

積層した炭素繊維プレートによる H型鋼梁の補剛・補強工法に関する実験的研究

山西 央朗*・高松 隆夫**・藤本 信介***

(平成30年11月1日受付)

Experimental study on stiffening and strengthening for H-shaped steel beam using laminated carbon-fiber-reinforced-plastic-plates

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU and Shinsuke FUJIMOTO

(Received Nov. 1, 2018)

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, multi-layer of CFRP plate, Loading test

1. 序 論

著者等は、小梁を想定したH形鋼に炭素繊維プレート(以降、CFRP)を貼付け、3点及び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),2)}。

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²⁾(全層同一長)、継手貼付け¹⁾(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(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。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長を設けることで、CFRPと梁フランジの垂直ひずみ差異が広がる。すなわち、定着長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、著者等は、補強・補剛対象区間全長貼付けを実施し、定着長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、また定着長の定義を改めて検討・確認する。

一方、一般的な補強工法にあっては、想定を超過する外力荷重に対しても靱性を確保すべきである。すなわち、弾性限界を超過した後の挙動を含めて、補強についての議論もしなければならない。

これに対しCFRPを接着したH形鋼梁の曲げ崩壊に着目した実験的検討した事例は多くはない。特に、本研究で検討している補強・補剛対象区間全長貼付けでは、存在応力が比較的小さい位置にCFRPの定着長を設けており、結果、弾塑性領域においてもCFRPの剥離が生じにくいことが予想され、当該崩壊機構、並びに終局状態を明らかにすることが必要である。

* 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

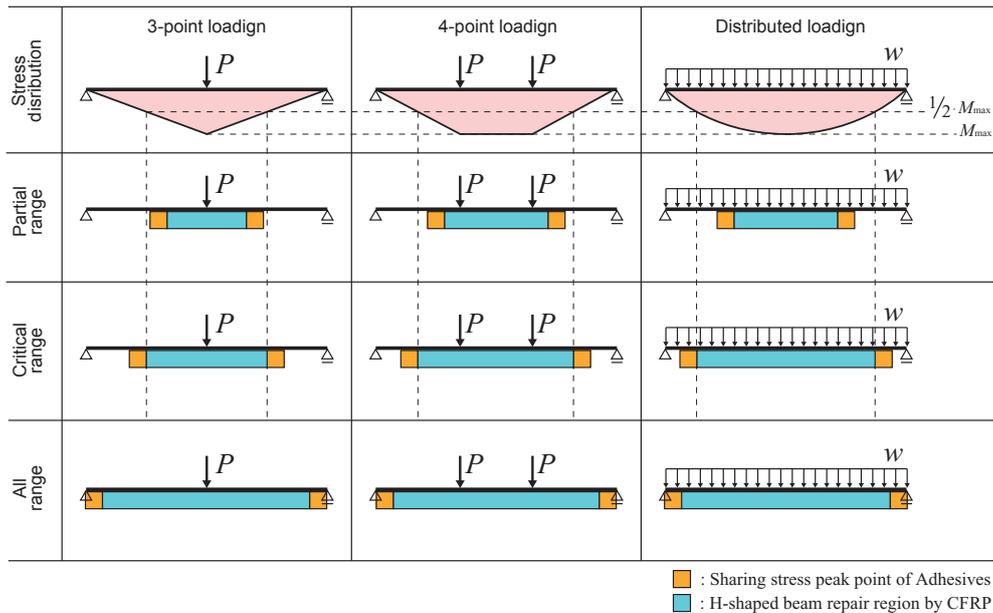


図1 応力分布，接着位置と補強・補剛位置

表1 素材特性

Member	Mateial	E (N/mm ²)	σ_Y (N/mm ²)	σ_U (N/mm ²)	σ_Y/σ_U (N/mm ²)	ϵ (%)	
H-shaped	Flange	SS400	205,000	321	447	72	26
	Web	SS400	205,000	348	462	75	28
Steel plate	SS400	205,000	281	449	63	32	
CFRP	ML	295,700	—	2,169	—	0.7	

