

積層した炭素繊維プレートによる H形鋼梁の補剛工法に関する実験的研究

山西 央朗*・高松 隆夫**・藤本 信介***・三島 範之*

(平成29年11月1日受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON STIFFENING FOR H-SHAPED STEEL BEAM USING LAMINATED CARBON-FIBER-REINFORCED-PLASTIC-PLATES

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU, Shinsuke FUJIMOTO and Noriyuki MISHIMA

(Received Nov. 1, 2017)

Abstract

This paper reports the results of bending tests conducted on a Narrow H-shaped steel beam before and after rehabilitation using CFRP plates. These results show enhanced flexural rigidity and the moment carrying capacity of the beam due to bonding CFRP plate. An analytical model is also proposed that can predict the flexural rigidity of rehabilitated steel beam.

Key Words: CFRP, 4 loading test, multi-layer-of CFRP plate

1. はじめに

著者等は、小梁を想定したH形鋼に炭素繊維プレートを貼付け、3点および4点曲げ載荷実験を行い、曲げ剛性・耐力の向上を図る研究を行っている^{1~8)}。

既往の研究より、4点曲げの等曲げ区間(最大応力発生領域)への部分貼付けにより、CFRPを通常貼付け^{1~5)}(全層同一長)、継手貼付け⁶⁾(下層のCFRPが不連続(複数枚で構成)でこれを覆うように上層のCFRPを接着した工法)及び段状貼付け⁸⁾(下層より上層を短く端部を階段状とした工法)を施した試験体の全てにおいてCFRPの積層数に比例した補剛効果が得られることを確認している。

しかしながら、等曲げ区間における部分貼付けでは、多層にすることにより引張側に貼付けたCFRP端部から界面破壊、層内破壊及び剥離破壊が生じる⁸⁾。これは、梁部材曲げ存在応力(以後、存在応力と記す)が大きい部位に定着部を設けることで、CFRPと梁フランジの垂直ひずみ差異が広がる、すなわち、定着部の接着剤に作用するせん断応

力度が大きくなることに基因している。

そこで本論文では、補剛・補強対象区間全長貼付けを実施し、定着部を存在応力の比較的小さい部位に設けることで、接着剤に作用するせん断応力度の低減を図っている。方法として4点曲げ実験を行い弾性剛性の向上と多層貼付けでの剥離破壊、層内破壊が生じないことを確認する。

2. 補強・補剛対象区間全長貼付けの定義

両端部から200mmの区間においては、接着剤に大きなせん断応力度が発生し、接着剤は当該存在応力に抵抗する必要がある。この区間を“定着部”と呼び、定着部の領域においてはCFRPによる補強・補剛効果は小さいので、両端定着部内側の区間で補強・補剛効果が得られると考える。本研究では、補強・補剛の対象部位においてCFRPによる補強・補剛効果が得られる貼付け工法を、“補強・補剛区間全長貼付け”と定義する。また、CFRPによる補強・補剛効果を得るために、存在応力が被補強材内における最大応力の半分の値となる位置で定着部が終了するように貼付け

