

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2 接着剤の疲労試験

玉井 宏章*, 中村 憲一**, 陣川 晃司**

Cyclic Loading Test on Rehabilitated Steel Beam Bonding CFRP Plates Part 2 Fatigue Test of Adhesive

by

Hiroyuki TAMAI*, Kenichi NAKAMURA** and Koji JINKAWA**

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 analytical stress distribution of adhesive layers on rehabilitated steel beam.

The result showed that fatigue life of rehabilitated beam is over two million cycles and the adhesive has enough fatigue toughness for severe working loading such as cyclic shear stress over creep limit strength.

Key words : Carbon Fiber Reinforced Plastic plate, Fatigue , Shear Strength of Adhesive, Cyclic Loading Test

1. はじめに

著者等は、炭素繊維プレートを補修材に選定し、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・開発をおこなっている^{1), 2)}。

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なことである。

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。

本研究では、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)の強度向上を目的として、接着層の応力分布を算定するとともに繰返し載

荷実験を行って、算定応力分布の妥当性を示すとともに、繰返し載荷時の破壊性状を検討する。

本報その2では疲労試験を行い、クリープ限界応力度近傍で接着剤が十分な疲労寿命を有しているかどうか検討する。

2. 実験方法

○加力装置

試験装置の概要を図1に示す。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、試験体中央部にロードセルを介し、動的繰返し載荷装置によって繰返し荷重を載荷した。

○試験体

試験体シリーズを表1、試験体の寸法を図2に示す。試験体に用いたH形鋼梁のフランジ(9mm)、ウェブ

平成26年7月4日受理

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

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

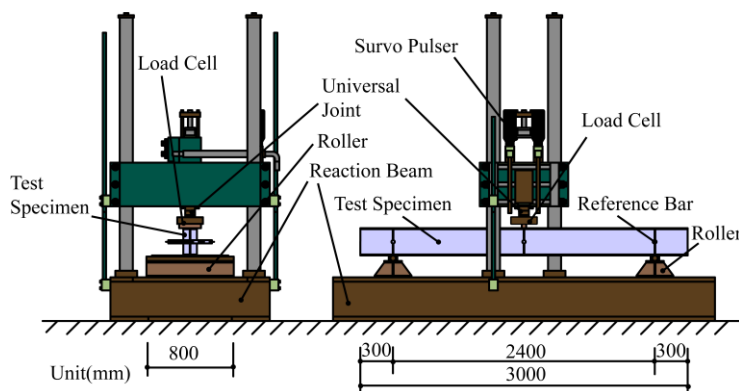
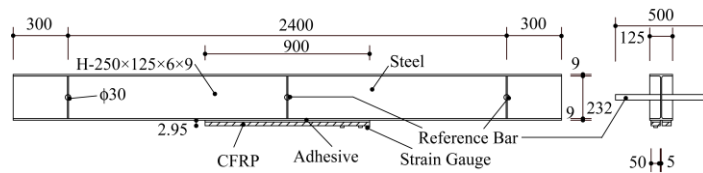


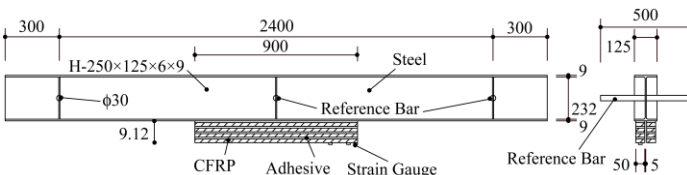
図 1 加力装置概要

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



(a) 1LB-W 試験体



(b) 4LB-W 試験体

図 2 試験体概要

表 2 鋼材の機械的性質

板厚	降伏応力度	引張強さ	破断伸び	一様伸び
mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%
6	330	444	26.1	15.4以上
9	280	414	25.1	19.4

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 ²	N/mm ²	%
CFRP ML	295700	2169	0.71

(b) 接着剤の機械的性質

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
2280	820	55.8	59.2	34.8	25.5

(6mm)それぞれの1号試験片により4体の素材試験結果の平均値を表2に、(a)炭素繊維プレート、(b)接着剤の機械的性質を表3にそれぞれ示す。

試験体は、全長 3000mm の H 形鋼(H-250×125×6×9)の下フランジ下面に、中弾性型炭素繊維プレート(ML50×2)を中央部 900mm 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)2 種類を用意した。接着剤は常温二液硬化型のエポキシ樹脂を、炭素繊維は中弾性型炭素繊維プレートを用いた。

