

CFRP板と鋼板の接着接合部の疲労強度と はく離進展の評価

手塚 渉太¹・中村 一史²・林 帆³

¹正会員 中日本高速道路株式会社 東京支社 厚木工事事務所 東名工事区
(〒243-0032 神奈川県厚木市恩名一丁目14番13号)

E-mail: s.tezuka-aa@c-nexco.co.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)

本研究では、CFRP板接着による補修・補強の設計法の確立に向けて、CFRP板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、実験的、解析的な検討を行った。試験片は、積層CFRP板をエポキシ樹脂接着剤で接着接合したものであり、接着端部からのはく離に着目した疲労試験を実施した。次に、FEM解析により、はく離先端の応力拡大係数を求め、疲労試験結果に基づいて、はく離の進展寿命を検討した。接着接合部の疲労試験結果より、初期はく離が発生するまでの疲労強度が明らかとなり、実験値による疲労強度の回帰線を提案した。さらに、はく離の進展寿命は、十分な精度で予測できることが確かめられた。

Key Words : CFRPstrips, adhesive joint, debonding, debonding propagation, fatigue durability

1. はじめに

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、繊維強化プラスチック（以下、FRPとよぶ）接着工法がある。本工法の特長は、軽量で現場でのハンドリングがよいことであり、近年、新しい補修・補強工法として注目されている。特に、強化材に、引張強度、弾性係数が高い、炭素繊維を用いたCFRPを対象に、国内外で研究開発が活発に進められており、実構造物へも適用されている^{1)~3)}。

FRP 接着による鋼構造物の補修・補強設計では、接着接合部のはく離が課題となっている。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⁾²⁾。

しかしながら、鋼溶接継手部の疲労対策として CFRP 接着工法を適用する場合や、接着接合部に繰返し荷重が作用する場合には、接着接合部が先行して疲労破壊することがある⁴⁾⁵⁾。CFRP 板と鋼板の接着接合部の疲労耐久性については、これまでに幾つかの研究^{6)~9)}が行われているものの、データが少ないのが現状である。また、剛性の高い、CFRP 板の接着端部では、断面が急変するた

め、接着剤の応力分布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 はく離すると考えられているが²⁾、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、将来的に、CFRP 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 CFRP 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。

そこで本研究では、CFRP 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、CFRP 板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、実験的、解析的な検討を行った。対象とした試験片は、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。次に、FEM 解析により、はく離をモデル化して、はく離先端の応力拡大係数を算定した。さらに、線形破壊力学に基づいてはく離の進展解析を行って、はく離の進展寿命の推定を試みた。

2. 鋼板に積層 CFRP 板を接着した試験片の設計と疲労試験の方法

(1) 試験片の設計

本研究では、鋼板とCFRP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、CFRP板（1層当たり300×50×1.2mm）を、2液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤（コニシE250、厚さ0.4mm）で接着したものを試験片とした。ここでCFRP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。

前述したように、CFRP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ことから、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。接着剤に生じる応力は、汎用有限要素解析プログラム（Msc. Marc2013）によって解析モデルを作成して、算定した。解析方法は、平面モデルによる線形弾性解析とし、対称条件により試験片全体の1/4の解析モデルを作成した。鋼板、CFRP板および接着剤を4節点ソリッド要素でモデル化し、要素寸法は全て0.1×0.1mmとした。図-2に、解析モデルの境界条件を示す。作用応力は鋼板への一様な引張応力 σ_y とした。試験片の設計にあたり、接着剤に生じるせん断応

力 τ 、垂直応力 σ_z は、接着剤の厚さ方向中心の応力分布から得られる最大値を抽出した。また、次式より主応力 σ_p を算出した。

$$\sigma_p = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

接着端部からはく離進展を検討するためには、接着端部の応力を適切に設定する必要がある。これまでの静的載荷実験により、表-1に示すような高強度タイプのCFRP板を接着した鋼板では、引張応力は、鋼材の降伏点まではく離しない場合がある¹⁰⁾。そこで本研究では、接着剤端部の主応力を大きくするために、CFRP板の積層数を増やすこととした。例えば、5層の積層CFRP板では、鋼材が弾性範囲内でもはく離することから、1層、5層、7層について、比較することとした。表-2に、設定した疲労試験の条件を示す。公称応力範囲 $\Delta\sigma_y$ は、疲労試験機の容量を考慮して、100, 120, 140, 160, 180MPaの5ケースとした。この時、応力比 R は、全ケースで0.1とした。その結果、CFRP板の積層数を組み合わせることによって、接着端部の主応力範囲 $\Delta\sigma_p$ は12.5～33.5MPaで検討することとした。

試験片には、4箇所の接着端部があるが、着目箇所を限定するために、図-1に示したように、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・動的載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

