

# H形鋼梁に貼付けたCFRPのメカニズム

高松 隆夫\*・服部 明生\*\*・玉井 宏章\*\*\*・藤本 信介\*\*\*\*

(平成25年10月30日受付)

## Fracture mechanism of CFRP bonded on flange of H-shaped steel beam

Takao TAKAMATSU, Akeo HATTORI, Hiroyuki TAMAI and Shinsuke FUJIMOTO

(Received Oct. 30, 2013)

### Abstract

Three-points-bending tests on H-shaped steel beams are carried out to examine increase of stiffness of the beams that the flange with decrease thickness caused by corrosion is strengthened by CFRP reinforcing method. The beams with total length of flange bonded CFRP show increase of stiffness. The beams with partially bonding CFRP show segregation fracture of CFRP. The strains on edge of CFRP are measured to clarify the fracture mechanism and the strengthening design method of partially bonding CFRP is proposed to increase the stiffness of the beam with corrosion.

**Key Words:** CFRP, Three points bending test, Bending stiffness, Fracture mechanism

### 1 はじめに

著者等は、H形鋼の小梁において常時引張応力が作用するフランジ下面全体に炭素繊維プレート(CFRP)を貼付けることによる補修方法の研究・提案を行っている<sup>1)~4)</sup>。CFRPを貼付けたH形鋼梁の3点曲げ実験を行うことでH形鋼の剛性向上が確認されており、CFRPを用いた補修方法は有効であると考えられる。また、CFRPの部分貼付け、および多層貼付けした場合においてもH形鋼梁の剛性向上が確認されている。しかしながら、CFRPの部分貼付けではCFRPが早期に剥離する傾向がある。

そこで本研究ではCFRPを部分貼付けしたH形鋼梁の3点曲げ実験を行い、CFRPの破壊メカニズムの解明を図る。また、CFRP多層貼付けでは、CFRP端部での急激な剛性の向上を回避するために提案されているCFRP貼付け端部に段差を設ける貼付け工法(図1)についても検討する<sup>5)</sup>。

なお、CFRPを貼付けたH形鋼梁の研究においては、実験的研究では鋼材の表面状況・養生条件などでCFRPの剥離、荷重にばらつきが出やすいため有限要素解析などを用いた解析的研究が精力的に行われている<sup>5)</sup>。解析結果として、CFRP、接着剤およびH形鋼の応力分布が示されているが、実験ではこれらの応力全てを計測することは困難である。

そこで、CFRPの貼付け長さの異なる試験体を用意することで剥離荷重のばらつきを考慮し、CFRPおよびH形

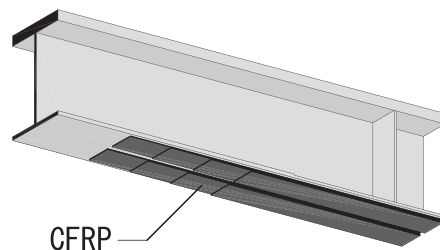


図1 CFRP 段差貼付け

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 東レ建設(株)技術部

\*\*\* 長崎大学工学部工学科

\*\*\*\* 東レ建設(株)技術部

鋼のひずみ計測結果を用いて CFRP 破壊時のひずみ分布を多項式近似することにより、CFRP 破壊メカニズムの解明を図る。

## 2 実験概要

### 2.1 実験方法

3 点曲げ実験を行う。図 2 に実験装置と変位計測位置を示す。

計測は、油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより中央集中荷重  $P$  を、梁中央部と両端支点に変位計を設置し、中央変位から両端支点変位の平均を差し引いて梁中央変位  $\delta$  をそれぞれ計測する。また、図 3 に示すひずみゲージ貼付け位置のひずみ  $\varepsilon$  を計測する。

载荷プログラムは単調载荷とし、CFRP の剥離破壊もしくは H 形鋼梁の降伏ひずみまで载荷する。

### 2.2 試験体

試験体形状を図 3 に示す。試験体に用いる H 形鋼は、鋼構造物のコンクリートスラブ付き小梁を想定した上フランジ厚 25 mm、下フランジ厚 9 mm の BH-250x125x6x9/25 を使用し、下フランジ中央部に腐食による断面欠損として板厚 6 mm の減厚部分 (500 mm) を設けている。試験体を使用した鋼材の素材特性を表 1 に示す。接着剤は二液タイプの常温硬化型エポキシ樹脂 (E258R, コニシ (株) 製) を使用する。接着剤の力学特性を表 2 に示す。CFRP を接着する部分はグラインダー、ベルトサンダーで H 形鋼の黒皮

を除去し、サンドペーパー #240, #1500 で表面処理を施した後に CFRP を貼付ける。

なお、接着剤は主剤 2 : 硬化剤 1 の割合で調合し、CFRP 貼付け後、気温 5℃ 以上の環境で 7 日以上養生する。

試験体一覧を表 3 に示す。CFRP は中弾性 (ML) 型を使用する。CFRP は幅 50 mm、板厚 2 mm、断面積 100 mm<sup>2</sup> である。