○計測計画

計測計画詳細図と変位計画詳細図の概要を図 3, 4 に示す。

歪については、図 3 に示すように、梁中央から 300mm, 400mm, 440mm 位置における炭素繊維プレートの材軸方向の垂直歪 $\varepsilon_3, \varepsilon_2, \varepsilon_1$ をそれぞれ計測した。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、変位については、

図 4 に示すように梁両端ウェブに取付けた $\phi 30$ の丸棒鋼のリファレンスバーに溝型鋼を渡し、その溝形鋼から高精度変位計で、梁中央ウェブに取付けた $\phi 30$ の丸棒鋼との相対変位を左右両側で計測し、平均して中央たわみ δ を算定した。

3. 理論解および数値解析

今回使用する数値解析法は前報に示す接着剤のせん断応力算定方法で行う³⁾。

○接着剤のせん断応力分布と CFRP の垂直歪分布

前報³⁾3章に示すように、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力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。

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

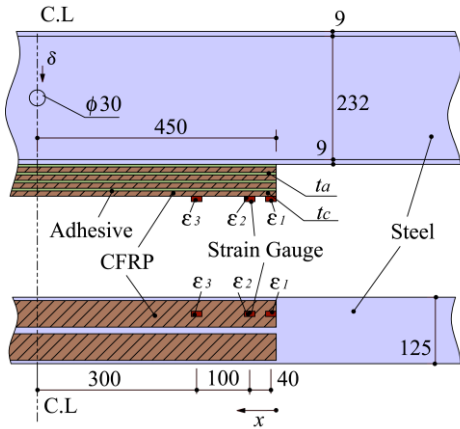


図3 計測計画詳細図

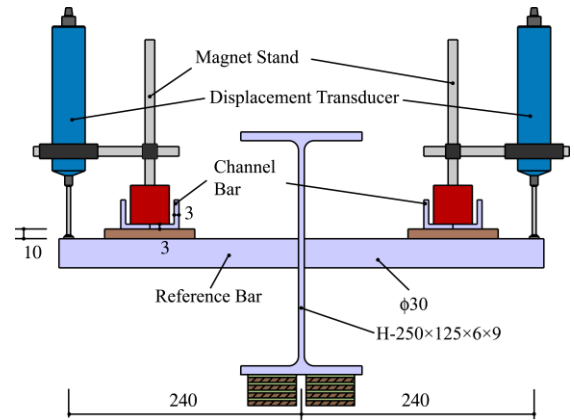


図4 変位計画詳細図

ここに、 λ は接着基準長さであり、次式で表される。

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

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

また CFRP の歪分布は文献3より次式で与えられる。

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

$$\sigma_c = \sigma_c^{(c)} + \sigma_c^{(d)} \quad (3.b)$$

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

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

ここに、

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

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

4. 疲労限度及び载荷プログラム

本報では接着剤の疲労限度の検討をするための片振り繰返し载荷試験を行う。

降伏条件, 修正 Goodman 線から, 鋼材, 接着剤の疲労

限度領域を決定⁴⁾し, 加力試験計画を立てる。疲労限度の領域として鋼材, 接着剤の降伏強さ, σ_{sy} , τ_{ay} , 両振疲労限度 σ_{sw} , τ_{aw} , 最大耐力 σ_{sb} , τ_{ab} を基に図5のような領域を考える。試験は引張側片振り試験である。応力比を $R=0.1$ と設定し, どの応力レベルで, 200 万回载荷以内で疲労破壊が生じるか試験して, 疲労限度領域を推定する。図内右上に荷重制御プログラム時の応力振幅を示す。

図6(a)に, 降伏条件線と修正 Goodman 線による鋼材フランジの疲労限度領域を示す。鋼材の両振疲労限度 σ_{sw} は, 短期許容応力度 $\sigma_{sw}=156\text{N/mm}^2$ と仮定した。

図6(b)に降伏条件線と修正 Goodman 線による最下層の接着剤の疲労限度領域を示す。今回使用した接着剤の特性より, 接着剤の弾性限界である τ_{ay} は, せん断弾性係数 G_a と降伏歪 1% として, $\tau_{ay}=8.20\text{N/mm}^2$ とした。両振疲労限度 τ_{aw} は弾性限界 τ_{ay} の 1/3 と仮定して $\tau_{aw}=2.73\text{N/mm}^2$ と求め, 修正 Goodman 線を図に示す。载荷プログラムの応力比 R は 0.1 を設定する。

