

炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その1 予備疲労試験

玉井 宏章*, 御厨 健太**, 陣川 晃司**, 立上 洋介***

Adhesive Fatigue Test on Rehabilitated Steel Beam Bonding CFRP Plates Part 1 Preliminary Adhesive Fatigue Test

by

Hiroyuki TAMAI*, Koji JINKAWA **, Kenta MIKURIYA **, and Yosuke TATSUKAMI ***

The authors have developed a tensile force strengthening method using bonded carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate to enhance the life of existing building. In this study, performs dynamic fatigue tests on rehabilitated steel beam bonding CFRP plates to reveal fatigue properties of the adhesive and examines fatigue fracture properties of adhesive on cyclic loading. In previous paper, calculated stress distribution of adhesive layer, and its showed validity. Also, it examined fatigue limit of adhesive on the basis of the modified Goodman law. In this paper, reports performing preliminary fatigue test for performing adhesive fatigue test to reveal the fatigue properties of adhesive. The result showed that shear yield limit and reversed fatigue limit was greater than assumed value.

Key words : Carbon Fiber Reinforced Plastic plate, Adhesive, Fatigue Test, Fatigue Limit, Modified Goodman's Law

1. はじめに

著者等は炭素繊維プレート(以下, CFRP)を補修材に選定し, これを鋼構造建築物に接着することによって, 耐環境性能, 耐震性能を向上させる, 耐震補強工法, 長寿命化技術の提案・開発を行っている^{1), 2)}.

CFRPの接着補強では, CFRPと接着剤の接着性能を最大限に引き出すことは重要である.

鋼梁の接着補強では, 断面に腐食が生じ欠損した部分にのみ補修するのが効率的であるが, 積載曲げ荷重の大きな部分のみの部分補強では, 接着端部の接着層に大きなせん断応力が生じるため, 比較的小さな荷重で接着層破壊する懸念がある. また, 実際の構造物は弾性範囲での多数回繰返し荷重が作用するため, 材料強度の比較的弱い接着剤の疲労破壊が問題となる.

本研究では接着剤の疲労特性を明らかにするため, CFRPによって接着補強された細幅系列単純梁の動的疲労試験を行い, 繰返し載荷時における接着剤の疲労

破壊性状を検討する. 既往の研究³⁾でCFRPによって接着補強された細幅系列単純梁について, 接着層の応力分布を算定しその妥当性を示した. また, 修正Goodman則を用いて接着剤の疲労限度について検討を行った.

本報では, 疲労特性を明らかにするための疲労試験を行うにあたって, 予備試験を行ったので報告する.

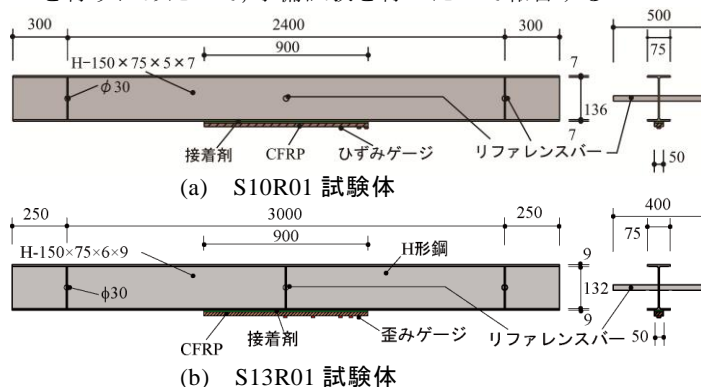


図1 試験体形状

平成27年12月25日受理

* システム科学部門(Division of System Science)

** 工学研究科(Graduate School of Engineering)

*** 工学部(University of Engineering Department)

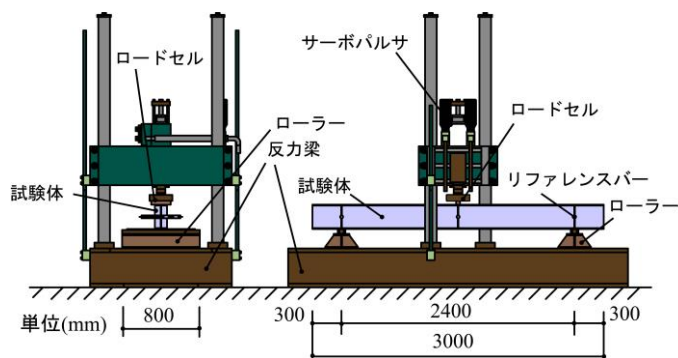


図 2 試験装置

表 1 試験体シリーズ

試験体名	試験方法	CFRP	CFRP全長	接着層厚
		枚	mm	mm
S10R01-S	弾性静的単調載荷	1	900	0.62
S10R01-F	動的疲労			
S10R01-E	弾塑性静的単調載荷			
S13R01-S	弾性静的単調載荷	1	900	0.69
S13R01-F	動的疲労			
S13R01-E	弾塑性静的単調載荷			