試験体は、CFRP 補強無で断面欠損無の N, 断面欠損有の N' と、CFRP1 層で長さの異なる CFRP1/900, CFRP1/1100, CFRP1/1300, CFRP を 2 層、4 層貼付けた CFRP2/900, CFRP4/900 および、2 層、4 層で CFRP 貼付け端部に段差を設けた CFRP2'/1300, CFRP4'/1300, CFRP4'/1100 の 10 体である。

表 1 素材特性

材質	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び %	
鋼板 t=25 mm	SN400B	205000	270	429	47.3
鋼板 t=9 mm	SN400B	205000	305	443	38.6
鋼板 t=6 mm	SN400B	205000	350	443	28.7
CFRP	ML	295700	-	2169	0.7

$E$ : ヤング係数  $\sigma_y$ : 降伏応力度  $\sigma_u$ : 引張強さ

表 2 E258R 力学特性

材質	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
E258R エポキシ樹脂	3000	81.5	37.3	24.7

$E$ : ヤング係数  $\sigma_c$ : 圧縮強度  
 $\sigma_t$ : 引張強度  $\sigma_s$ : 引張せん断強度

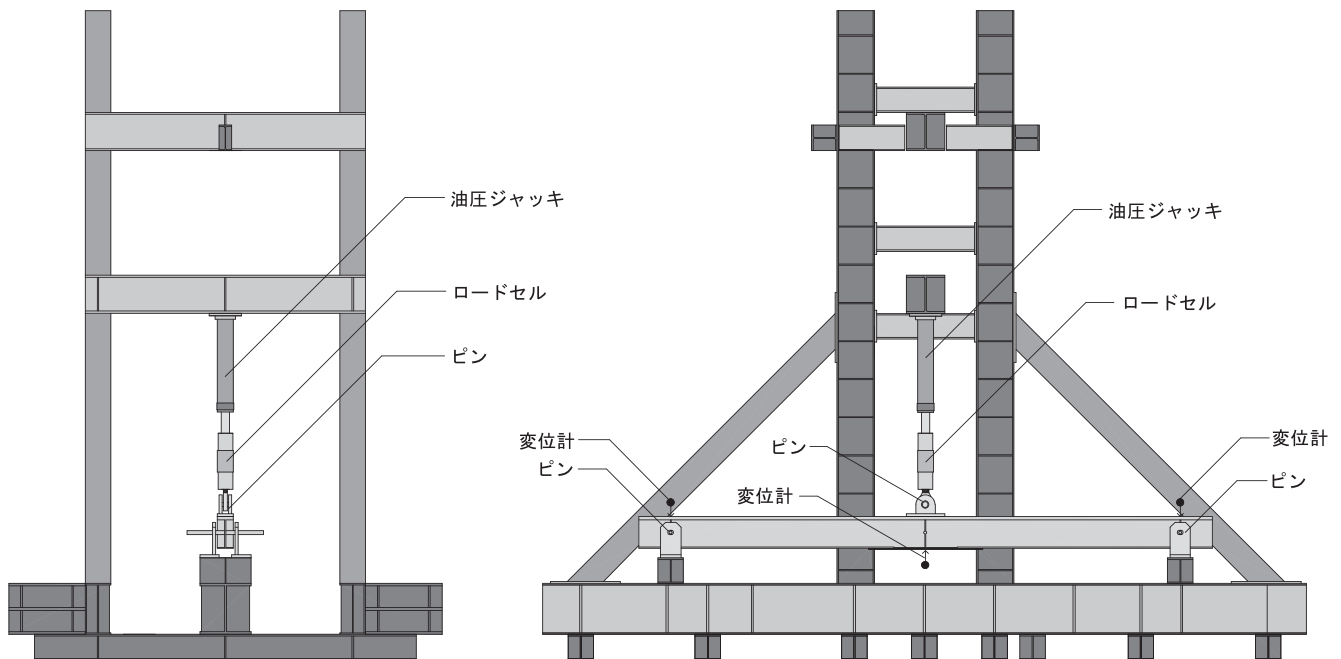


図 2 実験装置概要

表3 試験体一覧

試験体名	減厚	CFRP層数	1層目長さ (mm)	端部段長さ (mm)
N	無	-	-	-
N'	有	-	-	-
CFRP4/900	有	4	900	-
CFRP2/900	有	2	900	-
CFRP4/1100	有	4	1100	50
CFRP4/1300	有	4	1300	100
CFRP2/1300	有	2	1300	100
CFRP1/1300	有	1	1300	-
CFRP1/1100	有	1	1100	-
CFRP1/900	有	1	900	-

