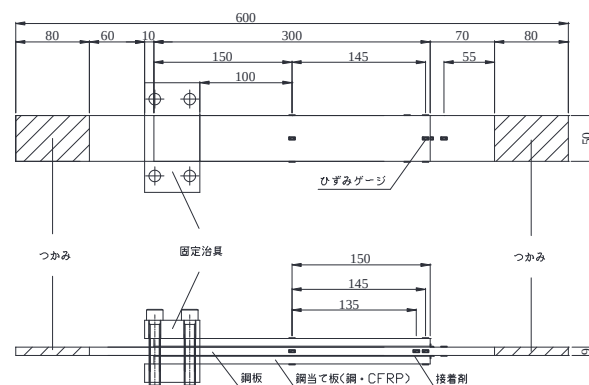


図-1 接着接合部試験片

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 E (MPa)	ポアソン 比 ν	せん断弾 性係数 G (MPa)	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)
鋼板 (SM490YA)	210	0.28	82.0	410	554
接着剤 (E250)	2.6	0.34	0.97	—	—
接着剤 (E258R)	3.6	0.34	1.34	—	—
CFRP 板 (高強度タイプ)	$E_{11}=150$	$\nu_{12}=0.34$	$G_{12}=5.2$	—	2,680
	$E_{22}=8$	$\nu_{23}=0.05$	$G_{23}=4.0$		
	$E_{33}=8$	$\nu_{31}=0.05$	$G_{31}=5.2$		

表-2 実験シリーズ

試験片名	接着剤	鋼当て板の厚さ (mm)	接着剤の厚さ (mm)	試験体数
E250P16	E250	16	0.4	3
E258RP16	E258R	16	0.4	3

a) 接着剤に生じるせん断応力

接着剤に生じるせん断応力は、鋼板に設置された2点間のひずみゲージの値を用いて次式により算定する³⁾。

$$\tau_e \left(\frac{L_{k+1} + L_k}{2} \right) = - \frac{t_s}{2} \cdot \frac{\sigma_s(L_{k+1}) - \sigma_s(L_k)}{L_{k+1} - L_k} \quad (2)$$

ここに、 τ_e は接着剤のせん断応力（N/mm²）， σ_s は鋼板の軸方向応力（N/mm²）， L_k は当て板の接着中央から鋼板応力の k 番目の計測位置までの距離（mm）， t_s は鋼板の厚さ（mm）である。

接着剤のせん断応力は、当て板端部で最大となることから、当て板端部近傍の鋼板にひずみゲージを設置して検討する。本検討では、当て板中央から135mmと145mmの位置にひずみゲージを設置し、当て板中央から140mmの位置の接着剤に生じるせん断応力を算出する。

b) はく離強度

はく離強度は、微小なはく離を観測できるマイクロスコープ（サンコーDino-Lite Premier2 S Polarizer，倍率：200倍）で連続静止画より判断する。同時に、式(2)を用いて当て板が端部からはく離した時の鋼板のひずみ値より算出された接着剤に生じるせん断応力や接着接合部の端部のひずみの急変部からも確認する。

(2) 実験シリーズ

表-2に、実験シリーズを示す。鋼板母材（9mm）の降伏強度を考慮して、厚さ16mmの当て板をそれぞれの接着剤E250とE258Rの3体ずつを準備する。接着剤の厚さは0.4mmで管理する。試験片とひずみゲージの設置位置を、図-1に示す。また、片側の接着端部を治具を用いて締め付けて、はく離の発生を防止している。なお、固定治具の有無について、別途、疲労試験により比較した結果、着目側において、静的・動的载荷時におけるひずみや、初期はく離の発生寿命、はく離の進展挙動に差異はなく、固定治具の影響はないことを確認している⁹⁾。

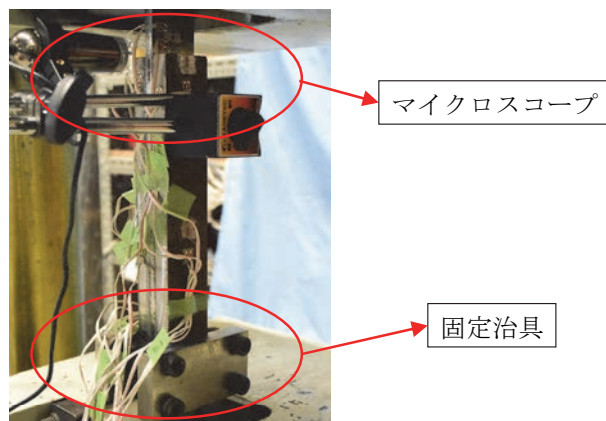


図-2 試験片のセットアップ図

(3) 試験片の製作と実験方法

鋼板の接着面の素地調整は、アルミナ（#40）によるブラスト処理とした。アセトンによる脱脂後、接着剤で当て板を接着した。当て板と鋼板の接着層の厚さは、直径0.4mmのガラスビーズを用いて0.4mmに管理した¹⁰⁾。養生の温度と時間は、約40℃、24時間とした。さらに、はく離の発生のばらつきを小さくすることおよびマイクロスコープで観察しやすくするため、接着端部と側面の接着剤によるフィレット部は、グラインダとサンドペーパー（#80～#1200）を用いて、垂直・平面になるように仕上げた。