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学

*** 東レ建設株式会社

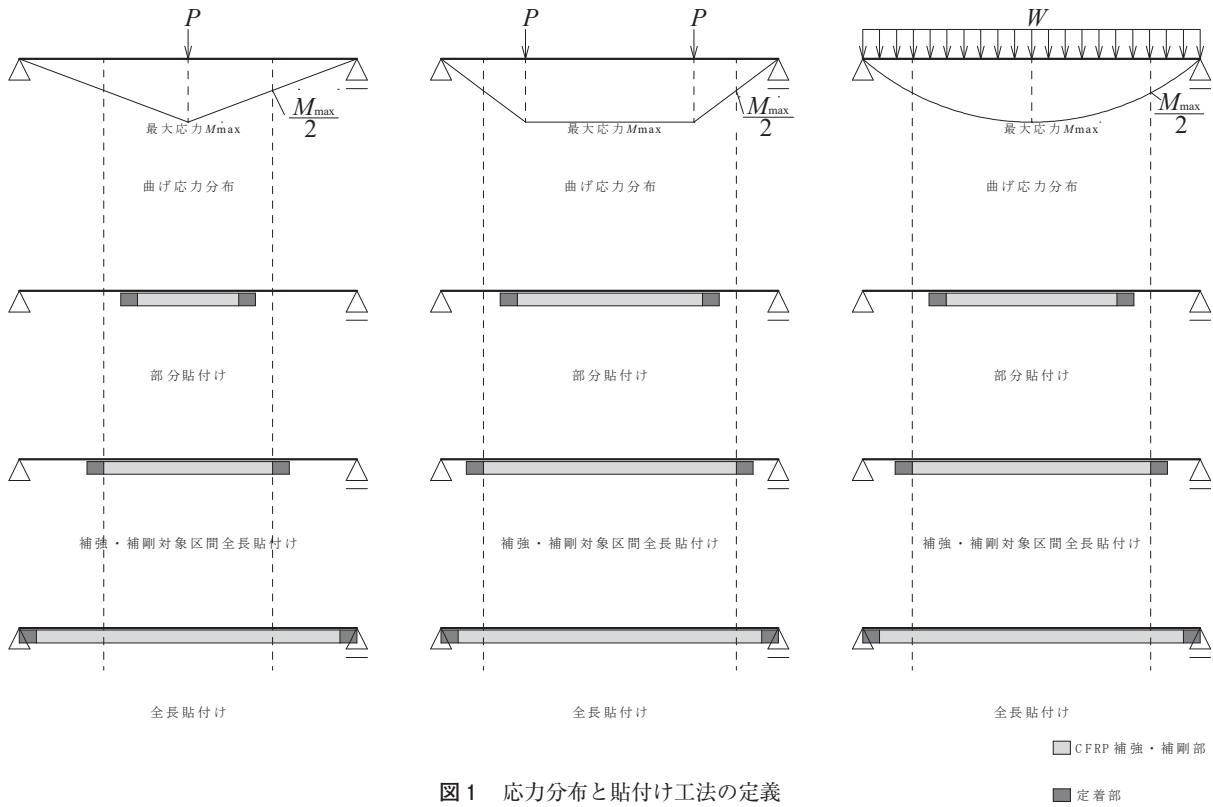


図1 応力分布と貼付け工法の定義

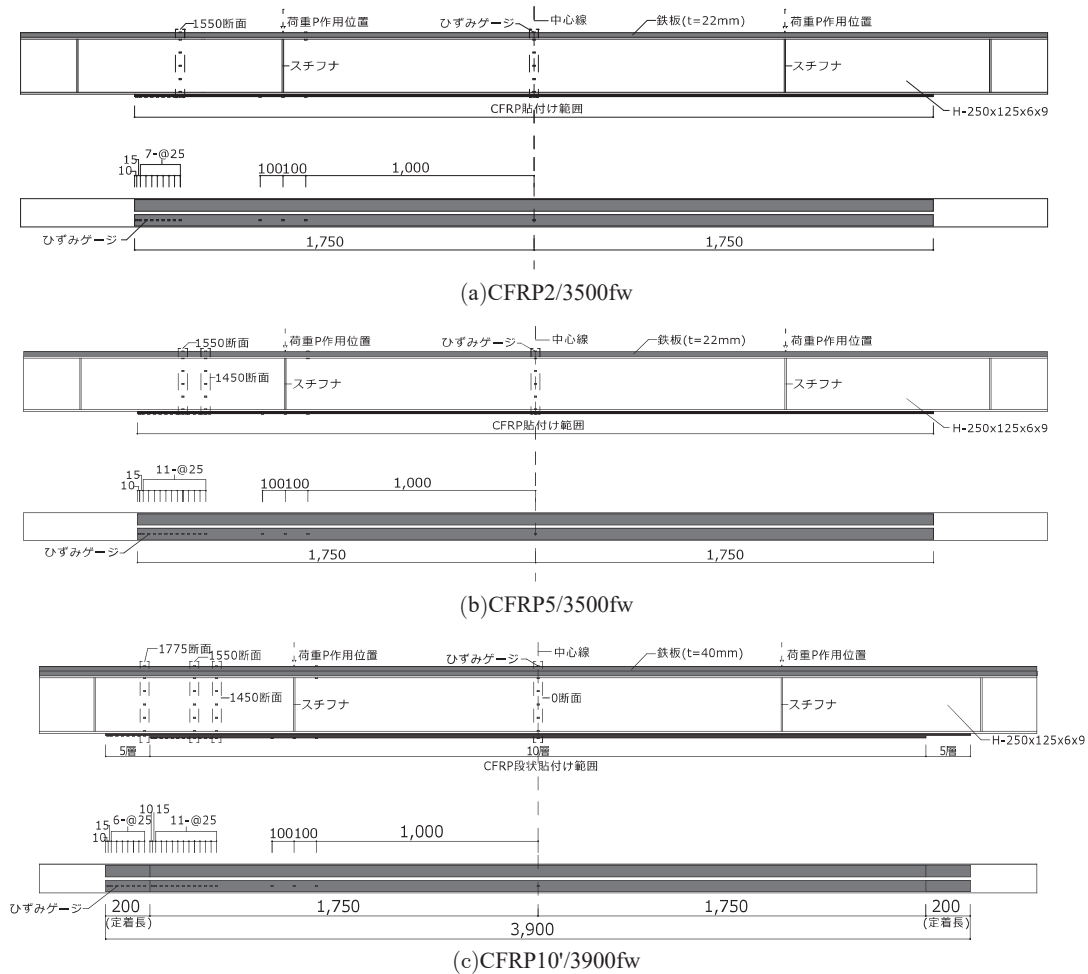


図2 試験体形状

表 1 素材特性

	材質	E (N/mm ²)	σ_Y (N/mm ²)	σ_U (N/mm ²)	σ_Y/σ_U (N/mm ²)	ε (%)
梁フランジ	SS400	205,000	321	447	72	26
梁ウェブ	SS400	205,000	348	462	75	28
鋼材	SS400	205,000	281	449	63	32
CFRP	ML	295,700	—	2,169	—	0.7