### 3 解析方法

#### 3.1 中央変位

試験体の中央変位  $\delta$  は、フランジ減厚部分とCFRPを考慮した有効断面2次モーメント  $I'$  を用いて次式で表される。なお、減厚部分の外側に貼付けた定着部分のCFRPの補強効果は無視している。

$$\delta = 2 \left\{ \int_0^{\frac{L-L'}{2}} \frac{M\bar{M}}{EI} dx + \int_{\frac{L-L'}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{M\bar{M}}{EI'} dx \right\} \quad (1)$$

$L$  : 試験体材長 ( $L=4,000$  mm)

$L'$  : 減厚部分長さ ( $L'=500$  mm)

$E$  : ヤング係数

$I$  : H形鋼の断面2次モーメント

$I'$  : 減厚フランジおよびCFRPを考慮した有効断面2次モーメント

$M$  : 実荷重による曲げモーメント

$\bar{M}$  : 単位荷重による曲げモーメント

#### 3.2 ひずみ

ひずみゲージ貼付け位置のひずみ  $\varepsilon$  は、貼付け位置断面の曲げモーメント  $M$  と有効断面2次モーメント  $I'$  を用いて次式で表される。ただし、 $I'$  の計算には定着部分のCFRPを考慮する。

$$\varepsilon = \frac{M}{EI'} y \quad (2)$$

$y$  : 中立軸からひずみゲージ貼付け位置までの距離

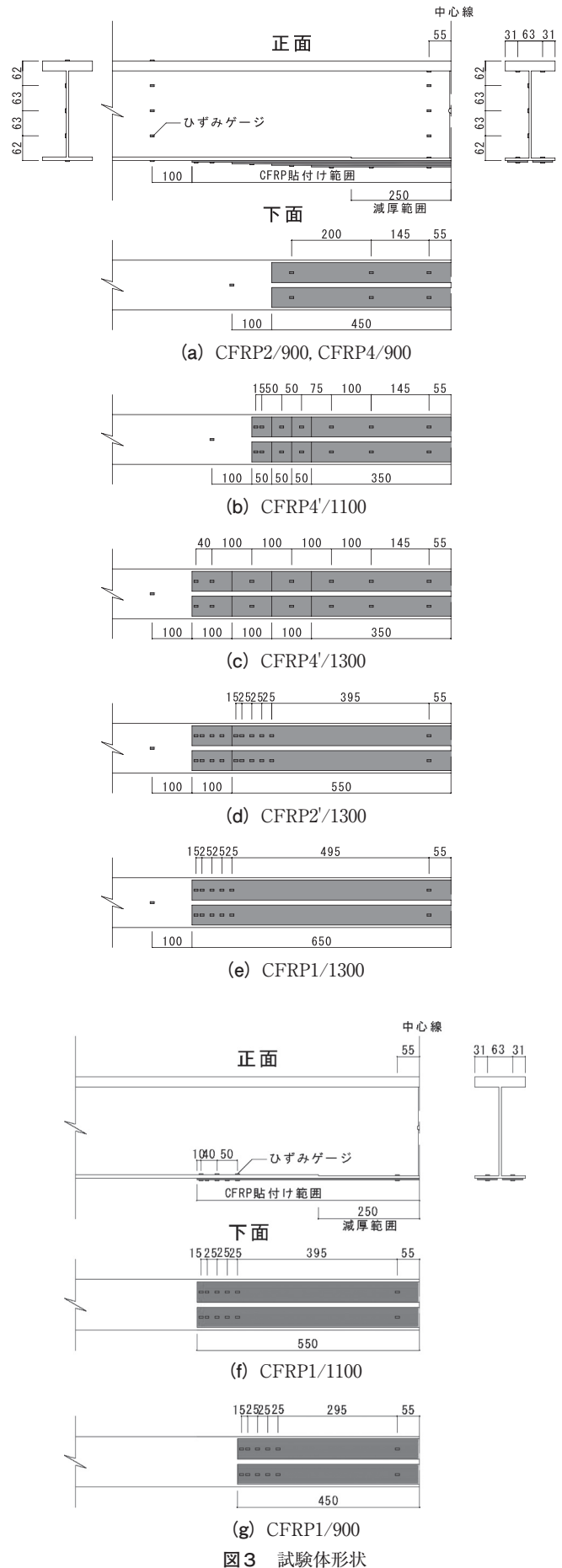


図3 試験体形状

#### 4 実験結果および考察

表4に実験結果を示す。CFRPの剥離で最大荷重が決定した試験体の破壊状況は、図4に示すような接着剤とCFRPあるいは梁フランジとの界面破壊である。

##### 4.1 曲げ剛性

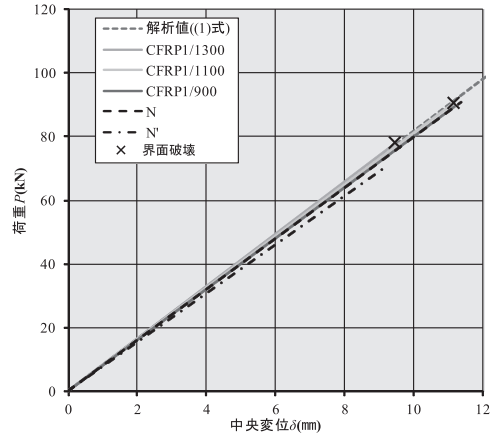
図5にCFRP層数別の荷重 $P$ -中央変位 $\delta$ 関係の実験値と(1)式を用いた解析値を示す。CFRP補強無の試験体 $N'$ と比較すると、CFRPを貼付けた全ての試験体の剛性が向上しており、CFRPを部分的に貼付けた場合においても試験体の剛性を向上させられることがわかる。また、(1)式より求めた中央変位 $\delta$ は、CFRP貼付け範囲を減厚範囲と同じ500mmで計算しているため若干の差異はあるものの、いずれの試験体にも良好に対応する結果となった。