図-2に、試験片のセットアップ図を示す。引張試験には、油圧チャック式万能試験機（静的容量：1000kN）を用いて、変位制御により载荷を行った。载荷速度は2mm/minとし、室温（約13℃）で試験を行った。マイクロスコープでの連続静止画については、1秒間隔の撮影で行った。

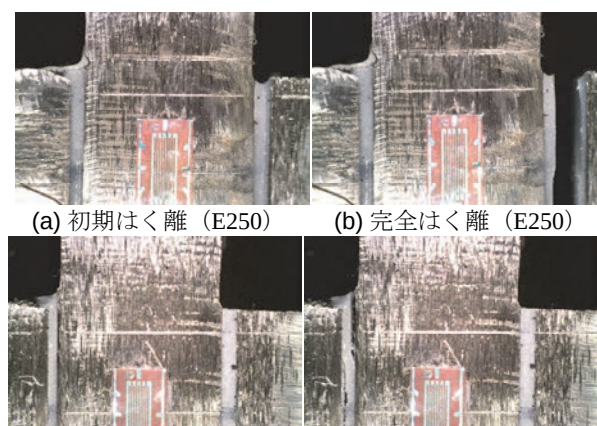


図-3 当て板端部のはく離時の画像

(4) 接着接合部の静的強度の評価

図-3に、接着剤E250、E258Rのマイクロスコープで撮影された当て板端部での接着剤のはく離時の画像の例を示す。画像解析により、E250とE258Rの平均破壊荷重はそれぞれ72.5kNと162.1kNであり、E258Rの平均破壊荷重はE250の平均破壊荷重より大きい（2.2倍）ことがわかる。また、E258Rの初期はく離から完全破壊までの時間は、E250の場合より長くなる傾向であった。表-3に、静的引張試験結果として、各試験片の接着剤の厚さ、はく離荷重、はく離時の引張応力、主応力をそれぞれ示す。表より、すべての試験片で、接着剤の厚さやはく離強度のばらつきが小さいことがわかる。

図-4に、引張応力とせん断応力の関係を示す。せん断応力は、当て板端部付近に設置されたひずみゲージから式(2)で計算された、当て板中央から140mmの位置の接着剤に生じるせん断応力である。画像解析からはく離と判定された時の引張応力は、図-4に示した、せん断応力の急変部の引張応力と一致していることを確認している。また、接着剤に生じるせん断応力の実験値は、表-1の材料物性値と文献3)から計算される理論値（図中の直線）より小さいが、低い応力の範囲ではほぼ一致している。しか

表-3 静的引張試験の結果

試験片	接着剤の厚さ t_e (mm)	はく離荷重 P_{max} (kN)	はく離時の引張応力 σ_{tu} (MPa)	はく離時の主応力 σ_{ep_max} (MPa)
E250-N1	0.55	75.2	174.8	42.3
E250-N2	0.55	68.3	159.2	38.4
E250-N3	0.48	74.2	171.7	41.7
平均	0.53	75.2	168.6	40.8
E258-N1	0.45	163.2	378.3	109.9
E258-N2	0.47	166.6	386.2	112.2
E258-N3	0.48	156.4	363.2	105.3
平均	0.47	162.1	375.9	109.1

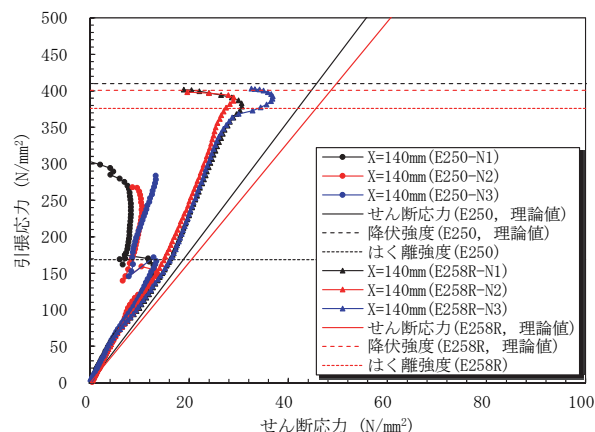


図-4 引張応力と端部の接着剤のせん断応力の関係

しながら、接着剤E258Rの高い応力の範囲では、両者の差異は大きくなった。これは、接着剤が非弾性となっている可能性もあるが、差異が大きくなる変化点で、画像解析からははく離は判別できなかった。

(5) 主応力による破壊包絡線

表-3より、E250とE258Rの平均最大主応力はそれぞれ40.8MPaと109.1MPaであり、E258Rの最大主応力重はE250の最大主応力より比較的大きいことがわかる（2.8倍）。図-5に、接着剤E250とE258Rの実験データと主応力による破壊包絡線にプロットしたものである。破壊包絡線は式(1)により得られる曲線である。実験値は、接着剤ごとに、図のような破壊包絡線にプロットされる。

