

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 (その2 クリープ限度せん断応力)

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

(平成22年10月29日受付)

Creep properties of composite plate made of CFRP and Steel. (Part2 Creep limit under shear stress)

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

(Received Oct. 29, 2010)

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 20,30,40,50 and 60°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^{1)~5)}。

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¹⁾、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²⁾。また、小ばりの曲げ補剛や山形鋼プレー

ス材の圧縮補強に、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^{3)~5)}。

長期荷重によりある値(クリープ限界応力)以上の応力が作用すると、鋼と炭素繊維プレートとの接着層内でクリープを起こす可能性がある。また、クリープ限界応力は雰囲気温度によっても影響を受け、接着効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。前年行った予備クリープ試験では、高温下において、低いせん断応力下で大きなクリープひずみが生じた。

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、山形鋼ブ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

* 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)技術設計部

**** 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

適か明らかにする必要もある。

そこで本研究では、高温下においてもクリープひずみが生じにくい新接着剤について、雰囲気温度を 18℃～60℃ の範囲で変化させて、定応力下でクリープひずみ特性を調査する。また、設計の便を考慮して、許容せん断応力の選定法を示し、クリープ限界応力を示す。

更に、鋼小梁の下フランジに複数枚炭素繊維プレートに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。

2. クリープ試験の概要

試験体を図に試験装置を写真に示す。試験体は 9 mm 厚の鋼材 (SS400) に、2 枚の炭素繊維プレート (厚さ 2 mm, 幅 50mm) と挟んで、二液常温硬化エポキシ系接着剤 (旧接着剤 E258, 新接着剤 E258 改) で接着したもので、両端部の接着長さ L を変えている。用いた接着剤と炭素繊維プレートの素材特性を表 1 に示す。試験体は表 2 に示すように、60mm, 50mm または、50mm, 40mm として試験体を用意した。

炭素繊維プレートは、高強度型炭素繊維プレートの表面を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、接着後は旧接着剤は常温 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、荷重を一定とし、接着部の温度を 20℃, 25℃, 30℃, 40℃, 50℃, 60℃ と一定にして、2 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。

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

$$\gamma = \frac{\delta}{l} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 W は接着幅、 L は接着長さ
 l は接着層厚

温度の計測は接着面の中央に各 5 点クロメルアルメルの熱電対を挿入して計測した。

写真 2 に温度制御装置とバンドヒーターを示す。変位計設置用アタッチメントを除く接着部全体を表裏挟むようにバンドヒーターで覆い、制御用熱電対をヒーター近傍に取り付け温度制御装置で試験中は一定温度に保つように制御した。

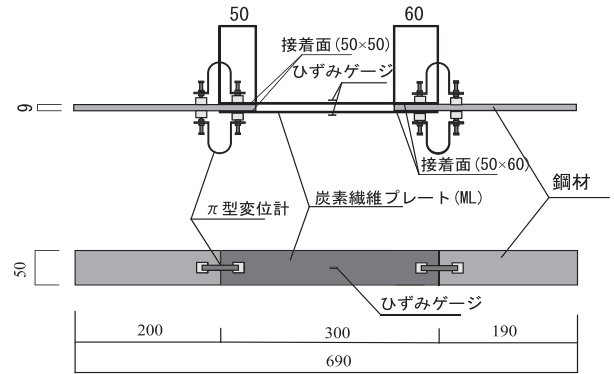
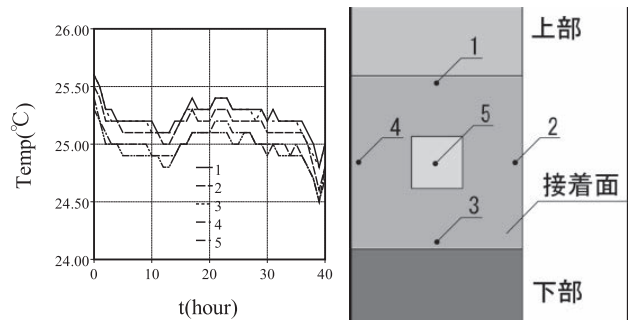


図 1 試験体



(a) 時間 - 温度関係 (b) 温度測定位置

図 2 温度分布

3. 限界せん断応力の決定法

応力を一定に保ち、長時間経過すると図 2 に示すようにひずみは時間とともに増大する。このような現象を一般にクリープという。小さな応力下では、弾性挙動し、ある限界を超えると、クリープが生じると考えられるが、クリープを起こさない最大の応力を接着設計の基準とすれば良い。以下には、このクリープを起こさない最大応力 (以降では限界せん断応力と呼ぶ) を求める方法を示す。

3.1 無限時間時のせん断ひずみ

サウスウェルによればクリープを生じる材のせん断ひずみと時間の関係は次式の線形関係が良好にあてはまることが知られている。

$$\frac{t}{\gamma} = \left(\frac{1}{\gamma}\right) \cdot t + a_1 \dots\dots\dots (3.a)$$

ここに、 t : 時間 (hour)

γ : せん断ひずみ

γ_{cr} : 実験定数 (無限時間のせん断ひずみ)

a_1 : 実験定数

(3.a) 式を変形すると、

$$t = \frac{a_1 \cdot \gamma_{cr}}{\frac{\gamma_{cr}}{\gamma} - 1} \dots\dots\dots (3.b)$$