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体形状を図 1, 試験体シリーズを表 1 に示す。試験体は、全長 3000mm の H 型鋼 H-150×75×5×7(鋼種:SS400), 全長 3500mm の H 型鋼 H-150×75×6×9(鋼種:H-SA700)の 2 種類の鋼材を用い、下フランジ下面に、中弾性型炭素繊維プレートを中心部 900mm に一列一層貼付けたものを使用した。H-150×75×5×7(SS400)の鋼梁に接着したものを S10R01-S,F,E 試験体, H-150×75×6×9(H-SA700)の鋼梁に接着したものを S13R01-S,F,E 試験体とした。試験体名の S10,S13 は S10R01 試験体を基準としたせん断降伏限度比を, R01 は応力比 $R=0.1$, -S,F,E は S が弾性静的単調載荷試験, F は疲労試験, E は弾塑性静的単調載荷試験を示している。接着剤は 2 液硬化型エポキシ樹脂 KS を用いて試験体の作成を行った。試験体は CFRP 貼付け後、気温 20℃以上の雰囲気中で 7 日以上養生した。表 2~4 に今回使用した CFRP, 鋼材と接着剤の機械的性質を示す。

CFRP を接着する下フランジ下面の部分はグラインダーで黒皮を除去後、サンドペーパー#1000 で表面処理した後、アセトンで油分を除去し CFRP を貼付けた。

接着層厚 t_a については、CFRP 貼り付け部分のフランジ、接着剤、CFRP を含んだ 5 か所の厚さの平均値から、フランジ及び CFRP の板厚を差し引いた値を接着層厚として採用した。また、接着層厚を調整するた

表 2 CFRP の機械的性質

名称	ヤング係数	引張強さ	破断ひずみ
	N/mm ²	N/mm ²	%
CFRP ML	295000	2169	0.71

表 3 鋼材の機械的性質

板厚	使用鋼材	降伏強さ	引張強さ	破断伸び	一様伸び
mm	—	N/mm ²	N/mm ²	%	%
5	SS400	343	433	26.2	15.7
6	H-SA700	795	862	11.7	6.6
7	SS400	337	438	24.1	18.3
9	H-SA700	742	870	11.7	8.9

ヤング係数：205000N/mm²

表 4 接着剤の機械的性質

名称	ヤング係数	せん断弾性係数	曲げ強度	圧縮強さ	引張強さ	引張せん断付着強度
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
試験方法 (JIS)	K7181	/	K7171	K7181	K7161	K6850
KS	3100	1115	58	71	35	29

表 5 動的疲労試験載荷範囲

試験体名	R	f	P_{min}	P_{max}	τ_{am}	$\Delta\tau_a$	σ_{sm}	$\Delta\sigma_s$
	/	Hz	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
S10R01-F	0.1	1.5	2.6	26	8.0	6.6	105.3	86.2
S13R01-F	0.1	1.5	2.9	29	10.1	8.3	109.4	89.5

め、CFRP の四隅及び長手方向に 4 等分するような位置の縁(6 か所)の計 10 か所に目標接着層厚の径の針金(長さ 5mm 程度)を入れて試験体を作成した。

2.2 加力装置

試験装置の概要を図 2 に示す。載荷装置は島津サーボパルサを用いて行った。ピンとローラー支持を取付けた反力梁上に試験体を設置し、中央のクロスヘッドを介して試験体中央部に荷重制御によって片振り繰返し載荷を行った。

2.3 載荷プログラム

載荷プログラムは、弾性静的単調載荷試験(S10R01-S, S13R01-S)を初期状態で弾性範囲と考えられる荷重振幅まで行い、その後所定の荷重振幅、荷重条件下で動的疲労試験(S10R01-F, S13R01-F)を行う。最後に、弾塑性静的単調載荷試験(S10R01-E, S13R01-E)を CFRP にはく離が確認されるまで行う。