E : ヤング係数 σ_Y : 降伏応力度 σ_U : 引張強さ ε_y : 伸び

表 2 接着剤の特性

	材質	E (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)
E258R	エポキシ樹脂	3,000	81.5	37.3	24.7

E : ヤング係数 σ_c : 圧縮強度 σ_t : 引張強度
 σ_s : 引張せん断強度

する。図 1 に、小梁における代表的な曲げ応力分布、補強・補剛区間全長貼付けと部分貼付けの概念図を示す。

尚、被補強材全長に渡って貼付ける場合を、“全長貼付け”と定義する。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

表 1 に試験体及び炭素繊維プレート (CFRP) の素材特性を、表 2 に接着剤の素材特性を、図 2 に試験体形状をそれぞれ示す。

試験体に H 形鋼は H-250×125×6×9 の断面を採用し、H 形鋼片側フランジには鋼構造のコンクリートスラブを想定した板厚 22 mm の鋼板を CFRP 2 層、5 層試験体には 1 層を、CFRP 10 層試験体には 2 層を接着剤により貼り付けている。尚、鋼板については、H 形鋼全長に渡って貼付けしており、存在応力が生じる区間全長において H 形鋼と一体化 (平面保持の仮定が成立) すると考える。

CFRP に中弾性 (ML) 型、幅 50 mm、板厚 2 mm を使用し、2 列貼付けとする。接着剤には二液性タイプの常温硬化型エポキシ樹脂を使用する。CFRP 貼付け部にはグラインダーとベルトサンダーで黒皮を除去した後にサンドペーパー #240、#1500 で表面を平滑にした後に CFRP を貼付ける。尚、接着剤の分量は主剤 2 : 硬化剤 1 の割合で調合する。養生期間は 14 日程度である。

試験体は 2 層、5 層、10 層の 3 体とし、2 層と 5 層は通常貼付けとし、10 層は段状貼付けとしている。試験体名は CFRP2/3500 fw, CFRP5/3500 fw, CFRP10/3900 fw とする。

3.2 計測方法

計測方法として、荷重は載荷装置の油圧計測により計測

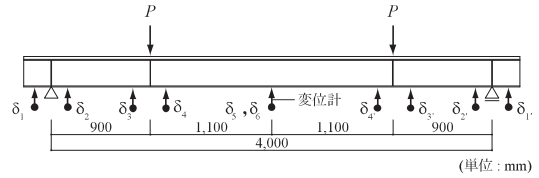


図 3 変位計測位置

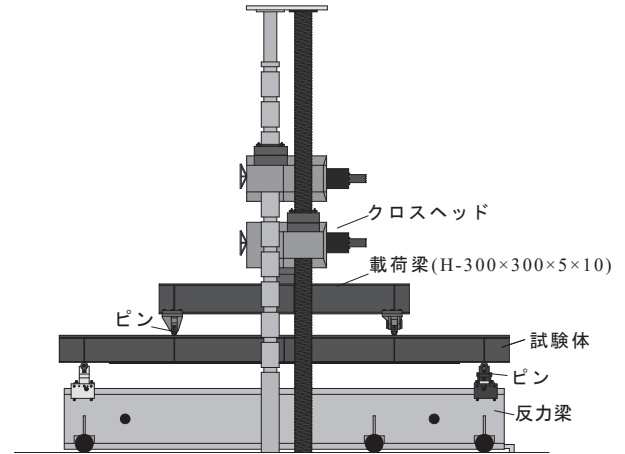


図 4 載荷装置

する。変位は図 3 に示した変位計位置により計測する。ひずみは図 2 で示した計測位置にひずみゲージを貼付けて、それぞれ計測する。尚、計測値の整理方法として荷重 P は油圧計測値の 1/2 としている。

3.3 載荷装置及び載荷方法

載荷方法は引張側フランジに CFRP を補剛・補強全長貼付けし、両端ピン支持とした H 形鋼小梁の 4 点曲げ実験である。荷重は単調載荷とし、CFRP の剥離もしくは H 形鋼梁の降伏荷重まで行う。尚、両端ピン支点から 900 mm の位置を載荷点とし、中央部を 2,200 mm の等曲げ区間としている (図 4)。

