

# 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2 接着剤疲労限度における降伏条件の検討

玉井 宏章\*, 御厨 健太\*\*, 國廣 智志\*\*\*

## Adhesive Fatigue Test on Rehabilitated Steel Beam Bonding CFRP Plates Part 2 Investigate the Yield Condition in the Adhesive Fatigue Limit

by

Hiroyuki TAMAI\*, Kenta MIKURIYA \*\*, and Satoshi KUNIHIRO \*\*\*

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, performed preliminary fatigue test for performing adhesive fatigue test to reveal the fatigue properties of adhesive. In this paper, reports investigating the validity of the yield condition in the fatigue limit diagram of the adhesive, which is calculated in the previous studies. The result showed that yield conditions shown in previous studies is reasonable.

**Key words** : Carbon Fiber Reinforced Plastic plate, Adhesive, Fatigue Test, Fatigue Limit

### 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<sup>1),2)</sup>.

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<sup>3)</sup>でCFRPによって接着補強された細幅系列単純梁について,予備疲労試験を行い,接着剤の疲労限度図について検討を行った.

本報では,既往の研究で算出した接着剤の疲労限度図における降伏条件の妥当性を検討したので報告する.

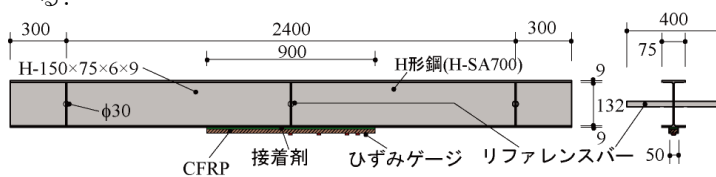


図1 試験体形状

\* 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)

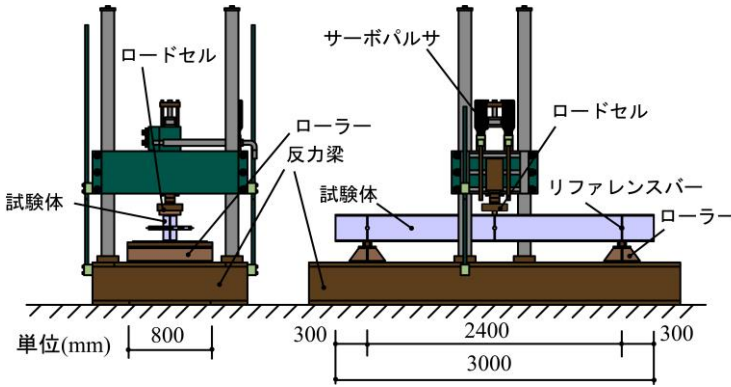


図 2 試験装置

表 1 試験体シリーズ

試験体名	試験方法	接着層厚 $t_a$ mm	$S = \frac{\Delta\tau_a + \tau_{am}}{\tau_{ay}}$	$R = \frac{\tau_{a\min}}{\tau_{a\max}}$
S10R02-S	弾性静的載荷	0.69	1.0	0.2
S10R02-F	疲労			
S10R02-E	弾塑性静的載荷			
S10R03-S	弾性静的載荷	0.57	1.0	0.3
S10R03-F	疲労			
S10R03-E	弾塑性静的載荷			

## 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：H-SA700)を用い、下フランジ下面に、中弾性型炭素繊維プレート(中央部 900mm に一列一層貼付けたもの)を使用した。試験体名の S10 は S10R01 試験体を基準としたせん断降伏限度比を、R02, R03 は応力比  $R=0.2, 0.3$  を、-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℃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。

### 2.2 加力装置

試験装置の概要を図 2，写真 1 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

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 <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
CFRP ML	295000	2169	0.71

表 3 鋼材の機械的性質

板厚 mm	降伏強さ	引張強さ	破断伸び	一様伸び
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%
6	330	444	26.1	15.4
9	280	414	25.1	19.4

ヤング係数：205000N/mm<sup>2</sup>

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 <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
試験方法(JIS)	K7181		K7171	K7181	K7161	K6850
KS	3100	1115	58	71	35	29

