

# H形鋼梁に貼付けたCFRPの破壊性状に関する実験的研究

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

(平成26年10月30日受付)

## Experimental study on CFRP fracture behavior bonding H-shaped steel beam

Takao TAKAMATSU, Akeo HATTORI, Hiroyuki TAMAI and Shinsuke FUJIMOTO

(Received Oct. 30, 2014)

### Abstract

An experimental study on H-shaped steel beam bonded CFRP plate is carried out to investigate CFRP fracture mechanism. Four-points bending tests are employed to clarify load-deformation curves of the beams strengthened by the CFRP plates partially bonding tension flange. The usual bonding type of specimens show CFRP fracture, but a new bonding type of specimens, that the CFRP plate is bonded without both edges, show no CFRP fracture.

**Key Words:** CFRP, Four-points bending test, Fracture

## 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点曲げ実験および4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り、いずれもCFRPの端部から剥離している。

そこで、本研究では4点曲げ実験において、CFRP端部への影響を軽減する目的でCFRPを端部無接着貼付けとした場合の試験体の実験を行い、CFRPを通常貼付けとした場合との比較により、CFRP破壊メカニズムの解明を図る。

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。

本研究では、CFRP端部のひずみ計測を行い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

4点曲げ実験を行う。図1に荷重位置と変位計測位置を示す。

計測は、荷重装置から求められた荷重の半分を $P$ とし、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2に示すひずみゲージ貼付け位置のひずみ $\varepsilon$ を計測する。

荷重プログラムは単調荷重とし、CFRPの剥離破壊もし

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 東レ建設(株) 技術部 博士(工学)

\*\*\* 長崎大学工学部工学科 教授 博士(工学)

\*\*\*\* 東レ建設(株) 技術部

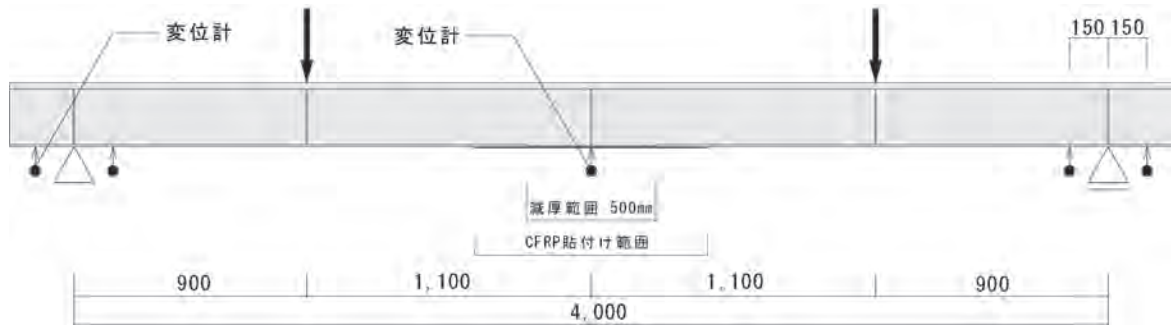


図1 荷重および変位計測位置

くは H 形鋼梁の降伏ひずみまで荷重する。

## 2.2 試験体

試験体形状を図2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，断面欠損有の N' と，通常貼付けの CFRP4/1100fs および貼付け端部部分に接着剤を塗布していない CFRP4/1100fnS(100)，CFRP4/1100fnS(50)，CFRP4/1100fnS(30)，CFRP4/1100fnS(20)，CFRP4/1100fnS(10)，CFRP4/1100fnS(0) による 8 体である。なお，CFRP4/1100fnS は同一の試験体を使用し，無接着部分を糸鋸で切断し長さを調節している。

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 <sup>δ</sup> %	
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

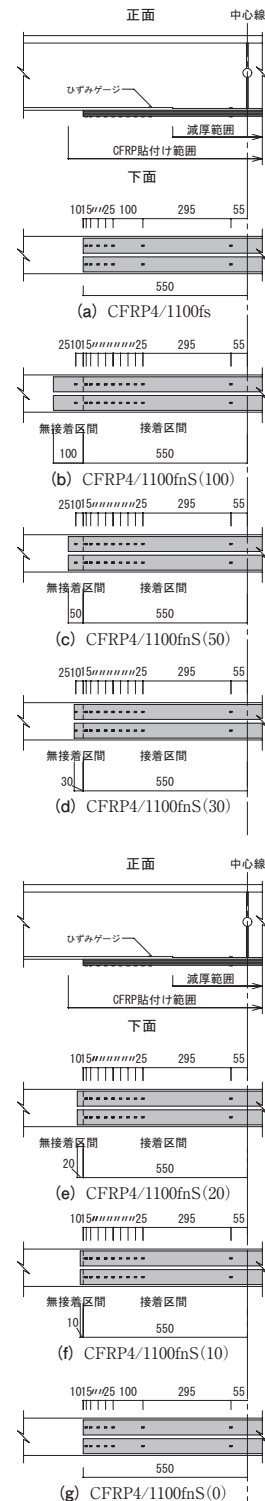


図2 試験体形状

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

表3 試験体一覧

試験体	減厚	CFRP 層数	接着面長さ (mm)	無接着面長さ (mm)
N'	有	0	-	-
CFRP4/1100fS	有	4	1100	-
CFRP4/1100fnS(100)	有	4	1100	100
CFRP4/1100fnS(50)	有	4	1100	50
CFRP4/1100fnS(30)	有	4	1100	30
CFRP4/1100fnS(20)	有	4	1100	20
CFRP4/1100fnS(10)	有	4	1100	10
CFRP4/1100fnS(0)	有	4	1100	-

