

# 炭素繊維プレートと鋼との複合材のせん断クリープ特性に関する研究

玉井 宏章\*・高松 隆夫\*・服部 明生\*\*・小澤 吉幸\*\*\*・山西 央朗\*\*\*\*

(平成21年10月30日受理)

## Creep properties of composite plate made of CFRP and steel

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Akeo HATTORI, Yoshiyuki OZAWA and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct 30, 2009)

### Abstract

We had proposed the rehabilitation technique for secondary steel beam by means of bonding CFRP plates. For the rehabilitation technique, it is very important to clarify the creep properties of the composite plate made of CFRP and steel plate. Creep tests of the composite plate made of steel and CFRP plate were performed. Allowable shear stress limit was shown in case of 18°C ambient temperature. Also, design data for secondary steel beam, so as to suppress the maximum shear stress in adhesive within allowable stress limit, were shown.

**Key Words:** CFRP plate, creep, composite plate, rehabilitation

### 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<sup>1)~5)</sup>。

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。この観点から、専用接着剤を開発し、各種の接着試験を行い<sup>1)</sup>、その接着特性を明らかにしたり、炭素繊維プレートや接着剤の構成方程式や降伏・破壊条件を導き出し、それを用いて、引張せん断接着試験について詳細な有限要素解析を行った<sup>2)</sup>。また、小ばりの曲げ補剛や山形鋼プレート材の圧縮補強に、この炭素繊維プレート接着工法を適用し、その有効性・有用性を示した<sup>3)~5)</sup>。

これらの研究で、課題として考えられることは、

1) 接着剤が長期荷重下で、クリープ変形して接着性能を

保持できなくなること。

2) 炭素繊維プレートの十分な強度を発揮する前に、接着剤とプレートとの界面で破壊することである。

また、炭素繊維プレートは種類として高強度型炭素繊維プレートと中弾性型炭素繊維プレートとがあり、小梁、山形鋼プレースの補強には既製品プレートを複数枚貼り付けて行うことが予想されるため、補強にどの組み合わせが最適か明らかにする必要もある。

本研究ではこれらの問題を解決するため作用せん断応力をパラメータとしたエポキシ樹脂接着剤のせん断クリープ試験を行い、クリープを生じない許容せん断応力を求めるとともに、鋼小梁の下フランジに複数枚炭素繊維プレートを接着した場合の補剛効果と接着層に生じる最大せん断応力を算定して補剛設計の基礎資料を提供する。

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院知的機能科学専攻

\*\*\* 東レ建設株

\*\*\*\* 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

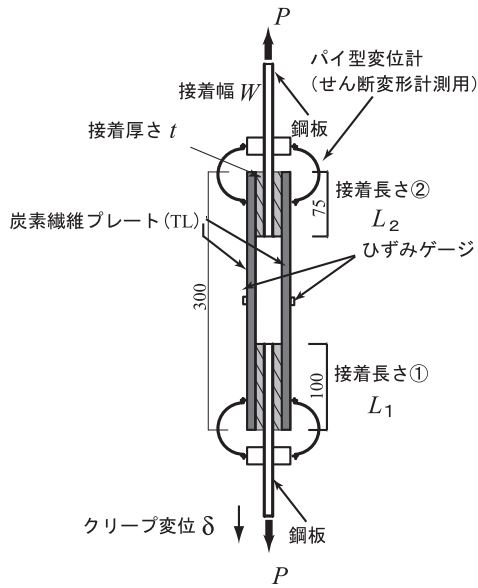


図1 試験体図



写真1 試験装置

表1 素材試験結果

(a) 接着剤

ヤング係数	曲げ強度	圧縮降伏応力	引張強度	引張せん断 付着応力	衝撃強度
kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kJ/m <sup>2</sup>
2.28	55.80	59.00	34.80	25.50	4.2
JISK7208	JISK7203	JISK7208	JISK7113	JISK6850	JISK7111

(b) CFRP 及び鋼材

	ヤング係数	引張強度	破断ひずみ
	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
CFRP	169	3085	1.5
鋼材	205	382	28.4

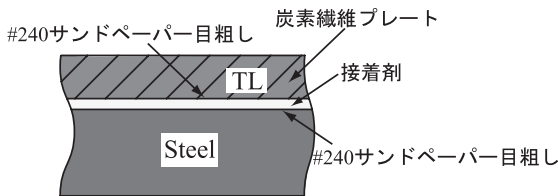


図2 接着面

表2 試験体一覧

	接着長さL <sub>1</sub> mm	接着長さL <sub>2</sub> mm
試験体1	101.2	76.5
試験体2	52.1	32.3
試験体3	25.7	16.0