表 5 疲労試験載荷範囲

試験体名	R	f	$P_{min}$	$P_{max}$	$\tau_{am}$	$\Delta\tau_a$	$\sigma_{sm}$	$\Delta\sigma_s$
		Hz	kN	kN	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
S10R02-F	0.2	1.5	6.4	32	8.7	5.8	105	69.9
S10R03-F	0.3	1.5	8.7	29	9.4	5.1	103	55.6

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り返し載荷を行った。

### 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(S10R02-S, S10R03-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、荷重条件下で疲労試験(S10R02-F, S10R03-F)を行う。最後に、弾塑性静的単調載荷試験(S10R02-E, S10R03-E)を CFRP にはく離が確認されるまで行う。

表 5 に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。

### 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載荷試験では図 3 に示す全ての位置でひずみ計測を行った。疲労試験では図 3 に示すように CFRP 中央部から 0mm( $C_1$ )、150mm( $C_2$ )、350mm( $C_4$ )、400mm( $C_5$ )、440mm( $C_6$ )での位置における CFRP の垂直ひずみを計測した。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。疲労試験で生じた試験体のひずみから温度変化

炭素繊維プレート接着補強部材の接着剤疲労試験  
その2 接着剤疲労限度における降伏条件の検討

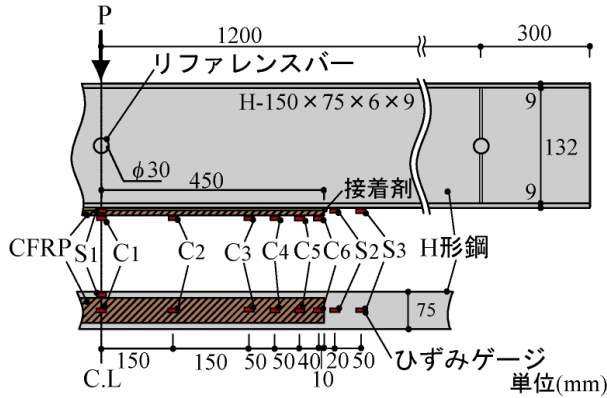


図3 ひずみゲージ貼付け位置

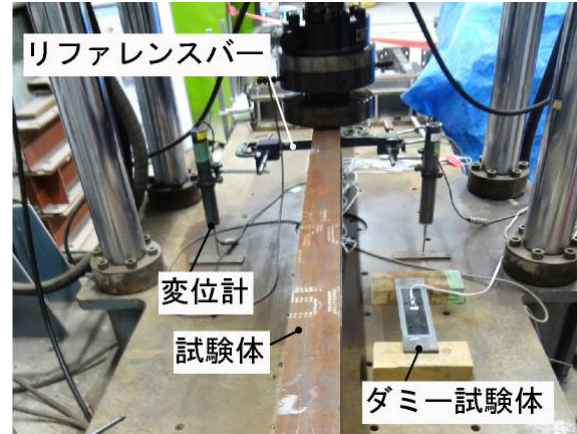


写真1 試験装置

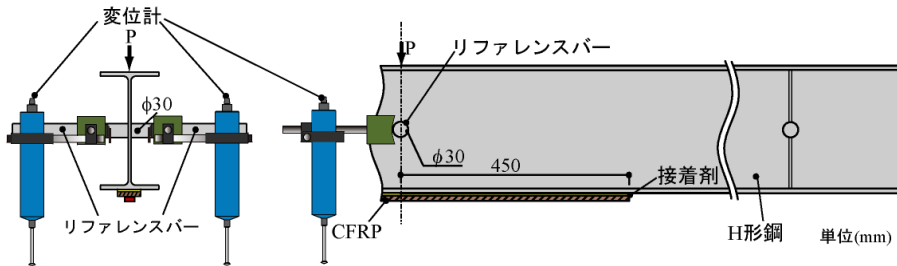


図4 変位計測詳細図



写真2 ダミー試験体

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2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 $\delta$ 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 $\tau_a$ は、次式で得られる<sup>4),5)</sup>。

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

ここに、 $\lambda$ 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 $\varepsilon_c$ は次式で与えられる<sup>5)</sup>。