表1 素材試験結果

(a) 接着材

ヤング係数 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²	圧縮降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	引張せん断 付着応力 N/mm ²	衝撃応力 kJ/m ²
2.28	55.80	59.00	34.80	25.50	4.20
JISK7203	JISK7203	JISK7208	JISK7113	JISK6850	JISK7111

(b) CFRP 及び鋼材

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

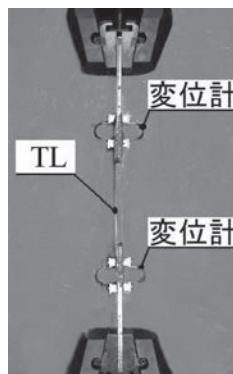


写真1 試験装置



写真2 温度制御装置

表2 試験シリーズ (旧接着剤)

(a) 20°C						(b) 30°C					
試験体名	L mm	P kN	τ N/mm ²	Temp max °C	Temp min °C	試験体名	L mm	P kN	τ N/mm ²	Temp max °C	Temp min °C
L60T017	60	1.0	0.17	25.9	24.3	L60T170	60	10.0	17.0	22.0	19.8
L50T020	50	1.0	0.20	26.0	24.4	L50T200	50	10.0	2.00	21.7	19.9
L60T100	60	6.0	1.00	24.8	24.8	L60T340	60	20.4	3.40	20.3	18.9
L50T120	50	6.0	1.20	25.5	24.1	L50T400	50	20.4	4.00	20.2	18.9
L60T170	60	10.0	1.70	25.5	24.0	L60T420	60	25.4	4.23	21.1	19.7
L50T200	50	10.0	2.00	26.0	24.0	L50T500	50	25.4	5.00	20.8	19.6

表3 試験体シリーズ (新接着剤)

(a) 40°C						(b) 50°C						(c) 60°C					
試験体名	L mm	P kN	τ N/mm ²	Temp max °C	Temp min °C	試験体名	L mm	P kN	τ N/mm ²	Temp max °C	Temp min °C	試験体名	L mm	P kN	τ N/mm ²	Temp max °C	Temp min °C
L50T815	50	20.00	8.15	41.2	39.9	L40T150	40	3.00	1.50	50.8	49.6	L40T150	40	3.75	1.50	61.0	59.9
L60T678	60	20.00	6.78	41.7	37.5	L50T120	50	3.00	1.20	52.0	50.0	L50T125	50	3.75	1.25	61.6	60.0
L60T575	60	17.50	5.75	40.6	39.7	L40T694	40	14.00	6.94	49.6	48.1	L40T100	40	2.00	1.00	60.5	59.6
L60T471	60	15.00	4.71	41.4	39.8	L50T558	50	14.00	5.58	49.3	47.8	L50T080	50	2.00	0.80	60.0	58.5
						L60T497	60	15.00	4.97	50.6	49.6	L50T400	50	10.00	4.00	62.0	55.5
												L60T330	60	10.00	3.30	61.3	56.9
												L60T503	60	15.00	5.03	60.6	60.2

表4 クリープ試験結果 (旧接着剤)

(a) 20°C				(b) 30°C			
試験体名	τ N/mm ²	γ^{48} %	γ^{∞} %	試験体名	τ N/mm ²	γ^{48} %	γ^{∞} %
L60T170	1.70	2.0	1.85	L60T017	0.4	0.4	—
L50T200	2.00	3.4	3.30	L50T020	0.7	0.7	0.96
L60T340	3.40	5.2	5.70	L60T100	0.2	0.2	0.18
L50T400	4.00	7.5	8.40	L50T120	1.2	1.2	1.06
L60T420	4.23	9.4	9.90	L60T170	1.8	1.8	2.03
L50T500	5.00	16.7	18.07	L50T200	5.0	5.0	5.98

表5 クリープ試験結果 (新接着剤)

(a) 40°C				(b) 50°C				(c) 60°C			
試験体名	τ N/mm ²	γ^{48} %	γ^{∞} %	試験体名	τ N/mm ²	γ^{48} %	γ^{∞} %	試験体名	τ N/mm ²	γ^{48} %	γ^{∞} %
L50T815	8.15	6.9	6.1	L40T150	1.50	1.5	1.1	L40T150	1.50	4.7	4.7
L60T678	6.78	4.9	4.9	L50T120	1.20	0.9	0.9	L50T125	1.25	2.7	2.6
L60T575	5.75	3.9	3.9	L40T694	6.94	6.2	6.2	L40T100	1.00	2.5	2.5
L60T471	4.71	3.0	2.9	L50T558	5.58	5.1	5.1	L50T080	0.80	1.8	1.7
				L60T497	4.97	3.8	3.8	L50T400	4.00	9.5	9.6
								L60T330	3.30	7.5	7.5
								L60T503	5.03	12.5	12.5

となるので $\gamma = \gamma_{cr}$ のときは無現大となる。すなわち、 γ_{cr} が無限時間時のせん断ひずみ予測値となることがわかる。図3 (a)には、図3 (b)に示した実験データを用いて時間をひずみで割った値 t/γ と時間 t との関係を示している。96時間の全時間のデータは (3.a) 式のような良好の直線関係にあり、無限時間時のせん断ひずみ γ_{cr} を求めるのに48時間 (2日目) 程度のデータで十分であることがわかる。実験データを用いて、最小2乗近似法を用いて直線