## 2. 試験の概要

試験体を図1に試験装置を写真1に示す。試験体は9mm板厚の鋼材 (SS400) に、2枚の炭素繊維プレート (厚さ2mm, 幅50mm) と挟んで、二液常温硬化エポキシ系接着剤で接着したもので、両端部の接着長さLを変えている。

用いた接着剤 (ボンド E258) と炭素繊維プレートの素材特性を表1に、試験体シリーズを表2に、それぞれ、示す。

試験体は表2に示すように両端部の接着長さを101.2と76.5mm, 52.1と32.3mm及び25.7と16.0mmとした組の3つの試験体を用意した。

図2に接着面の詳細を示す。炭素繊維プレートは、高強度型炭素繊維プレート (TL) で、鋼材と炭素繊維プレートの表面を #240 サンドペーパーで目粗し、アセトンで脱

脂した後、接着した。尚、接着後は、常温 20° 以上で、7日間以上養生した。

試験機は島津オートグラフ AG-250kN を用い、写真1のように鋼板部をくさび型チャックでつかみ、荷重及び室温が10kN, 18℃と一定として3日間載荷した。

荷重の計測は、クロスヘッド上部のロードセルから引張力Pを、変位の計測は、鋼板と炭素繊維プレートとの間の相対せん断方向変位を、表裏についてパイ型変位計 (PI-2) で計測し、それらの平均値δを、また炭素繊維プレート中央に貼付したひずみゲージを用いて、炭素繊維プレートのひずみを、それぞれ計測した。これらの計測値から平均的せん断応力、τとせん断ひずみ、γを次式で求める。

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot W \cdot L} \dots\dots\dots (1.a)$$

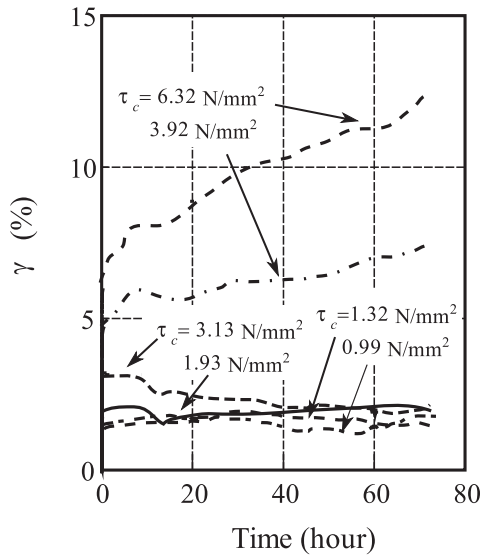


図3 せん断ひずみ-時刻歴

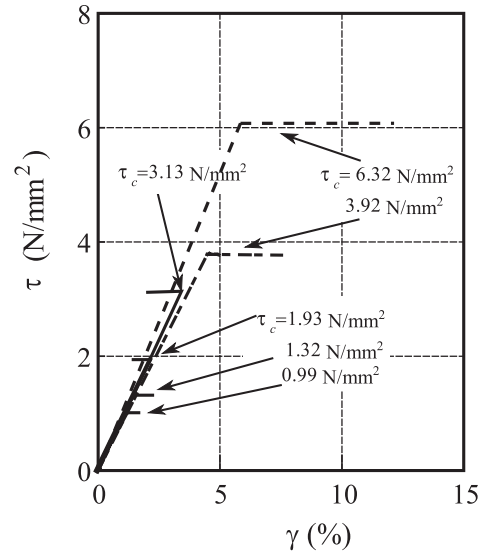


図4 せん断応力-せん断ひずみ関係

$$\gamma = \frac{\delta}{t} \dots\dots\dots (1.b)$$

ここに、 $W$ は、接着幅 (50mm),  $L$ は接着長さ  
 $t$ は接着層厚

炭素繊維材料のクリープと温度依存性は認められているが、 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 程度の範囲内であれば、顕著な差異は無いことが確認されている。炭素繊維プレートは、常温で耐力の75%の荷重下において、クリープひずみは無視できるほど小さい。

### 3. 試験結果と考察

クリープ試験結果を図3～4、表3に示す。

図3に各試験体の各接着箇所についての平均的せん断ひずみの時刻歴を、図4には同様の箇所の平均的せん断応力と平均的せん断ひずみの関係を、表3には各接着箇所の接着層厚せん断応力及び、3日後の最大せん断ひずみを示す。