4. 解析方法

4.1 中央変位

変位は梁中央部に設置した変位計により変位 δ_5, δ_6 を両端からピン支持に設置した変位計により変位 $\delta_1, \delta_2, \delta_1', \delta_2'$ を、荷重点に設置した変位計により変位 $\delta_3, \delta_4, \delta_3', \delta_4'$ を、それぞれ計測する (図 3)。以上の計測値より、中央変位 δ を次式により算出する。

$$\delta = \frac{\delta_5 + \delta_6}{2} - \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_1' + \delta_2'}{4} \quad (1)$$

4.2 ひずみ

ひずみゲージ貼付け位置のひずみ ε は、貼付け位置断面の曲げモーメントと CFRP 貼付けを考慮した有効断面 2 次

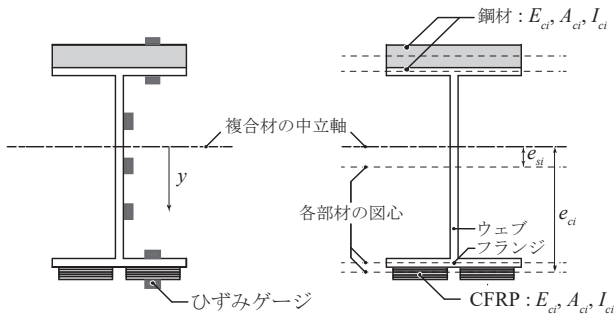


図5 解析モデル

表3 実験結果

試験体名称	最大荷重 P (kN)	中央変位 δ (mm)	弾性剛性 K (kN/mm)
N 試験体	135.10	16.81	8.10
CFRP2/1100 fw	126.30	13.84	9.18
CFRP2/3500 fw	174.01	16.96	10.25
CFRP5/3500 fw	191.02	14.68	12.99
N' 試験体	76.62	7.24	10.61
CFRP10'/3900 fw	202.52	8.30	24.29

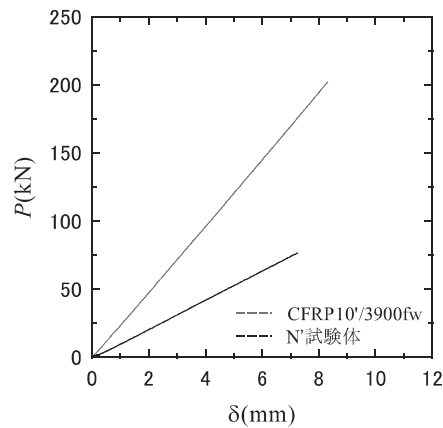
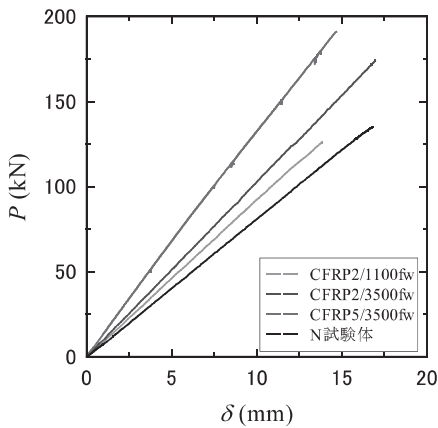


図6 P-δ 関係

モーメント用いて次式で算出する。

$$\varepsilon = \frac{M}{E_s \cdot I'} \cdot y \quad (2)$$

M : 曲げモーメント

E_s : 鋼材のヤング係数

I' : 補強材料を考慮した有効断面 2 次モーメント

y : 複合材中立軸からひずみゲージ貼付け位置までの距離。

尚、補強材料を考慮した有効断面 2 次モーメント I' は図 5 解析モデルの定義を用いて次式にて算出する。H 形鋼のフ illet 面積は考慮していない。

$$I' = \sum_{i=1}^n (I_{si} + A_{si} \cdot e_{si}^2) + \frac{E_c}{E_s} \cdot \sum_{i=0}^n (I_{ci} + A_{ci} \cdot e_{ci}^2) \quad (3)$$

I_{si} : i 番目鋼材の断面 2 次モーメント

A_{si} : i 番目鋼材の断面積

e_{si} : 複合材の中立軸から i 番目鋼材の図心間距離

E_c : CFRP のヤング係数

I_{ci} : i 番目補強材料の断面 2 次モーメント

A_{ci} : i 番目補強材料の断面積

e_{ci} : 複合材の中立軸から i 番目補強材料の図心間距離

5. 実験結果および考察

5.1 P-δ 関係

表 3 に実験結果を、図 6 に P-δ 関係をそれぞれ示す。尚、

表 3、図 6 には比較として無補強 N 試験体と既往の研究より CFRP2/1100 fw の実験結果を併せて示している。

表 3、図 6 より、CFRP の層数の増加に対して比例的に弾性剛性は増大している。厳密には、層数が増大する毎に弾性剛性の増大効率は低下する傾向にあるものの、支配的ではなく、層数の増大による剛性増大にほぼ期待できることがわかる。