近似をしその勾配から、 γ_{cr} を求める。

3.2 限界せん断応力決定法

以下に限界せん断応力、 τ^{lim} を求める方法を示す。

- 1) まず、ある温度について小さな荷重における定数により弾性係数 G を求める。
- 2) 数種類の応力下における、せん断ひずみ γ と時間 t の関係を計測し48時間時のせん断ひずみ γ^{48} と無限時間

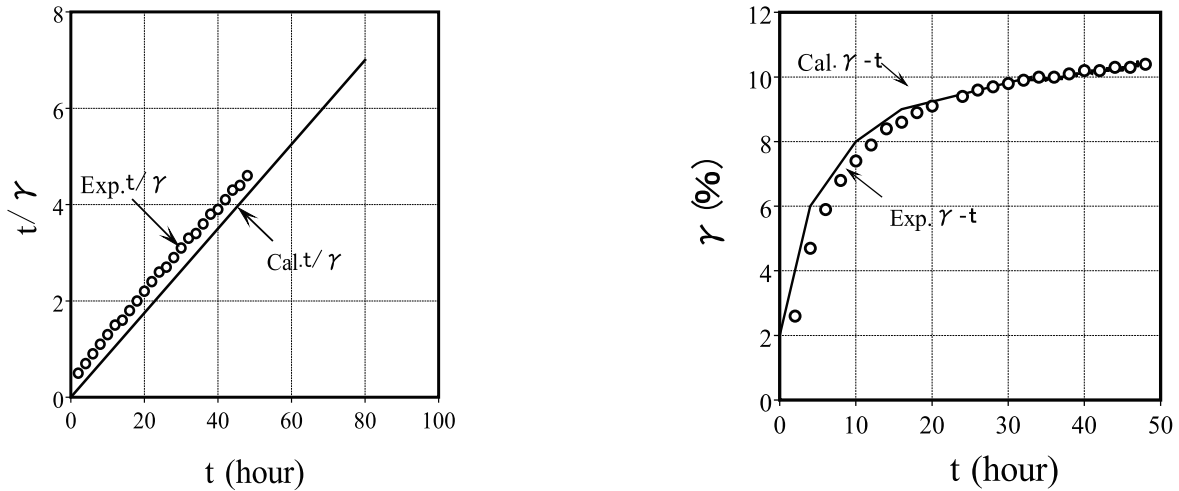


図3 サウスウェルの方法による無限時間後のせん断ひずみ同定結果

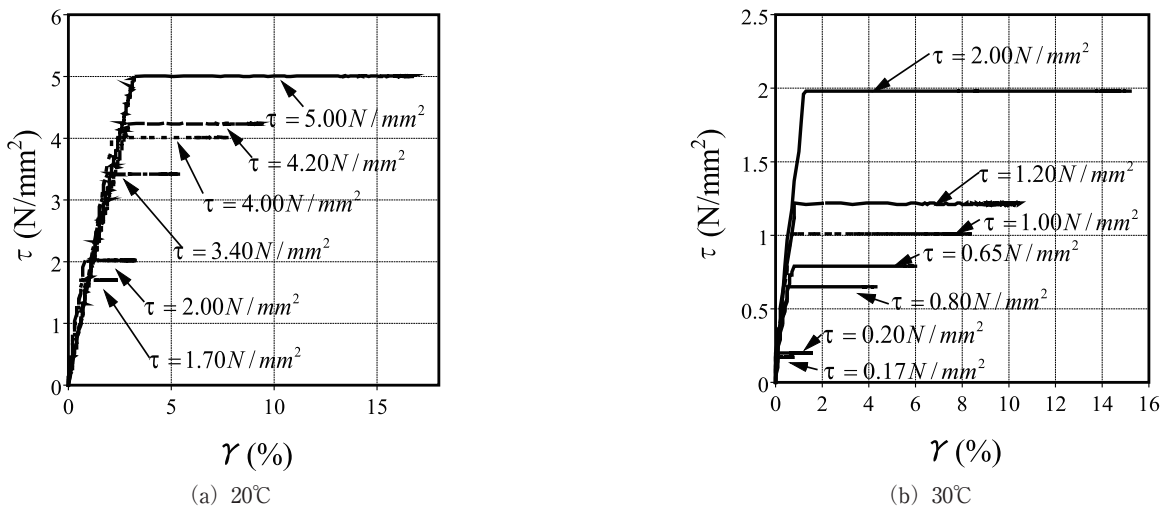


図4 せん断応力-ひずみ関係 (旧接着剤)

時のせん断ひずみ γ^∞ を求める。

- 3) γ^{48} と γ^∞ の値の近いものは弾性挙動しているものとして除外し、それ以外のデータを用いて τ と γ^{48} の関係を直線近似する。
- 4) 弾性関係との3)の、 $\tau - \gamma^{48}$ 近似直線との交点の τ の値を限界せん断応力として求める。

