

# 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の繰返し載荷試験 その3 接着剤疲労限度の検討

玉井 宏章\*, 中村 憲一\*\*, 陣川 晃司\*\*, 御厨 健太\*\*\*

## Cyclic Loading Test on Rehabilitated Steel Beam Bonding CFRP Plates Part 3 Study of Adhesive Fatigue Limit

by

Hiroyuki TAMAI\*, Kenichi NAKAMURA\*\*, Koji JINKAWA\*\*, and Kenta MIKURIYA\*\*\*

The authors have developed a tensile force strengthening method using bonded carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate to enhance the life of existing building. This paper showed the result of cyclic loading three point tests and the fatigue limit based on Goodman's Law for adhesive. The result showed that fatigue failure of adhesive could not be observed even if shear stress of adhesive at the top of CFRP is over assumed fatigue limit based on Goodman's Law.

**Key words** : Carbon Fiber Reinforced Plastic plate, Fatigue, Shear Strength of Adhesive, Cyclic Loading Test, Goodman's Law

### 1. はじめに

炭素繊維プレートの接着補強では、炭素繊維プレート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<sup>1)-3)</sup>。

前報その2では接着剤の破壊則について考察し、接着端部のせん断応力分布に着目した提案式を示した。

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。

本報その3では、部分補強を行う際において接着層破壊する場合の補強鋼部材(複合材)の疲労限度検討を目的として、鋼小梁を接着補強した材の多数回繰返し疲労試験を行う。また、疲労限度 Goodman 則を用いて、鋼材、接着剤の疲労による影響を検討する。

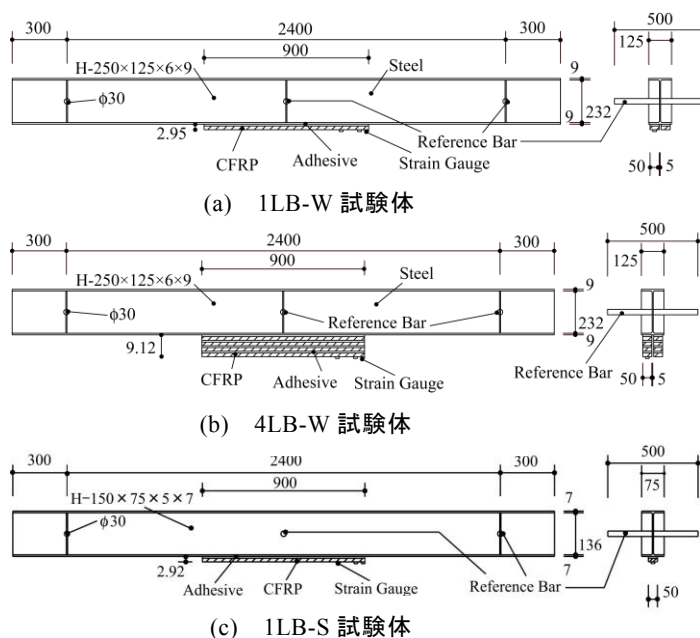


図1 試験体概要

平成27年1月23日受理

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

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

\*\*\* 工学部構造工学科 (Department of Structural Engineering)

表 1 試験体シリーズ

試験体名	CFRP	CFRP全長	接着層厚
	枚	mm	mm
1LB-W	1	900	0.95
4LB-W	4	900	0.78
1LB-S	1	900	0.92

表 2 鋼材の機械的性質

板厚	降伏強さ	引張強さ	破断伸び	一様伸び	使用箇所
mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%	—
5	343	433	26.2	15.7	H-150×75×5×7
6	330	444	26.1	15.4	BH-250×125×6×9
7	337	438	24.1	18.3	H-150×75×5×7
9	280	414	25.1	19.4	BH-250×125×6×9

表 3 炭素繊維プレート及び接着剤の機械的性質

(a) 炭素繊維プレートの機械的性質

	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

(b) 接着剤の機械的性質

名称	ヤング係数	せん断弾性係数	曲げ強さ	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>
KW	2280	820	56	59	35	26
KS	3100	1115	58	71	35	29