##### 4.2 最大荷重

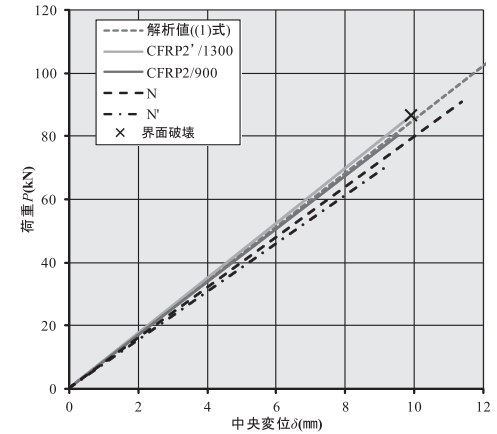
CFRPを複数層貼付けた場合におけるCFRPの剥離の原因をCFRP貼付け端部での剛性の急激な変化によるものという考えから、CFRP端部に段差を設け剛性の急激な変化を避けたCFRP4/1100, CFRP4/1300, CFRP2/1300を用意したが、最大荷重はCFRP2/900, CFRP4/900と殆ど同値である。また、CFRPを1層貼付けたCFRP1/1300, CFRP1/1100, CFRP1/900ともほぼ同値であることから、CFRPの剥離は剛性の急激な変化が原因ではないと推測され、CFRPの端部に段差を設けた貼付け工法は必ずしも有効でないと考えられる。



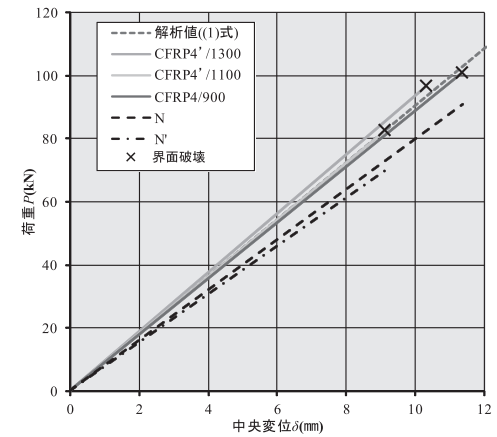
図4 破壊形状 (CFRP1/1100)



(a) CFRP1層



(b) CFRP2層



(c) CFRP4層

図5  $P$ - $\delta$ 関係

表4 実験結果

試験体名	最大荷重 $P$ (kN)	中央変位 $\delta$ (mm)	剛性 $P/\delta$ (N/mm) $N'$ との比	破壊状況	破壊位置
N	90.8	11.36	7993 1.04	無	-
$N'$	70.8	9.23	7671 1.00	無	-
CFRP4/900	100.8	11.33	8898 1.16	界面破壊	CFRP1層下面
CFRP2/900	80.5	9.51	8465 1.10	無	-
CFRP4/1100	82.3	9.07	9071 1.18	界面破壊	CFRP1層下面
CFRP4/1300	96.8	10.41	9407 1.23	界面破壊	CFRP1層下面
CFRP2/1300	86.5	9.89	8751 1.14	界面破壊	CFRP1層下面
CFRP1/1300	78.0	9.45	8245 1.07	界面破壊	フランジ下面
CFRP1/1100	90.5	11.15	8117 1.06	界面破壊	CFRP上面
CFRP1/900	89.5	11.16	8021 1.05	界面破壊	CFRP上面

4.3 ひずみ

図6にCFRP1/1100, CFRP1/900の各荷重におけるひずみゲージ貼付け位置のひずみを示す。CFRP端部に近づくにつれてCFRPのひずみが小さくなるとともに下フランジ上面のひずみが大きくなっている。なお、図中の点線は(2)式により求めたCFRP下面のひずみである。CFRPの端部から100mmおよび中央部のひずみは(2)式の値と良好に対応しており、平面保持の仮定が成立していることがわかる。