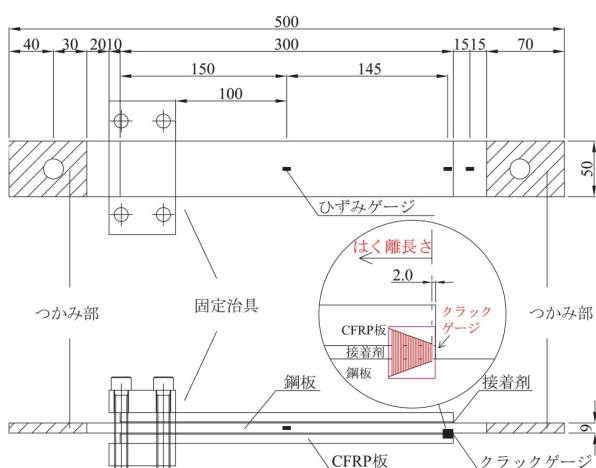


図-1 試験片の寸法およびゲージの設置位置

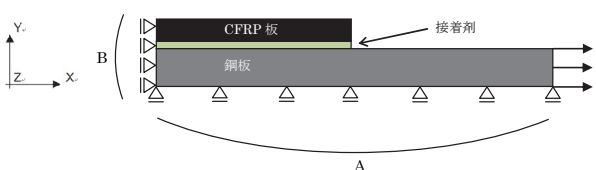


図-2 解析モデルの境界条件

表-1 鋼板、接着剤およびCFRP板の機械的性質

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 (SS400)	200	0.3	76.9	320	453
接着剤 (E250)	1.5	0.3	0.58	—	—
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 試験条件

実験シリーズ	公称応力 σ_y (MPa)			主応力 σ_p (MPa)		
	最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲
CLIN180	200.0	20.0	180	13.9	1.4	12.5
CL5N100	111.1	11.1	100	18.5	1.8	16.6
CL5N120	133.3	13.3	120	22.2	2.2	20.0
CL5N140	155.6	15.6	140	25.9	2.6	23.3
CL5N160	177.8	17.8	160	29.6	3.0	26.6
CL5N180	200.0	20.0	180	33.3	3.3	29.9
CL7N100	111.1	11.1	100	20.7	2.1	18.6
CL7N120	133.3	13.3	120	24.8	2.5	22.3
CL7N140	155.6	15.6	140	29.0	2.9	26.1
CL7N160	177.8	17.8	160	33.1	3.3	29.8
CL7N180	200.0	20.0	180	37.2	3.7	33.5

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。

(2) 試験片の作製方法

接着剤端部の主応力の大きさをパラメトリックに検討するために、CFRP板の剛性、すなわち積層数を変化させている。ここでは、CFRP板の積層数を1, 5, 7層とし

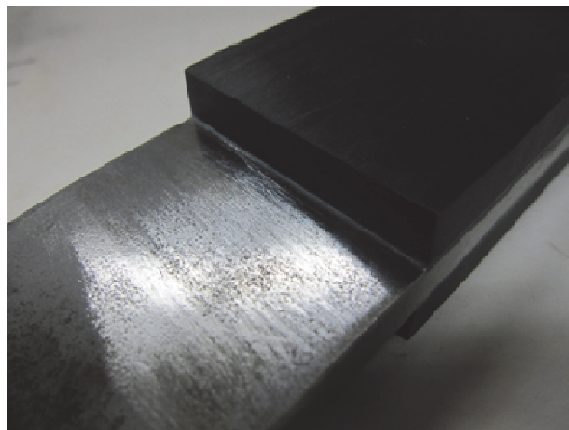
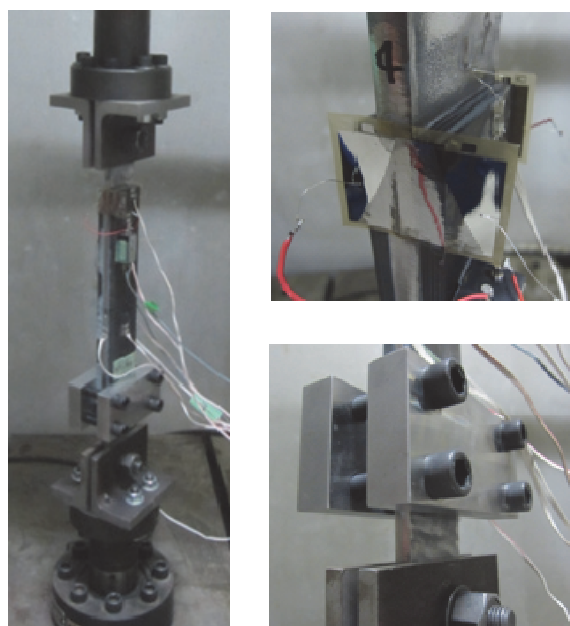


図-3 CFRP板の接着端部の仕上げの状況



(a) 全体図

(c) 固定治具

図-4 試験片のセットアップ図

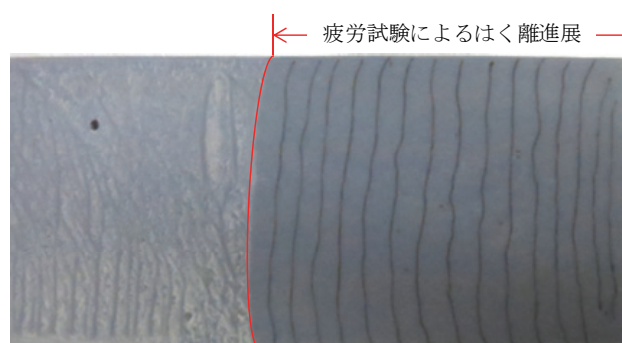


図-5 ビーチマーク法による破壊面の一例

ている。積層CFRP板は、鋼板接着用と同じエポキシ樹脂接着剤を用いて、予め作製した。この時、CFRP板間の接着層の平均厚さは約0.1mmであった。

また、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。CFRP板との接着層の厚さは、直径0.4mmのガラスビーズを用いて0.4mmに管理した¹⁾。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、また、FEM解析モデルに近い応力状態とするために、接着端部の接着剤によるフィレット部は、図-3に示すように、ディスクグラインダを用いて除去し、垂直になるように仕上げた。