(6) 破壊モード

当て板がエポキシ樹脂で接着された鋼板が静的引張荷重を受けた場合、図-3に示したように、接着接合部の内部にはく離が発生し、凝集破壊であることがわかる。

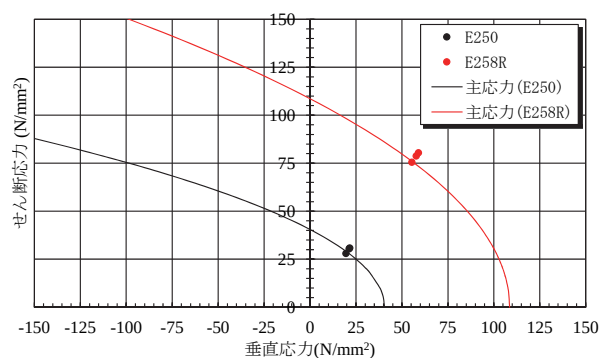


図-5 主応力による破壊包絡線

表-4 実験シリーズと条件

接着剤	当て板の厚さ t_p (mm)	振動数 f (Hz)	主応力範囲 $\Delta\sigma_{ep}$ (MPa)	試験片数
E250	9	15, 5	22.1–36.3	8
	6	15, 5		4
	4.5	15, 5		1
	CFRP: 1.2	15, 5	32.3	1
E258R	9	15	34.3–55.8	6
	6	15		4
	4.5	15		1
	CFRP: 1.2	15	44.5	1

4. 疲労試験による耐久性の検討

(1) 試験条件と試験片

静的引張試験片と同様な条件で、当て板がエポキシ樹脂で接着した鋼板の試験片を準備した。表-4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、電気油圧サーボ式材料強度試験機（島津サーボパルサEV200kN）を使用した。鋼板の公称応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ は、疲労試験機の容量を考慮して、100, 120, 140, 160, 180, 270, 310MPaの7ケースとし、当て板端部の接着剤の主応力範囲 $\Delta\sigma_{ep}$ に換算すると、22.1–55.8MPaの範囲で実験を行った。応力比 R は、全ケースで0.1とした。載荷速度 $f=15\text{Hz}$ で疲労試験を行ったが、進展速度が速い場合、一部の疲労試験では5Hzに変更した。荷重の波形は正弦波とし、動ひずみ測定器（キーエンス製NR-600）を用い、2/1,000秒間隔で荷重中の荷重、変位および各ひずみの値を測定した。一連の疲労試験は室温（8～29℃の範囲）で行った。

はく離進展の計測方法は、ビーチマーク法、断線検知法、クラックゲージ、マイクロスコープによる方法を予め検討した。ビーチマーク法では、導入されるビーチマークが安定しない場合があること、半振幅での進展が大きいことから、計測が困難であった。また、断線検知法とクラックゲージによる方法では、設置するのが困難であり、断線が遅れる場合が多かった。本研究では、断線検知法とマイクロスコープによる画像解析の方法を組合せて計測した。

図-6に、試験片のセットアップ図を示す。静的引張試験と同様に、はく離の発生を制御するため、片側の接着端部を治具を用いて締め付けて、はく離の発生を防止している。もう片側の接着端部に、マイクロスコープを設置し、連続静止画を撮影した。な