### 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。

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

$L$ : 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

### 4 実験結果および考察

表4に実験結果を示す。通常貼付けによる実験ではCFRPの剥離で最大荷重が決定した試験体の破壊状況は、写真1に示すようなCFRPの層内破壊であるが、今回行った端部無接着貼付けによる実験では確認されていない。

#### 4.1 曲げ剛性

図3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。

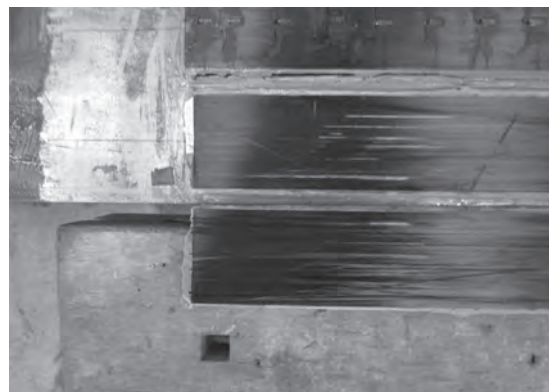


写真1 破壊形状 (CFRP4/1100)

表4 実験結果

試験体	荷重 $P$ (kN)	変位 $\delta$ (mm)	剛性 $P/\delta$ (N/mm)	$N'$ との比	破壊状況	破壊位置
$N'$	111.5	17.81	6261	1.00	-	-
CFRP4/1100fS	103.5	14.6	7089	1.13	層内破壊	CFRP1層
CFRP4/1100fnS(100)	121.3	16.70	7261	1.16	-	-
CFRP4/1100fnS(50)	121.1	16.57	7306	1.17	-	-
CFRP4/1100fnS(30)	121.7	16.72	7278	1.16	-	-
CFRP4/1100fnS(20)	120.8	16.53	7310	1.17	-	-
CFRP4/1100fnS(10)	121.1	16.68	7261	1.16	-	-
CFRP4/1100fnS(0)	121.1	16.72	7244	1.16	-	-

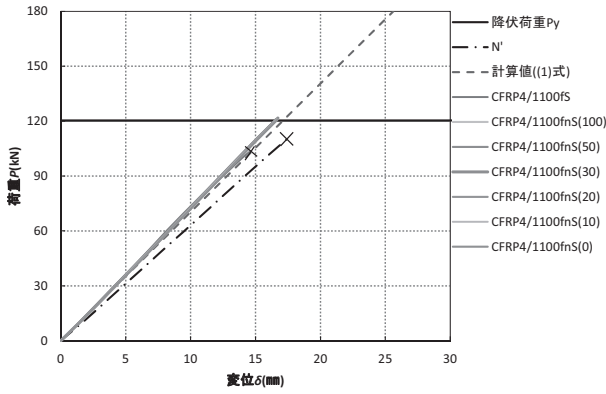


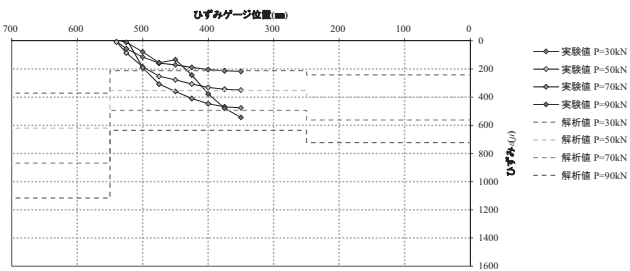
図3 P-δ関係

#### 4.2 最大荷重

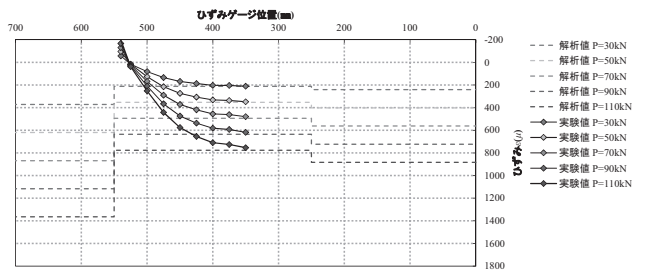
CFRP 貼付け端部への影響を避けた CFRP4/1100fnS は各実験において解析値における降伏荷重に達しても破壊が確認されなかった。通常貼付けとした CFRP4/1100fs においての最大荷重は降伏荷重を上回ることはないと考えられるため、CFRP の剥離を回避するには CFRP の切断時に生じる CFRP の端部における微小亀裂を防止することが有効であると考えられる。