このため、前述の試験体について弾塑性実験を実施し、当該崩壊機構、並びに終局状態について検討を行う。

2. 補強・補剛対象区間全長貼付けの定義

図1に、小梁における代表的な曲げ応力分布，CFRP貼付け位置の概念を示す。

CFRPを接着剤により鋼材に貼付けし、当該部材が曲げ応力を被る場合にはCFRP両端部から200mmの区間において、接着剤に大きなせん断応力度が発生する。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“定着長”と呼び、定着長の領域においてはCFRPによる補強・補剛効果は小さいので、両端定着長内側の区間で補強・補剛効果が得られると考える。

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。更に、補強・補剛区間全長貼付けを実現するため、CFRPは存在応力が被補強材内における最大応力の半分の値 ($1/2M_{max}$) となる位置で定着長が終了するように貼付けするものとする。

一方、定着長がの最大応力の半分の値 ($1/2M_{max}$) 内側

に位置する場合は“部分貼付け”、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. 弾性実験概要

3.1 試験体

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に試験体形状を示す。

試験体のH形鋼には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22mmの鋼板をCFRP2層、5層試験体には1層を、CFRP10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50mm、板厚2mm使用

表2 接着剤の素材特性

Mateial		E (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)
Code	Type				
E258 R	Epoxy resin	3,000	81.5	37.3	24.7