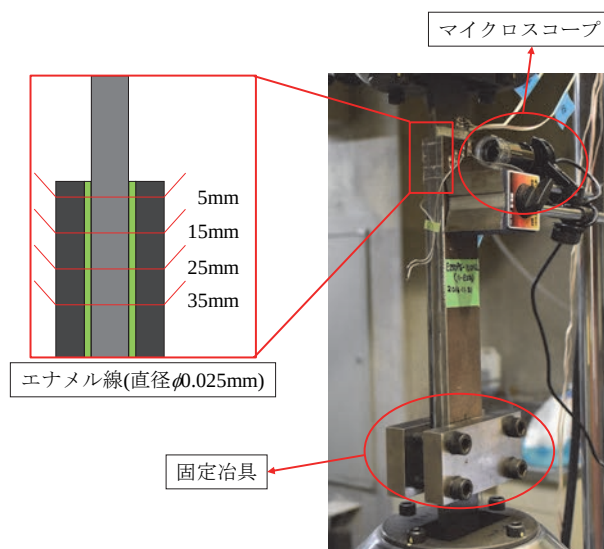


図-6 試験片のセットアップ

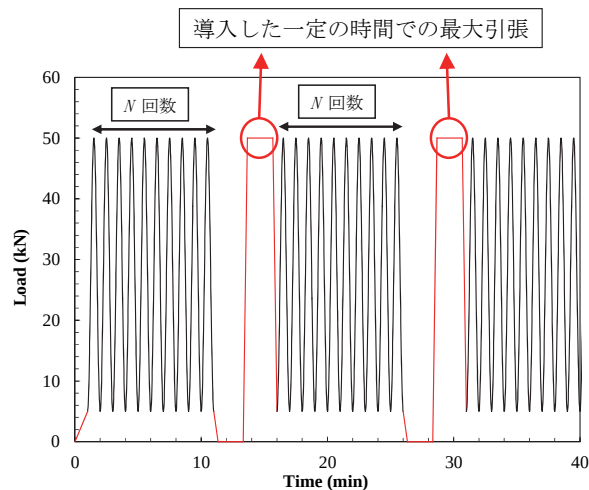


図-7 疲労試験の載荷プログラム

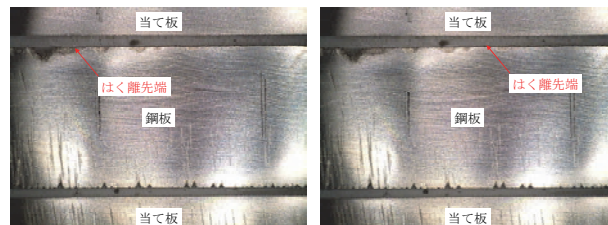
お、マイクロスコープでの撮影範囲の性能を考慮して、図-6に示すように、接着端部から5, 15, 25, 35mmの位置で4本のエナメル線 (φ0.025 mm) を貼り付け、断線検知法を導入した。エナメル線が断線されると、疲労試験が自動的に停止され、マイクロスコープでの撮影範囲を移動する仕組みとした。また、最大引張状態 (はく離面が開口する状態) で観察するため、図-7に示すような疲労試験の载荷プログラムで、所定の繰り返し回数の間隔ごとに一定の時間で最大引張を導入した。

疲労試験によって、試験片は、端部からはく離が進展するが、35mmのエナメル線を超えた段階で疲労試験を終了している。この時、試験片は、完全にはく離していないため、その後、静的引張試験で使用した万能試験機を用いて、当て板が完全にはく離するまで荷重を载荷し、破壊モードを確認した。

(2) はく離進展速度

接着端部の側面に接着したマイクロスコープによってはく離進展を計測した。図-8に、マイクロスコープで撮影された画像の計測の例である。また、図-9に、画像解析より抽出したデータからのプロットしたはく離長さと繰り返し回数の関係の一例を示す。図により、はく離長さ0~5mmまでの初期はく離では、ゆっくりで進展するが、はく離長さ5mm以上では進展速度が増加し、ほぼ線形挙動となることがわかる。

この関係により、本研究では、初期はく離ははく離長さ0~5mmまでの範囲を定義する。また、既往研究⁹⁾では、25mm (2~27mm) の進展寿命で検討したため、本研究では、繰り返し回数とはく離長さの関係により、試験開始からはく離長さ5mmまでの初期はく離寿命 (0~5mm) , 試験開始からはく離長さ30mmまでの



(a) はく離長さ $a=3.8\text{mm}$ (b) はく離長さ $a=9.7\text{mm}$

図-8 はく離の進展状況 (E258RP9-160N1)

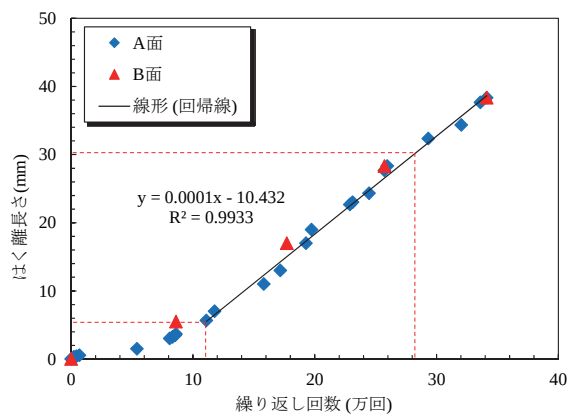


図-9 繰り返し回数とはく離進展長さの関係 (E258RP9-160N1)