表 5 に動的疲労試験での載荷範囲を示す。振動数 f は試験機の都合により 1.5Hz としている。

炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験
その1 予備疲労試験

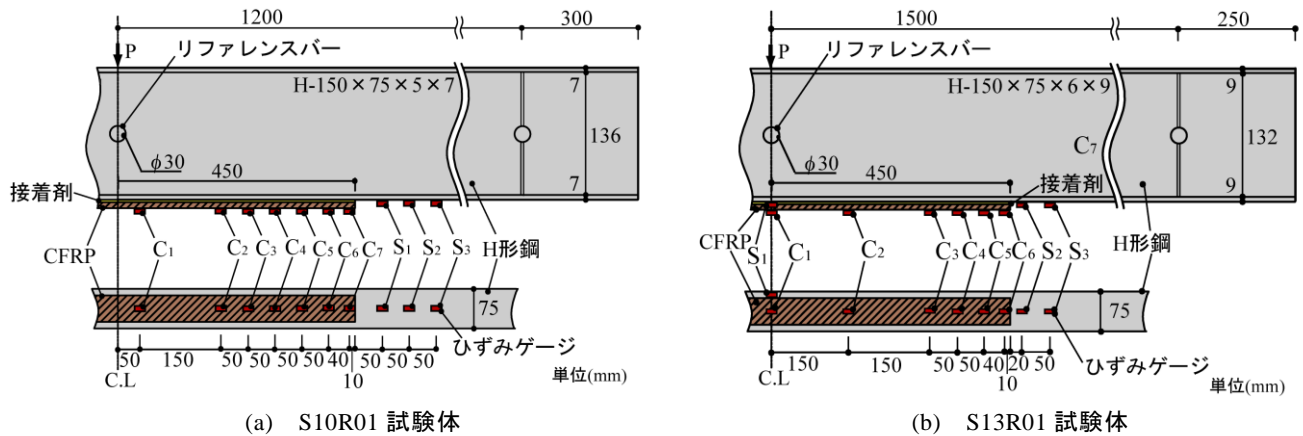


図3 ひずみゲージ貼付け位置

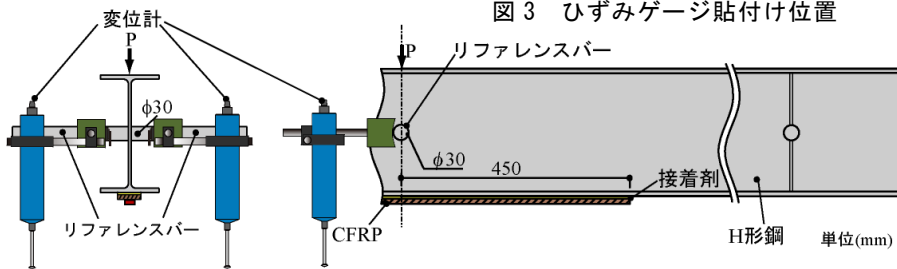


図4 変位計測詳細図



写真1 ダミー試験体

2.4 計測方法

図3にひずみゲージの貼付け位置をそれぞれ示す。ひずみゲージは検長1mmのものを使用した。計測は、荷重についてはクロスヘッド下部に取付けたロードセルから中央集中荷重 P を、ひずみについては静的単調荷試験では図3に示す全ての位置でひずみ計測を行った。動的疲労試験では図3に示すように、S10R01-F試験体はCFRP中央部から300mm(C4)、400mm(C6)、440mm(C7)、S13R01-F試験体についてはCFRP中央部から0mm(C1)、150mm(C2)、350mm(C4)、400mm(C5)、440mm(C6)、での位置におけるCFRPの垂直ひずみを計測した。S13R01試験体においては温度変化によるひずみへの影響を除去するために、試験体の下フランジと同じ断面積を持つ鋼材にCFRPを接着し、荷重を受けないダミー試験体を用意した。動的疲労試験で生じた試験体のひずみから温度変化によって生じたダミー試験体のひずみ値を差し引いた値を、本試験で生じたひずみとした。写真1にダミー試験体の写真を示す。

変位については、図4に示すように梁中央ウェブに取り付けた $\phi 30$ の丸鋼棒のリファレンスバーに変位計を取り付け、左右両端で変位の計測を行い、平均して中央たわみ δ を算定した。

3. 接着層の応力分布理論解

鋼板の中央部にCFRPを接着した複合材に引張力 P が作用した時の接着剤のせん断応力分布 τ_a は、次式で

得られる^{4),5)}。

$$\tau_a = -\frac{P}{\lambda \cdot \sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \left\{ \cosh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \cosh \left(\frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 λ は接着基準長さであり、次式で表される。

$$\lambda^2 = \frac{t_a^2}{G_a \cdot A_a} \cdot \frac{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \quad (2)$$

G_a, A_a, t_a : 接着剤のせん断弾性係数, 断面積, 層厚

L : 接着長さ

E_s, A_s : 鋼材のヤング係数, 断面積

E_c, A_c : CFRPのヤング率, 断面積

x : CFRP先端からの x 座標値

また、CFRPの垂直歪分布 ε_c は次式で与えられる⁵⁾。

$$\varepsilon_c = \sigma_c / E_c \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sigma_c^{(c)} + \sigma_c^{(d)} \quad (4.a)$$

$$\sigma_c^{(c)} = E_c \cdot \frac{P \cdot (x + l_c)}{2 \cdot (EI)_c} \cdot h_c \quad (4.b)$$

$$\sigma_c^{(d)} = \frac{-P_c}{A_c} \left\{ 1 - \frac{1}{\sinh(L/\lambda)} \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \left[\sinh \frac{L}{\lambda} - \sinh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \sinh \left(\frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right) \right] \right\} \quad (4.c)$$