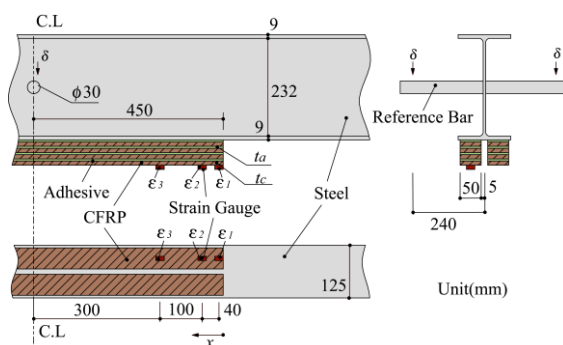


図 2 歪ゲージ貼付位置(1LB-W, 4LB-W)

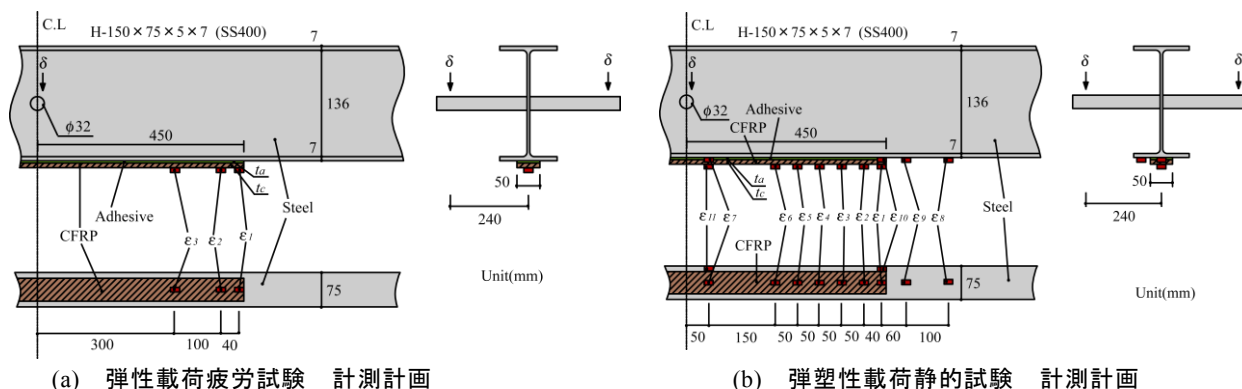


図 3 歪ゲージ貼付位置(1LB-S)

## 2. 実験方法

接着層の応力分布，破壊性状及び疲労特性を検討するため，炭素繊維プレートで部分接着補強した細幅系列単純梁について，中央集中荷重を作用させる片振り繰返し載荷疲労実験を行う。

### 2.1 試験体

試験体概要を図 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-250×125×6×9 と，H-150×75×5×7 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央部に 900mm 張り付ける．H-250×125×6×9 の鋼梁に 2 列 1 層及び 4 層部分接着したもの(1LB-W 及び 4LB-W 試験体)，及び H-150×75×5×7 の鋼梁に 1 列 1 層部分接着したもの(1LB-S 試験体)の 3 種類を用意した．また，1LB-W，4LB-W 試験体には 2 液硬化型エポキシ樹脂(冬期用

表 4 試験シリーズ

		$P_{max}$	$P_{min}$	$f$	$R$	No. of cycles	$\Delta\sigma_s$	$\sigma_{sm}$	$\Delta\tau_a$	$\tau_{am}$
		kN	kN	Hz	—	—	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1LB-S	弾性静的	20.0	0.0	0.0	0.0	0.25	63.2	63.2	4.2	4.2
	弾性疲労	24.0	2.4	2.0	0.1	2,000,000	68.2	83.4	4.4	5.6
	弾塑性静的	65.0	0.0	0.0	0.0	0.25	205.3	205.3	13.7	13.7
1LB-W	弾性疲労	30.0	3.0	2.0	0.1	2,000,000	23.4	28.5	1.5	1.7
4LB-W	弾性疲労	39.0	3.9	2.0	0.1	2,000,000	25.0	30.6	1.5	1.7

KW)を, 1LB-S 試験体には同様のエポキシ樹脂(夏期用KS)を用いて接着を行った。

表 2 に試験体に用いた H 型鋼梁のフランジ, ウェブそれぞれの 1 号試験片により 4 体の引張り試験結果の平均値を示し, また, 炭素繊維プレート, KW, KS 接着剤の機械的性質を表 3(a), (b)にそれぞれ示す。