接着剤に生じるせん断応力の CFRP プレート端部に生じる最大せん断応力 τ_a は, 文献3より次式で与えられる。

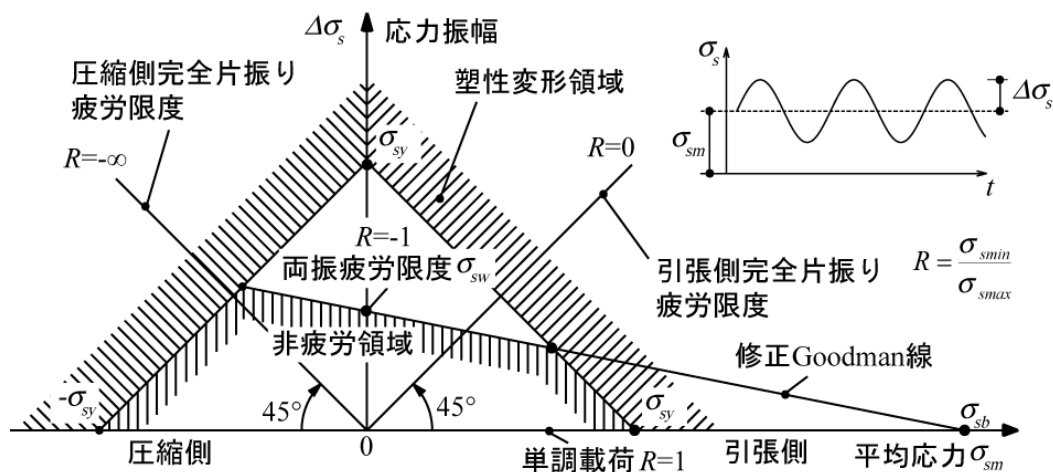
$$\tau_a = \sqrt{\frac{G_a \cdot E_c \cdot A_c \cdot E_s \cdot A_s}{t_a \cdot w_a \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)} \cdot \frac{h_c \cdot l_c}{(EI)_c} \cdot \frac{P}{2}} \quad (5)$$