#### 4.3 ひずみ

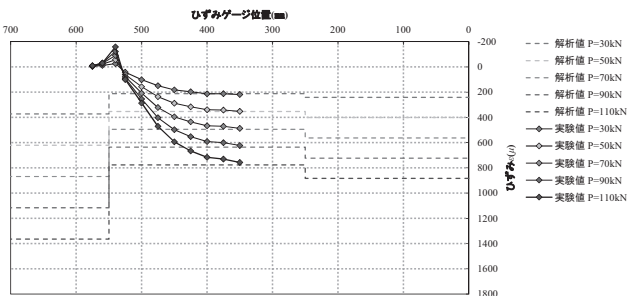
図4にCFRP4/1100fs, CFRP4/1100fnS(100), CFRP4/



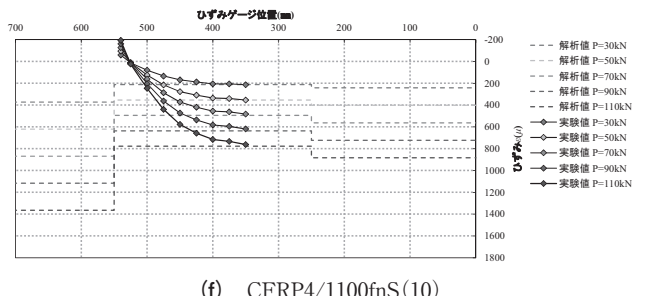
(a) CFRP4/1100fs



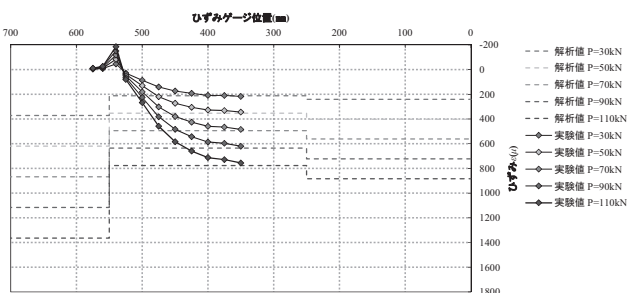
(e) CFRP4/1100fnS(20)



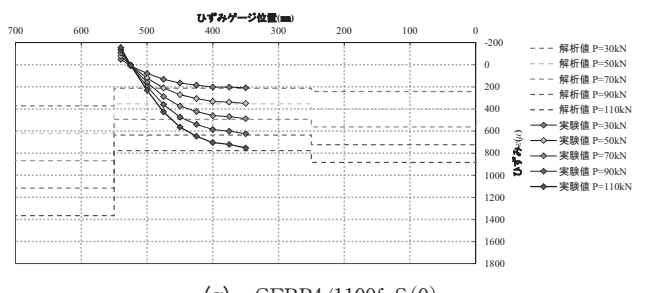
(b) CFRP4/1100fnS(100)



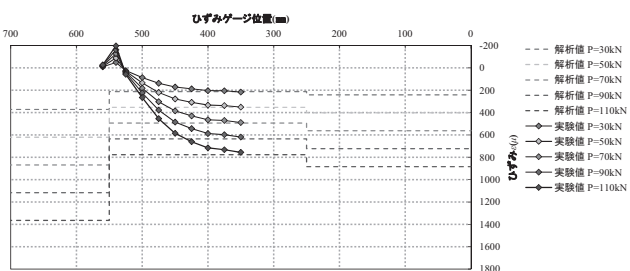
(f) CFRP4/1100fnS(10)



(c) CFRP4/1100fnS(50)



(g) CFRP4/1100fnS(0)



(d) CFRP4/1100fnS(30)

図4 ひずみ

1100fnS(50), CFRP4/1100fnS(30), CFRP4/1100fnS(20), CFRP4/1100fnS(10), CFRP4/1100fnS(0)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。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。しかし、CFRP4/1100fnSの各ひずみは端部にマイナス方向のひずみを確認できる。CFRP4/1100fnSは端部部分に曲げによる圧縮側のひずみを生じさせている。

#### 4.4 CFRPの剥離破壊

端部無接着貼付けによるCFRP4/1100fnS(100), CFRP4/1100fnS(50), CFRP4/1100fnS(30), CFRP4/1100fnS(20), CFRP4/1100fnS(10), CFRP4/1100fnS(0)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4と同様に端部から100mmの範囲で発生している。無接着貼付け長さは、ひずみの低下傾向にほとんど影響しないことがわかる。

### 5 まとめ

本実験から得られた知見を以下に示す。

- (1) 端部無接着貼付けにすることにより端部からのCFRP破壊を防止することが可能である。
- (2) CFRPの剥離は貼付け端部から発生し、端部のひずみ低下に対応している。
- (3) 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。
- (4) 端部無接着貼付けの場合、端部のひずみは圧縮ひずみとなる。
- (5) CFRP4/1100fnSの場合、無接着部分に欠損が生じても破壊が起きなかったため、CFRPの破壊メカニ

ズムには接着部分の断面欠損が関わっていると考えられる。

今後は端部無接着工法により圧縮側での小梁のCFRPによる補強が可能であるかの検討もしていく。

### 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 A 1 (構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp.26-39, 2013.

