

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1 接着応力の分布

玉井 宏章*, 中村 憲一**, 陣川 晃司***.

Cyclic Loading Test on Rehabilitated Steel Beam Bonding CFRP Plates

Part 1 Distribution of Bond Stress

by

Hiroyuki TAMAI*, and 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 tests and the exact stress solution of adhesive.

These results showed change of strain and stress distribution by cyclic loading. And showed the required length of adhesive from the strain distribution.

Key words: Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Steel Member, Bonding Strengthening, 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1では、接着応力分布を検討する。

2. 実験方法

接着層の応力分布と破壊性状を検討するため、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実験を行う。

○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、サーボパルスによる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、表2に試験体に用いたH型鋼梁のフランジ(9mm)、ウェブ(6mm)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、(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型鋼(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及び4LB試験体)2種類を用意した。

平成25年12月17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)

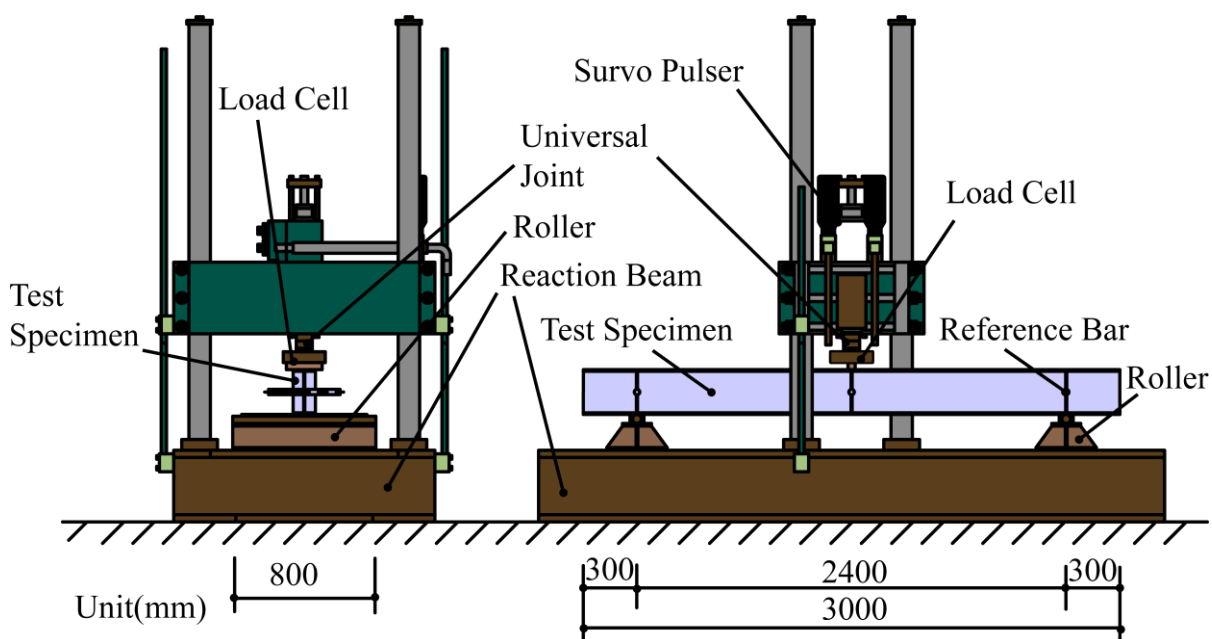
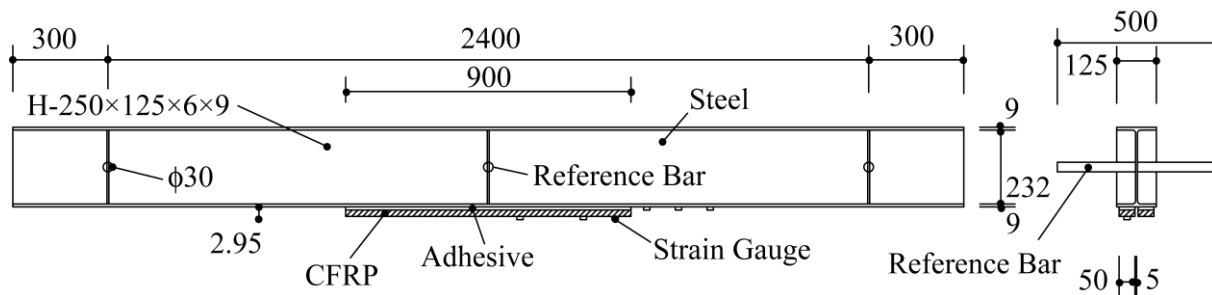
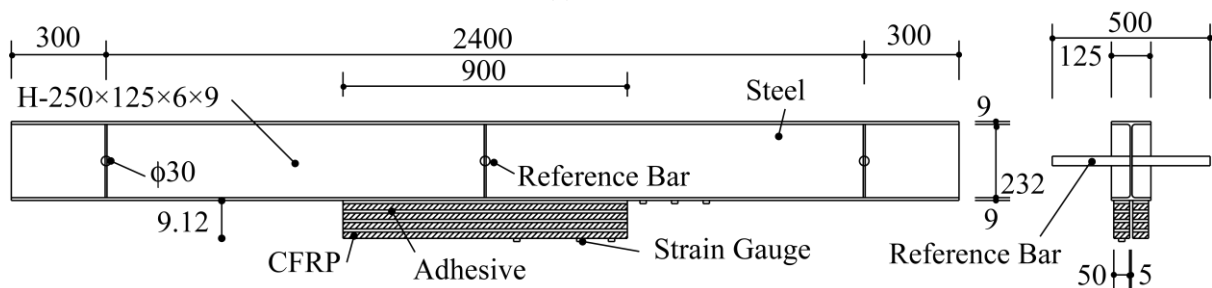