(3) 疲労試験の条件

疲労試験の荷重条件は、表-2 に示した通りであり、疲労試験機には、油圧サーボ式材料強度試験機（島津サーボパルサ EHF-UB100kN）を使用した。図-4 に、試験片のセットアップ図を示す。試験片長さ 500mm に対して、各つかみ長さ 70mm として、標点距離 360mm を確保した。つかみ部では、摩擦接合用高力ボルト M16 を用いて、試験片を疲労試験機に接続し、下側を固定、上側に引張荷重を作用させた。載荷速度 $f=10\sim18\text{Hz}$ で疲労試験を行った。なお、載荷速度は、応力範囲が大きい場合、小さくしている。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、5/10,000 秒間隔で載荷中の荷重、変位および各ひずみの値を測定した。一連の試験は室温（約 15℃）で行った。

一様な引張応力の作用を確認するために、全ての試験片で、鋼板のつかみ部から 10mm の位置において、鋼板の両面および両側面にひずみゲージを設置して、載荷試験を行っている。ばらつきが大きい場合には、設置位置を調整している。

(4) はく離進展の計測方法

はく離進展の計測方法は、ビーチマーク法、クラックゲージによる方法を検討した。図-5に、ビーチマーク法における破壊面の一例を示す。接着端部からほぼ一様にビーチマークが導入されていることがわかる。ただし、半振幅での進展が大きいこと、ビーチマーク間隔の制御が困難であったことから、本研究では、クラックゲージを用いてはく離の進展を計測した。

本研究で用いたクラックゲージ（共和電業製KV-25B）は、1mm間隔で25mmまで計測できるものである。接着端部の側面にクラックゲージを設置し、接着接合部のはく離によって生じる側面のき裂がクラックゲージのグリッド線を切断することを利用して、はく離進展を計測した。クラックゲージの設置位置は、接着端部から試験片中心部に向かって2mmの位置とした。したがって、

初期はく離の繰返し回数は、全ての試験片で、接着端部から2mmの位置にはく離先端が到達した時の繰返し回数を指す。さらに、接着端部から2mmの位置から、27mmまではく離進展を1mm間隔で、計測した。なお、CFRP板の端部から5mmの位置、試験片中央部におけるCFRP板と鋼板側面には、ひずみゲージ（ゲージ長3mm）を設置した。

3. 疲労試験による接着接合部の疲労寿命とはく離進展挙動の検討

(1) 接着接合部の疲労寿命の検討

疲労試験結果の一部として、表-3に、所要のはく離長さまでの繰返し回数を示す。本研究では、はく離長さ0mm（疲労試験の開始）からはく離長さ2mmまでを初期はく離と定義している。

表より、1層のCFRP板を接着した試験片（CL1FT）では、 $\Delta\sigma_m = 180\text{MPa}$ で10,000,000回以上载荷しても、接着端部からのはく離やひずみの変化がなかった。したがって、本研究では、疲労限と判断した。また、5層、7層のCFRP板を接着した実験シリーズでは、いずれも疲労限は得られず、接着端部からのはく離が発生した。

図-6に、接着接合部の初期はく離の寿命（はく離長さが0から2mmまでに要する繰返し回数）を公称応力範囲で整理した図を示す。

図-6 (a)は、接着接合の疲労強度を、一般的な鋼溶接継手の疲労強度と比較するために、一例として日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」¹²⁾（以下、JSSC指針とよぶ）で規定される設計S-N曲線と比較したものである。図-6 (a)より、接着接合部の疲労試験結果の回帰線は、JSSC指針の疲労強度等級のD～H等級を跨いでおり、応力範囲が高くなるほど、疲労強度等級が低くなる傾向が見られる。

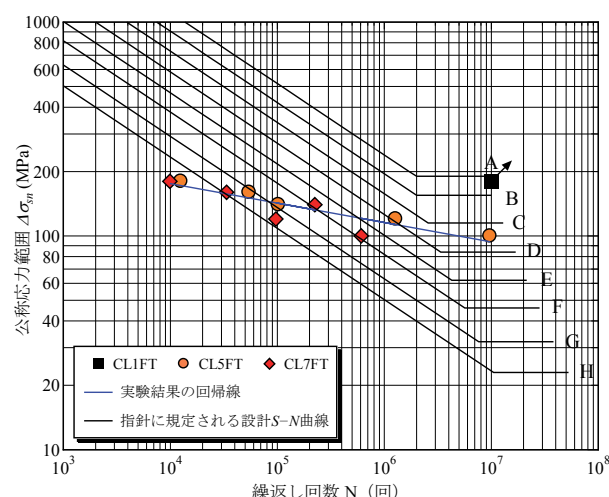
図-6 (b)は、接着接合部のみの疲労試験データで示し

た、公称応力範囲 $\Delta\sigma_m$ と初期はく離長さ（2mm）までの繰返し回数の関係を示したものである。図-6 (b)より、公称応力範囲で整理した場合、疲労試験結果にばらつきが見られること、CL1FT180が疲労限となることから統一的な評価ができないことがわかる。