く離寿命 (0~30mm) およびはく離長さ5mmから30mmまでの25mmの進展寿命のデータを抽出することとした。

(3) 繰り返し回数

前述したように、抽出したの初期はく離寿命0~5mm, はく離寿命0~30mmおよびはく離長さ5~30mmの25mmの進展寿命を、表-5に示す。また、試験番号

表-5 実験シリーズと所定のはく離長さまでの繰り返し回数

実験シリーズ	試験番号	$\Delta\sigma_{sn}$	$\Delta\sigma_{ep}$	繰り返し回数 (回)			備考	実験シリーズ	試験番号	$\Delta\sigma_{sn}$	$\Delta\sigma_{ep}$	繰り返し回数 (回)			備考
		(MPa)	(MPa)	0-5 mm	0-30 mm	5-30 mm				(MPa)	(MPa)	0-5 mm	0-30 mm	5-30 mm	
E250P9-100N1	2	100	25.9	545,697	996,717	451,019		E258RP9-100N1	12	100	31.0	10,000,000	10,000,000	0	疲労限
E250P9-100N2	3	100	25.9	1,735,674	1,905,812	170,137		E258RP9-120N1	9	120	37.2	221,928	1,619,357	1,397,429	
E250P9-100N3	8	100	25.9	51,567	71,852	20,286		E258RP9-120N2	10	120	37.2	—	5558	—	40mm
E250P9-100N4	18	100	25.9	545,349	979,226	433,877		E258RP9-120N3	11	120	37.2	460,666	1,178,438	717,772	
E250P9-120N1	4	120	31.1	550	2,699	2,249		E258RP9-140N1	13	140	43.4	107,091	801,149	694,059	
E250P9-120N3	6	120	31.1	—	6,103	—	140mm	E258RP9-160N1	15	160	49.6	101,006	281,760	180,753	No.12 再疲労
E250P9-120N5	19	120	31.1	9,330	38,101	28,771		E258RP9-180N1	29	180	55.8	39,090	191,332	152,242	
E250P9-140N1	1	140	36.3	—	18,871	—	70mm	E258RP6-120N1	17	120	34.3	345,431	9,338,237	8,992,806	
E250P6-100N1	26	100	23.9	26,430	129,954	103,524		E258RP6-140N1	22	140	40.0	1,819,045	5,229,686	3,410,641	
E250P6-100N2	28	100	23.9	7,176	38,000	30,824		E258RP6-160N1	16	160	45.7	3,532	189,212	185,680	
E250P6-120N1	14	120	28.6	18,394	34,640	16,246		E258RP6-160N2	21	160	45.7	1,528,967	5,271,482	3,742,515	
E250P6-120N2	20	120	28.6	16,515	19,753	3,238		E258RP4.5-160N1	25	160	42.4	978,686	2,124,789	1,146,103	
E250P4.5-100N1	27	100	22.1	14,085	151,335	137,250		E258RC1.2-310N1	24	310	44.5	67,474	634,801	567,327	
E250C1.2-270N1	23	270	32.3	7,505	12,856	5,351									

No.12 (E258RP9-100N1) では、1000万回の繰返し荷重を与えても破壊しないため、ここでは、接着剤E258Rの疲労限と判断した。その後、疲労限の載荷荷重より大きな荷重 ($\Delta\sigma_{sn}=160\text{MPa}$) で疲労試験を再開した (試験番号No.15)。さらに、一部の試験では、エナメル線の断線が検知できなかった場合もあったため、所定のはく離長さが計測できない試験片もあった (試験番号No.1, 6, 10)。

5. 接着接合部の疲労強度の評価

(1) 主応力で評価した疲労強度

図-10および図-11に、表-5に示した接着剤E250とE258Rの初期はく離寿命、30mmまではく離寿命および25mmの進展寿命を整理したS-N関係を示す。図より、疲労寿命は主応力範囲で整理した場合、E258Rについては評価可能であるが、E250の疲労寿命にばらつきが大きく、評価が困難であることがわかる。この理由については、別の評価結果から考察する。また、E258Rの初期はく離については、30mmまではく離寿命と25mmの進展寿命よりばらつきがあることがわかる。接着端部の仕上げの状態や、接着剤の厚さにばらつきがあることが要因として考えられる。

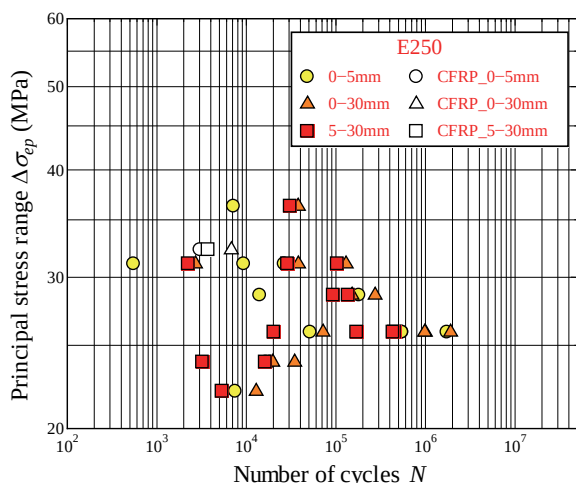


図-10 接着剤 E250 の疲労寿命

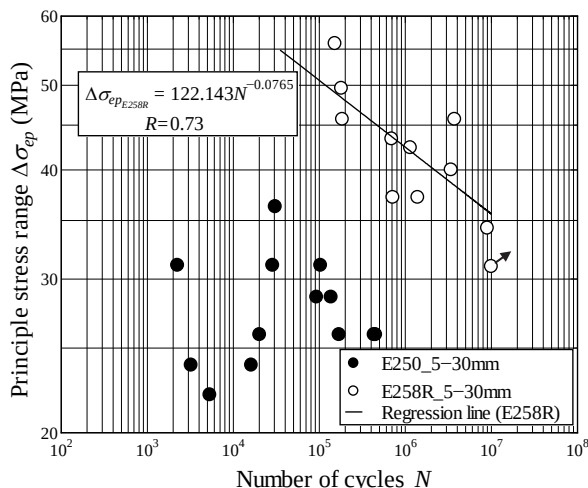


図-12 主応力で評価された疲労寿命

図-12に、接着剤E250とE258Rの25mmの進展寿命を主応力範囲で整理したS-N関係を示す。図より、接着剤の主応力範囲で整理すると、接着剤E258Rでは、当て板種類・厚さに依存せず、ばらつきの小さいS-N関係が得られるが、接着剤E250ではばらつきが大きく、接着剤の種類にも依存することがわかり、はく離進展寿命の定量的な評価は、困難であるといえる。