図1 試験装置の概要



(a) 1LB 試験体



(b) 4LB 試験体

図2 試験体の概要

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	1	900	0.95
4LB	4	900	0.78

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

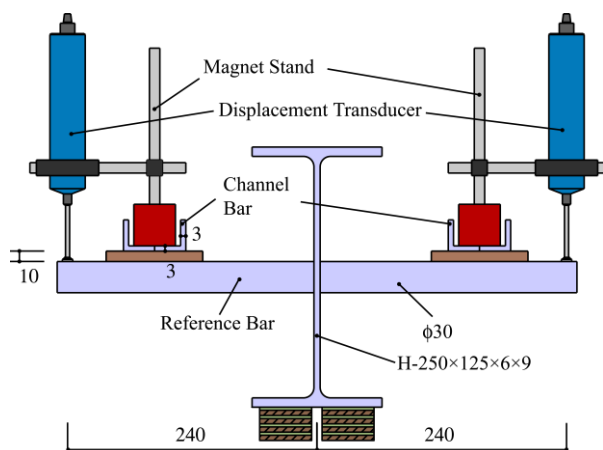
表 3 炭素繊維プレート及び接着剤の機械的性

(a) 炭素繊維プレートの機械的性質

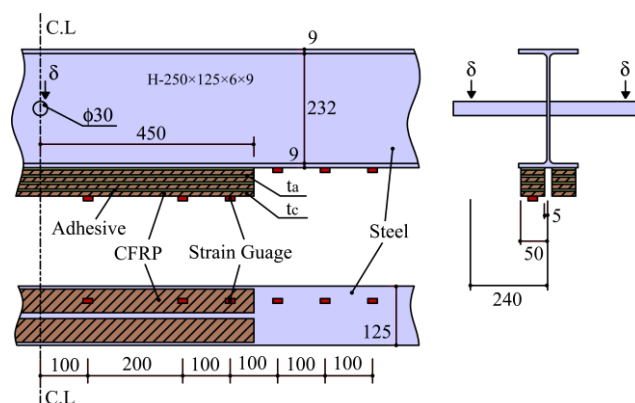
	ヤング係数	引張強さ	破断ひずみ
	N/mm ²	N/mm ²	%
CFRP ML	295000	2169	0.71

(b) 接着剤の機械的性質

ヤング係数	曲げ強度	圧縮降伏応力度	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
2280	55.8	59.2	34.8	25.5