4. 試験結果と考察

実験結果と限界せん断応力の算定結果を旧接着剤について表2, 4図4, 5, 8に, 新接着剤について表3, 5図6, 7, 9に示す。表2には接着長さ L , 荷重 P , せん断応力 τ , 最高温度 T_{max} , 最低温度 T_{min} を示す。図4, 6には, せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を, 表4, 5には各試験体についてせん断応力 τ と48時間及び無限時間時のせん断ひずみ γ^{48} , γ^∞ を示す。

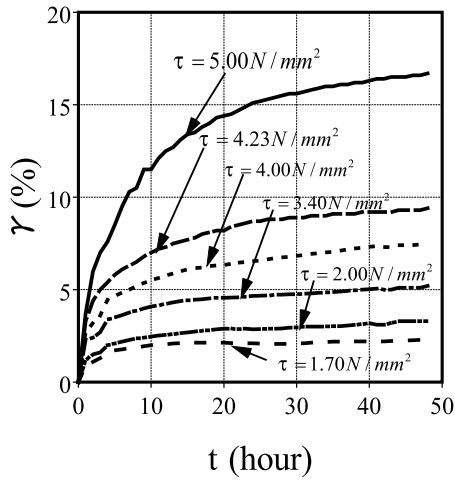
図5, 図7にはせん断ひずみ γ と時間 t との関係を, 図8,

9には, せん断応力 τ と48時間及び無限時間時のせん断ひずみ γ^{48} , γ^∞ の関係を, 弾性勾配と弾性挙動を示さない γ^{48} のデータから求めた近似直線を併せて示す。

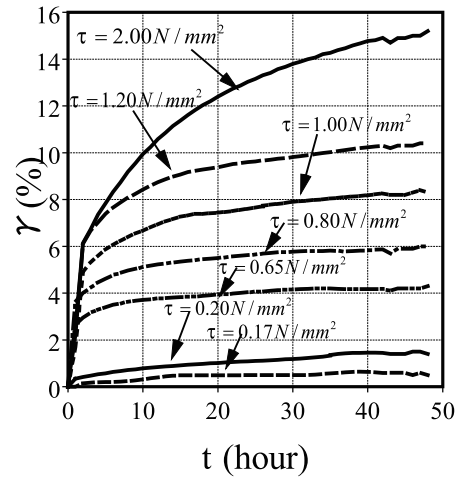
図10には求めた限界せん断応力 τ^{lim} と雰囲気温度 Temp との関係を示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

- 1) 図4, 6から初期弾性係数は温度に依存すること,
- 2) 図5, 7から, クリープせん断ひずみがこれ以上増大しなくなる限界が存在すること,
- 3) 図3から, サウスウェルの方法により良好に無限時間時のせん断ひずみ γ^∞ は推定でき, 今回の場合2日間程度のデータがあれば十分推定可能であること,
- 4) 図8, 図9, 図10より, クリープせん断ひずみが増大しない限界のせん断応力(限界せん断応力) τ^{lim} があり, この τ^{lim} は温度鋭敏に依存すること等のことがわかる。

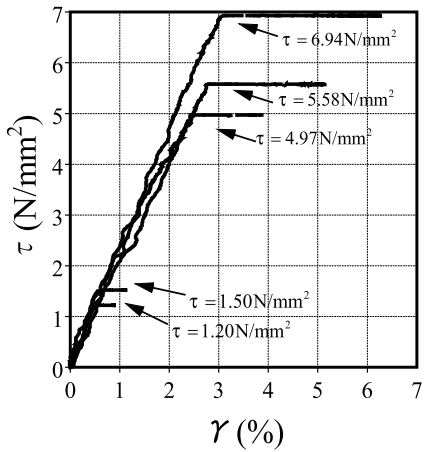


(a) 20°C

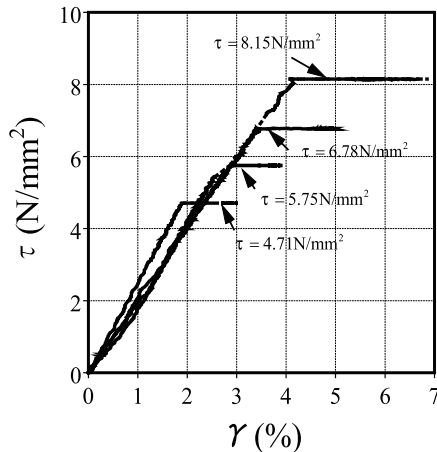


(b) 30°C

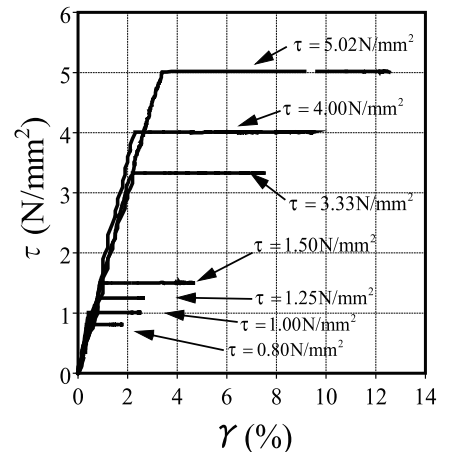
図5 ひずみ-時間関係 (旧接着剤)