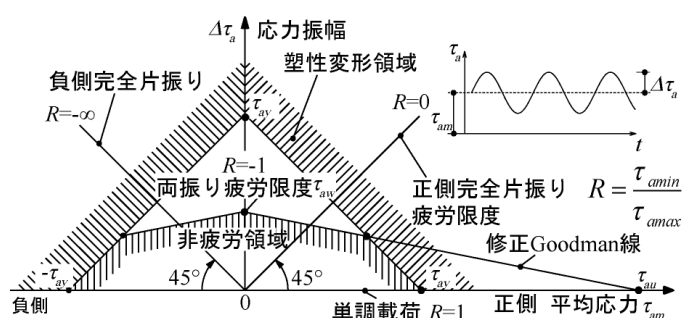


図5 接着剤の疲労限度図モデル

表6 疲労限度図に用いる材料定数

接着剤	N/mm ²	仮定値	名称
τ_{ay}	11.6	実験値(S08R01試験体)	せん断降伏限度
τ_{aw}	6.7	実験値(S08R01試験体)	両振り疲労限度
τ_{au}	29.0	引張せん断付着強度	せん断強さ

$$P_c = E_c \cdot A_c \cdot \frac{P \cdot l_c}{2 \cdot (EI)_c} \cdot h_c \quad (4.d)$$

l_c : 梁端部から CFRP 端部までの距離

h_c : 複合材の図心から CFRP までの高さ

試験体の接着剤破壊則に必要な接着剤に生じるせん断応力の CFRP 端部で生じる最大せん断応力 τ_a は、次式で与えられる。

$$\tau_a = \sqrt{\frac{G_a}{t_a \cdot w_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c \cdot E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{h_c \cdot l_c}{(EI)_c} \cdot \frac{P}{2}} \quad (5)$$

w_a : 接着剤の幅

$(EI)_c$: 複合材の曲げ剛性

また、試験体、鋼梁の疲労特性判定に必要な梁中央の下フランジに生じる垂直応力 σ_s は、次式で与えられる。

$$\sigma_s = E_s \cdot \frac{h_s \cdot l_s}{(EI)_c} \cdot \frac{P}{2} \quad (6)$$

l_s : 梁端部から中央までの距離

h_s : 複合材の図心から梁下フランジ縁までの高さ

4. 疲労限度

接着剤の疲労限度図の模式図を図5に示す。疲労限度図は多数回の繰返し载荷下における応力の変動を平均応力 τ_{am} と応力振幅 $\Delta\tau_a$ との組み合わせで示し、応力の領域で疲労破壊しない限界(疲労限)を示す図である。最大応力に対する最小応力の比である応力比 R ($R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}}$) が一定であればこれを満足する応力は原点を通る直線上に並ぶことになる。

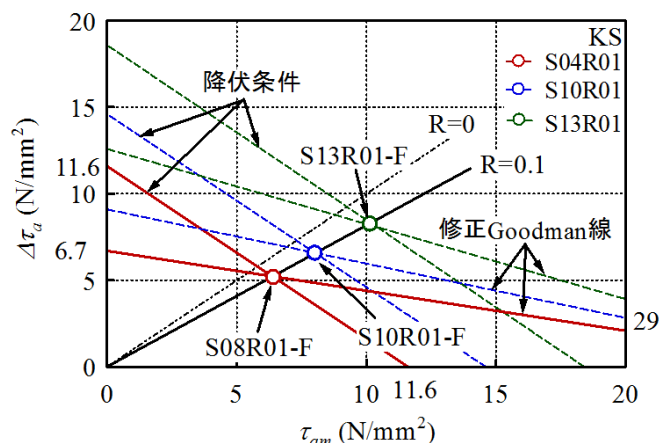


図6 接着剤の疲労限度図

繰返し载荷時に降伏現象が起きれば、早期に疲労破壊すること、疲労限度図において両振り疲労限度 τ_{aw} と引張せん断付着強度 τ_{au} を結ぶ直線より原点側の領域では疲労は生じないとする修正 Goodman 則を採用すると、接着剤の疲労を生じない応力の領域はこれらの領域の積として図5のように表せる。

接着剤の応力分布で最大となる弾性応力を求め、応力比 R を一定として(例えば $R=0.1$)この線上で200万回载荷しても疲労破壊しなかった最大の応力点を実験によって求めると、疲労破壊しない応力領域(ないしは両振り疲労限度)が得られる。

表6には目安となる接着剤(KS)の疲労限度図の材料定数 τ_{ay} , τ_{aw} , τ_{au} を示す。既往の研究³⁾の S08R01-F 試験体の応力点において疲労破壊が生じなかったことから、両振り疲労限度 τ_{aw} を $\tau_{aw} = 6.7 \text{ N/mm}^2$ としている。また、せん断降伏限度 τ_{ay} を図6に示す S08R01 試験体の応力点を通る傾き-1の直線の y 切片と仮定し、 $\tau_{ay} = 11.6 \text{ N/mm}^2$ としている。

図6は降伏条件線と修正 Goodman 線による接着剤の疲労限度図を示す。今回行った動的疲労試験での応力点、降伏条件及び修正 Goodman 線を S10R01-F 試験体は青の実線又は○印で、S13R01-F 試験体は緑の実線又は○印で示している。参考のため、既往の研究³⁾の試験体(S08R01)の応力点、降伏条件式及び修正 Goodman 線を赤の実線又は○印で示す。

5. 実験結果と考察

試験結果を図7~11に示す。図7, 9の括弧内の数字は CFRP 中央部からの距離を示している。

図7は200万回サイクルまでの CFRP 各部に生じる最大歪と载荷サイクル数 n との関係を示している。黒色の実線は実験値、赤色の破線は多項近似した実験値、一点鎖線はひずみ分布度算定式からの予測値を示す。

炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験
その1 予備疲労試験

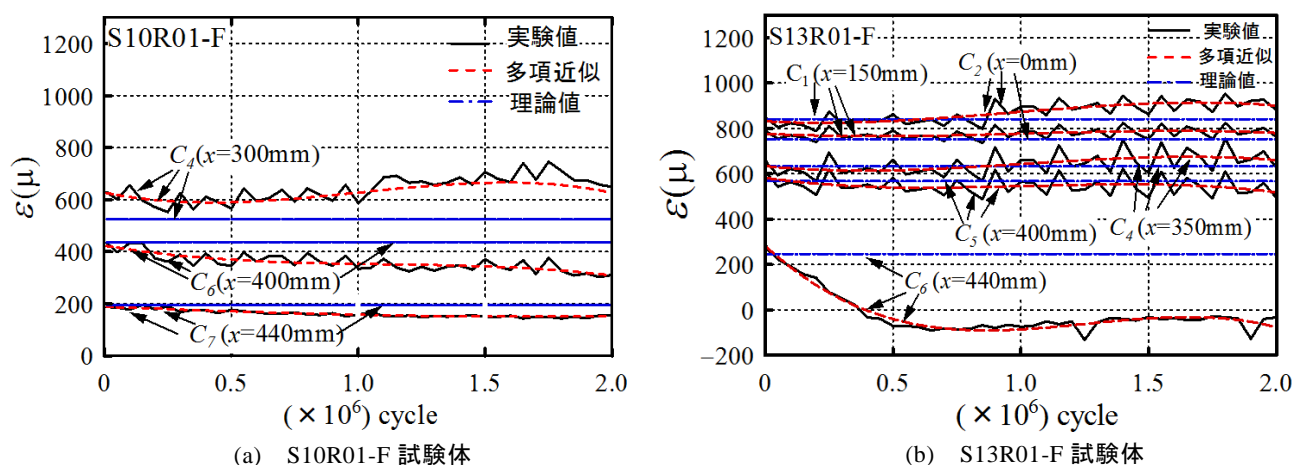


図7 荷回数—最大ひずみ振幅関係

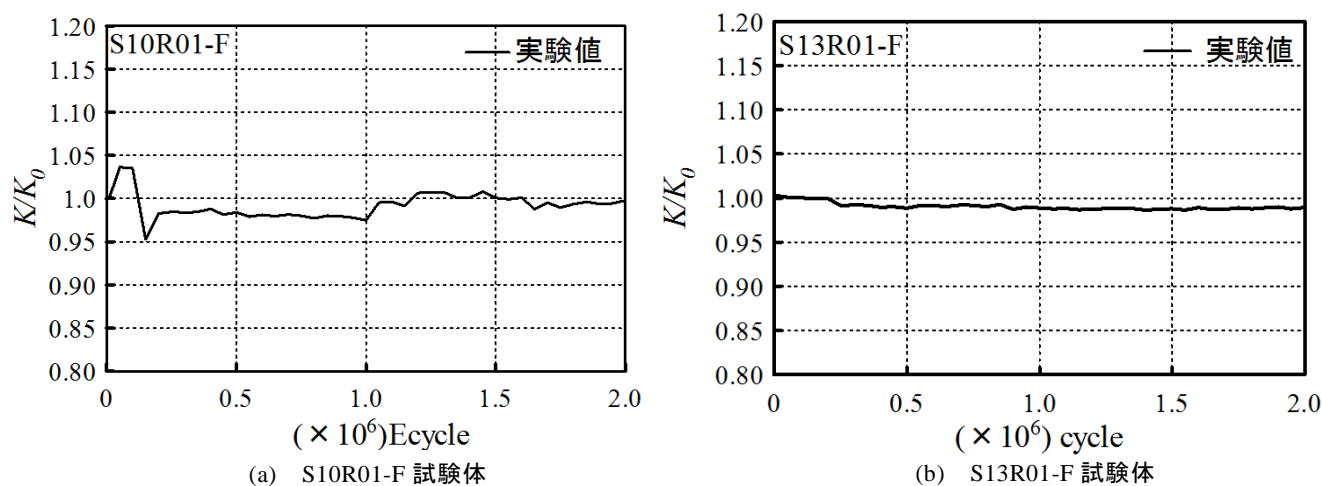


図8 荷回数—剛性関係

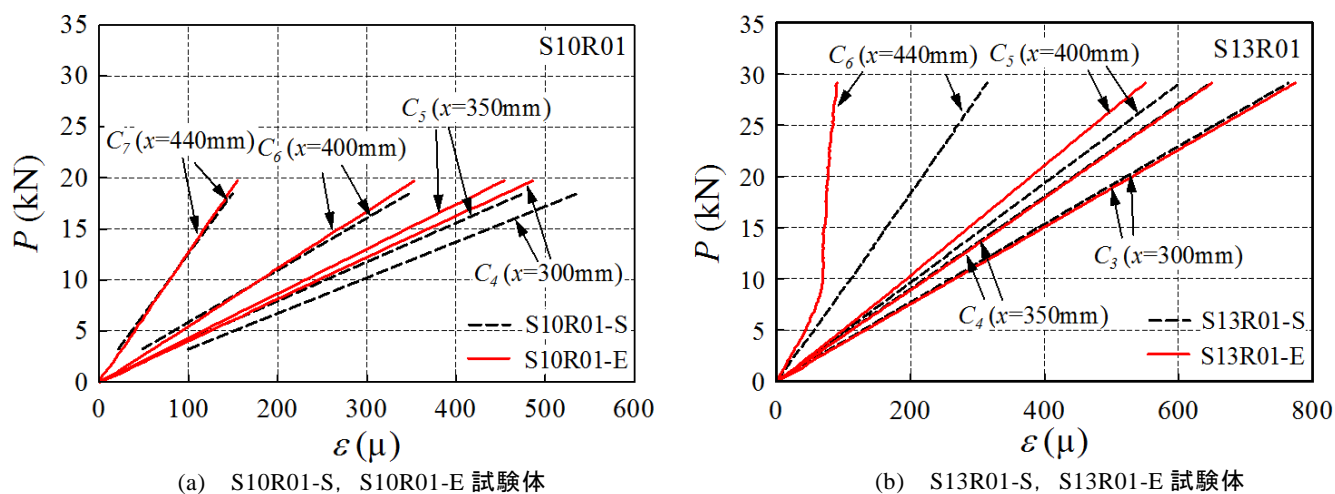
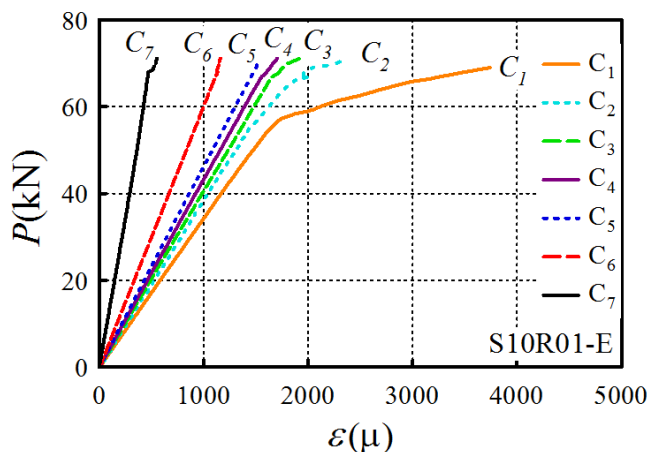