更に、既往の研究では、部分貼付けでは 4 層接着が限界であり、梁のみの降伏荷重 ($P \approx 200$ kN) 近傍で定着部から接着剤の凝集破壊または接着剤・CFRP 間の剥離破壊が生じていたが、図 6 の 5 層および、10 層対象区間全長貼付けにおいては前述の破壊が発生しなかった。これは、定着部を相対的に存在応力の小さな区間に設けることで、界面および接着層内のせん断応力度の低減を実現したことに基因する。従って、対象区間全長貼付けを実施することにより、剛性の増大、最大荷重の増大を同時に現実することが可能となる。

以上より、CFRP の使用量は増加するものの、対象区間全長貼付けを実施することで合理的な接着効果が得られると言える。

5.2 平面保持の仮定

図 7 に各断面のひずみ分布を示す。尚、図 7 には H 形鋼

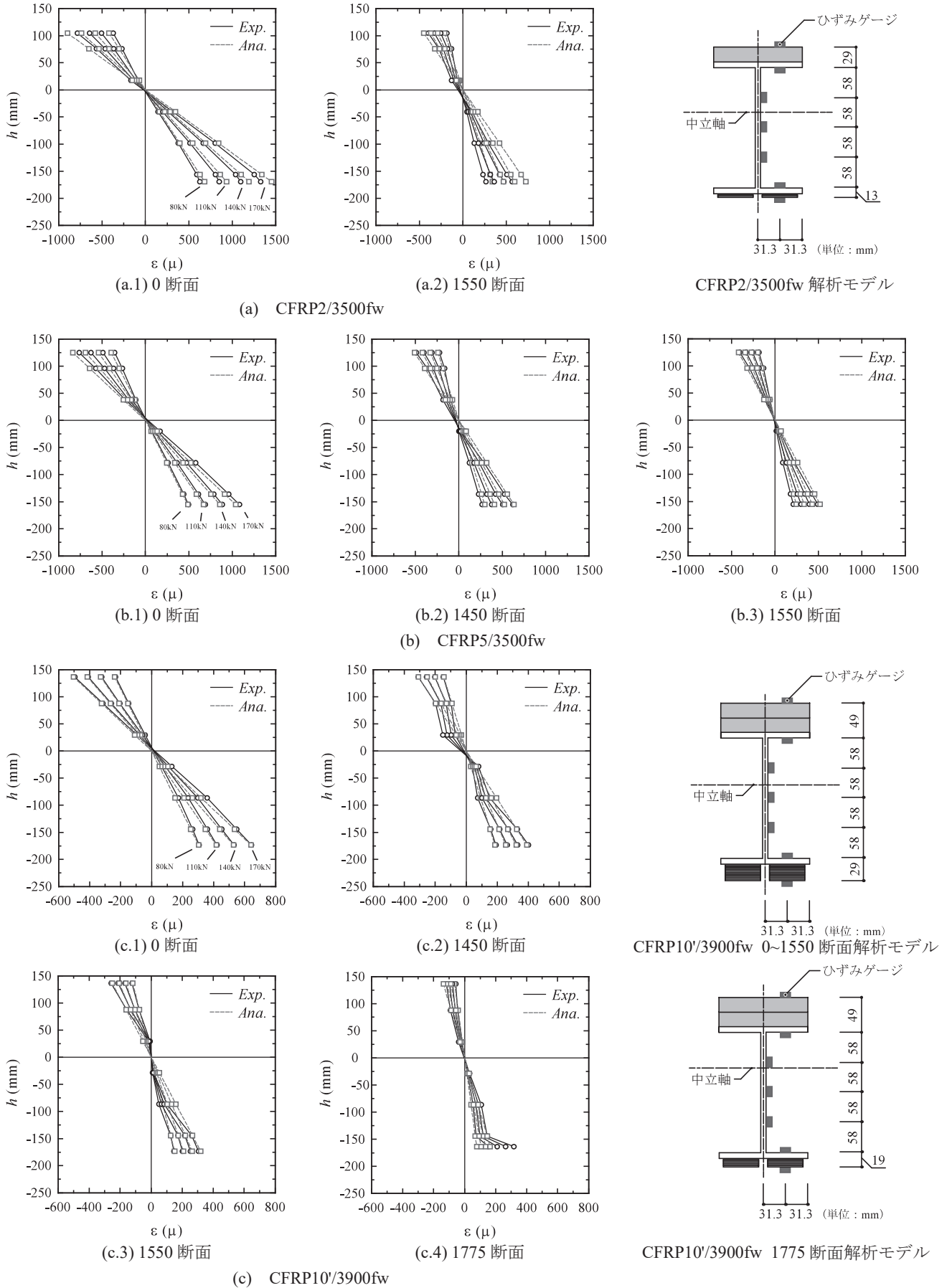


図7 各断面の平面保持

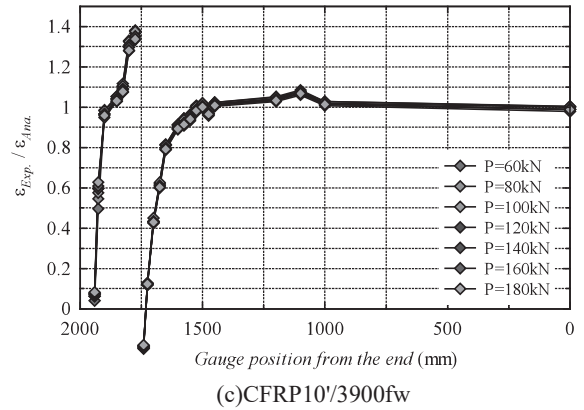
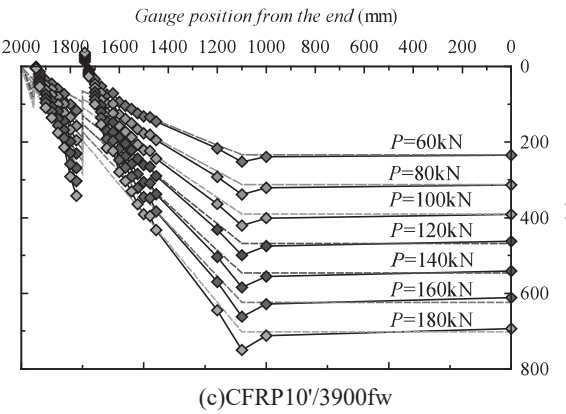
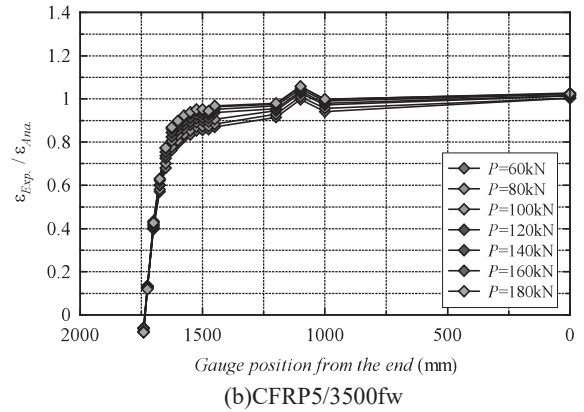
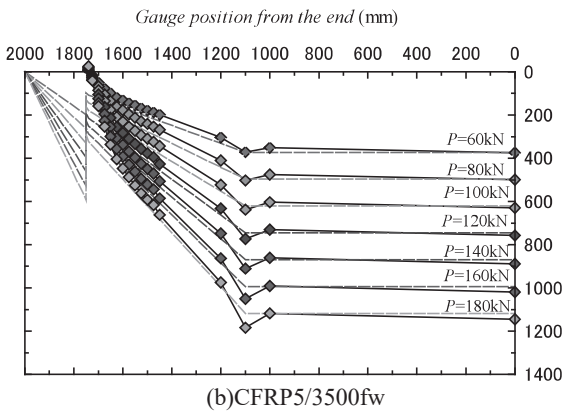
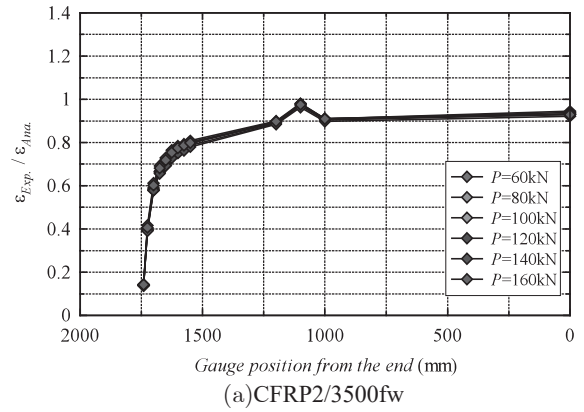
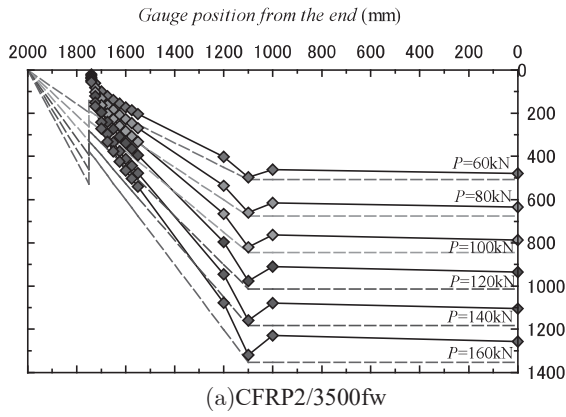