4.4 CFRPの剥離破壊

ひずみゲージをCFRP端部に集中的に貼付けたCFRP1/900, CFRP1/1100, CFRP1/1300, CFRP2/1300および、CFRP4/1300のCFRP端部近傍ひずみからCFRPの破壊メカニズムの解明を図る。

ひずみの低下は全ての試験体において、図6と同様に端部から100mmの範囲で発生している。

4.4.1 CFRPのひずみ

CFRP端部100mmの範囲のひずみを多項式で近似する。CFRP端部から距離 $x$ の位置におけるひずみ $\varepsilon$ を(3)式で仮定する。(3)式は $x=0, \varepsilon=0$ および $x=100, \varepsilon=\varepsilon_{100}$ を満足する多項式である。

$$\varepsilon = (-1)^{i-1} \frac{\varepsilon_{100}}{100^i} (x-100)^i + \varepsilon_{100} \quad (3)$$

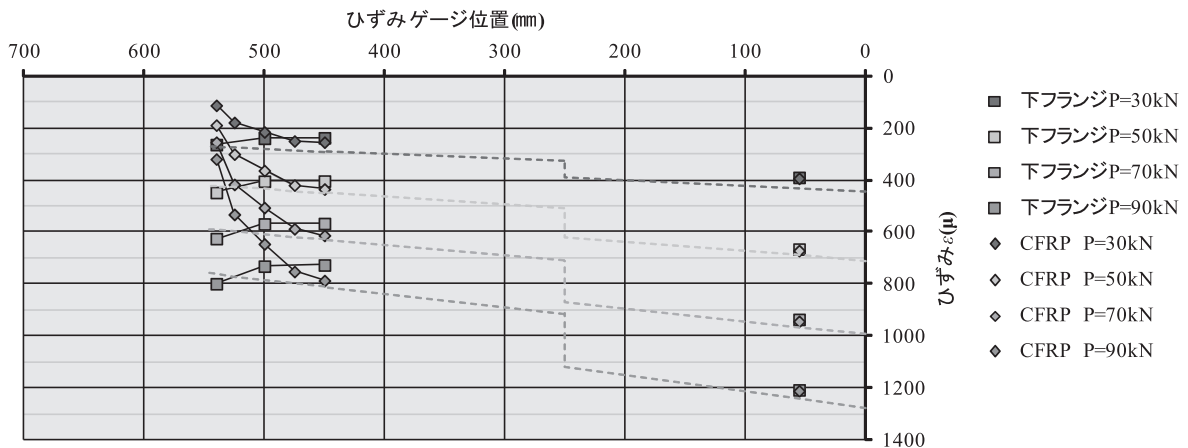
ここに、 $i$ : 正の整数

$\varepsilon_{100}$ : 端部から100mmの位置におけるひずみ

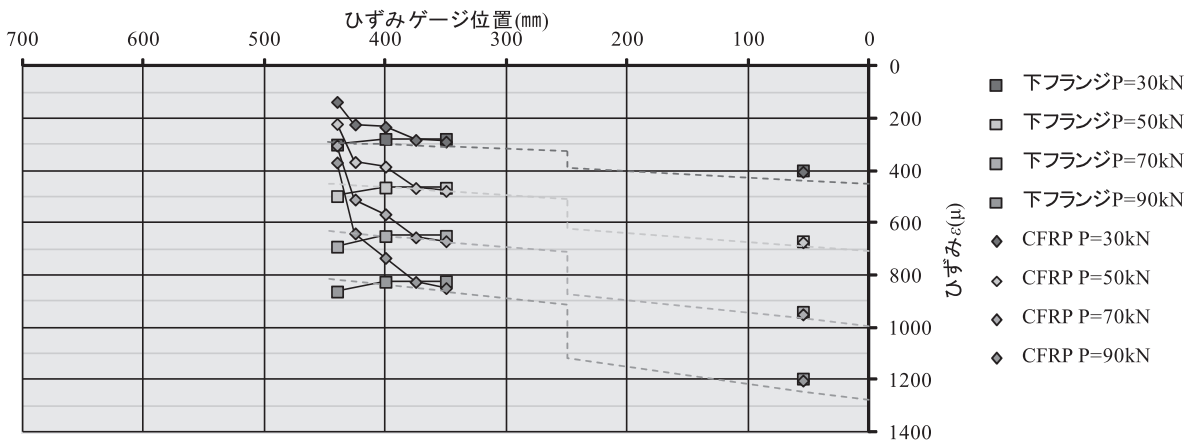
図7に最大荷重時におけるひずみを示す。図中に(3)式において、 $\varepsilon_{100}$ に実験結果を代入した $i=2\sim 8$ までの多項式曲線(ひずみ曲線)を併せて示している。 $i=4\sim 6$ としたひずみ曲線が実験結果をほぼ近似している。図8にCFRP1/1300およびCFRP2/1300の各荷重における実験値とひずみ曲線( $i=4\sim 6$ )を示す。各荷重においてもひずみ曲線が実験値をほぼ近似していることがわかる。