## 2.2 計測方法

計測計画として歪ゲージ貼付位置を 1LB-W, 4LB-W 試験体及び 1LB-S 試験体について図 2 及び 3 に示す。

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, 変位については左右リファレンスバーを用いて両端と中央との相対変位  $\delta$  の計測を行う。歪については, 1LB-W, 4LB-W 試験体において, 図 2 に示すように, 梁中央から 300mm, 400mm, 440mm での位置における炭素繊維プレートの垂直歪を, 1LB-S 試験体は図 3 のように, 疲労試験では CFRP 部分 3 箇所, 弾塑性静的载荷試験では CFRP 部分 7 箇所, 鋼材部分 4 箇所歪計測を行った。

## 2.3 試験シリーズ

試験シリーズを表 4 に示す。

1LB-S 試験体について, まず弾性範囲の荷重 ( $P=20\text{kN}$ )を静的単調に载荷する弾性静的载荷試験を, 次に 1LB-W, 4LB-W, 1LB-S 試験体について荷重及び鋼梁中央下フランジ縁の垂直応力の最大値に対する最小値の比(応力比) $R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ を 0.1 とし, 弾性範囲かつ非疲労領域内において 200 万回繰返し载荷する弾性疲労試験を, 最後に弾性疲労試験が終了した 1LB-S 試験体について単調で終局( $P=65\text{kN}$ )まで载荷する弾塑性静的载荷試験を用意し, 計 5 ケース実験を実施した。

## 3. 応力分布理論解

鋼板の中央部に炭素繊維プレート(CFRP)を接着した複合材に引張り  $P$  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  
 $E_c, A_c$ : 炭素繊維プレートのヤング率, 断面積  
 $x$ : 炭素繊維プレート先端からの  $x$  座標値

式を利用すると, 試験体における CFRP の垂直歪分布  $\varepsilon_c$  は次式で与えられる<sup>5)</sup>。

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

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

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

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

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

$l_c$ : 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 プレート端部で生じる最大せん断応力  $\tau_a$  は, 次式で与えられる。

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

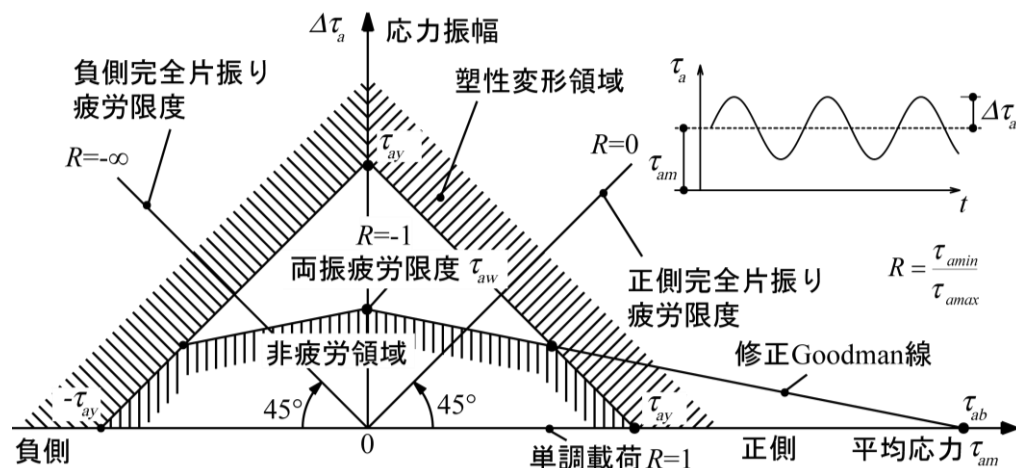
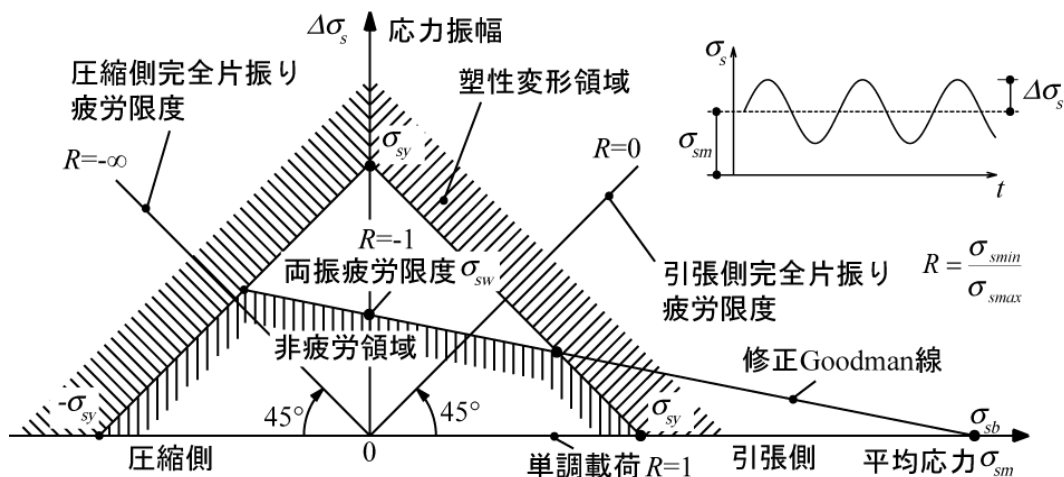