図8 CFRP軸方向ひずみ分布

図9 CFRP軸方向ひずみ比分布

強軸方向のひずみ分布を示し、高さ h は中立軸位置を 0 と定義している。また、(2) 式により算出した各断面の解析値 ($Ana.$) を併せて示し、任意荷重時のひずみ分布を示している。

図7 (a), (b) および (c) の、0 断面より、ひずみは直線的な分布を示していることから平面保持の仮定が成立しているといえる。また、(a), (b) では CFRP 端部より 200 mm の位置となり、定着部終了位置である 1550 断面も平面保持の仮定が成立している。従って、当該位置より内側にあたっては、補剛・補強効果が得られるため、(2) 式により評価できることがわかる。しかし、CFRP10'/3900 fw は、モーメント勾配位置にある CFRP 最上部より 200 mm の位

置に相当する 1550 断面と 300 mm の位置に相当する 1450 断面では、ウェブ部分において直線性が失われ、平面保持の仮定が成立していない。ウェブの応力状態を確認するために、後述の 5.3 にて平面応力状態を確認しているが弾性範囲に留まっている。ひずみゲージの不具合等も考えて、計測方法を工夫したが、ウェブ部分のひずみ分布の乱れは解消されなかった。当該試験体においては、フランジ部分による曲げ剛性の支配率が極端に高く、かつ接着剤により母材軸方向になだらかに断面諸量が変化していくことに基因した潜在的な結果であるかもしれない。

但し、いずれも縁応力度は解析値と一致しており、曲げ変形に対する補剛効果の観点から、1550 断面の位置で CFRP

表 4 実験結果

試験体名称	最大荷重 P (kN)	中央変位 δ (mm)	弾性剛性 K (kN/mm)	弾性剛性比
N 試験体	135.10	16.81	8.10	1.00
CFRP2/3500 fw	174.01	16.96	10.25	1.27
CFRP5/3500 fw	191.02	12.99	1.60	
N' 試験体	76.62	7.24	10.61	1.00
CFRP10'/3900 fw	202.52	8.30	24.29	2.29

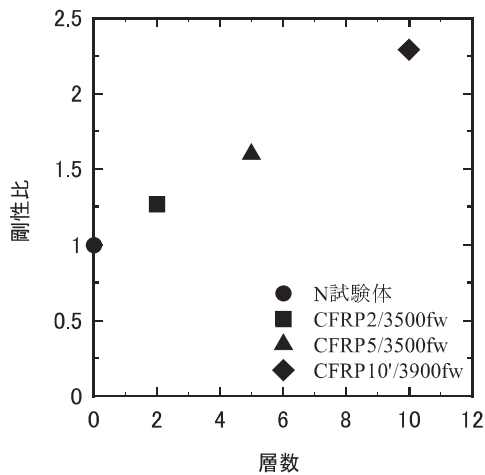


図10 層別剛性比

による補剛効果が発揮されていると判断できる。また、CFRP 端部より 175 mm の位置に相当する 1775 断面でも平面保持の仮定が成立していない。これは、上部の CFRP が下部の CFRP を引張っているためである。

次に、図 7 (a), (b), (c) より 2 層と 5 層及び 10 層の試験体を比較すると、層数が増加することでひずみが減少していることがわかる。これは、CFRP の層数が増加することで有効断面 2 次モーメントが増加したことにより、同一応力下であってもひずみが減少したためである。この点からも、層数を増加させても層数に対して比例的に補剛効果が得られていることが分かる。

5.3 ひずみ分布

図 8 に梁材長方向 CFRP ひずみ分布を示す。尚、図中の点線は (2) 式より算出した解析値であり、併せて任意荷重時の値で示している。

図 8 より (2) 式で算出した解析値と実験値は概ね対応していることがわかる。厳密には、各実験結果はゲージ位置 1550 近傍に達するまでは乖離があり、1550 近傍を境に解析値と重複するように一致した結果を示している。これは、後述 5.4 で詳細を記すが、CFRP 端部位置では補剛・補強効果が得られることなく母材と CFRP 間で平面保持が成立しておらず、定着部の区間で接着剤のせん断応力伝播効果