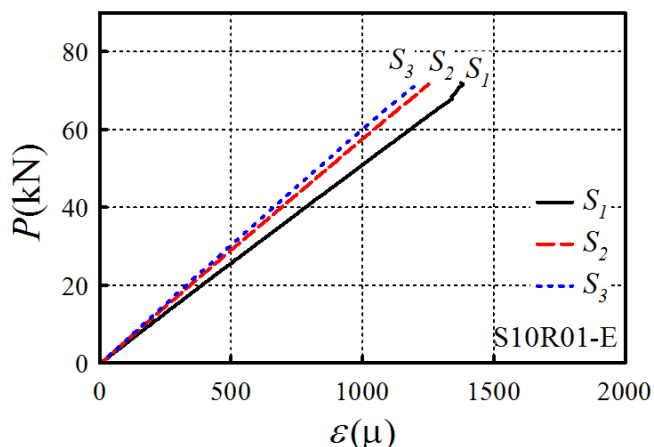


図9 動的疲労試験前後の単調載荷試験での荷重—ひずみ関係

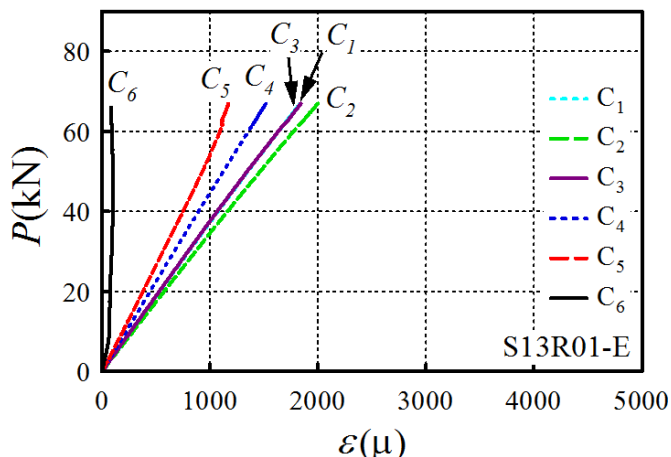


(a) CFRPの発生ひずみ

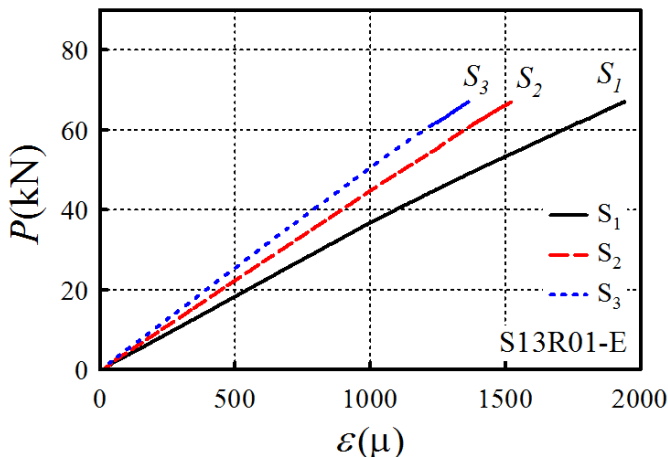


(b) 鋼材(SS400)の発生ひずみ

図10 弾塑性静的単調载荷試験の荷重—ひずみ関係(S10R01-E 試験体)