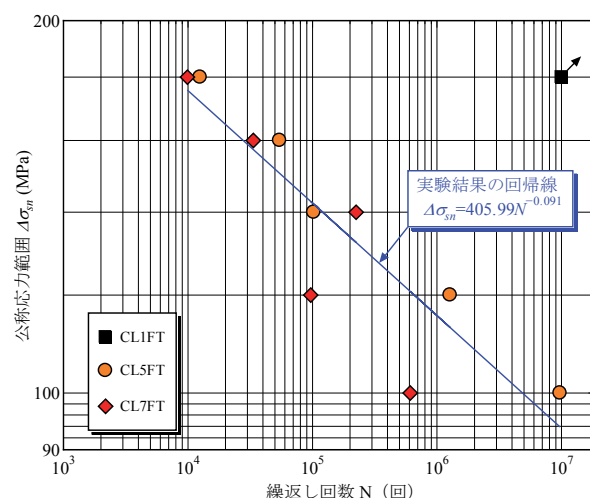
図-7、図-8 および図-9 に、せん断応力範囲 $\Delta\tau$ 、垂直応力範囲 $\Delta\sigma$ 、主応力範囲 $\Delta\sigma_p$ でそれぞれ整理した S-N 関係を示す。

図-7 のせん断応力範囲では、CL1FT180 の疲労限を十分に説明できないこと、図-8 の垂直応力範囲では、CL1FT180 の疲労限はかなり低く評価されていることがわかる。図-9 より、主応力範囲で整理すれば、せん断応力、垂直応力の影響が考慮されており、CFRP 板の積層数に応じて接着剤端部の応力性状が異なる点も評価されている。特に、CL1FT180 が疲労限となることは明らかであり、本研究では、主応力範囲で評価した場合、その疲労限は15MPa程度と考えられる。

図-7、図-8 および図-9 には、5 層、7 層の実験シリーズの疲労試験結果から、最小二乗法を用いて算出した各



(a) JSSC 指針に規定される設計 S-N 関係との比較



(b) 接着接合部の疲労試験データ

図-6 公称応力範囲と初期はく離長さまでの繰返し回数の関係

表-3 所要のはく離長さまでの繰返し回数

実験 シリーズ	繰返し回数(N)		
	はく離長さ a 0～2mm	はく離長さ a 2～27mm	はく離長さ a 0～27mm
CL1FT180	>10,000,000	>10,000,000	>10,000,000
CL5FT100	9,648,865	※1,163,519	※10,812,384
CL5FT120	1,389,837	201,405	1,591,242
CL5FT140	102,585	115,353	217,938
CL5FT160	54,611	146,918	201,529
CL5FT180	12,533	76,828	89,360
CL7FT100	608,864	865,175	1,474,038
CL7FT120	96,805	455,660	552,465
CL7FT140	223,823	367,879	591,701
CL7FT160	33,495	58,643	92,138
CL7FT180	9,898	38,050	47,948

※CL5FT100は、はく離長さ15mmで試験を終了したため、15mmまでの回数を記載した

応力範囲の回帰線を図中に併記している．各応力で評価した回帰線を式 (2) に示す．

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{sn} &= 405.99 N^{-0.0091}, R^2 = 0.80 \\ \Delta\tau &= 39.42 N^{-0.0091}, R^2 = 0.84 \\ \Delta\sigma &= 60.18 N^{-0.0091}, R^2 = 0.87 \\ \Delta\sigma_p &= 77.88 N^{-0.0091}, R^2 = 0.87\end{aligned}\quad (2a-d)$$