(a) 40°C

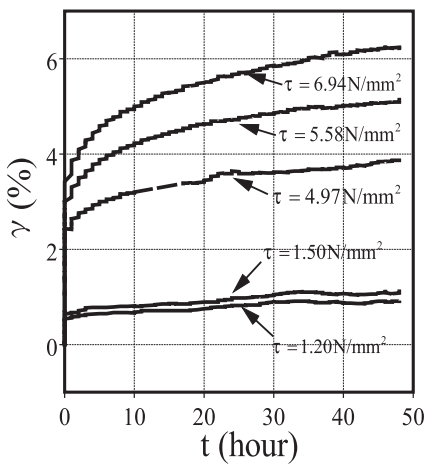


(b) 50°C

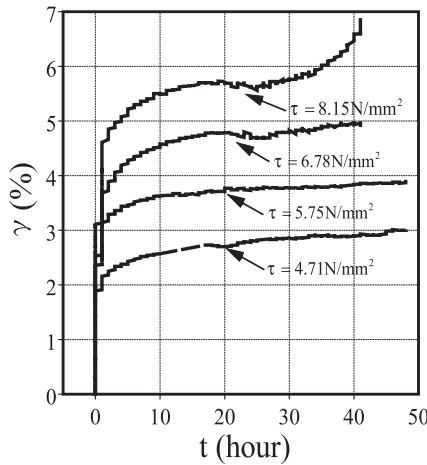


(c) 60°C

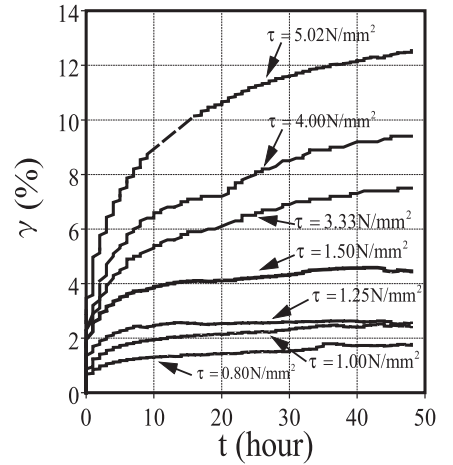
図6 せん断応力-ひずみ関係 (新接着剤)



(a) 40°C



(b) 50°C



(c) 60°C

図7 ひずみ-時間関係 (新接着剤)

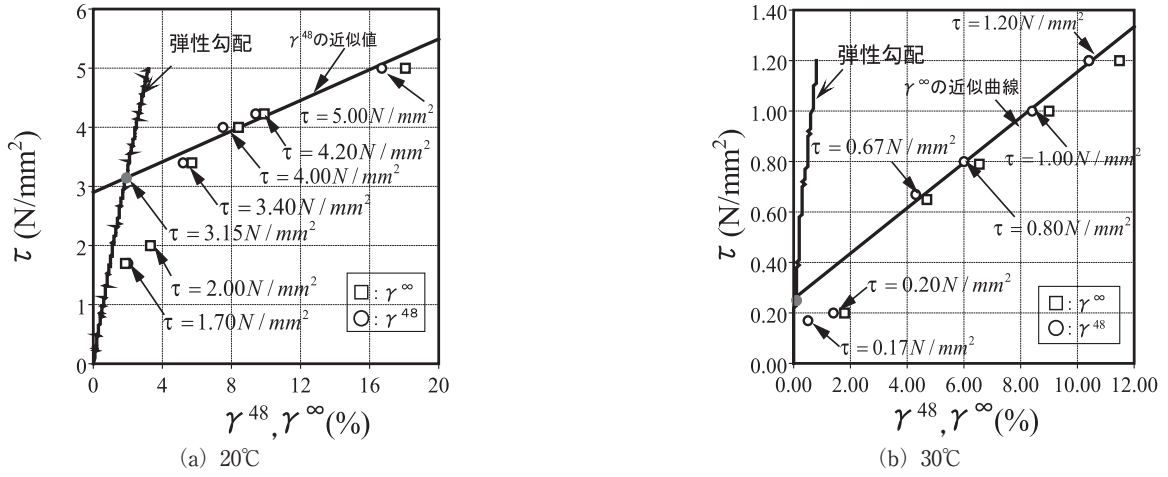


図8 せん断応力-せん断ひずみ, 限界せん断関係 (旧接着剤)