(a) 中央たわみの計測方法



(b) 歪ゲージ貼付位置

図 3 計測方法の詳細

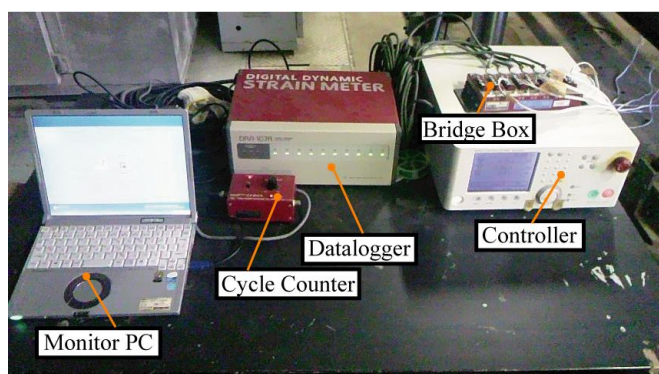


写真 1 計測装置

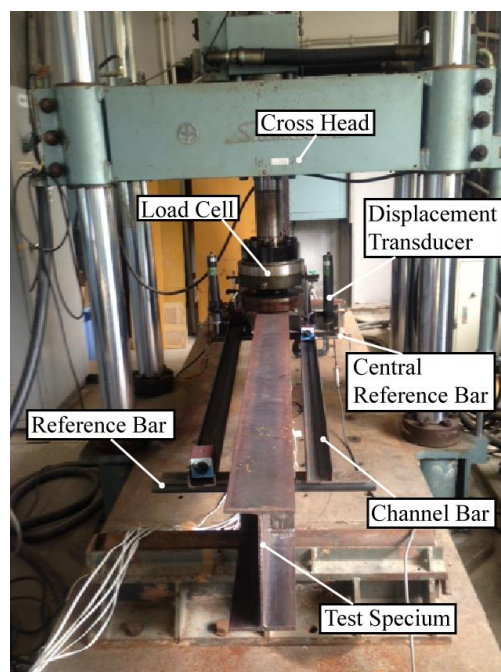


写真 2 中央たわみ計測治具

○計測方法

計測方法及計測装置の概要を図 3(a), (b)及び写真 1, 2 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、変位については図 3(a), 写真 2 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端で計測し、平均して中央たわみ δ を算定した。

歪については、図 3(b)に示すように、梁中央から 100mm, 300mm, 400mm 位置における炭素繊維プレートの垂直歪と 500mm, 600mm, 700mm 位置における、下フランジ下面の垂直歪をそれぞれ計測した。

3. 接着層の応力分布

鋼と鋼とを接着した時の接着層の応力分布は文献 3, 文献 4 に示されている。文献 5 では鋼と炭素繊維プレートとの複合材のせん断応力分布を示している。

図 4 に示す、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。

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

ここに、

$$\lambda^2 = \frac{t_a^2}{G_a \cdot A_a} \cdot \frac{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \quad (1.b)$$

であり、

G_a, A_a, t_a, L : 接着剤のせん断弾性係数、

断面積、層厚、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、断面積である。

軸方向の釣り合いから、 τ_a を図 4 の x について 0 から x まで積分し、接着左端部位置 $x=0$ で炭素繊維プレートの直応力 σ_c は次式のように求まる。

$$\sigma_c = \frac{P}{\sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left\{ \sinh \frac{L}{\lambda} - \sinh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \sinh \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right\} \quad (2)$$

図 5(a) のような中央集中荷重を受ける部分補強梁の接着応力を考える。

CFRP 端部を原点に x 座標をとる。

(b) に示す曲げを受ける部分補強梁の接着層の応力分布は(c) の様な CFRP と鋼梁が 1 体となった一様断面梁に(d) の様な CFRP 端部の垂直応力が(c) と重ね合わせた時に 0 となる様な集中力を受けた場合の解を重ね合わせて得られる。

(d) の解は、ウェブ、下フランジの効果を無視し、圧縮力を受ける側が CFRP であることを考慮すると次式で与えられる。

$$\tau_a^{(d)} = \frac{-P_c}{\lambda \cdot \sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \left\{ \cosh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \cosh \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right\} \quad (3.a)$$