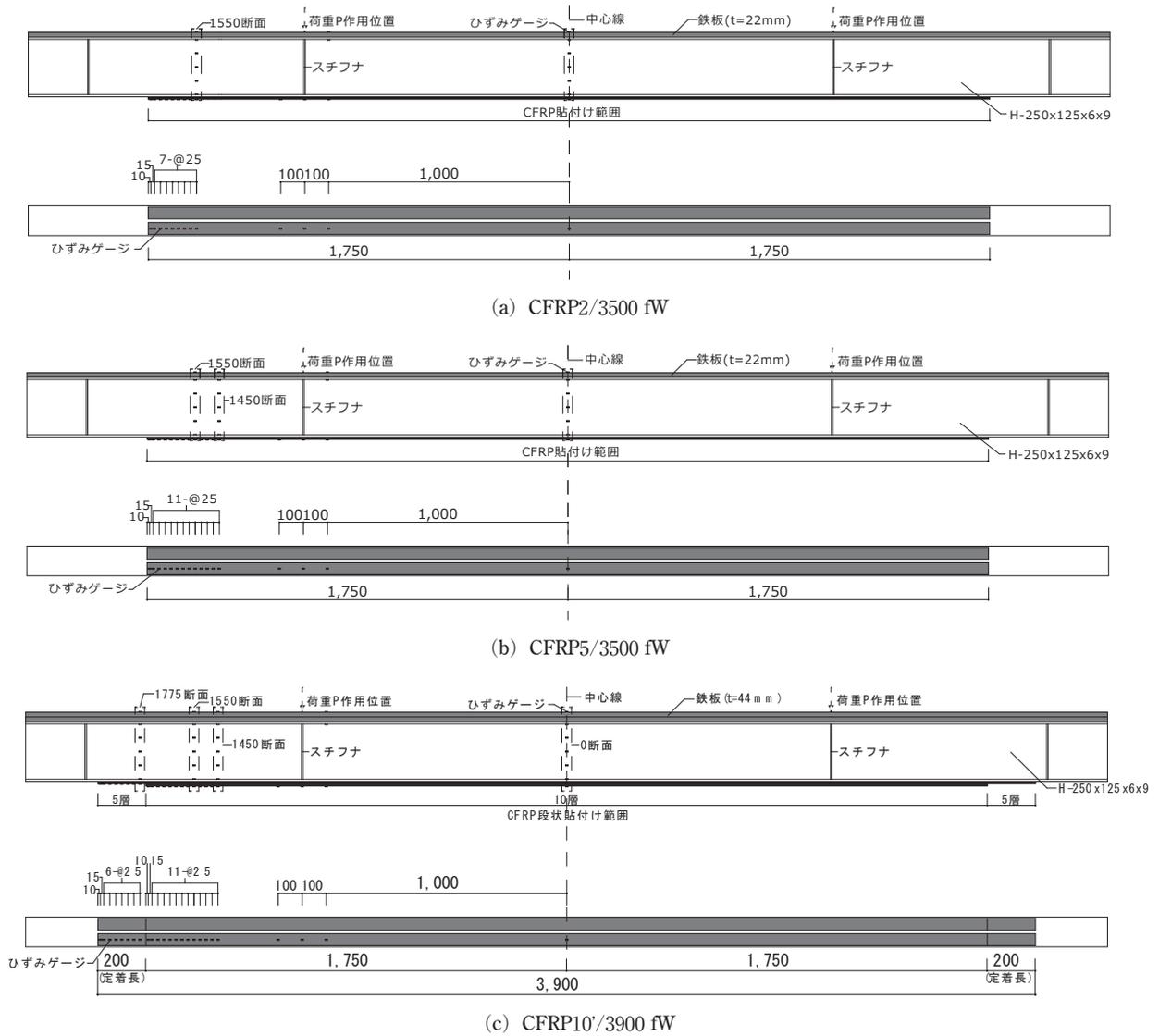


図 2 試験体形状

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：硬化剤=2:1 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。補強・補剛対象区間貼付けを実現するために、2層、5層は3500mmにCFRPを層数分貼付け、10層は3900mmに1~5層を、3500mmに6~10層を貼付けている。試験体名はCFRP2/3500 fw, CFRP5/3500 fw, CFRP10/3900 fwとする。

更に、CFRP 接着による効果を比較検討するため、CFRP を設置しておらず床スラブを想定した鋼板1層を貼付したものをN試験体、CFRP を設置しておらず床スラブを想定

した鋼板2層を貼付したものをN'試験体として、別途、載荷実験を行っている。

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。

また、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、試験体両端（ピン支点）に設置した変位計により変位 δ_1 , δ_2 , δ_1 , δ_2 を、載荷点に設置した変位計により変位 δ_3 , δ_4 , δ_3 , δ_4 を、それぞれ計測する。

以上の計測値より、中央変位 δ を次式により算出する。

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

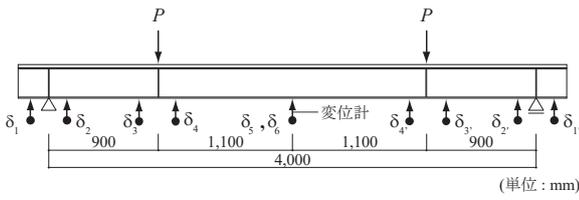


図3 変位計測位置

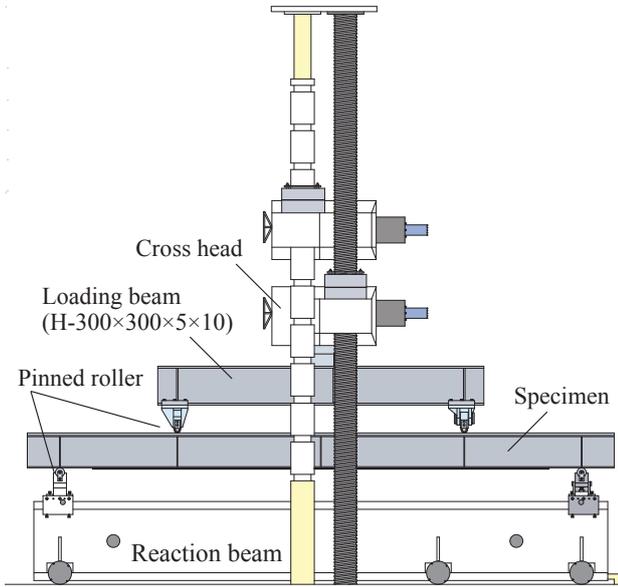


図4 荷装置 (アムスラー)