これらの結果より、接着長さによらず、せん断弾性係数はほぼ等しいこと、平均的せん断応力が3.13N/mm以下であれば、最大せん断ひずみが2.5%に留まり一定応力以下で、ひずみが時間とともに増大するクリープ現象は生じないことがわかる。尚、試験開始後10時間の時点で、せん断ひずみの低下が見られるが、試験温度には大きな変化はないため、試験誤差と考えられる。

従って、炭素繊維プレートを用いて鋼材を接着被服する場合には室温下ではせん断応力を3.13N/mm以下としておく必要がある。

### 4. 接着層と炭素プレートのせん断応力

#### 4.1 算定方法

接着剤のせん断応力に対するクリープ限界強度は低く、また、中弾性型炭素繊維プレートのせん断強度も引張強度

に比べて非常に低い。本節では、炭素繊維プレートを複数層、H形鋼梁下端に接着した場合のせん断応力算定法を示す。

図5に示す複合材の断面を考える。座標を図5のようにとる。複合材の中立軸位置を $y_0$ 、曲げ剛性を $EI$ 、 $y$ 座標位置の断面の幅とヤング係数を $b(y)$ 、 $E(y)$ とする。

平面保持の仮定が成立するとすれば、曲げモーメント $M$ を受ける断面のひずみ分布 $\epsilon_z$ 、応力分布 $\sigma_z$ は次式ようになる。

$$\epsilon_z(y) = \frac{M}{EI} \cdot (y - y_0) \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\sigma_z(y) = E(y) \cdot \frac{M}{EI} \cdot (y - y_0) \dots\dots\dots (2.b)$$

図6の材長 $dz$ の切り出した断面の $x$ 方向の力の釣り合い式を立てる。 $y$ 座標位置の水平断面にせん断応力 $\tau$ が生じているとすると、下の部分の釣り合いから次式が成り立つ。

$$\tau \cdot b(y) \cdot dz + \int_{y_B}^y \sigma_z \cdot b(y) \cdot dy - \int_{y_B}^y \left( \sigma_z + \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot dz \right) \cdot b(y) \cdot dy = 0$$

$$\therefore \tau \cdot b(y) \cdot dz = \int_{y_B}^y \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot dz \cdot b(y) \cdot dy = 0$$

$$\tau = \frac{1}{b(y)} \int_{y_B}^y \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot b(y) \cdot dy \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $y_B$ は下端部の座標である。

(2.b)式を(3)式に代入し、次式の関係を検討すると、(5)式が得られる。

$$Q = -\frac{dM}{dz} \dots\dots\dots (4)$$

表3 クリープ試験結果

接着長さ mm	層厚 mm	せん断応力 N/mm <sup>2</sup>	最大せん断 ひずみ %
101.2	0.65	0.99	2.2
76.5	0.65	1.32	2.3
52.1	0.48	1.93	2.0
32.2	0.40	3.13	2.4
25.7	0.29	3.92	4.8
16.0	0.45	6.32	7.5

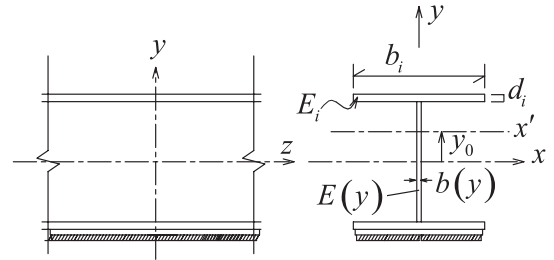


図5 複合材の断面

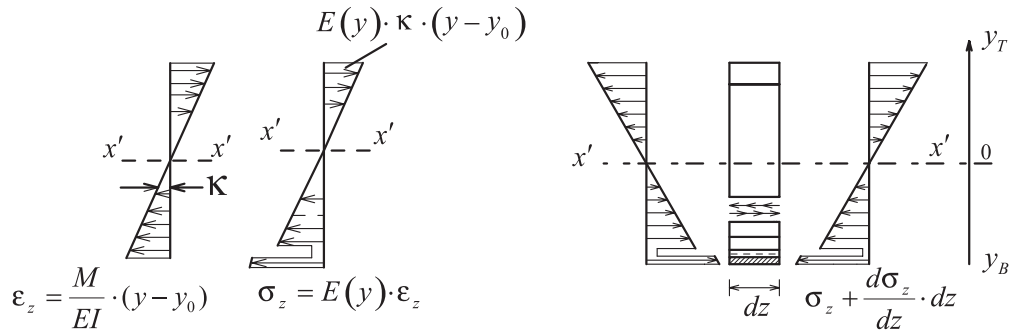


図6 断面内の応力分布

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{b(y)} \int_{y_b}^y \frac{E(y)}{EI} \cdot \frac{dM}{dz} \cdot (y - y_0) \cdot b(y) \cdot dy \\ &= -\frac{Q}{b(y) \cdot EI} \int_{y_b}^y E(y) \cdot b(y) \cdot (y - y_0) \cdot dy \quad \dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 $Q$ は断面の合せん断力である。