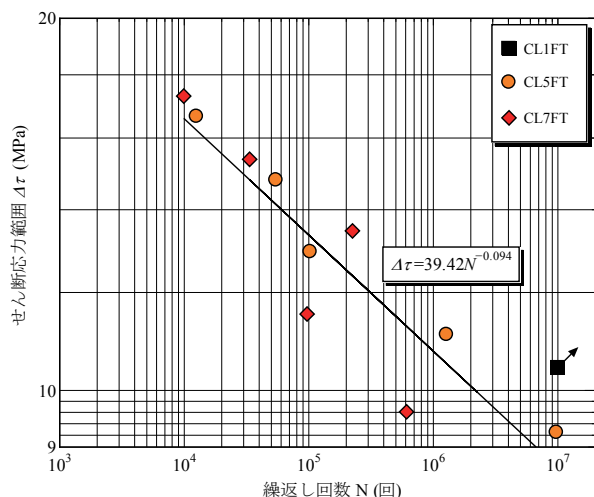


図-7 セン断応力範囲と初期はく離長さまでの繰返し回数の関係

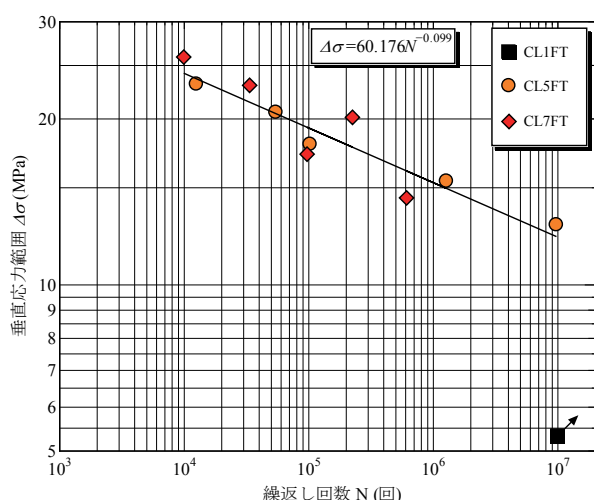


図-8 垂直応力範囲と初期はく離長さまでの繰返し回数の関係

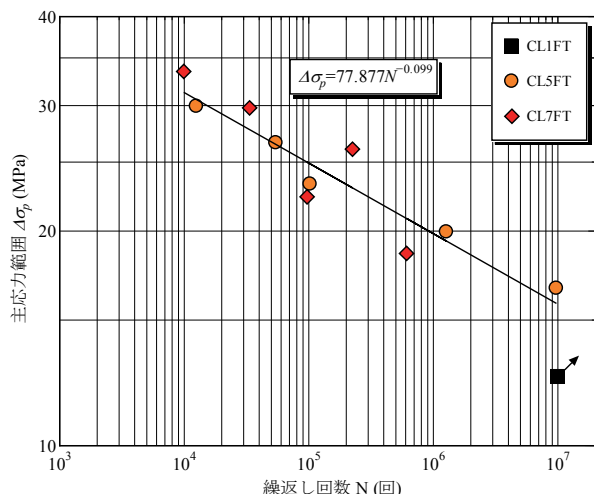


図-9 主応力範囲と初期はく離長さまでの繰返し回数の関係

なお，1 層の CFRP 板を接着した試験片は疲労限と判断されたため，評価から除いている．併記した回帰線の相関係数 R^2 から，垂直応力，主応力で評価した場合，予測の精度が高いことがわかる．

(2) 接着接合部の破壊形態

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，クラックゲージの計測範囲 (27mm) 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，万能試験機を用いて，CFRP板が完全にはく離するまで荷重を載荷している．図-10に，鋼板とCFRP板のはく離面を示す．図より，両側に接着層があることから，繰返し荷重を受けた場合，接着接合部の破壊形態は，凝集破壊となることがわかった．ただし，接着層の破壊面は，鋼板の界面に近い層であることも確かめられた．また，応力範囲が高いほど，接着層の厚さ中心に近い位置ではく離の破壊面が見られた．

(3) はく離進展速度の評価

接着端部の側面に設置したクラックゲージによって，はく離進展を計測した．図-11 に，はく離長さと繰返し回数の関係を示す．全ての試験片で，はく離長さと繰返し回数の関係は，ほぼ線形挙動を示すことがわかる．また，一部で，異なる挙動が見られるものの，応力範囲が高いほど，勾配が大きくなり，進展速度が高いことがわかる．一方，CL5FT100，CL7FT100 においては，ほかの実験シリーズと比較して，はく離の進展速度が著しく小さいことがわかる．はく離の進展速度は，はく離長さや一定であることは，一般的な鋼部材の溶接継手とは異なる特徴であるといえる．これは，図-5 に示したように，繰返し回数の切り替え間隔が一定である場合，ピーチマーク間隔もほぼ一定となることから確かめられる．このような挙動になる理由については，第4章で検討する．

図-12に，試験開始からのはく離長さ 2mm までの初期は

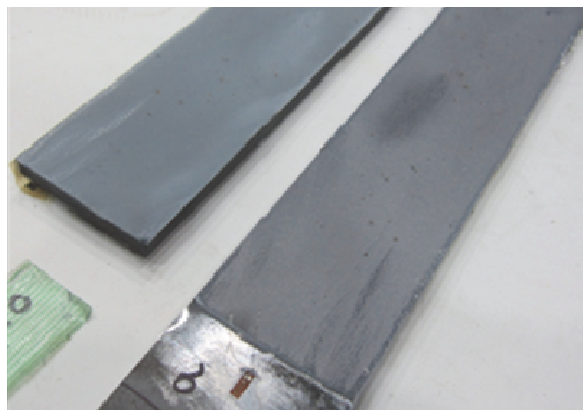


図-10 疲労試験後のはく離面の一例

く離寿命および試験開始からはく離長さ 27mm までのく離寿命を比較した $S-N$ 関係を示す。はく離長さ 2mm から 27mm に至るまでの繰返し回数（進展寿命）は、主応力範囲が大きいほど、増大する傾向を示すが、一般的な鋼部材の溶接継手と同様に、初期はく離までに要する繰返し回数が寿命の多くを占めることがわかる。

したがって、初期はく離の検出が重要であるが、き裂進展の予測は比較的容易であるといえる。

4. はく離進展解析とはく離寿命の推定

(1) 解析モデルと解析条件

第 2 章(1)で述べた解析条件に基づいて、はく離を考慮した解析モデルを作成した。材料物性値、荷重条件、境界条件等は、表-1 および図-2 と同様である。

図-13 に、はく離のモデル化とはく離先端部の定義を示す。前述の実験結果より凝集破壊であり、はく離面は、接着層内で、鋼板側に近い位置にあることから、鋼板から 0.1mm の位置における接着剤の要素に二重節点を設けることでモデル化した。さらに、線形破壊力学に基づいてはく離進展解析を行うために、はく離先端部のエネルギー