(2) 最大主応力に対する主応力範囲の比 ($\Delta\sigma_{ep}/\Delta\sigma_{ep_max}$) で評価した疲労強度

図-13に、接着剤E250とE258Rの25mmの進展寿命を主応力比 (静的引張試験で得られた最大主応力に対する疲労試験で行った主応力範囲の比: $\Delta\sigma_{ep}/\Delta\sigma_{ep_max}$) で整理したS-N関係を示す。図より、 $\Delta\sigma_{ep}/\Delta\sigma_{ep_max}$ と繰返し回数の関係で整理すれば、相関係数Rは0.74であり、接着剤の種類によらず、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。

また、標準偏差 σ による疲労強度の評価を試みる。複合構造標準示方書による材料強度の特性値¹¹⁾は、特性値を下回る確率を5%とし、正規分布を仮定して係数kを1.64としている。図-13に、回帰式に対して $\pm 1.64\sigma$ の範囲を破線で併記しているが、5～30mmの進展寿命のデータはこの範囲内に存在して

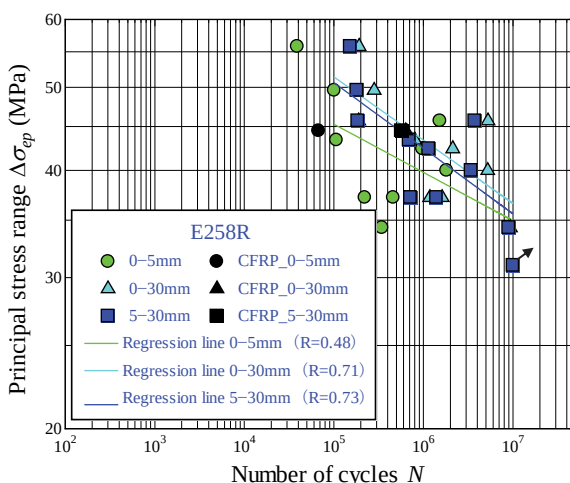


図-11 接着剤 E258R の疲労寿命

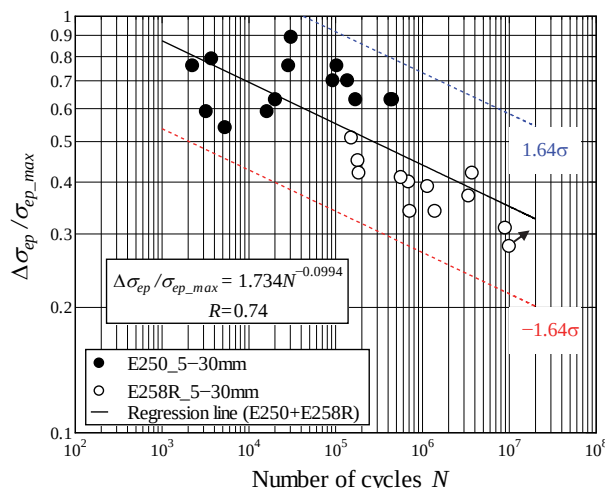


図-13 主応力比で評価された疲労寿命

いることがわかる．なお，ここに示していないが，初期はく離寿命，30mmまではく離寿命のデータについては， $\pm 1.64\sigma$ に収まっていることを確認している．

また，図より，接着剤E250で行った疲労試験の主応力範囲は，最大主応力に対して，ほぼ55%以上であった．したがって，接着剤E250では，比較的高い主応力範囲が繰り返し発生しており，クリープ等の現象が疲労寿命にばらつきが生じている一因と考えられる．

図-14に，接着剤E250とE258Rの初期はく離寿命，30mmまではく離寿命および25mmの進展寿命を最大主応力に対する主応力範囲の比で整理したS-N関係を示す．各疲労寿命について最大主応力に対する主応力範囲の比で評価した回帰線を式(3)に示す．

$$\Delta\sigma_{ep} / \Delta\sigma_{ep_max} (0-5mm) = 1.449N^{-0.0880} \quad R = 0.62$$

$$\Delta\sigma_{ep} / \Delta\sigma_{ep_max} (0-30mm) = 1.886N^{-0.1006} \quad R = 0.72$$

$$\Delta\sigma_{ep} / \Delta\sigma_{ep_max} (5-30mm) = 1.733N^{-0.0994} \quad R = 0.74$$