図4 鋼材と接着剤の疲労限度図モデル

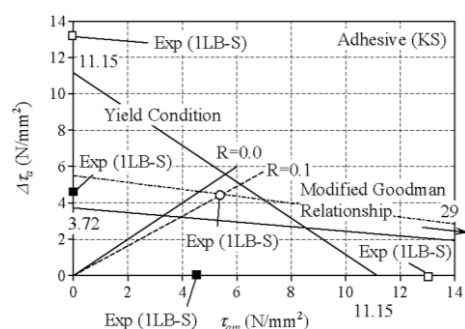
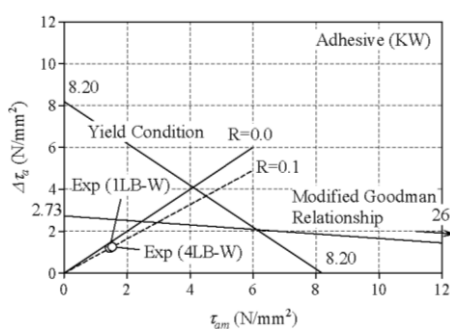
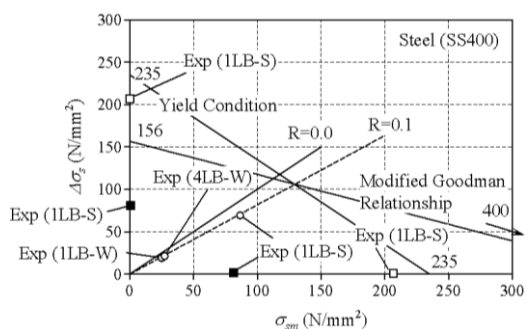


図5 疲労限度図

$w_a$  : 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 $\sigma_s$ は、次式で与えられる。

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

$l_s$  : 梁端部から中央までの距離

$h_s$  : 図心から梁下フランジ縁までの高さ

#### 4. 疲労限度

鋼材と接着剤の疲労限度図の模式図を図 4(a), (b)に示す。疲労限度図は多数回の繰返し載荷下における応力の変動を平均応力 $\sigma_{sm}$ 、 $\tau_{am}$ と応力振幅 $\Delta\sigma_s$ 、 $\Delta\tau_a$ 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、応力比  $R (= \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}})$  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。

繰返し載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疲労限度( $\sigma_{sw}$ ,  $\tau_{aw}$ )と引張又はせん断強さ( $\sigma_{sb}$ ,  $\tau_{ab}$ )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、鋼材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 4(a), (b)のように表せる。

引張圧縮の垂直応力を対象とした鋼材の疲労限度は圧縮側で亀裂が閉じるのでその領域が増加するのに対し、せん断応力を対称とした接着剤の疲労限度は、平均応力の正側と負側で対象となっている。

試験体の各部(鋼, 接着剤)で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 万回載荷しても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(ないしは両振疲労限度)が得られる。

表 5 には目安となる鋼材(SS400)及び接着剤(KW, KS)の疲労限度図の材料定数 $\sigma_{sy}$ ,  $\sigma_{sw}$ ,  $\sigma_{sb}$ 及び $\tau_{ay}$ ,  $\tau_{aw}$ ,  $\tau_{ab}$ を示す<sup>6)</sup>。接着剤のせん断降伏度 $\tau_{ay}$ はせん断弾性係数 $G_a$ と降伏せん断ひずみ $\gamma_y$ を既往の研究<sup>7)</sup>から $\gamma_y=0.01$ として算定し、両振疲労限度 $\tau_{aw}$ は $\tau_{aw} = \frac{\tau_{ay}}{3.0}$ として設定した。