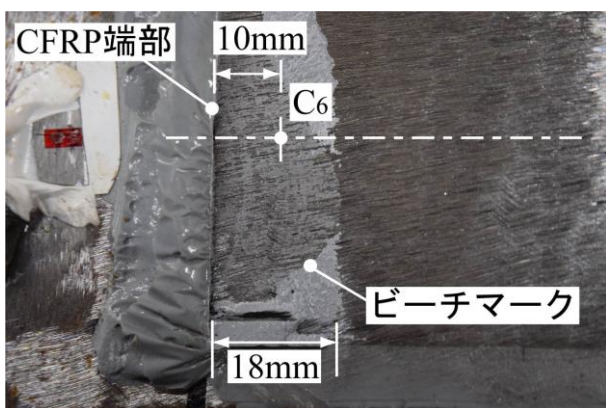


(a) CFRPの発生ひずみ

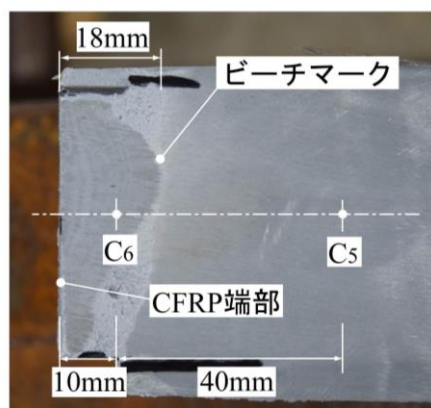


(b) 鋼材(H-SA700)の発生ひずみ

図11 弾塑性静的単調载荷試験の荷重—ひずみ関係(S13R01-E 試験体)



(a) 鋼材側



(b) 接着剤側

写真2 試験後の様子(S13R01 試験体)

炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その1 予備疲労試験

図 8 は荷重—変位関係から求めた剛性 $K(=P/\delta)$ と載荷回数との関係を、y 軸は載荷回数毎の剛性 K を 1 万回サイクル時の剛性 K_0 で除した値である。なお、剛性は荷重—変位関係から最小二乗法を用いて求めている。

図 9 は動的疲労試験前後の単調載荷試験における荷重—ひずみ関係を示している。黒色の破線は疲労試験前、赤色の実線は疲労試験後を示す。

図 10, 11 は弾塑性静的単調載荷試験における CFRP と鋼材の荷重—ひずみ関係を示している。

写真 2 に S13R01 試験体の試験後にはく離した CFRP 端部の写真を示す。CFRP のはく離はバーナーで下フランジ部を熱し、パールを用いてはく離した。

試験結果から以下のことが分かる。

- 1) 図 7(a)より CFRP 端部であるひずみ C_6 、ひずみ C_7 は繰返し載荷に伴ってひずみ値が減少し、CFRP 中央側のひずみ C_4 のひずみ値に大きな変化はないことから、CFRP 端部では繰返し載荷に伴い接着剤の剛性が変化している。
- 2) 図 7(b)より CFRP 端部であるひずみ C_6 のひずみ値が 50 万回サイクル時にかけて減少しており、CFRP 端部の接着剤にはく離が生じたと考えられる。その他のひずみ値には 200 万回サイクルまで大きな変化はない。
- 3) 図 8(a)より繰返し載荷初期に多少の剛性の変化があるものの、200 万回サイクルまでの剛性に大きな変化はない。
- 4) 図 8(b)より 50 万回サイクル時まで剛性が若干低下している。これは CFRP 端部の接着剤にはく離が生じたことから、剛性が低下したと考えられる。
- 5) 図 9(a)より CFRP 端部側のひずみ C_6 、ひずみ C_7 では疲労試験前後のひずみ値に変化はないが、CFRP 中央側のひずみ C_4 、ひずみ C_5 で疲労試験後のひずみ値が疲労試験前のひずみ値に比べ小さい。
- 6) 図 9(b)より CFRP 端部のひずみ C_6 が 9kN 付近で線形性を失っており、CFRP 端部の接着剤にはく離が生じている。
- 7) 図 10(a)より $P=57.3\text{kN}$ で CFRP 中央部に塑性化が生じ、 $P=67.4\text{kN}$ で CFRP 端部にはく離が生じたことが分かる。ひずみ C_1 において線形性が失われた点を CFRP 端部に明瞭なはく離が生じた点とすると、この時のはく離せん断応力 τ_{max} は $\tau_{max}=26.5\text{N/mm}^2$ となり接着剤の引張せん断付着強度と近い値になった。
- 8) 図 11(a)より CFRP 端部のひずみ C_6 は 9kN 付近で