上フランジの垂直応力 $\sigma_s^{(d)}$ は、

$$\sigma_s^{(d)} = \frac{-P}{\sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left\{ \sinh \frac{L}{\lambda} - \sinh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \sinh \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right\} \quad (3.b)$$

よって CFRP の垂直応力 $\sigma_c^{(d)}$ は、

$$\sigma_c^{(d)} = \frac{-P_c}{A_c} \left\{ 1 - \frac{1}{\sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left\{ \sinh \frac{L}{\lambda} - \sinh \frac{L}{\lambda} \left(1 - \frac{x}{L} \right) - \sinh \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{x}{L} \right\} \right\} \quad (3.c)$$

ここに

$$P_c = E_c \cdot A_c \cdot \frac{M_c}{(EI)_c} \cdot h_c \quad (4.a)$$

$$M_c = F \cdot \ell_c \quad (4.b)$$

ℓ_c は梁端部から CFRP 端部までの距離、 $(EI)_c$ は複合材の曲げ剛性、 h_c は複合材の図心から CFRP までの高さである。

(c) の解は

$$\tau_a^{(c)} = -\frac{F}{b(y)(EI)_c} \int_{y_b}^{y_a} E(y) \cdot b(y) \cdot (y - y_o) dy \quad (5.a)$$

$$\sigma_c^{(c)} = E_c \cdot \frac{F \cdot (x + \ell_c)}{(EI)_c} \cdot h_c \quad (5.b)$$

$$\sigma_s^{(c)} = E_s \cdot \frac{F \cdot (x + \ell_c)}{(EI)_c} \cdot h_s \quad (5.c)$$

ここに、 y_b, y_a, y_o は断面下端、接着層中央、図心の断面方向座標値、 $E(y), b(y)$ は y 座標値の要素のヤング係数と幅、 h_s は複合材の図心から上フランジ上端までの距離である。

求める部分補強梁の応力分布は、(3.a~c) 式、(5.a~c) 式を用いて、次式で得られる。

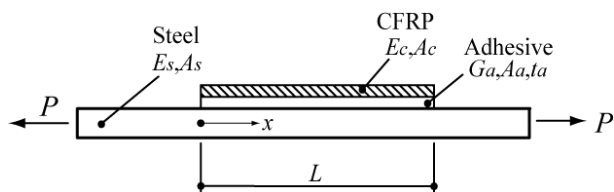
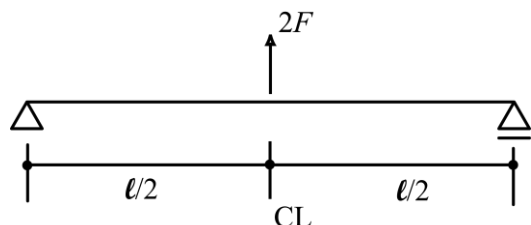
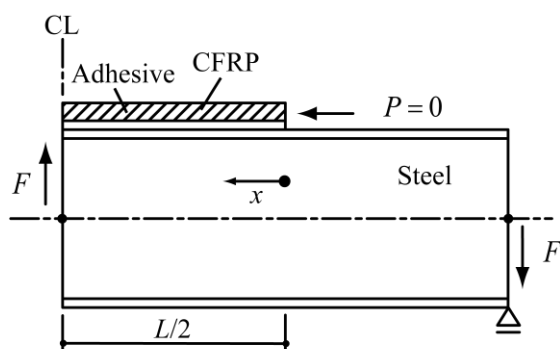