さて、図5に示す矩形要素からなる断面を考え、矩形要素の幅、厚さ、図心位置とヤング係数を  $b_i$ 、 $d_i$ 、 $y_i$  と  $E_i$  で表す。すると、下端から  $j$  番目の要素の上端のせん断力  $\tau_j^+$  は、次式で求まる。

$$\begin{aligned} \tau_j^+ &= \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^j E_i \cdot b_i \cdot \left( \frac{y^2}{2} - y_0 \cdot y \right) \Bigg|_{y_i - \frac{d_i}{2}}^{y_i + \frac{d_i}{2}} \\ &= \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^j E_i \cdot b_i \cdot (y_i - y_0) \cdot d_i \quad \dots (6a) \end{aligned}$$

同様に、下端から  $j$  番目の要素の下端のせん断力  $\tau_j^-$  は、次式となる。

$$\tau_j^- = \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^{j-1} E_i \cdot b_i \cdot (y_i - y_0) \cdot d_i \quad \dots (6b)$$

#### 4.2 H形鋼小梁の補鋼設計用データ

前節で示した計算法を用いて、「S-ラミネート工法 CFRP 帯板接着による鋼梁の補強工法 設計・施工マニュアル (案) 第2版」<sup>7)</sup>の補強性能表 (付録 A.2) を参考に梁のせん断力が 100kN のときの接着最内層、炭素繊維プレート最内層のせん断力度を求めた。その結果を表4、表5に示す。

表4、表5には、対象とするH形鋼の寸法、炭素繊維プ

レートのタイプ (中弾性型炭素繊維プレート ML、高強度型炭素繊維プレート TL)、接着層数、横列数、補強後の強軸断面2次モーメント、 $I_x$ 、圧縮フランジ端からの中立軸位置、 $y_0$ 、圧縮側断面係数、 $Z_c$ 、引張側断面係数、 $Z_t$ 、とせん断力 100kN あたりの、接着最内層、炭素繊維プレート最内層での発生せん断力度、 $S.F$  を示している。表中の Layer ply は、炭素繊維プレートを重ねる枚数・層数であり、Row ply は、接着する炭素繊維プレートの列数を示している。表4には層数による効果を、表5には列数による効果を、それぞれ、示している。

これらの表から、接着層数を増やすと、発生最大せん断応力  $S.F$  は大きくなり、逆に接着横列数を増やすと、 $S.F$  は小さくなることとがわかる。また、H-175x90x5x8 の鋼小梁について、高強度型炭素繊維プレート TL を 1 列 4 層補剛する場合を考える。許容応力  $F$  を 235N/mm<sup>2</sup>、スパン長  $L$  を 4m として、許容曲げモーメント  $M$ 、発生せん断力  $Q$  とクリープ限度せん断力  $Q_a$  を求めると

$$\begin{aligned} M &= F \cdot Z_c = 235 \times 1.427 \times 10^5 \\ &= 33.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$Q = M/L = 33.5/4 = 8.37 \text{ kN}$$