線形性を失い早期に CFRP にはく離が生じているが、その他のひずみは線形に変化しており、はく離は生じていない。

- 9) 写真 2 より S13R01 試験体について、はく離した後の接着剤にビーチマークの模様が見られた。また、S13R01 試験体の鋼材にはビーチマークの模様で接着剤が付着していた。このことから、S13R01 試験体において、ビーチマークが表れ、明確にはく離が生じ CFRP 先端の接着剤において疲労破壊が生じている。

6. まとめ

本研究では、CFRP によって接着補強された細幅系列単純梁について、疲労特性を明らかにするための疲労試験を行うにあたって、予備疲労試験を行った。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) S10R01 試験体の応力振幅では疲労破壊が生じていないが、S13R01 試験体の応力振幅では疲労破壊が生じている。
- 2) KS 接着剤のせん断降伏限度 τ_{ay} は S10R01 試験体の応力点を通る傾き -1 の直線の y 切片である 14.6N/mm^2 となる。また、修正 Goodman 線の y 切片である両振り疲労限度 τ_{aw} は 9.1N/mm^2 となる。
- 3) S13R01 試験体においてはビーチマークが表れ、明確にはく離が生じ CFRP 先端の接着剤において疲労破壊が生じていることを確認した。

7. 今後の疲労試験計画

表 7 に今後の試験計画、図 12 に今回の疲労試験の結果から求めた接着剤(KS)の疲労限度図を示す。図 12 において疲労破壊しなかった試験体を○印で、疲労破壊した試験体を●印で示す。

今後は降伏条件線の妥当性を検討するため、図 12 の赤の○印で示すように応力比 R が 0.2, 0.3 の場合で表 7 に示す応力振幅で動的疲労試験を行う。また、青の○印で示すように今回の動的疲労試験で疲労破壊しなかった S10R01 試験体と疲労破壊した S13R01 試験体の間の応力振幅で動的疲労試験を行い、修正 Goodman 線の妥当性について検討を行い、また応力比 R を変えた場合の動的疲労試験も行う。

接着は化学変化によるものなので、今後は CFRP 貼付け後、恒温室を用いて養生を行い、すべての試験体の養生条件を合わせて試験を行う。

表 7 今後の試験計画

試験体	R	τ_{am}	$\Delta\tau_a$	試験体数
		N/mm ²	N/mm ²	
S10R01	0.1	8.0	6.6	5
S10R02	0.2	8.7	5.8	5
S10R03	0.3	9.5	5.1	5
S11R01	0.1	9.0	7.4	5
S11R02	0.2	9.8	6.6	5
S11R03	0.3	10.7	5.7	5

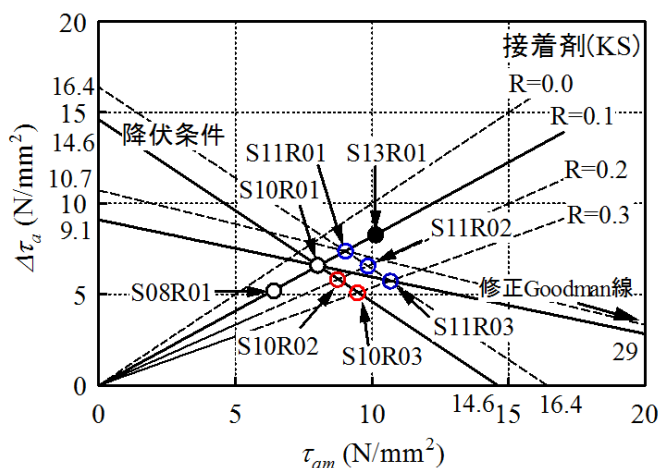


図 12 疲労限度図

参考文献

- 1) 玉井宏章, 島津勝: 炭素繊維プレート接着補強部材の有限要素法解析, その 1 材料異方性と破壊則の導入, 長崎大学大学院工学研究科報告, 第 42 巻 第 79 号 pp21-28, 2012. 7.
- 2) 原伸幸, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる鋼構造建物小梁の曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp. 523-530, 2005. 11.
- 3) 玉井宏章, 中村憲一, 陣川晃司, 御厨健太: 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の繰返し载荷試験, その 3 接着剤疲労限度の検討, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 第 45 巻 第 84 号 pp11-18, 2015. 1.
- 4) 中村憲一, 玉井宏章, 高松隆夫, 陣川晃司: 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着応力分布: その 1 実験の概要, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系(53), 409-412, 2014, 3.
- 5) 陣川晃司, 玉井宏章, 高松隆夫, 中村憲一: 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着応力分布: その 2 理論解と結果の考察. 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系(53), 413-416, 2014, 3.

謝辞

本研究を実施するにあたり, 藤本信介(東レ建設(株)), 服部明生(東レ建設(株)), 堀井久一(コニシ(株)), 松井孝洋(東レ(株))の諸氏には, 材料支給の協力を頂きました. ここに記して謝意を表します.