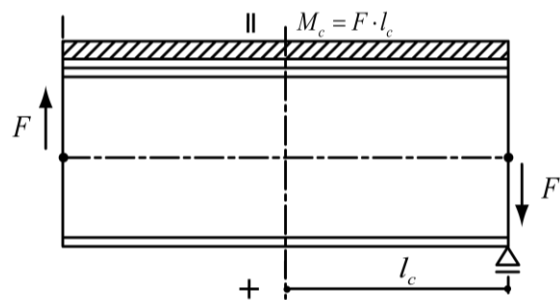
図4 複合材の形状



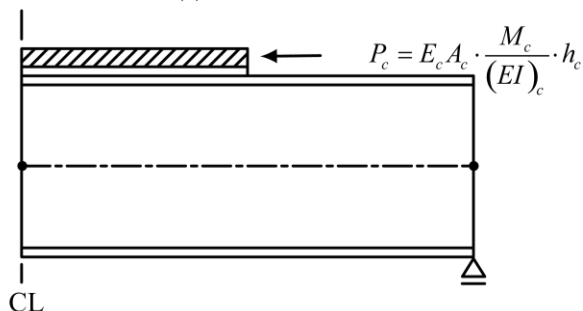
(a) 中央集中荷重を受ける梁



(b) 部分補強試験体



(c) 全体補強試験体



(d) 部分補強試験体

図5 単純支持された部分補強梁の構造モデル

$$\left. \begin{aligned} \tau_a &= \tau_a^{(c)} + \tau_a^{(d)} \\ \sigma_c &= \sigma_c^{(c)} + \sigma_c^{(d)} \\ \sigma_s &= \sigma_s^{(c)} + \sigma_s^{(d)} \end{aligned} \right\} (6.a \sim c)$$

次に、接着剤の破壊について考える。

梁が十分に細長いと $\tau_a^{(c)}$ は $\tau_a^{(d)}$ と較べて十分に小さく無視できる。

(1.a)より $\tau_a^{(d)}$ は $x=0$ のとき最大となる。 x の最大値は、

$$\tau_{a \max}^{(d)} = \frac{P_c}{\lambda \cdot \sinh \frac{L}{\lambda}} \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \left(\cosh \frac{L}{\lambda} - 1 \right) \quad (7.a)$$

$\frac{L}{\lambda} \geq 10$ と L が十分長いときは

$$\frac{1}{\sinh \frac{L}{\lambda}} = 0, \quad \frac{\cosh \frac{L}{\lambda}}{\sinh \frac{L}{\lambda}} = 1 \quad \text{となるので}$$

$$\tau_{a \max}^{(d)} = \frac{P_c}{\lambda} \cdot \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \quad (7.b)$$

ここに P_c, λ を整理すると、端部における接着層の最大せん断応力度は次式から与えられる。

$$\tau_{a \max} = \sqrt{\frac{G_a}{t_a \cdot w_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c \cdot E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{h_c \cdot l_c}{(EI)_c} \cdot F} \quad (8)$$

4. 理論実験結果とその考察

実験結果を図6～9に示す。また解析値は3章の式と表4の形状・材料定数を用いて各試験体について計算した。

図6は、各試験体の荷重-中央たわみ関係である。

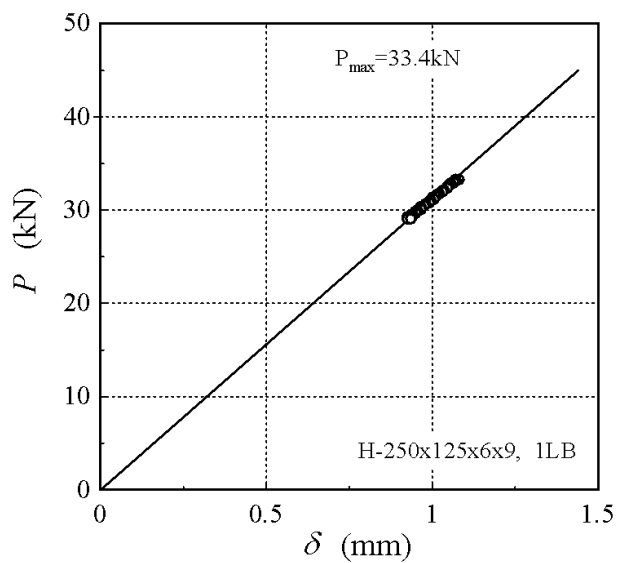
図7は、各試験体の下フランジ下面の縁歪を断面保持を仮定した理論値 ε^* と実験値 ε の関係を、 $x=700\text{mm}$ (鋼フランジ)、 400mm (CFRP 端付近)及び 100mm (CFRP 中央側)について示す。