4.4.2 接着剤のせん断応力度

CFRPの垂直応力度 $\sigma$ は(3)式を用いて次式で表される。



(a) CFRP1/1100



(b) CFRP1/900

図6 ひずみ

$$\sigma = E_C \varepsilon = (-1)^{i-1} \frac{E_C \varepsilon_{100}}{100^i} (x-100)^i + E_C \varepsilon_{100} \quad (4)$$

ここに、

$E_C$ : CFRP のヤング係数 ( $E_C = 2.957 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ) 図 9 に示す CFRP の微小部分の力の釣合いより、接着剤のせん断応力度  $\tau$  は、次式で表される。

$$\tau = t \frac{d\sigma}{dx} = (-1)^{i-1} \frac{ti}{100^i} (x-100)^{i-1} E_C \varepsilon_{100} \quad (5)$$

ここに、 $t$ : CFRP 板厚

図 10 に最大荷重時におけるせん断応力度曲線を示す。(5) 式において  $\varepsilon_{100}$  に実験結果を代入して求めた曲線である。 $i = 6$  の場合に、端部のせん断応力度が接着剤の引張せん断強度  $\sigma_s = 24.7 \text{N/mm}^2$  にほぼ等しくなる。

(5) 式において最大せん断応力度  $\tau_{\max}$  は端部  $x=0$  の位置に作用する。

$$\tau_{\max} = \frac{ti}{100} E_C \varepsilon_{100} \quad (6)$$

図 11 に、(6) 式を用いて  $\tau_{\max} = \sigma_s = 24.7 \text{N/mm}^2$  から求めた  $\varepsilon_{100}$  を (3) 式に代入して求めたひずみ曲線を示している。 $i=6$  とした曲線が実験結果のほぼ平均値を示していることがわかる。

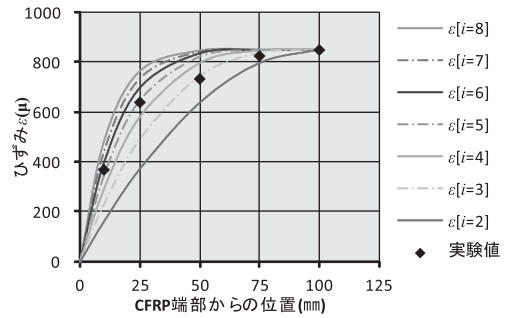
以上の結果より、CFRP 端部からの剥離破壊が接着剤の引張せん断破壊に関係していることが推察できる。そのため、以下の方法により剥離破壊を防止できると考えられる。

- 1) 接着剤の引張せん断強度  $\sigma_s$  を求める。
- 2) CFRP 端部近傍のひずみ近似多項式を求める。
- 3) ひずみ曲線を用いて接着剤のせん断応力度曲線を求める。
- 4) 端部のせん断応力度  $\tau_{\max}$  が  $\sigma_s$  に等しくなる時の端部から 100mm の位置の CFRP のひずみ  $\varepsilon_{100}$  を求める。
- 5) 端部から 100mm の位置の CFRP ひずみが  $\varepsilon_{100}$  以下となるような曲げモーメント  $M_{100}$  を平面保持の仮定を用いて求める。この点の曲げモーメントを  $M_{100}$  以下となるように設計する。

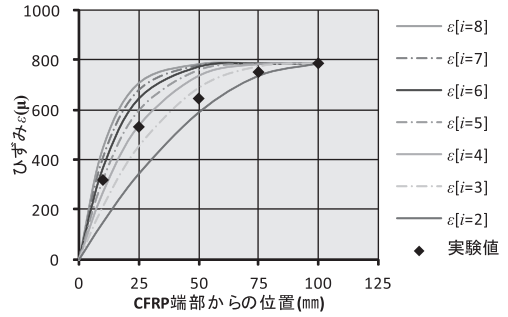
## 5 まとめ

本実験から得られた知見を以下に示す。

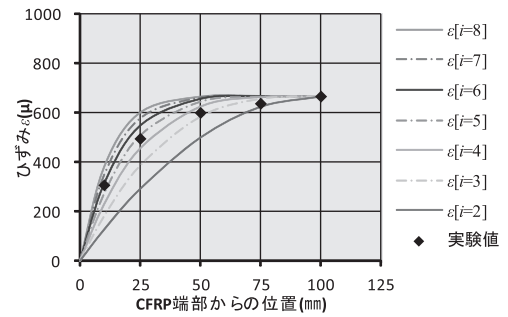
- (1) フランジ減厚部分に CFRP を貼付けることにより剛性が向上する。
- (2) CFRP 貼付け中央部では平面保持の仮定が成立し、減厚部分のみに有効断面 2 次モーメントを用い (1) 式により精度良くたわみを計算できる。
- (3) CFRP4 層貼付けにおいて、段状貼付けを採用しても界面破壊を起こす。
- (4) CFRP 端部では平面保持の仮定が成立せず、端部に近づくにつれ CFRP のひずみが小さくなるととも