w_a : 接着剤の幅

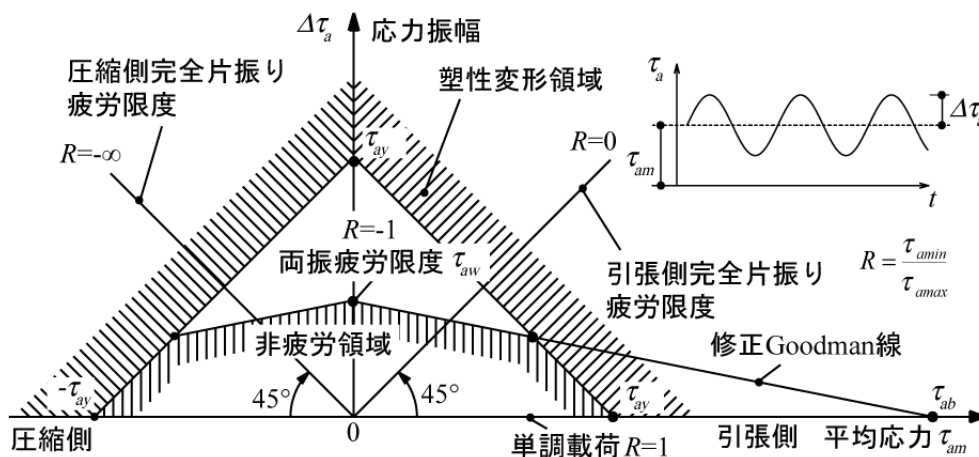
$(EI)_c$: 複合材の曲げ剛性

下フランジ鋼板の CFRP プレート端部に生じる垂直応力 σ_s は, 次式で与えられる。

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

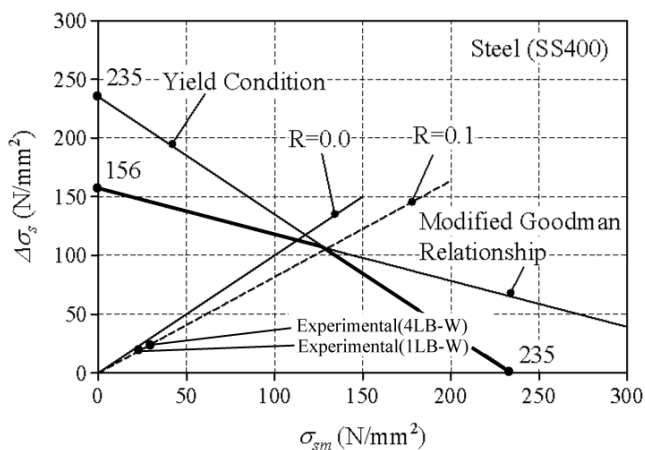


(a) 鋼材の疲労限度図

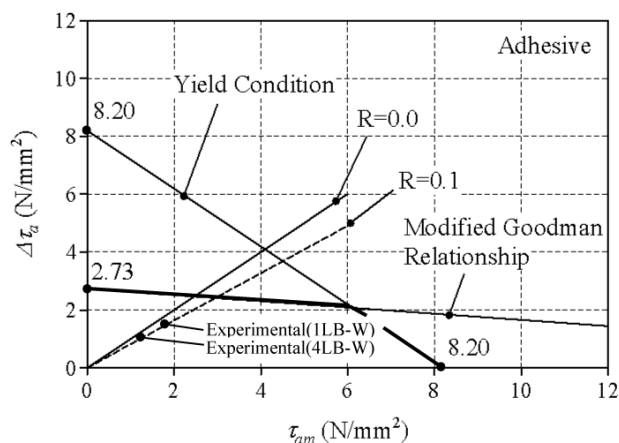


(b) 接着剤の疲労限度図

図5 鋼材と接着剤の疲労限度図モデル



(a) 鋼材引張側フランジの疲労限度図



(b) 最下層の接着剤の疲労限度図

図6 疲労限度図

表 4 接着応力検計用形状・材料定数

Specimen	E_s	E_c	G_a	A_s	A_c	A_a	t_a	L	h_c	w_a	l_c	h_s	l_s	$(EI)_c$
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N・mm ²
1LB-W	205000	295700	820	531.3	100	47.5	0.95	900	117.9	50	750	125	750	8.40×10^{12}
4LB-W	205000	295700	820	531.3	400	156	3.12	900	104.3	50	750	125	750	1.04×10^{13}

表 5 载荷プログラム

	R	τ_{am}	$\Delta\tau_a$	τ_{amin}	τ_{amax}	P_{min}	P_{max}	σ_{sm}	$\Delta\sigma_s$	σ_{smin}	σ_{smax}
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1LB-W	0.1	1.78	1.46	0.32	3.24	3.07	30.68	21.39	17.50	3.89	38.89
4LB-W	0.1	1.36	1.12	0.25	2.48	3.84	38.37	26.75	21.89	4.86	48.64

ここに、

h_s : H形鋼の図心から下フランジ端までの高さ

l_s : 梁端部から CFRP 端部までの距離

$E_s I_s$: H形鋼の曲げ剛性

(5)式と表 4 の形状、材料定数、断面定数を用いて 1LB-W 試験体では接着剤の最大せん断応力度 τ_{amax} がクリープ限度せん断応力 3.0N/mm^2 に近づくよう最大載荷荷重 P_{max} を 30.6kN 、応力比 $R(P_{min}/P_{max})$ を 0.1 とし最小載荷荷重 P_{min} を 3.06kN とした。

4LB-W 試験体は、1LB-W 試験体の 20%増しの荷重で最大載荷荷重 P_{max} を 38.4kN 、最小載荷荷重を 3.84kN とした。表 5 には、载荷プログラムを整理して示す。

なお、4 層貼りの試験体は、(3,a,b)、(5)式の適用範囲外であるが、接着剤層、CFRP 層を集約した値で τ_{amin} 、 τ_{amax} を計算した。

5. 実験結果とその考察

実験結果を図 7~12 に示す。

図 7, 8 は、 1×10^4 cycles, 200×10^4 cycles での ϵ_1 , ϵ_3 , P の時刻歴を 1LB-W, 4LB-W 試験体についてそれぞれ示す。

図 9 は、 $2,000,000$ cycles 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 との関係を示している。破線は実験値、実線は多項近似実験値、一点鎖線は(3.a)式の歪分布度算定式からの予測値を示す。(a)に 1LB-W 試験体、(b)に 4LB-W 試験体の結果を示す。

図 10, 11 は 1LB-W, 4LB-W 試験体での下フランジ下面 CFRP の歪の分布を、実験値を丸印で、(3.a)式の歪分布算定値を実線でそれぞれ示す。 x^* は梁中央点からの長さを指す。

図 12 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示している。 y 軸は、載荷回数毎の剛性 K を $10,000$ cycles 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た。

これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) 図 7(c), (f), 図 8(c), (f)より 200 万回の荷重制御による載荷は安定して行われていること、図 8(b), (c), 図 9(b), (c)より $x^*=300\text{mm}$ の CFRP の歪は 200 万回目では平均値が上昇し、また、振幅が小さくなっている。
- 2) 図 9(a), (b)よりいずれの試験体についても $x^*=440\text{mm}$ の CFRP 先端の歪 ϵ_1 は 100 万回以降で漸増し、その値は 150μ に達している。このことから内部の接着状況に変化が生じていると推測できる。
- 3) 図 10(a)より、(3.a)式の CFRP 歪分布算定式は実験値とほぼ等しくなることから、1 枚貼付の場合の CFRP 歪分布算定式と(1)式の接着剤のせん断応力分布算定式は妥当と考えられる。一方、図 11(a)より算定式と実験値は大きく外れており、4 枚貼付の場合については、本算定式は利用できないことが分かる。
- 4) 図 12(a), (b)より、CFRP の歪 ϵ_{3max} に載荷の繰返しに伴って変化が生じているにもかかわらず、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った。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ないことが分かる。

6. まとめ

今回、下フランジ下面に炭素繊維プレートを部分接

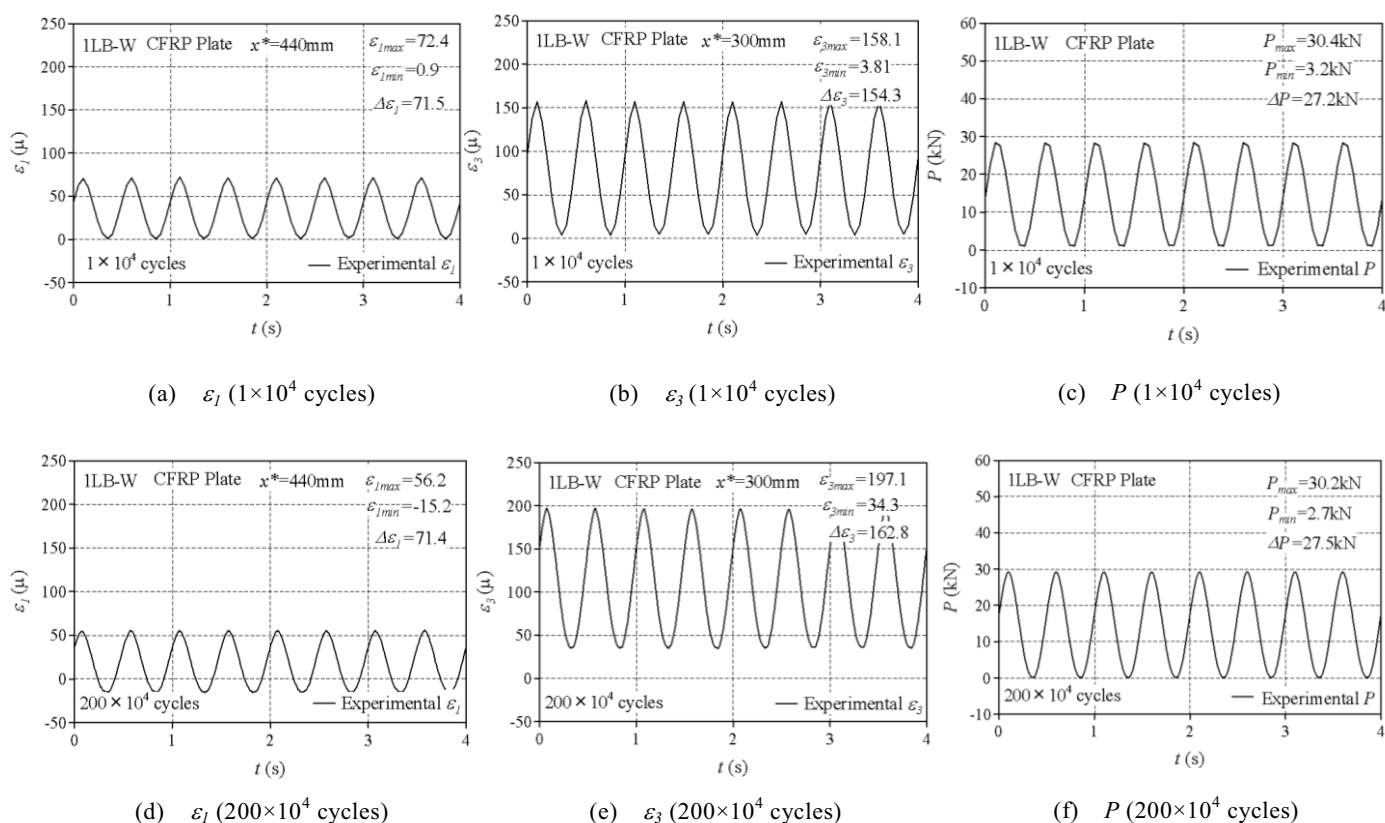


図7 载荷時刻歴 (1LB-W 試験体)