図8は、下フランジ下面の縁歪の分布を、実験値を丸印で、提案する数値構造解析値を実線で、断面保持で仮定した理論値を破線でそれぞれ示す。 x^* は梁中央からの長さを指す。鋼フランジでの値($x > 450\text{mm}$)は、解析値と理論値は一致している。

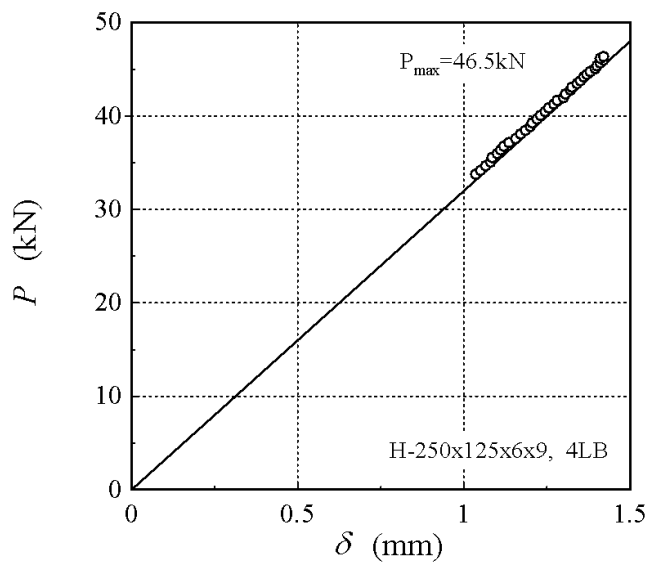
図9は、1LB試験体についてCFRP端部を原点にとった x' 座標を接着基準長さで無次元化した値を用いてCFRP及び鋼フランジの垂直応力分布 σ_c, σ_s と接着剤のせん断応力分布 τ_a を示したものである。