#### 5. 実験結果とその考察

各試験体の疲労限度図を図 5 に(a)鋼材, (b)接着剤(KW), (c)接着剤(KS)について示し、実験値を○で、表

表 5 疲労限度図に用いる各材料定数

Steel	N/mm <sup>2</sup>	仮定式	名称
$\sigma_{sy}$	235	降伏伏点実験値	引張降伏限度
$\sigma_{sw}$	156	$\sigma_{sw} = \frac{\sigma_{sy}}{1.5}$	両振疲労限度
$\sigma_{sb}$	400	引張強さ実験値	引張強さ
Adhesive(KW)	N/mm <sup>2</sup>	仮定式	名称
$\tau_{ay}$	8.2	$\tau_{ay} = G_a \cdot \gamma_{ay}$ ( $\gamma_{ay}=0.01$ )	せん断降伏強度
$\tau_{aw}$	2.73	$\tau_{aw} = \frac{\tau_{ay}}{3.0}$	両振疲労限度
$\tau_{ab}$	26.0	引張せん断付着強度	せん断強さ
Adhesive(KS)	N/mm <sup>2</sup>	仮定式	名称
$\tau_{ay}$	11.5	$\tau_{ay} = G_a \cdot \gamma_{ay}$ ( $\gamma_{ay}=0.01$ )	せん断降伏強度
$\tau_{aw}$	3.72	$\tau_{aw} = \frac{\tau_{ay}}{3.0}$	両振疲労限度
$\tau_{ab}$	29.0	引張せん断付着強度	せん断強さ

5 の材料定数で求めた疲労限度曲線を実線で併せて示している。また、弾性静的載荷時の応力点を■, 弾塑性静的載荷時の応力点を□で示す。

弾性疲労試験の結果を 1LB-W, 4LB-W 試験体について図 6, 7 に, 1LB-S 試験体について図 8, 9 にそれぞれ示す弾性及び弾塑性の静的載荷試験の結果を表 6 及び図 10 に示す。

図 6, 8 は 2,000,000cycles までの炭素繊維プレート各部に生じる最大歪と載荷サイクル数  $n$  との関係を、破線は実験値、実線は多項近似した実験値、一点鎖線は歪分布度算定式からの予測値を示す。(a)に 1LB-W 試験体, (b)4LB-W 試験体の結果を示す。

図 7, 9 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 10,000cycles 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剛性を求めている。

図 10 は静的載荷での CFRP と鋼材の荷重-ひずみ関係を、疲労試験前に行った静的載荷試験結果を(A), 疲労試験後に行った静的載荷試験結果を(B), 破壊に至るまでの結果を(C)に示す。また、図 10 の(a), (b)の場合について、降伏荷重の 50%である  $P=15\text{kN}$  時における CFRP と鋼材に生じる各点の歪値を表 6 に示す。

以上の結果から以下のことが分かる。

- 1) 図 6, 7(a), (b)より, CFRP の歪 $\varepsilon_{3max}$ に載荷の繰返しに伴って若干の変化が生じているが, 1LB-W 試験体の剛性に繰返し回数  $n$  が 200 万回まで変化は認められない。また, 4LB-W 試験体についても同様の結果である。このことから, 接着剤のせん断応力 $\tau_{amin}=0.32\text{N/mm}^2$ ,  $\tau_{amax}=3.24\text{N/mm}^2$ において疲労破壊は生じていない。