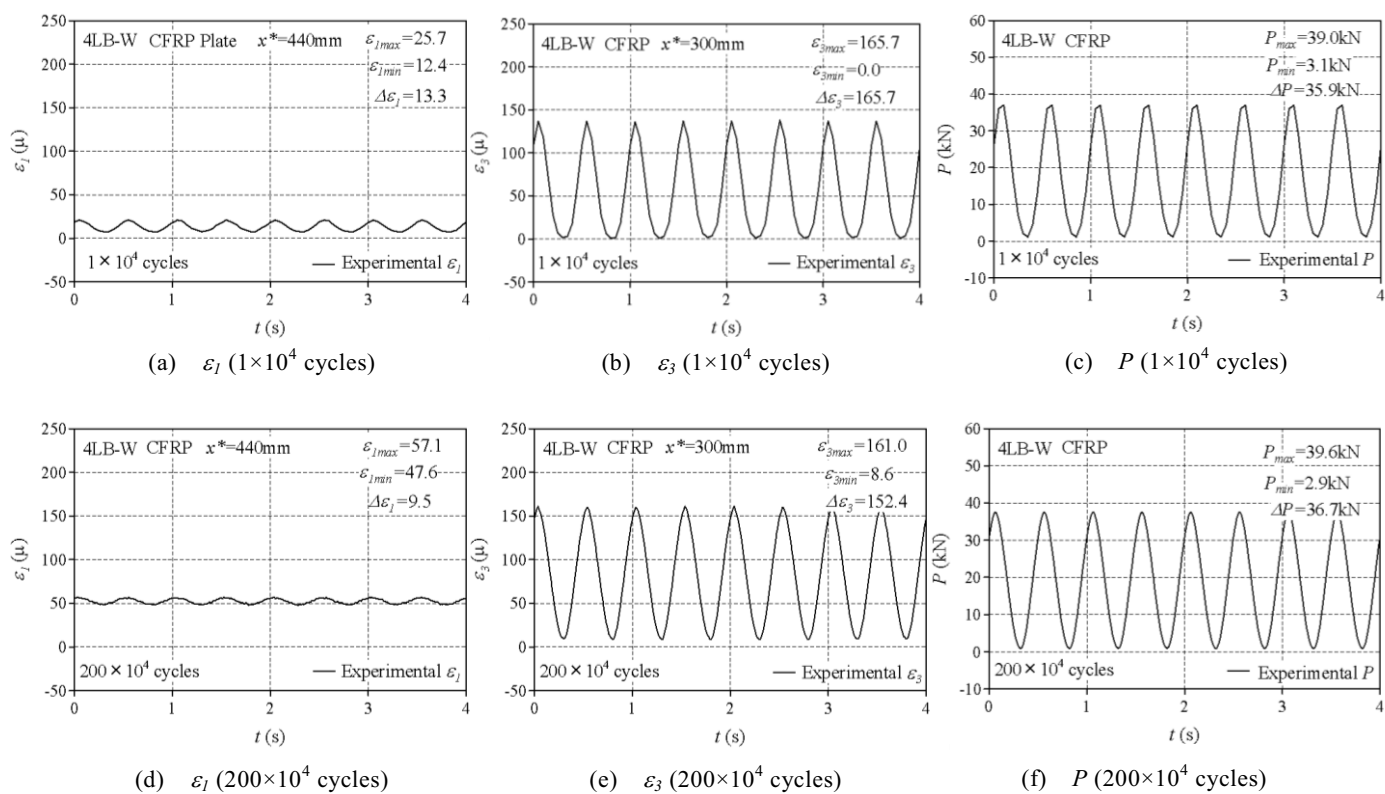


図8 载荷時刻歴 (4LB-W 試験体)