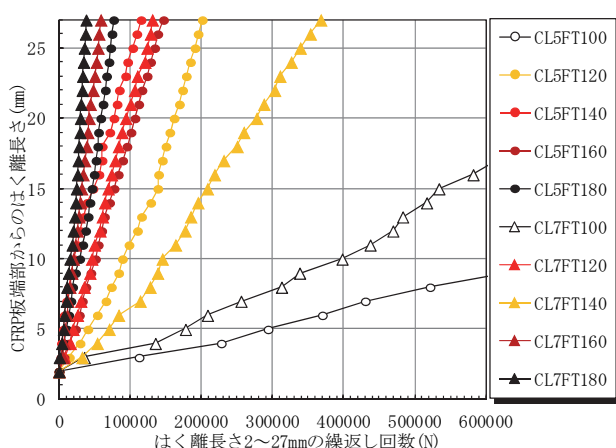


図-11 はく離長さと繰返し回数の関係

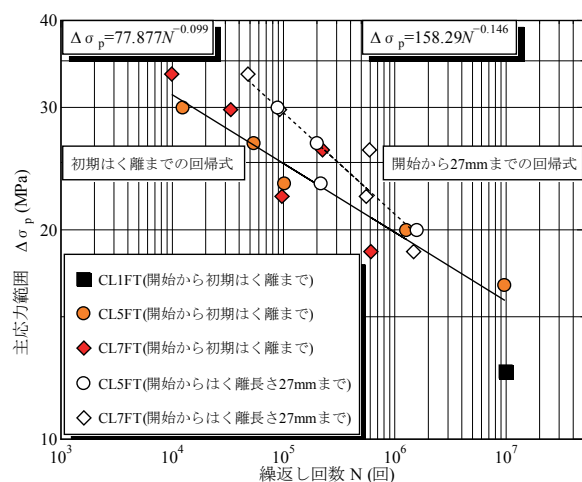


図-12 初期はく離寿命とはく離の進展寿命の比較

ギー解放率を算定する。エネルギー解放率の算定は、ここでは、汎用有限要素解析プログラム (Msc. Marc2013) に実装されている VCCT (Virtual Crack Closure Technology) 機能を用いた。

解析は、公称引張応力 $\sigma_a = 100\text{MPa}$ の作用下での線形弾性解析を行っていることから、各応力範囲におけるエネルギー解放率 g は、その比例関係から算出した。

対象とするはく離の先端では、垂直応力 σ とせん断応力 τ が支配的であることから、そのモードは、それぞれモード I (開口型) およびモード II (せん断型) となる。そこで、FEM 解析により各モードに対応するエネルギー解放率 (g_I , g_{II}) を求めた。さらに、等方弾性体と仮定している接着剤の弾性係数 E 、せん断弾性係数 G を用いて、モード I およびモード II の応力拡大係数は次式で与えられる。

$$g_I = K_I^2 / E \quad (3a)$$

$$g_{II} = K_{II}^2 / G \quad (3b)$$

また、2 つのモードが同時に作用している場合、次式によって等価応力拡大係数 K_V が求められる¹³⁾。

$$K_V = K_I \cos^3\left(\frac{\theta}{2}\right) - 3K_{II} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

式 (4) における θ は、はく離先端の最大接線応力の角度であり、応力拡大係数と θ の関係は次式となる¹³⁾。

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \quad (5)$$

式 (5) を変形して、次式より接線応力の方向角が求められる。この角度は、図-13 のはく離の水平面に対するなす角である。

$$\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8}\right) \quad (6)$$

(2) はく離先端の応力拡大係数

図-14 に、はく離長さとモード I の応力拡大係数の関係を、図-15 に、はく離長さとモード II の応力拡大係数の関係をそれぞれ示す。なお、図中には、1 層、5 層、7

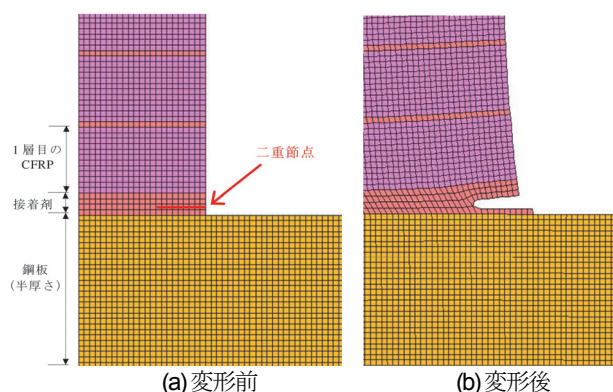


図-13 はく離のモデル化とはく離先端部の定義

層の場合における値を併記している。

図-14 より、CL5FT、CL7FT では、はく離長さが 2mm 以下では、はく離長さが短くなるほど、応力拡大係数が増加するものの、2mm 以上ではほぼ一定値になることがわかる。一方、図-15からは、はく離長さが 2mm 以下では、はく離長さが短くなるほど、応力拡大係数が小さくなるものの、2mm 以上ではモード I と同様に、ほぼ一定値になることがわかる。また、両者を比較すると、モード I の応力拡大係数の方が、モード II よりも大きいこと、はく離長さ 0mm（はく離なし）では、両者はともにゼロになることも確かめられる。

図-16 に、式 (4) より算定される等価応力拡大係数とはく離長さの関係を、また、図-17 に、式 (5) より算定されるはく離先端の主応力の角度とはく離長さの関係をにそれぞれ示す。

図-16 より、はく離長さが 1mm 以下では、その長さが小さいほど、等価応力拡大係数は小さくなるが、はく離長さが 1mm 以上では、はく離長さにかかわらず等価応力拡大係数はほぼ一定となることがわかる。これは、モード I、モード II の応力拡大係数が 2mm 以上ではほぼ一定値に収束するためである。これらのことから、初期はく離長さが 2mm 以下では、はく離先端の応力拡大係数がはく離長さに依存して、小さい値となり、はく離進展が遅くなるといえる。また、はく離長さが 2mm 以上では、はく離先端の応力拡大係数がほぼ一定値に収束するため、はく離の進展速度は、はく離長さによらず一定となる。これは疲労試験でも同様の挙動が確認されている。

図-17 より、はく離長さが 2mm 以上で、はく離先端の等価応力拡大係数の角度が一定値に収束することがわかる。これは、前述したように、モード I、モード II の応力拡大係数がはく離長さ 2mm 以上で、一定値に収束しているためである。