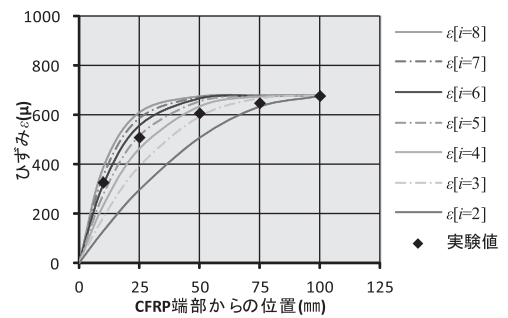
(a) CFRP1/900



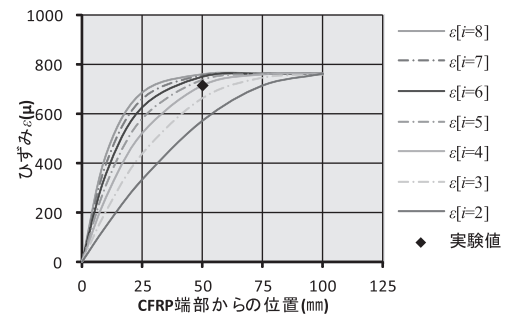
(b) CFRP1/1100



(c) CFRP1/1300



(d) CFRP2/1300



(e) CFRP4/1300

図 7 ひずみ曲線

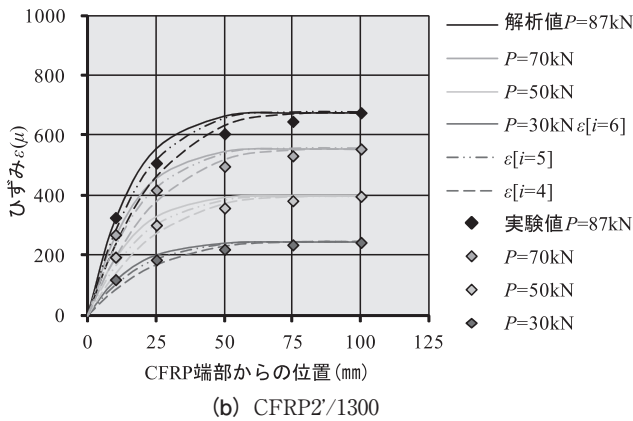
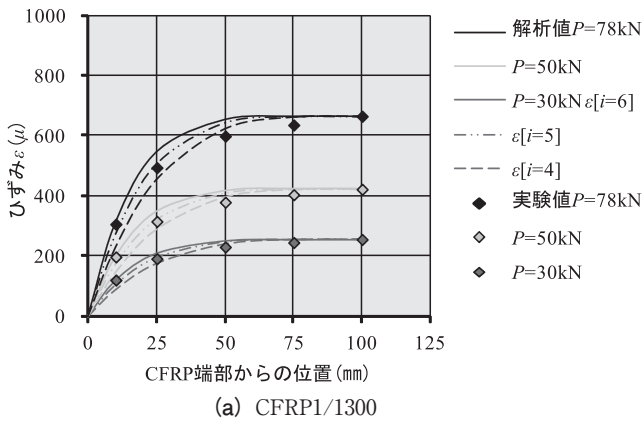


図8 荷重別ひずみ曲線

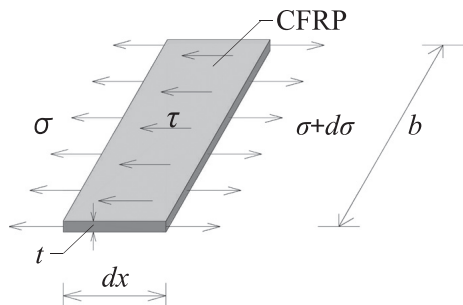


図9 CFRP 微小部分の力のつり合い

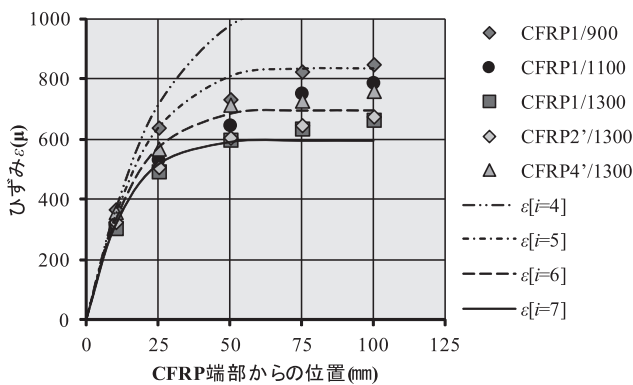


図11 ひずみ曲線 ( $\tau_{max} = \sigma_s = 24.7N/mm^2$ )