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2 接着剤の疲労試験

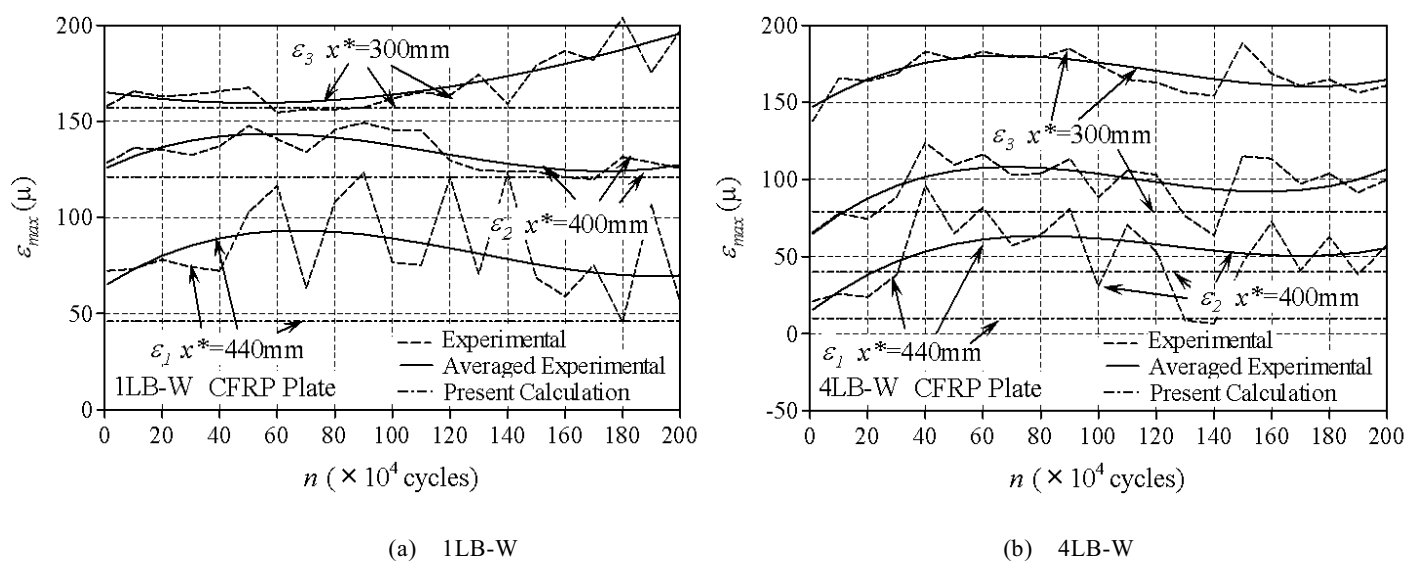


図9 载荷回数毎の最大歪

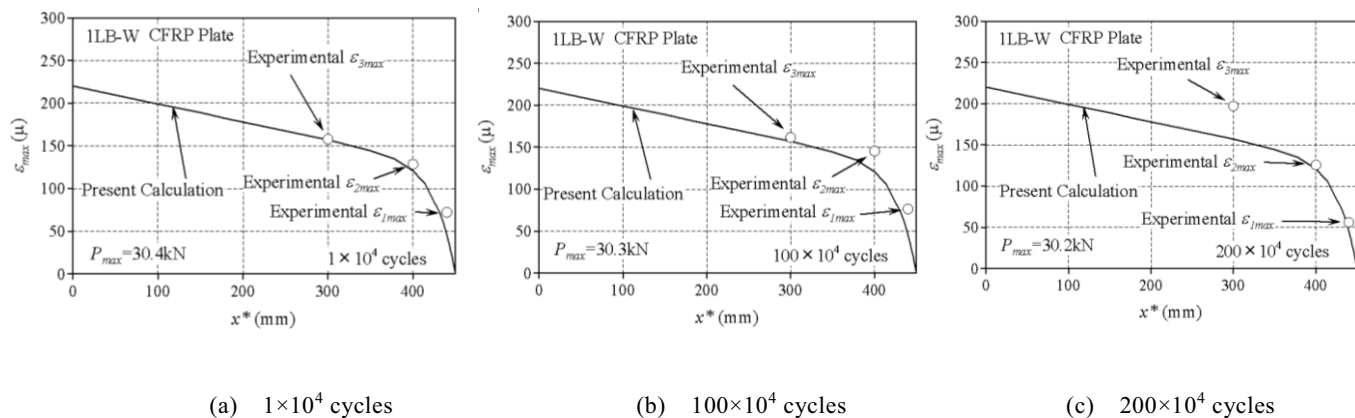


図10 载荷回数毎の歪分布図 (1LB-W 試験体)