これらの結果から以下のことが分かる。

1) 図6より、荷重-変位関係は、線形関係にあり、1Hz

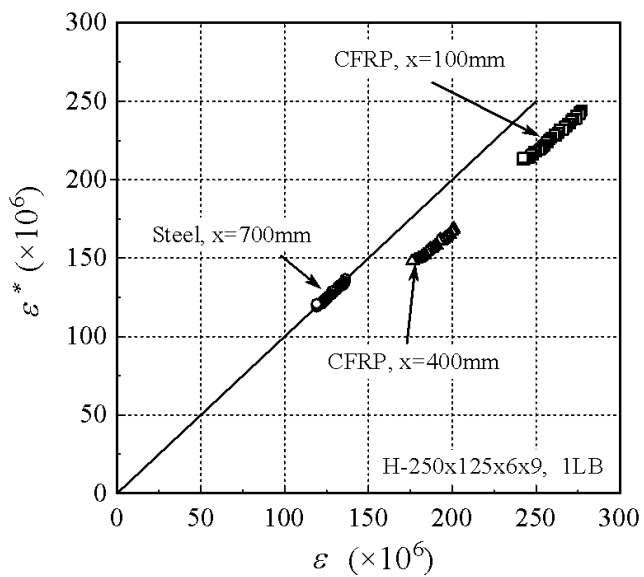


(a) 1LB 試験体

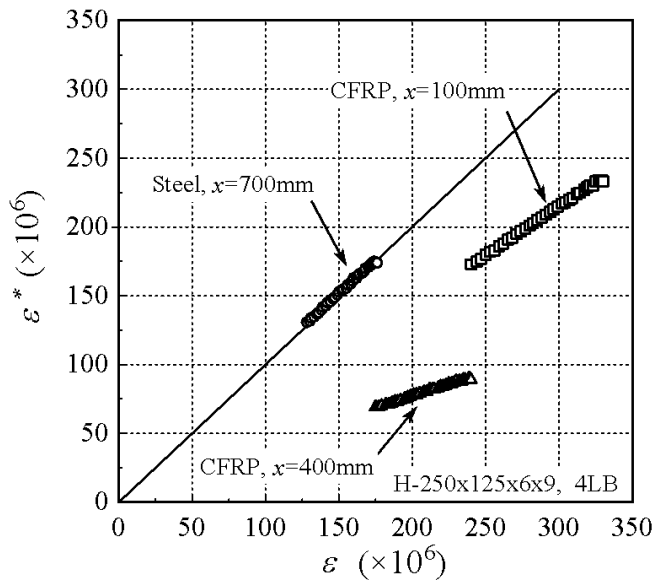


(b) 4LB 試験体

図 6 荷重-中央たわみ関係



(a) 1LB 試験体



(b) 4LB 試験体

図 7 下フランジ下面の縁歪の予測

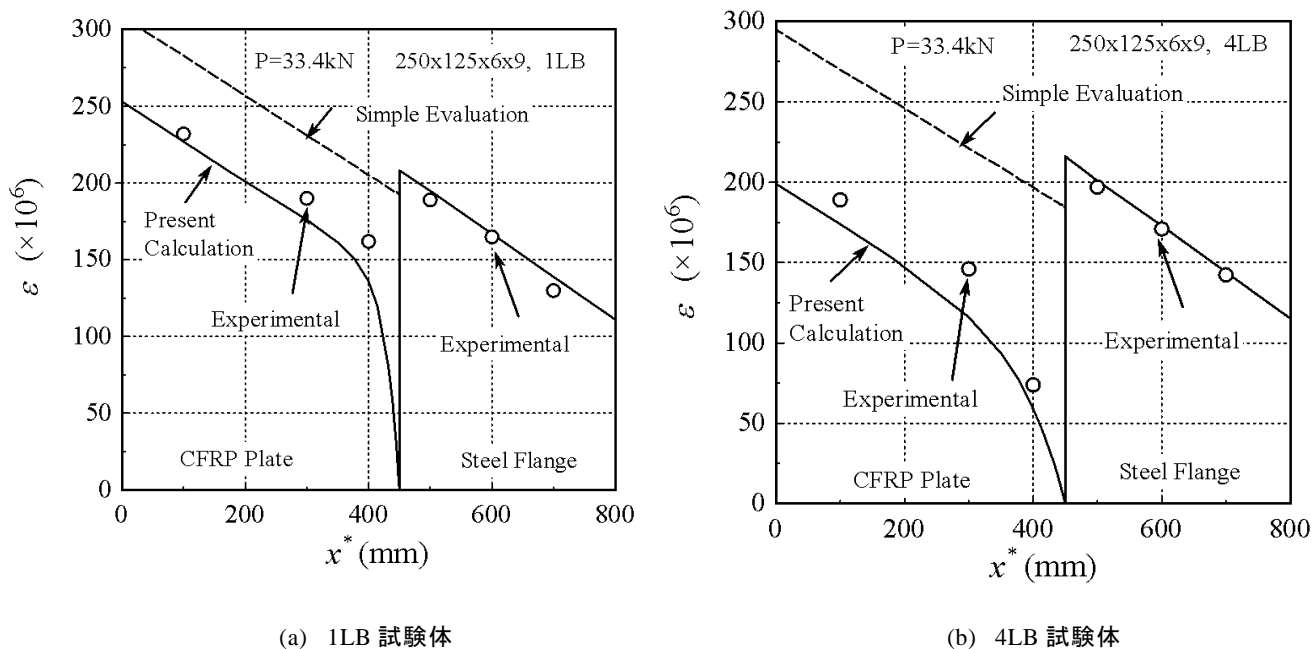


図 8 下フランジ下面の歪分布

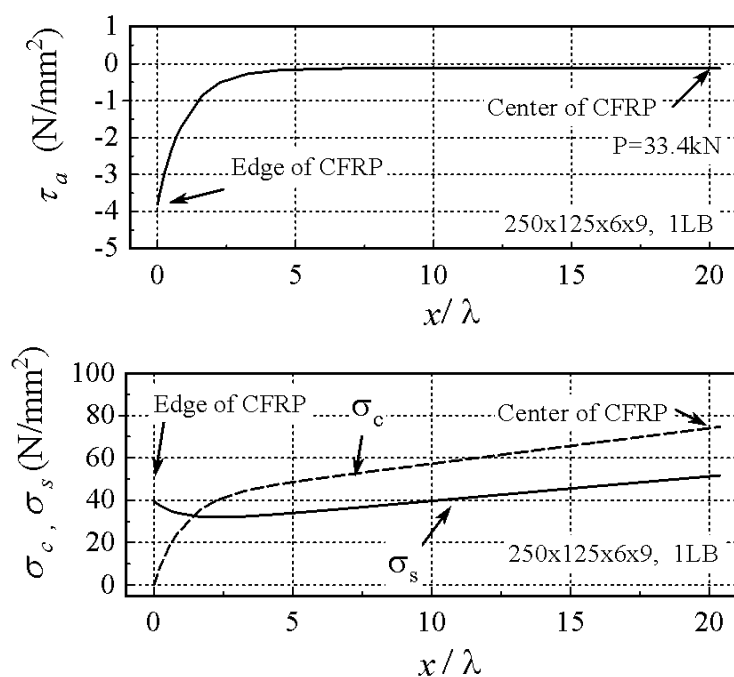
図 9 炭素繊維プレート, フランジ鋼板の垂直応力
接着剤のせん断応力分布 (1LB 試験体)

表 4 接着応力検討用形状・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	$(EI)_c$
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	N・mm
1LB	205000	295000	3100	3642	200	95	0.95	900	125.5	100	750	8.852×10^{12}
4LB	205000	295000	3100	3642	800	312	0.78	900	127	100	750	1.092×10^{13}

の載荷振動数では、接着剤の粘性的性質は、荷重-変位関係には表れない。

- 図 7 より部分補強では、CFRP(補強領域)の縁歪の断面保持を仮定した理論値は実験値より大きくなる傾向にある。
- 図 8 より、数値構造解析モデルを用いた解析値はCFRP(補強領域)を含めた縁歪の分布をほぼ良好に近似できる。CFRP(補強領域)における理論解と解析解との差は、CFRP 端部の応力解放による圧縮歪成分を重ね合わせたことにある。
- 図 9 により、CFRP 端からの距離が基準接着長さ λ の 5 倍以上になると、CFRP の垂直応力 σ_c 及び鋼フランジの垂直応力 σ_s はともに線形に変化する。接着剤のせん断応力 τ_a もその位置でほぼ 0 となる。CFRP を十分に機能させ歪を生じさせ抵抗させることを考え、CFRP の発生歪がほぼ線形変化させるに要する接着長さを必要接着付加長さとして定義すると、この長さは基準接着長さ λ の 5 倍以上にすればよい。