(3)

図-15に，既往研究⁹⁾の行った疲労試験の結果を考慮して25mmの進展寿命を最大主応力に対する主応力範囲の比で整理したS-N関係を示す．なお，既往研究の行った試験片ではすべてCFRP板の当て板である．それらは，2～27mmまでの25mmの進展寿命

で評価したものであり， τ_e と σ_e の値については，汎用有限要素解析プログラム（Msc. Marc2013）を用いて，積層CFRP板の間の接着剤を考慮して解析モデルを作成し，算定されている．図より，本研究のデータは，既往研究のデータとほぼ一致し，回帰線がほぼ変わらないことがわかる．CFRP板を含めた25mmの進展寿命の回帰線を式(4)に示す．

$$\Delta\sigma_{ep} / \Delta\sigma_{ep_max} (25mm) = 1.860N^{-0.1008} \quad R = 0.71$$

(4)

また，回帰線により，最大主応力に対して，主応力範囲を30%以下とすれば，十分な疲労耐久性（ 10^7 回）を確保できることが確かめられた．

(3) 破壊形式と温度の影響

疲労試験後，破壊形式を確認するため，万能試験機を用いて，当て板が完全にはく離するまで荷重を載荷した．その結果，接着剤E258Rのすべての試験片が接着層内部に生じた凝集破壊であった．一方，E250の試験片の場合，鋼板と接着の間の接着破壊（界面破壊），接着層の凝集破壊および接着破壊と凝集破壊の3つの破壊形式が確かめられた．ただし，接着層の破壊面は，鋼板の界面に近いことも確認された．また，接着破壊と凝集破壊の試験片については，凝集破壊は当て板端部付近にあることが多く見られた．