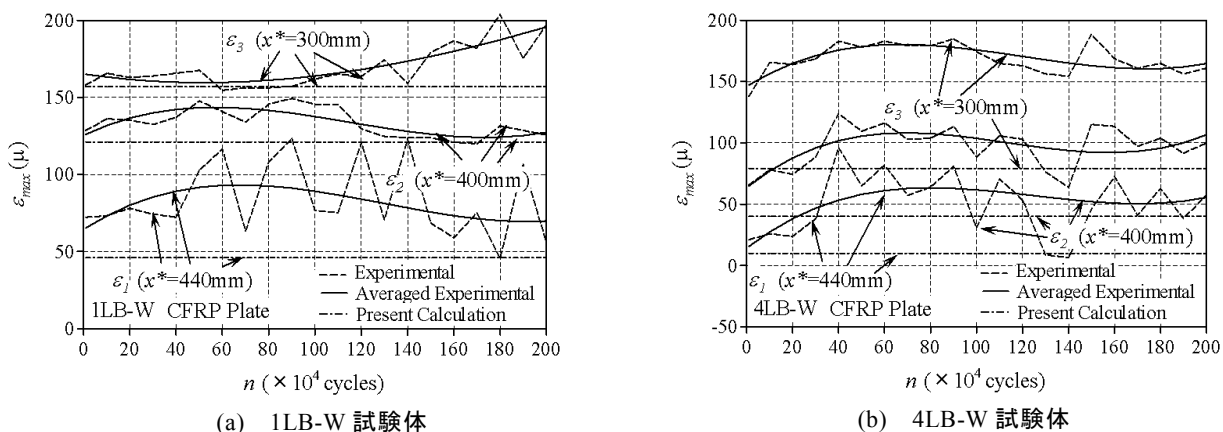


図6 荷回数-最大歪振幅関係(1LB-W, 4LB-W 試験体)

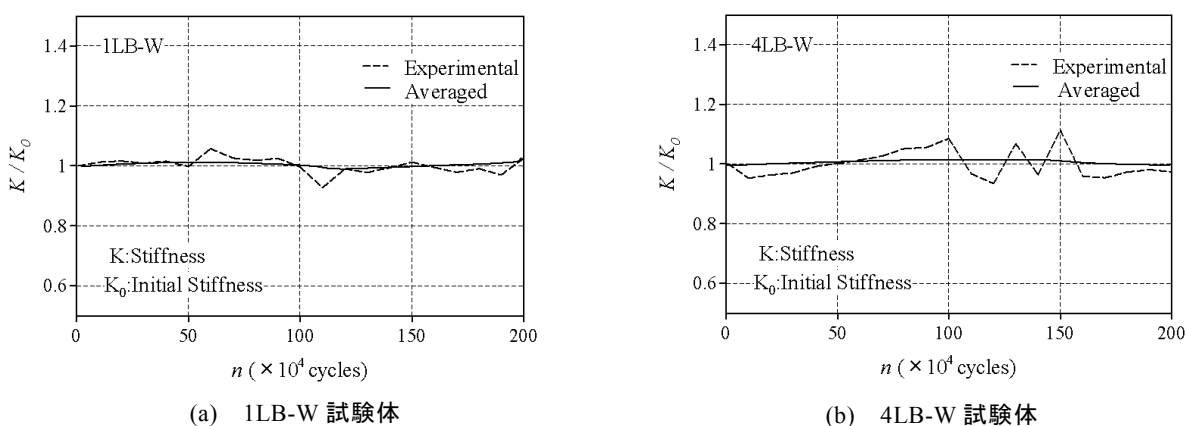


図7 荷回数-剛性関係(1LB-W, 4LB-W 試験体)

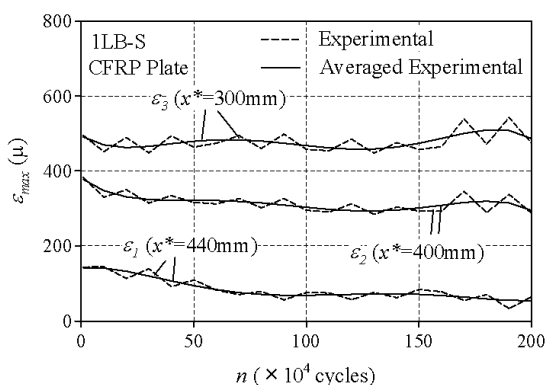


図8 荷回数-最大歪振幅関係(1LB-S 試験体)

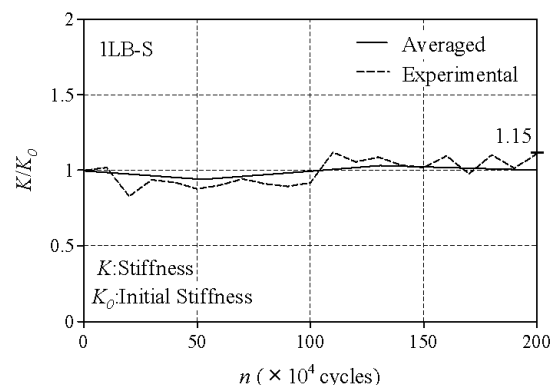


図9 荷回数-剛性関係(1LB-S 試験体)

表6 静的弾性荷重時でのCFRPと鋼材の歪値

CFRP (P=15.0 kN時)の歪 (μ)							
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$
疲労前	102.9	258.1	311.4	332.4	357.1	371.4	433.3
疲労後	63.8	234.3	294.3	314.3	337.1	354.3	417.1
疲労後/疲労前	0.62	0.91	0.95	0.95	0.94	0.95	0.96