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

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

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

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

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

$l_c$  : 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 $\tau_a$ 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

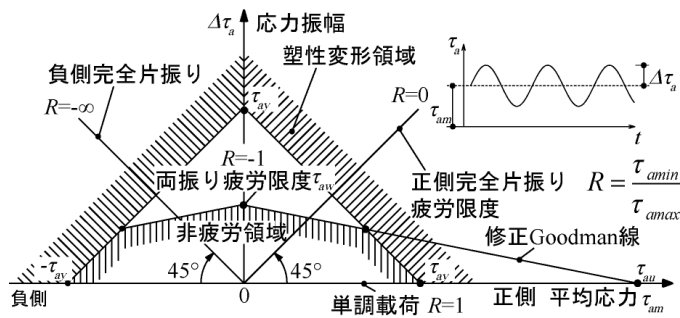


図5 接着剤の疲労限度図モデル

表6 疲労限度図に用いる材料定数

接着剤(KS)	N/mm <sup>2</sup>	採用値	名称
$\tau_{ay}$	14.6	実験値(S08R01試験体)	せん断降伏限度
$\tau_{aw}$	9.1	実験値(S08R01試験体)	両振り疲労限度
$\tau_{au}$	29.0	引張せん断付着強度	せん断強さ

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 $\sigma_s$ 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 $\tau_{ave}$ 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  $R$  ( $= \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{\tau_{amin}}{\tau_{amax}}$ ) 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。

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と、疲労限度図において両振り疲労限度 $\tau_{aw}$ と引張せん断付着強さ $\tau_{au}$ 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 $\tau_{ay}$ 、 $\tau_{aw}$ 、 $\tau_{au}$ を示す。既往の研究<sup>3)</sup>のS10R01-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

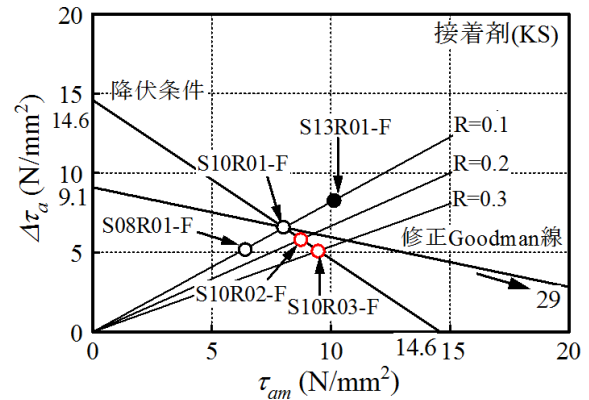


図6 接着剤の疲労限度図

ら、両振り疲労限度 $\tau_{aw}$ を $\tau_{aw} = 9.1\text{N/mm}^2$ としている。また、せん断降伏限度 $\tau_{ay}$ を図6に示すS10R01試験体の応力点を通る傾き-1の直線のy切片と仮定し、 $\tau_{ay} = 14.6\text{N/mm}^2$ としている。

図6は降伏条件と修正 Goodman 線による接着剤の疲労限度図を示す。今回行った疲労試験での応力点を赤の○印で示している。参考のため、既往の研究<sup>3)</sup>の試験体の応力点を疲労破壊しなかった試験体は○印で、疲労破壊した試験体は●印で示す。

#### 5. 実験結果と考察

試験結果を図7~10に示す。

図7は200万回サイクルまでのCFRP各部に生じる最大ひずみと载荷サイクル数 $n$ との関係を示している。黒色の実線は実験値、破線はひずみ分布度算定式からの予測値を示す。図7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(a)のひずみ $C_4$ については25~75万回のひずみ値のデータが取れていないため、それ以外のひずみ値を示している。

図8は荷重一変位関係から求めた剛性 $K(=P/\delta)$ と载荷回数との関係を、y軸は载荷回数毎の剛性 $K$ を1万回サイクル時の剛性 $K_0$ で除した値である。なお、剛性は荷重一変位関係から最小二乗法を用いて求めている。