5. まとめ

下フランジ下面に炭素繊維プレート部分を部分接着補強した鋼梁の正側繰り返し載荷実験と数値構造解析モデルによる解析を行って、接着層の応力分布性状を検討した。得られた知見は以下の様に要約できる。

- 部分補強では、断面保持を仮定した理論解によるCFRP(補強領域)の縁歪は、実験値より大きめに予測する。
- 一方、CFRP 端部の応力解放による接着応力分布を重ね合わせた数値構造解析モデルを用いた算定解は、CFRP(補強領域)の縁歪の歪低減効果を良好に近似する。この歪低減効果は、CFRP 端部の応力解

放による圧縮歪成分がCFRP及び鋼フランジに重ね合わされることに基因する。

- CFRP(補強領域)の発生歪がほぼ線形変化させるに要する接着長さを必要接着付加長さとして、これは基準接着付加長さ λ の 5 倍程度とれば十分である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 石川敏之: プレストレスが導入された CFRP 板接着鋼部材のはく離曲げモーメント, 構造工学論文集, Vol.56A, pp991-998, 2010.
- 大沼康二: 金属外板接着部の応力分布とその強さの特性について 日本航空学会誌 第 7 巻 1958
- 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 灰谷徳治, 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接着応力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 C, 22473, pp. 945-946, 2013. 8.

謝辞

本研究を実施するにあたり、2012 年度長崎大学卒業生原口春水君の協力を得た。また、服部明生, 灰谷徳治, 小澤吉幸(東レ建設), 堀井久一, 久保田啓仁(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。