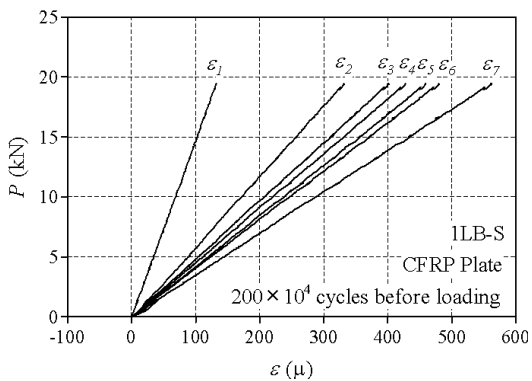
  

Steel (P=15.0 kN時)の歪 (μ)				
	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$
疲労前	238.1	283.8	321.9	444.7
疲労後	227.6	273.3	301.9	418.1
疲労後/疲労前	0.96	0.96	0.94	0.94

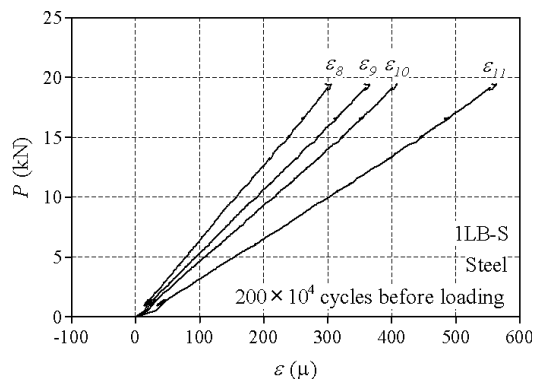
  

剛性 (kN/mm)	
	剛性 (kN/mm)
疲労前	4.99
疲労後	5.73
疲労後/疲労前	1.15

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

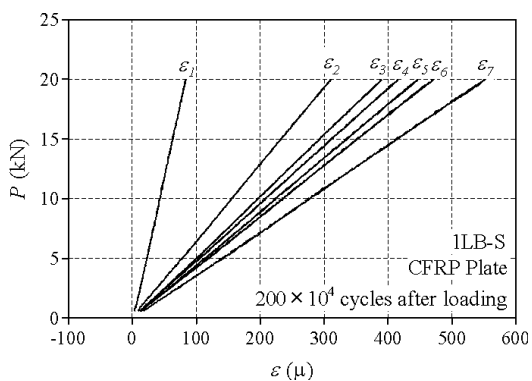


(a) 炭素繊維プレートの発生歪

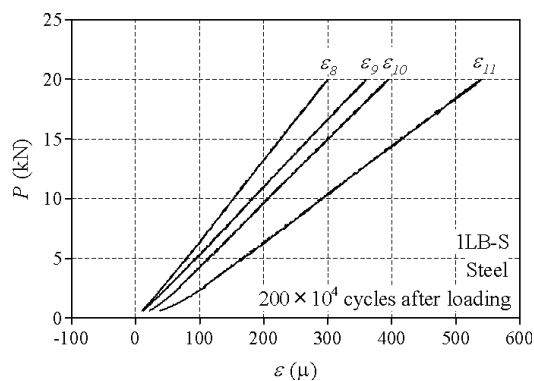


(b) 鋼材の発生歪

(A) 疲労試験前(弾性試験)

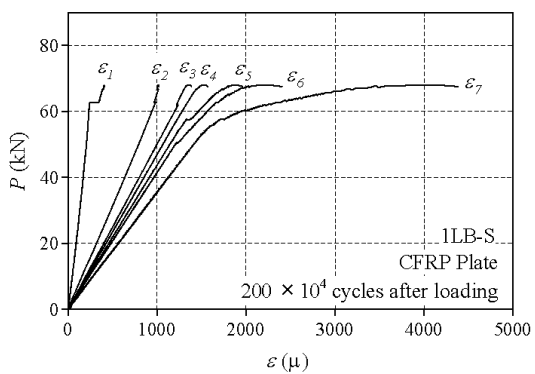


(a) 炭素繊維プレートの発生歪

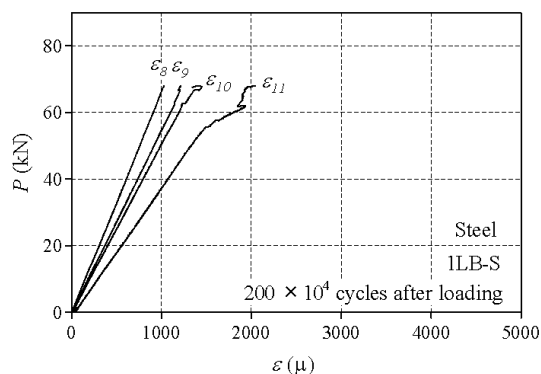


(b) 鋼材の発生歪

(B) 疲労試験後(弾性試験)