図9は疲労試験前後の単調载荷試験における荷重一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は弾塑性静的単調载荷試験におけるCFRPの荷重一ひずみ関係を示している。

試験結果から以下のことが分かる。

- 1) 図7(a), (b)よりCFRP端部であるひずみ $C_6$ は200万回サイクルまで大きな変化はない。また、その他のひずみについても200万回サイクルまで大きな変化はない。



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2 接着剤疲労限度における降伏条件の検討

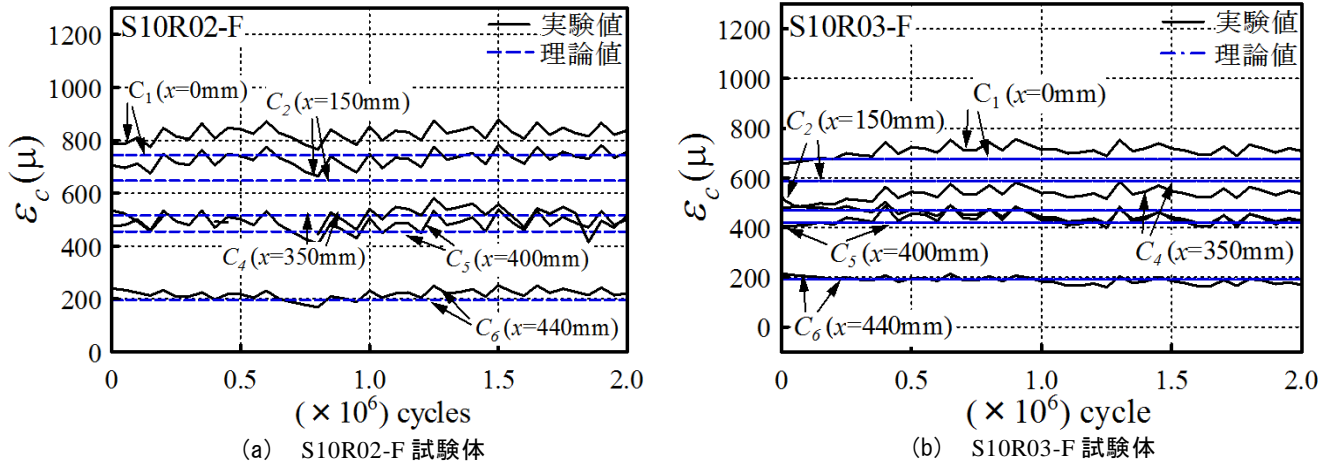


図7 荷回数—最大ひずみ振幅関係

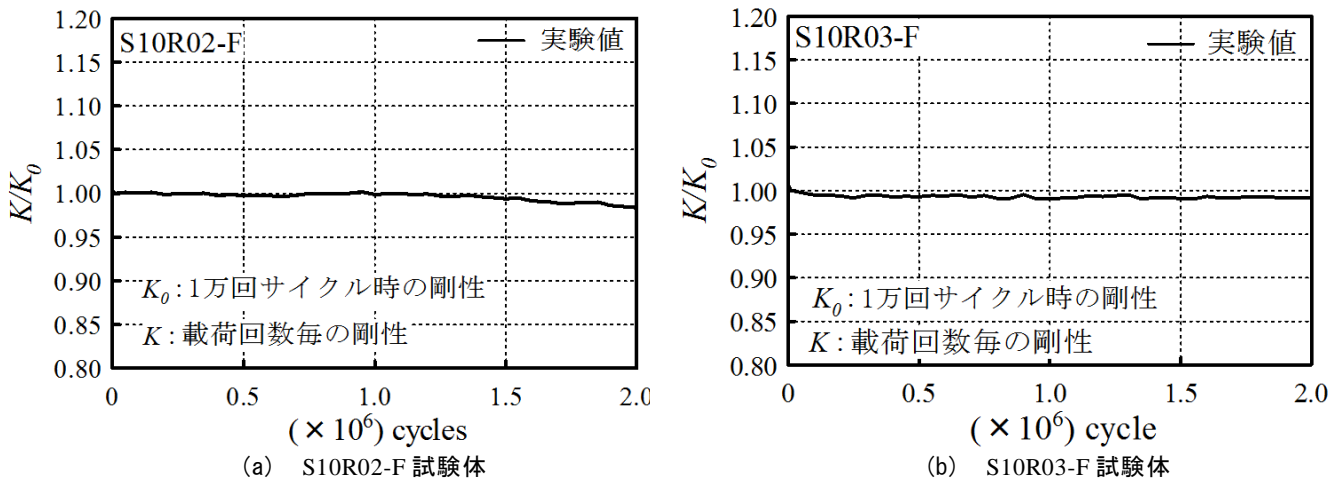


図8 荷回数—剛性関係

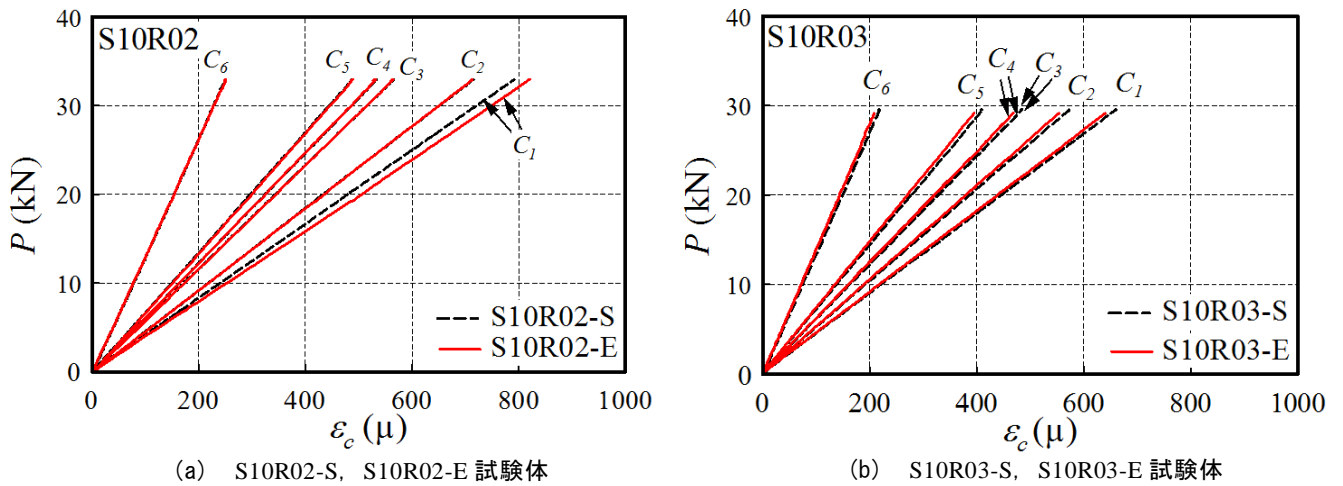


図9 疲労試験前後における単調荷重試験の荷重—ひずみ関係

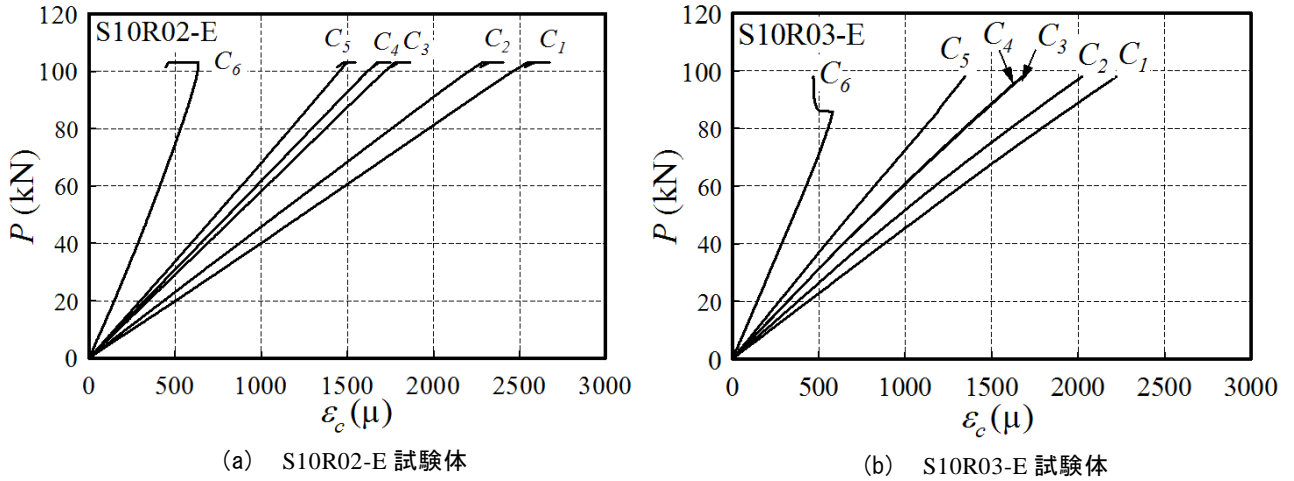


図 10 弾塑性静的単調載荷試験の荷重—ひずみ関係

表 7 今後の試験計画

試験体	R	$\tau_{am}$	$\Delta\tau_a$	試験体数
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
S11R01	0.1	9.0	7.4	5