(3) はく離進展寿命の推定

前述のとおり、はく離長さと繰返し回数の関係は、線形関係であること、すなわち、はく離進展速度は一定であることが実験的に確かめられている。ここでは、FEM 解析により算定された応力拡大係数を用いて、線形破壊力学を適用して、はく離進展寿命の推定を試みる。本検討では、はく離長さ 2mm から 27mm における 25mm の範囲の繰返し回数（寿命）を推定することとした。

はく離の進展解析には、式 (7) に示すように、パリズ則¹²⁾を適用した。

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_v^m \quad (7)$$

ここで、 da/dN は、はく離進展速度、 C 、 m は、材料定数である。なお、はく離進展寿命の推定に用いる応力拡大係数範囲には、モード I とモード II を複合的に評価す

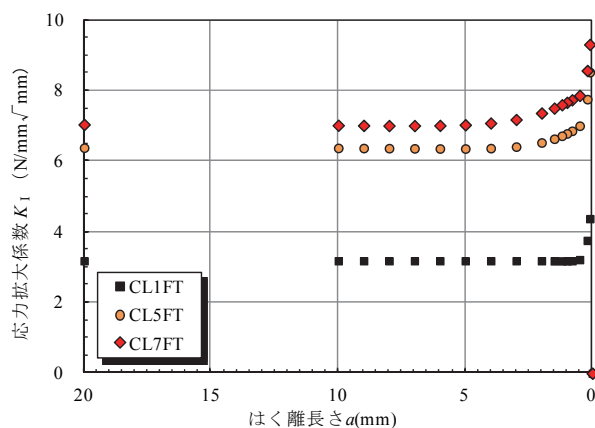


図-14 モード I の応力拡大係数とはく離長さの関係

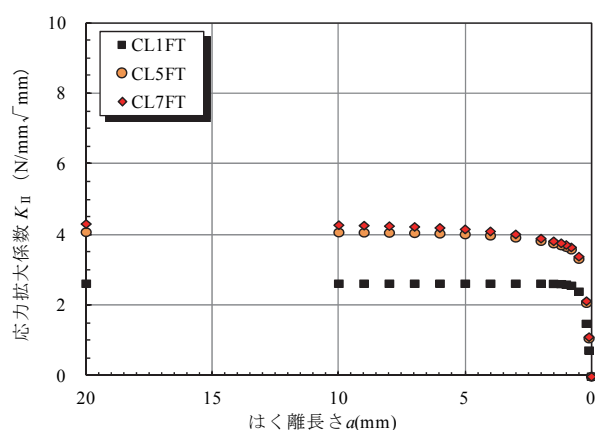


図-15 モード II の応力拡大係数とはく離長さの関係

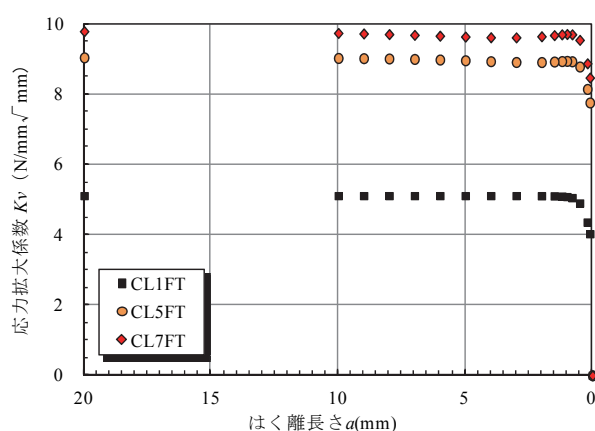


図-16 等価応力拡大係数とはく離長さの関係

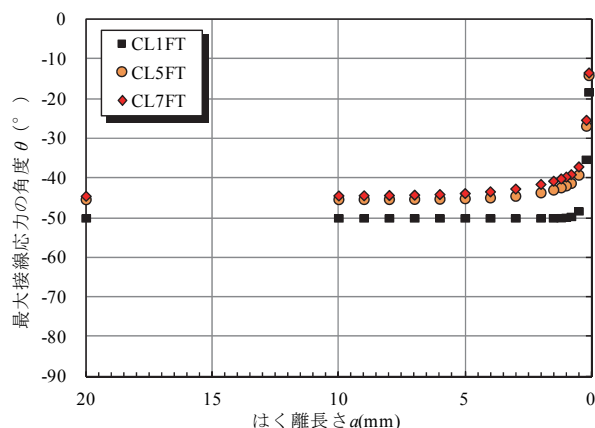


図-17 最大接線応力の角度とはく離長さの関係

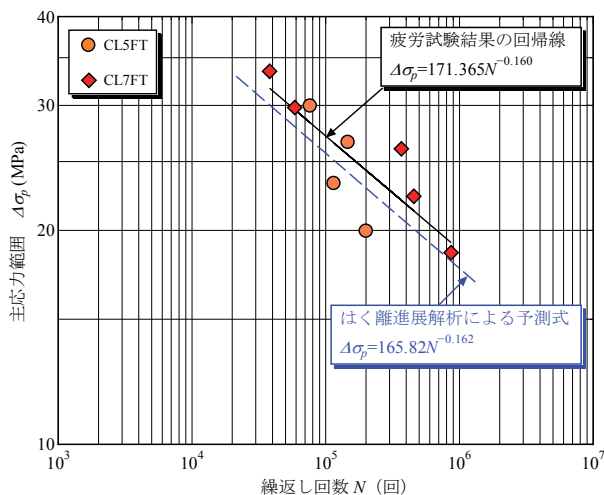


図-18 はく離長さ2～27mmにおけるはく離の進展寿命

るため、等価応力拡大係数範囲 ΔK_v を用いる。

はく離進展解析を行うにあたり、材料定数 C 、 m を決める必要がある。まず、材料定数 m は、疲労試験結果より得られる、主応力範囲 $\Delta\sigma_p$ とはく離長さ2mmから27mmまでの繰返し回数の関係の回帰線より算定される。