によって連続的断面（平面保持の仮定）が成立したためである。また、ゲージ位置 1100 mm でひずみが大きくなっているのはこの部分に載荷点があるためである。

5.4 ひずみ比

図 9 に端部のひずみ比を示す。ひずみ比は実験値を解析値で除した値と定義し、任意荷重時のひずみ比を示している。

図 9 より、CFRP 端部には定着部が存在し、当該区間で接着剤のせん断応力伝播により定着部より内側の CFRP と母材とは連続的断面と見なせるような応力度、ひずみ分布を得ることができる（平面保持の仮定の成立）。また、10 層を設置した場合、5 層毎に定着部に設けた段状貼付け工法においては、各定着部は 200 mm 程度の間で定着を完了していることが読み取れる。具体的には、1 層～5 層は端部が 1950 mm に位置し、1750 mm に達する位置で =1.4 近傍に値が収束していく。次に、6 層～10 層は端部が 1750 mm に位置し、1550 mm に達する位置で =1.0 近傍に値が収束していき、特に、6 層～10 層が設計思想通りに、最大応力の半分の位置で定着が完了していることが分かる。さらに、図 9 では層数の違いによる影響を比較することができ、層数の増大に伴い定着部は拡大する傾向にあることが読み取れる。しかしその長さは、設計時に定着部として想定した 200 mm 以内に収まっており、従来の研究知見を踏襲することが可能な結果を示していることが分かる。

5.5 層別剛性比

図 10 に層別剛性比を表 4 に実験結果をそれぞれ示す。表 4 中の弾性剛性比は CFRP を貼付けしていない試験体の弾性剛性で除した値とし、実験結果の比較としている。

表 4 および図 10 より、積層数と補剛効果を表した剛性比とはほぼ直線的に分布している。積層数を増大しても、補剛効率の著しい低下が見られないことが分かり、接着工法の思想、

- ・補剛区間全長貼付けとするため、定着部が最大曲げ応力の半分の位置より外側（より応力の小さい部位）へ位置するように接着する。
- ・単一の定着部が伝播できる積層数の上限を 5 層とし、これを超過する場合は定着部を追加するという考えで接着を行う。尚、当該工法を実施する場合、補剛・補強開始位置は CFRP 全層にて平面保持の仮定を確保できる位置とする。

を、満足することで補剛設計が簡便に実施できることが分かる。

但し、厳密には層数の増大に伴い補剛効率（CFRP 量に対する剛性上昇率）は低下することが明瞭に現われている

ため、当該工法においては、10層程度を限界と定め設計することが望ましい。更に積層数を増大させる場合においては、改めて、当該積層数を設置した載荷実験を行うことが重要であろう。

6. まとめ

本論文では、炭素繊維プレートを多層貼付けによる剥離、破壊を回避することを目的にCFRP、2層、5層および10層を補剛・補強全長貼付けを用いて載荷実験を実施した。その結果以下の知見を得られた。

- 1) 補剛・補強全長貼付けを採用することにより、H形鋼部材の降伏荷重までCFRPの剥離・破壊が生じることなく、積層数に対して比例的に補剛効果が発揮する補強工法が確立した。
- 2) 層数の増大に伴い定着部（CFRP端部から平面保持の仮定が成立するまでの区間）は広がる傾向にあるものの、5層程度であれば、既往の研究で述べている200mmを確保すればよいことを確認した。更に、5層以上の層数を必要とする場合は、5層毎に端部を段状とし、かつ各段の定着部を200mm確保すればよいことを10層貼付け試験体で確認した。

謝 辞

本実験の実施に当たり、広島工業大学大学院生、学部生諸氏の協力を受けました。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、感謝の意を表します。

文 献

- 1) 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
- 2) 服部明生，高松隆夫，玉井宏章，藤本信介：CFRPにより部分補強されたH形鋼梁の載荷実験，鋼構造年次論文報告集，Vol. 21，CD-ROM論文番号-106，2013.11
- 3) 服部明生，高松隆夫，玉井宏章，藤本信介：H形鋼小梁のCFRP部分貼付け補修工法に関する実験的研究，日本建築学会中国支部研究報告集，第37巻，CD-ROM論文番号-242，2014.3.1
- 4) 藤本信介，服部明生，高松隆夫，玉井宏章：H形鋼梁に貼付けたCFRPのひずみについて：その1 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，CD-ROM論文番号-22471，2013.8
- 5) 服部明生，高松隆夫，玉井宏章，藤本信介：H形鋼梁に貼付けたCFRPのひずみについて：その2 考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，CD-ROM論文番号-22472，2013.8
- 6) 藤本信介，高松隆夫，玉井宏章，岩瀬貴信：継手を有する炭素繊維プレートによるH形鋼梁の補強工法に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，CD-ROM論文番号-22502，2016.8
- 7) 藤本信介，高松隆夫，玉井宏章，服部明生：H形鋼梁の炭素繊維プレート端部無接着貼付けに関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，CD-ROM論文番号-22435，2015.9
- 8) 岩瀬貴信，高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，藤本信介：炭素繊維プレートによるH形鋼梁の補強工法に関する破壊防止条件，日本建築学会中国支部研究報告集日本建築学会中国支部編40，275-278，2017-03-04