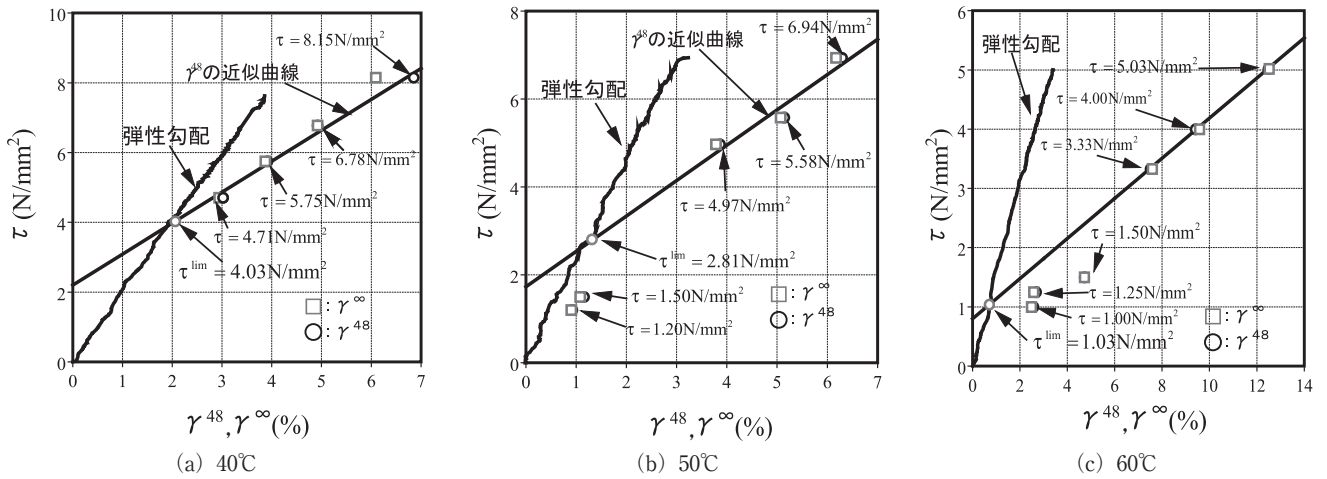


図9 せん断応力-せん断ひずみ, 限界せん断関係 (新接着剤)

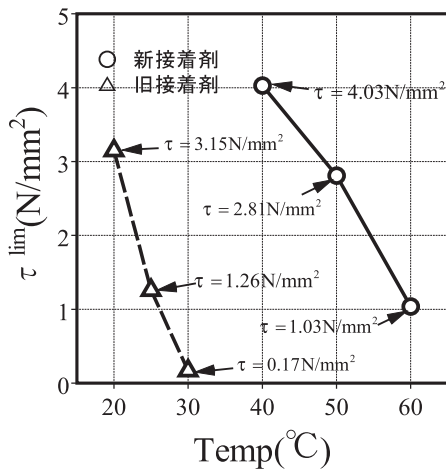


図10 せん断応力-温度関係 (新・旧接着剤)

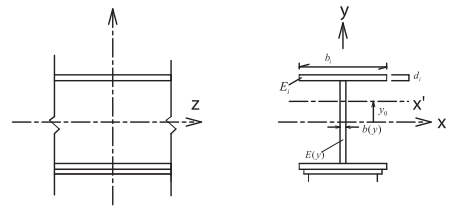


図11 複合材の断面

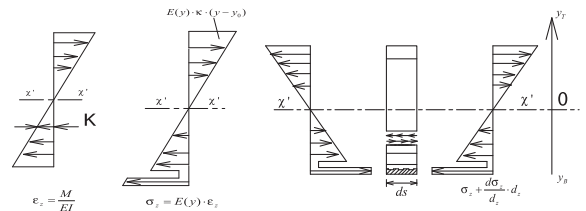


図12 断面内の応力分布

5.1 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合層、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11に示す複合材の断面を考える。座標を図11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 ϵ_z 、応力分布 σ_z は次式のよ

表6 補剛 H 型鋼梁の断面性能と接着層での発生せん断応力 (層数の効果)

H-Beam Section					CFRP			Sectional Properties									
D	B	tw	tf	r	Type	Layer ply	Row ply	I _x mm ⁴	y ₀ mm	Z _c mm ³	Z _t mm ³	S.F./100kN N/mm ²					
175	75	5	7	8	ML	1	1	7.155E+06	81	8.886E+04	1.030E+05	2.67					
						2	1	7.846E+06	85	9.177E+04	1.216E+05	4.63					
						3	1	8.504E+06	90	9.445E+04	1.418E+05	6.12					
						4	1	9.136E+06	94	9.697E+04	1.638E+05	7.28					
					TL	1	1	6.855E+06	78	8.759E+04	9.555E+04	1.65					
						2	1	7.287E+06	81	8.954E+04	1.062E+05	3.03					
						3	1	7.718E+06	84	9.148E+04	1.176E+05	4.20					
						4	1	8.150E+06	87	9.342E+04	1.299E+05	5.20					
					175	90	5	8	8	ML	1	1	1.273E+07	93	1.376E+05	1.544E+05	1.77
											2	1	1.370E+07	97	1.409E+05	1.761E+05	3.17
											3	1	1.463E+07	102	1.441E+05	1.992E+05	4.29
											4	1	1.554E+07	106	1.471E+05	2.240E+05	5.22
TL	1	1	1.231E+07	90	1.361E+05	1.457E+05	1.08										
	2	1	1.291E+07	93	1.383E+05	1.581E+05	2.02										
	3	1	1.350E+07	96	1.405E+05	1.712E+05	2.85										
	4	1	1.410E+07	99	1.427E+05	1.851E+05	3.59										
200	100	5.5	8	8	ML	1	2	2.013E+07	109	1.839E+05	2.232E+05	1.23					
						2	2	2.236E+07	118	1.902E+05	2.712E+05	2.05					
						3	2	2.437E+07	125	1.955E+05	3.234E+05	2.64					
						4	2	2.622E+07	131	2.003E+05	3.795E+05	3.08					
					TL	1	2	1.911E+07	106	1.809E+05	2.026E+05	0.77					
						2	2	2.054E+07	111	1.853E+05	2.304E+05	1.38					
						3	2	2.192E+07	116	1.894E+05	2.598E+05	1.87					
						4	2	2.324E+07	120	1.933E+05	2.913E+05	2.27					
					250	125	6	9	8	ML	1	2	4.294E+07	134	3.212E+05	3.691E+05	0.74
											2	2	4.662E+07	141	3.296E+05	4.294E+05	1.28
											3	2	5.003E+07	148	3.370E+05	4.926E+05	1.71
											4	2	5.322E+07	155	3.438E+05	5.591E+05	2.04
TL	1	2	4.130E+07	130						3.174E+05	3.445E+05	0.45					
	2	2	4.359E+07	135						3.230E+05	3.789E+05	0.83					
	3	2	4.582E+07	140						3.283E+05	4.148E+05	1.16					
	4	2	4.800E+07	144						3.335E+05	4.524E+05	1.44					
300	150	6.5	9	13						ML	1	3	7.783E+07	162	4.794E+05	5.653E+05	0.48
											2	3	8.537E+07	173	4.933E+05	6.724E+05	0.82
											3	3	9.215E+07	182	5.050E+05	7.841E+05	1.06
											4	3	9.833E+07	191	5.152E+05	9.010E+05	1.26
					TL	1	3	7.437E+07	157	4.727E+05	5.213E+05	0.30					
						2	3	7.915E+07	164	4.823E+05	5.824E+05	0.54					
						3	3	8.369E+07	170	4.910E+05	6.459E+05	0.74					
						4	3	8.803E+07	176	4.992E+05	7.120E+05	0.90					