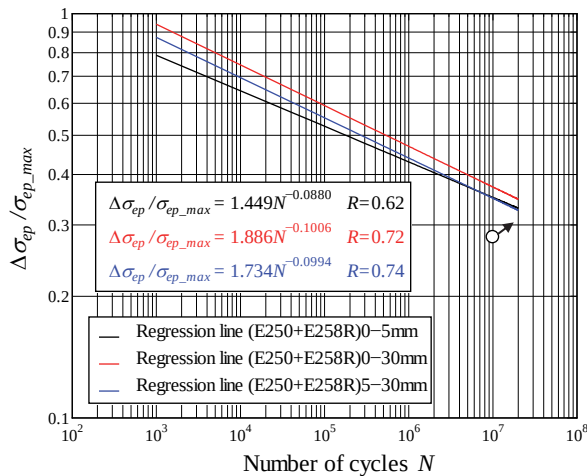


図-14 0～5 mm，0～30 mm，5～30mm の疲労寿命

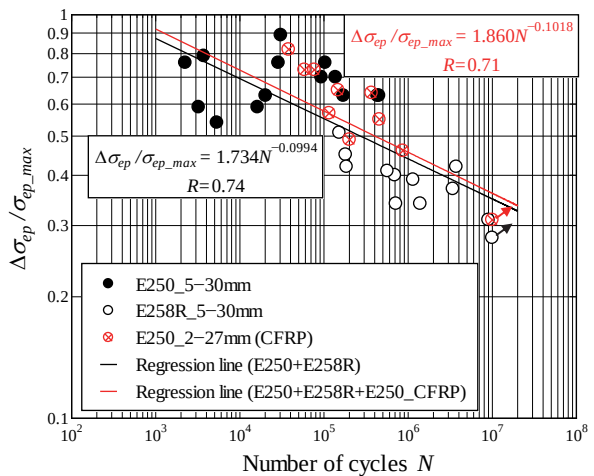


図-15 5～30mm の疲労寿命（CFRP 板を含む）

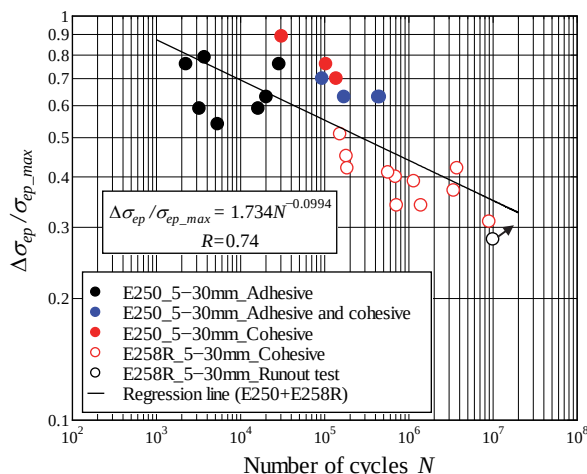


図-16 5～30mm の疲労寿命（破壊形式分布）

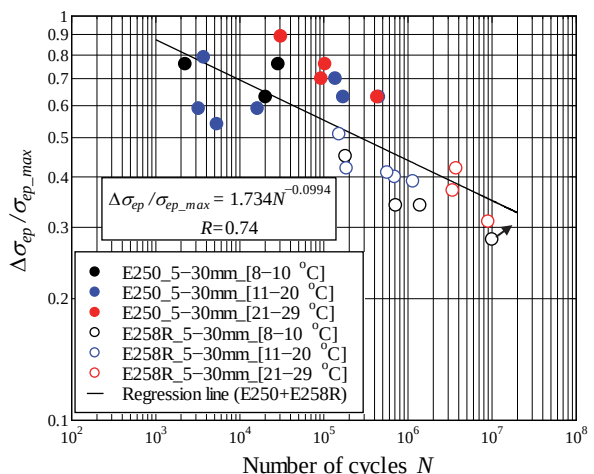


図-17 5～30mm の疲労寿命（温度分布）

破壊形式ごとにプロットした25mmの進展寿命を、図-16に示す。図より、接着剤E250の場合、接着破壊の試験片は凝集破壊の試験片より、はく離進展速度が高いという傾向が見られ、進展寿命のばらつきに影響すると考えられる。

また、上記したように、一連の試験は、室温とはいえ、8～29℃の温度範囲で行ったため、接着剤に対する温度の影響も検討した。ただし、一部の疲労試験では室温のデータが得られていないため、8～10℃、11～20℃、21～29℃の3つの段階で整理した。図-17に、温度分布でプロットした25mmの進展寿命を示す。図より、温度が高くなるほど繰り返し回数が大きく、特に、温度20℃以下で行った試験片では、繰り返し回数が小さいという傾向が見られた¹²⁾。

6. まとめ

本研究では、鋼構造物の補修・補強の設計法の確立に向けて、鋼製あるいはCFRP製の当て板と鋼板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。その結果、次のことがいえた。

- (1) 最大主応力に対する主応力範囲の比と繰り返し回数の関係で整理すれば、当て板の厚さ・種類および接着剤の種類によらず、接着接合部の疲労強度を精度よく評価できる。
- (2) はく離時の接着剤の最大主応力に対して、主応力範囲を30%以下とすれば、十分な疲労耐久性(10^7 回)が確保できることが確かめられた。
- (3) 静的引張荷重または繰返し荷重によるはく離は、鋼板の界面に近い接着層の内部で発生すること、また、その破壊形式は凝集破壊であることが確かめられた。ただし、一部の疲労試験片では、鋼板と接着剤の間の接着破壊、または接着破壊と凝集破壊が生じた。
- (4) 繰返し応力が静的引張強度に対して相対的に大きい場合、疲労寿命のばらつきが大きくなる傾向が見られた。ばらつきの要因としては、接

着剤のクリープ現象や環境温度などが考えられた。

参考文献

- 1) 複合構造委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端、複合構造レポート 05、土木学会、2012。
- 2) Nakamura, H., et al. : Development of Pre-tensioning Device for CFRP Strips and Applicability to Repair of Cracked Steel Members, *Advances in Structural Engineering*, 17(12), pp. 1705–1717, 2014.
- 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 09、土木学会、2013。
- 4) Zhao, X. L. : FRP-Strengthened Metallic Structures, CRC Press, 2013.
- 5) Colombi, P., et al. : Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 39, Issue 1, pp. 61–71, 2003.
- 6) Liu, H. B., et al. : The Effect of Fatigue Loading on Bond Strength of CFRP Bonded Steel Plate Joints, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, BBFS2005, pp. 451–456, 2005.
- 7) Bocciarelli, M., et al. : Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates, *Composite Structures*, Vol.87, pp. 334–343, 2009.
- 8) 林帆, 中村一史, 前田研一, 山谷佑介, 伊原啓裕 : 鋼板と CFRP 板の接着継手の疲労強度と繰返し載荷後の残存強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp. 659–666, 2009.
- 9) 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, 構造工学論文集 Vol.62A, pp. 906–914, 2016.
- 10) 姜威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫 : CFRP 板と鋼板の接着特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp. 595–602, 2006.
- 11) 土木学会複合構造委員会 : 2014 年制定複合構造標準示方書, 丸善出版, 2014.
- 12) 姜威, 山谷佑介, 中村一史, 前田研一, 伊原啓裕 : 温度変化時における鋼板と CFRP 板の接着継手強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp. 651–658, 2009.

EVALUATION OF FATIGUE STRENGTH OF ADHESIVELY BONDED JOINTS BETWEEN STEEL PLATES AND PATCH PLATES USING EPOXY RESIN ADHESIVE

Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA, Fan LIN and Hisakazu HORII

In this paper, toward the establishment of repair or strengthening method of steel structures by externally bonded patch plates, the static tensile tests and fatigue tests of adhesively bonded joints are carried out and the fatigue durability is evaluated. Two types of epoxy resin, Konishi E250 and Konishi E258R and two types of patch plates, steel and CFRP laminates are considered varying the thickness of patch plates and the applied stress ranges. 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 maximum principal stress by tensile test, independently to either the thickness/type of patch plates or type of adhesives. Also, the fatigue limit is confirmed to be approximately at 30% of maximum principal stress.