次に、式(7)より、 C を同定する。式(7)の左辺(離進展速度 da/dN)は、実験値より同定した値(図-9におけるはく離進展長さ a と繰返し回数 N の勾配)とした。また、右辺の等価応力拡大係数範囲 ΔK_v には、解析値(式(4))を用いることとし、上述の m を用いて、線形の近似式より、 C を同定した。なお、等価応力拡大係数範囲 ΔK_v は、はく離長さ20mmの(収束値)のモードI、モードIIの応力拡大係数範囲を用いて、式(4)より算定している。その結果、それぞれ、 $m=6.25$ 、 $C=2.00 \times 10^{-11}$ となった。

さらに、式(7)を積分することで、式(8)のように、はく離の進展寿命 N が計算できる。

$$N = \int_{a_i}^{a_j} \frac{1}{C \Delta K_v^m} da \quad (8)$$

ここで、 N は、はく離長さ a_i から a_j までの繰返し回数(寿命)である。なお、右辺の等価応力拡大係数 K_v ははく離長さに無関係であるため、式(8)は次式となる。

$$N = \frac{a_j - a_i}{C K_v^m} \quad (9)$$

図-18に、主応力範囲とはく離長さ2mmから27mmまで(はく離長さの範囲25mm)における繰返し回数の関係を、式(9)から算出した、はく離の進展寿命の予測値を併記して示す。図より、はく離の進展解析による推定値は、ばらつきのある実験値を平均的に評価していることがわかる。また、図中に併記した実験値の回帰線とはく離の進展解析による推定値は、よく一致していることも確かめられる。本研究で得られた、はく離の進展寿命の推定式は次式となる。

$$\Delta\sigma_p = 165.82 N^{-0.162} \quad (10)$$

式(10)の適用範囲は、はく離長さ2mmから27mmである。

5. まとめ

本研究では、CFRP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、解析的な検討を行った。その結果、次のことがいえた。

- (1) 接着端部の接着剤に生じる主応力で整理することにより、CFRP板の積層数に依存しない S - N 関係を評価できることがわかった。
- (2) はく離の進展挙動は、一般的な鋼溶接継手から発生する疲労き裂と同様に、はく離発生後の進展寿命に比べて、初期はく離が発生するまでの寿命の方が長いことがわかった。
- (3) 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し、破壊形態は凝集破壊であることが確かめられた。
- (4) 一様な引張力を受ける接着接合部では、はく離長さが一定以上になると、はく離先端の応力拡大係数は一定値に収束することがわかった。
- (5) モードI(開口型)、モードII(せん断型)の応力拡大係数から等価応力拡大係数を算定し、線形破壊力学に基づいて、はく離進展解析を行った結果、疲労試験結果に対して、精度よくはく離の進展寿命を予測することができた。

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) 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) Xiao-Ling Zhao: FRP-Strengthened Metallic Structures, CRC Press, 2013。
- 4) 中村一史、諸井敬嘉、鈴木博之、前田研一、入部孝夫：溶接継手に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による補修効果、日本鋼構造協会、鋼構造年次論文報告集、第 13 巻、pp. 89-96、2005。
- 5) 林帆、孫継光、中村一史、前田研一、福田欣弘：ストップホール施工に積層 CFRP 板接着を併用した疲労き裂の補修に関する実験的検討、土木学会第 66 回年次学術講演会概要集、I-153、pp. 305-306、2011。
- 6) P. Colombi, A. Bassetti, A. Nussbaumer: Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 39, Issue 1, pp. 61-71, 2003。

- 7) H.B.Liu, X.L.Zhao, R.Al-Mahaidi: 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.
- 8) Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G and Poggi, C.: Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates, Composite Structures, Vol.87, pp. 334-343, 2009.
- 9) 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.
- 10) 手塚渉太, 林帆, 孫継光, 中村一史, 前田研一, 福田弘: 鋼構造の補修・補強に用いる積層 CFRP 板の端部処理による接着強度の向上, 土木学会, 第 67 回年次学術講演会, CS3-017, pp.33-34, 2012.
- 11) 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.
- 12) 日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1998.
- 13) 田中啓介, 秋庭義明, 加藤拓也, 高橋弘樹: 繰返しねじり・引張複合荷重下での予き裂からの疲労き裂進展経路の予測, 日本機械学会論文集 (A編), 第74巻, 704号, pp.21-28, 2005.

EVALUATION OF FATIGUE STRENGTH AND DEBONDING PROGRESS OF ADHESIVELY BONDED JOINTS BETWEEN STEEL PLATE AND CFRP STRIPS

Syouta TEZUKA, Hitoshi NAKAMURA and Fan LIN

In this study, the fatigue durability of the adhesively bonded joints between CFRP strips and steel plates were investigated experimentally and analytically aiming at the debonding in the end of CFRP strips. Fatigue tests were conducted using the coupon specimens composed of the steel flat bar adhesively bonded by multi-layered CFRP strips varying the stress range and the number of layers of the CFRP strip. The stress intensity factor of the debonding tip were calculated by FE analysis and the propagation life of the debonding was predicted based on the linear fracture mechanics.