うになる。

$$\epsilon_x(y) = \frac{M}{EI} \cdot (y - y_0) \quad \dots \quad (4.a)$$

$$\sigma_z(y) = E(y) \cdot \frac{M}{EI} \cdot (y - y_0) \quad \dots \quad (4.b)$$

図 12 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 τ 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。

$$\begin{aligned} & \tau \cdot b(y) \cdot dz + \int_{y_B}^y \sigma_z \cdot b(y) \cdot dy \\ & - \int_{y_B}^y \left(\sigma_z + \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot dz \right) \cdot b(y) \cdot dy = 0 \\ \therefore \tau \cdot b(y) \cdot dz & = \int_{y_B}^y \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot dz \cdot b(y) \cdot dy = 0 \\ \tau & = \frac{1}{b(y)} \int_{y_B}^y \frac{d\sigma_z}{dz} \cdot b(y) \cdot dy \quad \dots \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 y_B は下端部の座標である。

(4.b) 式をに代入し、次式の関係性を考慮すると、(7)式が得られる。

$$Q = -\frac{dM}{dz} \quad \dots \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau & = \frac{1}{b(y)} \int_{y_B}^y \frac{E(y)}{EI} \cdot \frac{dM}{dz} \cdot (y - y_0) \cdot b(y) \cdot dy \\ & = -\frac{Q}{b(y) \cdot EI} \int_{y_B}^y E(y) \cdot b(y) \cdot (y - y_0) \cdot b(y) \cdot dy \quad \dots \quad (7) \end{aligned}$$

ここに、 y_B は断面の合せせん断応力である。

さて、図 11 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

表7 補剛 H 型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									
D	B	tw	tf	r	Type	Layer ply	Row ply	I _x mm ⁴	y ₀ mm	Z _c mm ³	Z _t mm ³	S.F./100kN N/mm ²					
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					

で表す。すると、下端から j 番目の要素の上端のせん断応力 τ_j^+ は、次式で求まる。

$$\begin{aligned} \tau_j^+ & = \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^j E_i \cdot b_i \cdot \left(\frac{y^2}{2} - y_0 \cdot y \right) \Big|_{y=\frac{d_i}{2}}^{y=\frac{d_i}{2}} \\ \tau_j^+ & = \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^j E_i \cdot b_i \cdot (y_i - y_0) \cdot d_i \quad \dots \quad (8.a) \end{aligned}$$

同様に、下端から j 番目の要素の下端のせん断応力 τ_j^- は、次式となる。

$$\tau_j^- = \frac{-Q}{b_j \cdot EI} \sum_{i=1}^j E_i \cdot b_i \cdot (y_i - y_0) \cdot d_i \quad \dots \quad (8.b)$$

上式を用いて、エクセル等により、接着剤での最大せん断応力が簡単に計算できる。

5.2 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」の補強性能表 (付録 A.2) を参考に梁のせん断力 100kN がのときの接着最内層、炭素繊維プレート最内層のせん断応力を求めた。その結果を表 6、表 7 に示す。

表 6、表 7 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応力度、 $S.F.$ 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 6 には層数による効果を、表 7 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、50℃ の鋼小梁について、高強度型炭素繊維プレート ML を 2 列 2 層補剛する場合を考える。許容応力 F を 235N/mm²、スパン長 L を 4 m とし、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

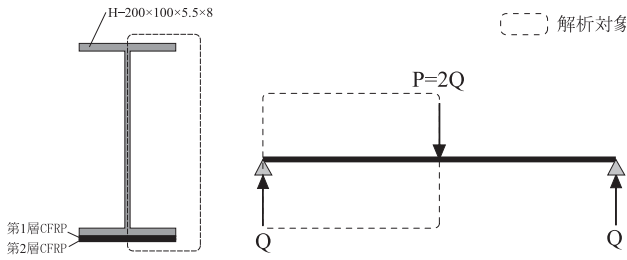


図13 解析モデル

表8 素材特性

	ヤング係数 kN/mm ²	ポアソン比	降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
鋼材	205.0	0.28	286	382
ML	295.7	0.30	-	2169
TL	169.1	0.34	-	3085
接着剤	2.3	0.4	35	44