$$Q_a = 100 \times 3.13/3.59 = 87.1 \text{ kN}$$

$$Q \leq Q_a$$

となるので、通常の鋼小梁の炭素繊維プレート接着補剛によって生じる接着層の発生せん断力は、常温下の接着樹脂のせん断クリープ限度以下となることがわかる。

表4 補剛H形鋼梁の断面性能と接着層での発生せん断応力度（層数の効果）

H-Beam Section					CFRP			Sectional Properties				
<i>H</i>	<i>B</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>f</sub></i>	<i>r</i>	Type	Layer	Row	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>y<sub>0</sub></i>	<i>Z<sub>c</sub></i>	<i>Z<sub>t</sub></i>	S.F./100kN
mm	mm	mm	mm	mm		ply	ply	$\times 10^6 \text{ mm}^4$	mm	$\times 10^4 \text{ mm}^3$	$\times 10^4 \text{ mm}^3$	N/mm <sup>2</sup>
150	75	5	7	8	ML	1	1	7.16	81	8.89	10.30	2.67
						2	1	7.85	85	9.18	12.16	4.63
						3	1	8.50	90	9.44	14.18	6.12
						4	1	9.14	94	9.70	16.38	7.28
					TL	1	1	6.85	78	8.76	9.55	1.65
						2	1	7.29	81	8.95	10.62	3.03
						3	1	7.72	84	9.15	11.76	4.20
						4	1	8.15	87	9.34	12.99	5.20
175	90	5	8	8	ML	1	1	12.73	93	13.76	15.44	1.77
						2	1	13.70	97	14.09	17.61	3.17
						3	1	14.63	102	14.41	19.92	4.29
						4	1	15.54	106	14.71	22.40	5.22
					TL	1	1	12.31	90	13.61	14.57	1.08
						2	1	12.91	93	13.83	15.81	2.02
						3	1	13.50	96	14.05	17.12	2.85
						4	1	14.10	99	14.27	18.51	3.59
200	100	5.5	8	8	ML	1	2	20.13	109	18.39	22.23	1.23
						2	2	22.36	118	19.02	27.12	2.05
						3	2	24.37	125	19.55	32.34	2.64
						4	2	26.22	131	20.03	37.95	3.08
					TL	1	2	19.11	106	18.09	20.26	0.77
						2	2	20.54	111	18.53	23.04	1.38
						3	2	21.92	116	18.94	25.99	1.87
						4	2	23.24	120	19.33	29.13	2.27
250	125	6	9	8	ML	1	2	42.94	134	32.12	36.91	0.74
						2	2	46.62	141	32.96	42.94	1.28
						3	2	50.03	148	33.70	49.26	1.71
						4	2	53.22	155	34.38	55.91	2.04
					TL	1	2	41.30	130	31.74	34.45	0.45
						2	2	43.59	135	32.30	37.89	0.83
						3	2	45.82	140	32.83	41.48	1.16
						4	2	48.00	144	33.35	45.24	1.44

表5 補剛H形鋼梁の断面性能と接着層での発生せん断応力度（列数の効果）

H-Beam Section					CFRP			Sectional Properties				
<i>H</i>	<i>B</i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>f</sub></i>	<i>r</i>	Type	Layer	Row	<i>I<sub>x</sub></i>	<i>y<sub>0</sub></i>	<i>Z<sub>c</sub></i>	<i>Z<sub>t</sub></i>	S.F./100kN
mm	mm	mm	mm	mm		ply	ply	$\times 10^6 \text{ mm}^4$	mm	$\times 10^4 \text{ mm}^3$	$\times 10^4 \text{ mm}^3$	N/mm <sup>2</sup>
200	100	5.5	8	8	ML	4	1	22.64	118	19.18	27.64	4.17
						4	2	26.22	131	20.03	37.95	3.08
					TL	4	1	20.72	111	18.64	23.32	2.82
						4	2	23.24	120	19.33	29.13	2.27
250	125	6	9	8	ML	4	1	46.99	142	33.13	43.43	2.61
						4	2	53.22	155	34.38	55.91	2.04
					TL	4	1	43.81	135	32.41	38.16	1.69
						4	2	48.00	144	33.35	45.24	1.44



## 5. まとめ

炭素繊維プレートと鋼との複合材のせん断クリープ試験を行うとともに、鋼小梁の下フランジに複数枚炭素繊維プレートを接着した場合の発生せん断応力を計算し、本接着補剛工法の有用性を検討した。

得られた知見は、以下のように要約できる。

- 1) 室温下で接着層での発生せん断応力を 3.13N/mm以下としておけば、クリープは生じない。
- 2) 鋼小梁下フランジの炭素繊維プレートの接着層数を増やすと、接着層の発生せん断応力は大きくなり、逆に接着横列数を増やすと、発生せん断応力は小さくなる。
- 3) 通常の鋼小梁の炭素繊維プレート接着補剛によって、生じる接着層の発生せん断応力は、常温下の接着樹脂のせん断クリープ限界度以下となる。

## 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, 高松隆夫, 櫻庭誠, 灰谷徳治, 服部明生:

連続繊維プレートと鋼材との接着特性に関する有限要素解析, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.537-544, 2005.11.

- 3) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる鋼構造物小ばりの曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.553-530, 2005.11.
- 4) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭誠, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートによる補強山形鋼ブレース材の圧縮補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.553-560, 2005.11.
- 5) 櫻庭誠, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートによる補強山形鋼ブレース材の正負交番繰り返し載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.437-444, 2006.11.
- 6) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 櫻庭誠, 白木剛: 高強度鋼と炭素繊維プレートとの複合材の基本的力学的特性, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.1-8, 2007.11.
- 7) S-ラミネート工法-CFRP帯板接着による鋼梁の補強工法-設計・施工マニュアル(案)第2版, 東レ建設(株), 2007.8.