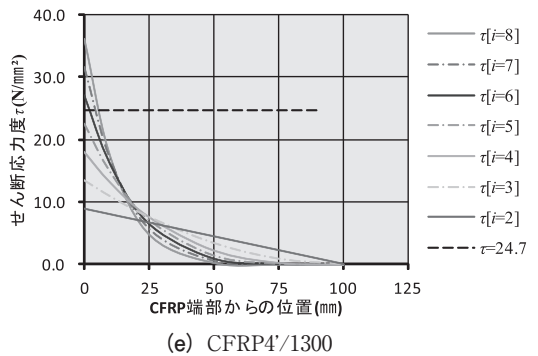
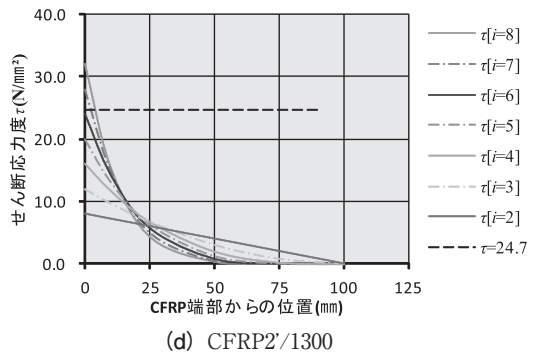
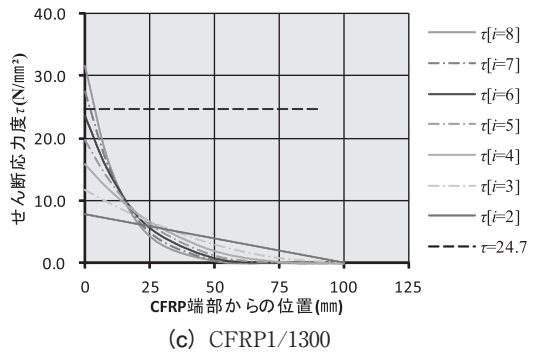
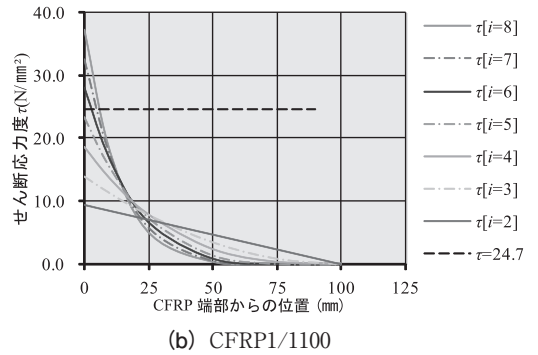
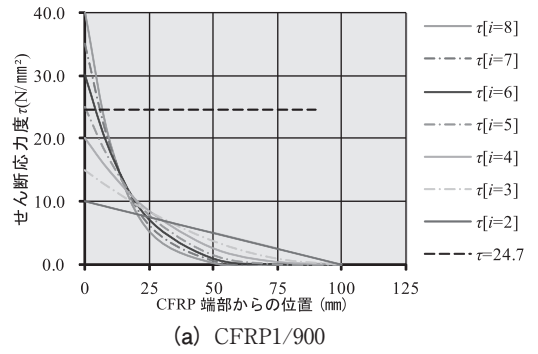


図10 せん断応力度曲線

に下フランジ上面のひずみが大きくなる。

- (5) CFRP 端部のひずみ分布は (3) 式において  $i=6$  の時にもっとも良好に対応し、せん断応力度分布は (5) 式 ( $i=6$ ) 求められる。

今後は、CFRP の層数・長さ・貼付け位置を変化させた試験体の 3 点曲げ実験および 4 点曲げ実験を行い、破壊メカニズムのより正確な評価方法の解明に向けて研究を行う予定である。

### 謝 辞

本実験においては広島工業大学高松研究室卒業研究生および大学院生の皆様に御協力頂きました。また、接着剤はコニシ株式会社に提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 原伸幸, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 角田敦, 服部明生: 連続繊維プレートによる鋼構造建物の長寿命化に関する基礎的研究: その 3: 補強 H 形鋼はりの載荷試験, 日本建築学会中国支部研究報告集 27, pp.225-228, 2004.3
- 2) 原伸幸, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生, 小畑寛行: 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: その 1 実験方法, 日本建築学会中国支部研究報告集 28, pp.161-164, 2005.3
- 3) 原伸幸, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生, 小畑寛行: 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: その 2 実験結果, 日本建築学会中国支部研究報告集 28, pp.165-168, 2005.3
- 4) 服部明生, 高松隆夫, 玉井宏章, 小澤吉幸: フランジ断面欠損部を有する H 形鋼梁の炭素繊維プレート補修に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, CD-ROM 論文番号 -239 2013.3
- 5) 宮下剛, 石川敏之: 多層の CFRP 板が積層された曲げを受ける鋼部材の応力解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp26-39, 2013.