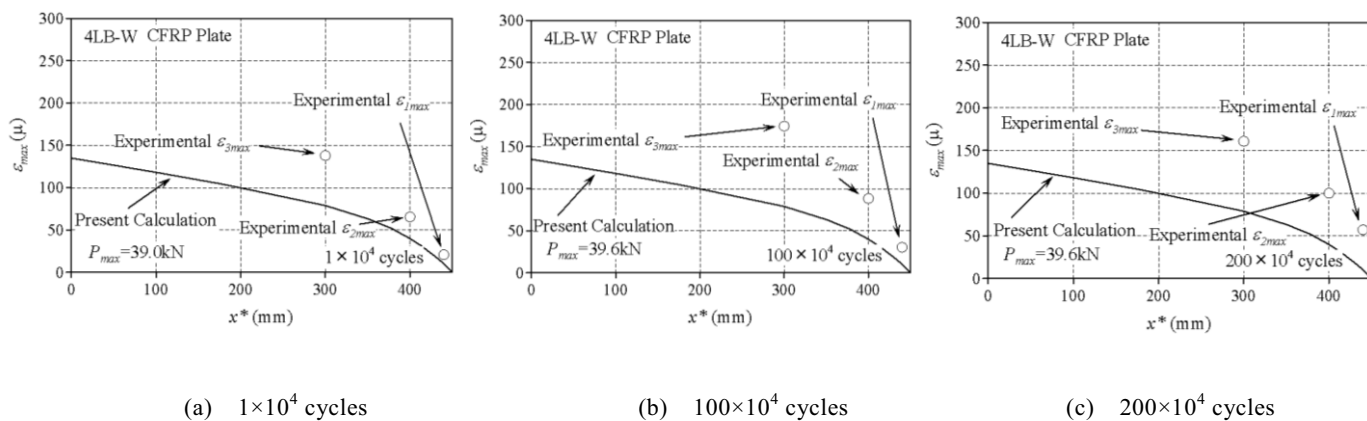


図11 载荷回数毎の歪分布図 (4LB-W 試験体)

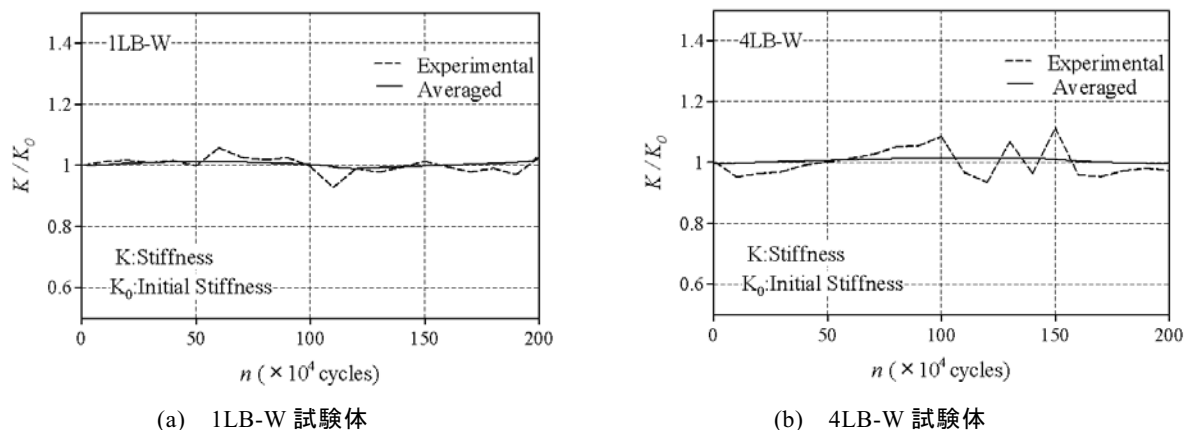


図 12 荷重回数毎の剛性変化関係

着補強した鋼梁の正側多数回繰返し荷重実験を行い、荷重回数毎の剛性、CFRP の歪の変化について検討を行った。また、CFRP の垂直応力分布と理論式との比較を行った。

得られた知見は以下の様に要約できる。

- 1) CFRP を H 形鋼下フランジに部分的に 1 枚貼する場合における CFRP の歪分布は(3.a)式で良好に予測できる。このことから、CFRP 端部の接着剤のせん断応力値も(1)式で予測できる。
- 2) 接着剤の CFRP 端部のせん断応力度で最小値 0.32N/mm^2 、最大値 3.24N/mm^2 となる応力比 0.1 の片振り繰返し荷重下において、接着剤は疲労破壊を生じず、補強梁材の剛性は変化しない。このせん断応力度 3.24N/mm^2 は接着剤のクリープ限界応力度にほぼ等しい。

今後、応力比 0.1 について、1 枚貼りの試験体について荷重振幅値を上げて、追加試験を行い、接着剤の疲労限度図を求める予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、高松隆夫(広島工大),服部明生,藤本信介(東レ建設),堀井久一(コニシ(株)),松井孝洋(東レ(株))の諸氏には、試験体作成の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

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書, 第 13 巻, pp. 523-530, 2005. 11.
- 3) 玉井宏章, 中村憲一, 陣川晃司: 炭素繊維プレート接着補強鋼部材の繰返し荷重試験 その 1 接着応力の分布, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 44(82), pp.21-28, 2014.
- 4) 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.