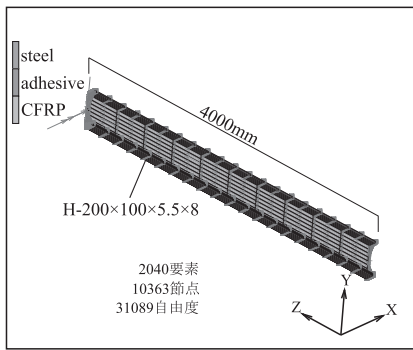


図14 要素分割図

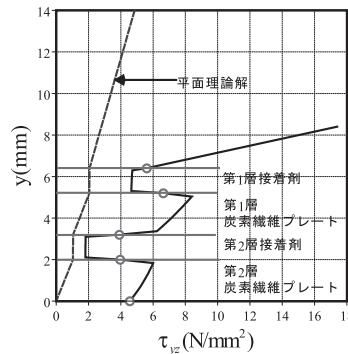


図15 下フランジ断面中心のせん断応力分布

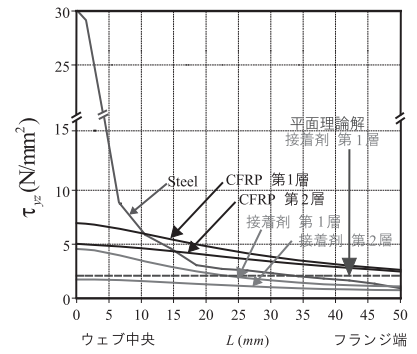


図16 幅方向のせん断応力分布

$$M = F \cdot Z_c = 235 \times 1.902 \times 10^5 = 44.7 \text{ kN}$$

$$Q = M / L = 44.7 / 4 = 11.2 \text{ kN}$$

$$Q_a = 100 \times 2.81 / 2.05 = 137.1 \text{ kN}$$

$$Q \leq Q_a$$

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、50℃の高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。

6. せん断応力分布解析 (有限要素解析)

図13のように、H-200x100x5.5x8の鋼小梁について、中弾性型炭素繊維プレートMLを2列2層補剛する場合を考える。スパン長を4m、せん断、梁中央に荷重を加えた場合を考える。

この全断面でせん断力分布が同一形状となる場合について3次元有限要素法解析を行ってフランジ幅方向のせん断力分布性状を調べる。要素分割図を図14に示す。解析の対称性を考慮して図13のように材軸方向に半分、断面幅方向に半分の1/4解析を行った。材内部のひずみ分布を良好に近似するため、20節点アイソパラメトリック6面体要素を用いた。

2040要素、10363接点、31089自由度で要素分解しており、特に、第1・2層接着剤、第1・2層CFRPは、板厚方向に3分割をした。素材特性を表8に示す。解析結果を図15、図16に示す。

図15は、断面中心の下フランジ近傍部のせん断応力分

布を、図16は、第1層第2層の接着剤及びCFRP及びフランジのせん断応力のフランジ幅方向分布を実線で示す。

これらの図には、前章で示した平面理論解を破線で示す。以下の結果から以下のことがわかる。

- 1) 有限要素解は、断面中心では平面理論解と比べて大きくなる。
- 2) 接着剤とCFRPとの間のせん断力分布は不連続となる。
- 3) 断面中心では、せん断応力分布は、極大となり、フランジ端に行く線せん断遅れ現象によってせん断応力分布は、小さくなる傾向にある。

7. まとめ

炭素繊維プレートによる接着補強工法に用いる接着剤のクリープ特性を実験により調査し、限界せん断応力を示した。また、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) クリープ限界せん断応力は旧接着剤 (E258) では、20℃では3.15N/mm²、25℃では1.26N/mm²、30℃では0.13N/mm²となり、高温になるほどクリープ限界は低くなる。
- 2) 新接着剤 (E258改) では、40℃では4.03N/mm²、50℃では2.81N/mm²、60℃では1.03N/mm²と旧接着剤 (E258) と比べて大きな性能の向上ができる。
- 3) 鋼小梁下フランジの炭素繊維プレートの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すと、発

生せん断応力は小さくなる。

- 4) 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、50℃程度の高温下の接着樹脂のせん断クリープ限界度以下となる。
- 5) CFRP 接着剤は鋼と比べて、せん断遅れによるせん断応力分布の乱れは小さく、接着剤第1層のせん断力分布の平均値は、平面理論解に一致する。

謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施しました。実験実施にあたり2009、2010年度広島工業大学工学部建築工学科玉井研究室の卒業生諸君には、多大の協力を得た。また東レ(株)早川敏弘氏、コニシ(株)若原直樹、久保田啓仁氏には、素材提供と有益な情報をいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

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建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建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.
- 8) Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Theory of Elastic Stability, Second Edition, McGraw-Hill, pp. 135-142, pp. 185-192, 1961.