S11R02	0.2	9.8	6.6	5
S11R03	0.3	10.7	5.7	5
S13R02	0.2	11.1	7.4	5
S13R03	0.3	12.0	6.5	5

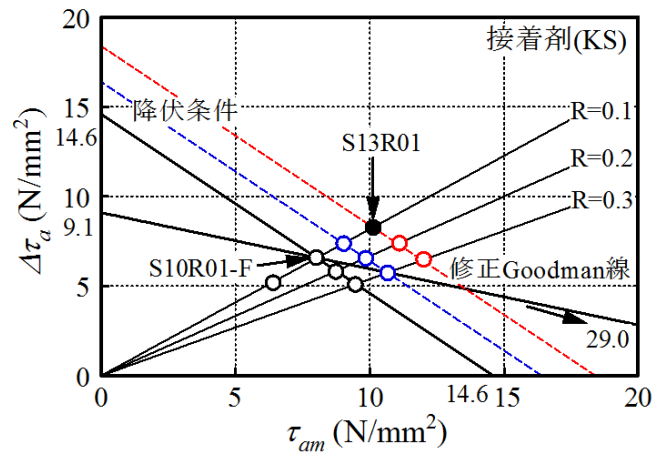


図 11 疲労限度図

- 2) 図 8(a), (b)より 200 万回サイクルまでの剛性に大きな変化はない。
- 3) 図 9 より疲労試験前後のひずみ値に大きな変化はなく、疲労による影響はない。
- 4) 図 10(a)より  $P=102.3\text{kN}$  で S10R02-E 試験体の CFRP 端部にはく離が生じている。この時のはく離せん断応力  $\tau_{amax}$  は  $\tau_{amax}=46.3\text{N/mm}^2$  である。
- 5) 図 10(b)より  $P=85.8\text{kN}$  で S10R03-E 試験体の CFRP 端部にはく離が生じている。この時のはく離せん断応力  $\tau_{amax}$  は  $\tau_{amax}=42.7\text{N/mm}^2$  である。

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、接着剤の疲労限度図における降伏条件の妥当性を検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) S10R02 試験体, S10R03 試験体の応力振幅では疲労破壊が生じていない。
- 2) 既往の研究で示した降伏条件は妥当である。

7. 今後の疲労試験計画

表 7 に今後の試験計画, 図 11 に接着剤(KS)の疲労限度図を示す。図 11 において既往の研究で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。

今後は青の○印で示すように疲労破壊しなかった S10R01 試験体と疲労破壊した S13R01 試験体との間の応力振幅で疲労試験を行い、降伏条件について検討を行う。また赤の○印で示すように疲労破壊しなかった S13R01 試験体については応力比 R を変えた場合の疲労試験も行う。

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.

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2 接着剤疲労限度における降伏条件の検討

- 3) 玉井宏章, 御厨健太, 陣川晃司, 立上洋介: 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, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 第46巻第86号 pp7-14, 2016, 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-

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.