(a) 炭素繊維プレートの発生歪



(b) 鋼材の発生歪

(C) 破壊まで(弾塑性試験)

図 10 静的载荷試験での CFRP と鋼材の荷重-ひずみ関係

- 2) 図 8 より  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  での CFRP 端部の歪最大値は下降し, CFRP 中央部である  $\varepsilon_3$  での歪最大値は大きな変化が生じていないことが分かる. これより, CFRP 端部では繰返し载荷に伴い接着剤の剛性が変化している.
- 3) 図9より, CFRPの歪 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ に载荷の繰返しに伴って変化が生じており, 試験体の剛性の変化は $100 \times 10^4$  cyclesまでは微量ながらも剛性が低下し, その後,  $200 \times 10^4$  cyclesまでは若干に剛性が上昇する.
- 4) 図 10 より, CFRP 部分端部における歪 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  は, 疲労試験後で, 歪値が小さくなる. 特に, CFRP 端部での発生歪は低下する. 同様に, 鋼材部分の歪値も疲労試験後で低下する.
- 5) 表 6 より, 疲労試験前後で行った弾性静的载荷試験での発生歪を比べると, 炭素繊維, 鋼材ともにおよそ 5~8%程度小さくなっていることから, 接着剤の硬化現象が生じており, CFRP 先端の接着剤には疲労破壊は生じていない.
- 6) 図 10(C)から  $P=65\text{kN}$  で炭素繊維プレートにはく離が生じており, この時の  $\tau_{max}=28.59\text{N/mm}^2$  は接着剤の素材特性, 引張せん断付着強度と一致することから, 疲労試験後においても, 前報その 2 で提案した破壊則が有用である.
- 7) 図5(c)から, 1LB-S試験体の弾性疲労試験で接着剤の疲労破壊が生じなかったことから, 修正 Goodman線のy切片である両振疲労限度  $\tau_{aw}$  は仮定値  $3.72\text{N/mm}^2$  より大きく  $6.0\text{N/mm}^2$  程度あることが分かる.

## 6. まとめ

本研究では, CFRP接着補強した鋼材に繰返し载荷を行い, 修正Goodman則を採用し, 鋼材, 接着剤の疲労限度検討を行った. また, 疲労前後での弾性静的载荷試験, 弾塑性静的载荷試験を行い, それぞれの結果から疲労による影響を検討した.

本研究で得られた知見を以下に示す.

- 1) 1LB-S試験体については, 疲労試験後に歪値が小さくなっており, これは接着剤の硬化現象が生じたということが判断しうる.
- 2) 今回の荷重条件では疲労による破壊が見られず, 接着剤での修正Goodman線の両振疲労限度は, 仮定値よりも大きく,  $6.0\text{N/mm}^2$ 程度であることが分かる.

## 参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生:連続繊維プレートによる鋼構造物の補強に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, pp. 239-246, 2004. 11.
- 2) 玉井宏章, 陣川晃司, 高松隆夫, 服部明生, 堀井久一:炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力:鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp. 589-595, 2014. 11.
- 3) 玉井宏章, 服部明生, 高松隆夫, 小澤吉幸, 久保田啓仁:炭素繊維プレートによる接着補強山型鋼圧縮材の解析的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 号, pp. 245-252. 2012. 11.
- 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. 03.
- 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. 03.
- 6) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説(2012年改訂版), 技報堂, 2012.
- 7) 服部明生, 玉井宏章, 高松隆夫, 小澤吉幸, 久保田啓仁:炭素繊維プレートと鋼との複合材の高温クリープ限界せん断応力, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 号, pp523-530, 2011. 11.

## 謝辞

本研究を実施するにあたり, 高松隆夫(広工大), 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), 松井孝洋(東レ(株))氏には, 素材を提供して頂きました. ここに記して謝意を表します.