3.3 荷装置及び荷方法

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。荷は単調荷とし、H形鋼梁断面のひずみ値が弾性域に留まるように荷する。但し、10層については、せん断応力も卓越してくることから垂直ひずみのみでは判断が難しいので、5層と同程度の荷重に留めた。尚、両端ピン支点から900mmの位置を荷点とし、中央部を2,200mmの等曲げ区間としている。

4. 計算値ひずみ

ここでは、下フランジ下面CFRP、および上フランジ上面鋼板とH形断面が完全に一体化し、平面保持の仮定が成立するとの仮定のもと、任意断面の任意高さyにおけるひずみεの算出法を記す。

まず、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

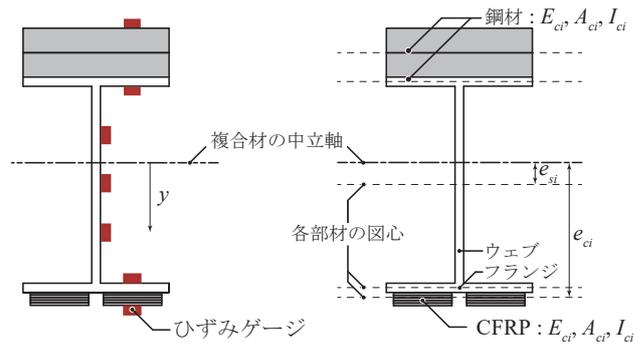


図5 断面形状 (補強・補強区間)

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。なお、H形鋼のフィレット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. 弾性荷実験結果と考察

弾性荷実験結果として、図6に荷重P中央たわみδ関係を、図7に無補強(CFRP貼付無し)試験体に対する剛性比-層数関係を、図8に定着長の内側においてCFRPとH形鋼との一体性が確保できていると仮定した場合の試験体中央位置の弾性剛性を算出し、図9に縦軸をCFRPとH形鋼梁との一体性が得られているとの仮定の下算出したCFRP表面のひずみ分布計算値ε_{Ana.}で実験計測ひずみε_{Exp.}を除いた値とした、ひずみ比の軸方向分布を、実験結果と比較したものを、図10に縦軸を中立軸を0位置とした断面高さhとしたひずみ値の分布を、表3に図6より算出したたわみ剛性Kと剛性比を、それぞれ示す。

尚、図9において下横軸は試験体中央=0とした、各ひずみ計測位置までの距離である。更に、図10にて示す各ひずみゲージ貼付位置の概要を図11に示す。

5.1 P-δ関係

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、層数の増大が期待できることがわかる。

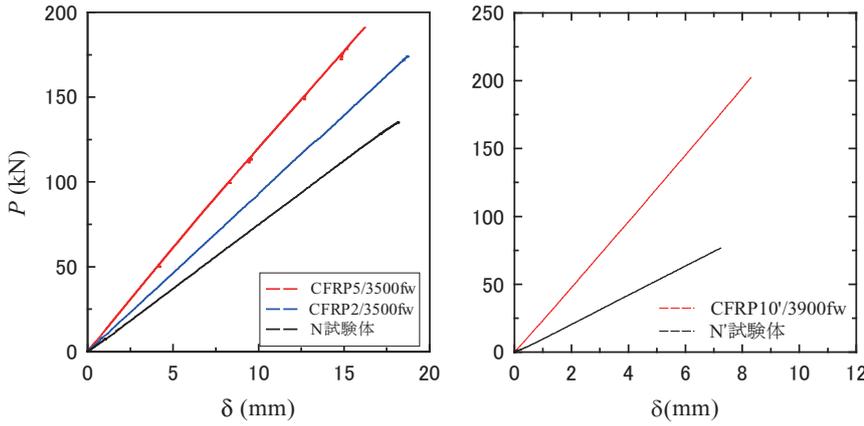


図 6 荷重 P - 中央たわみ δ 関係

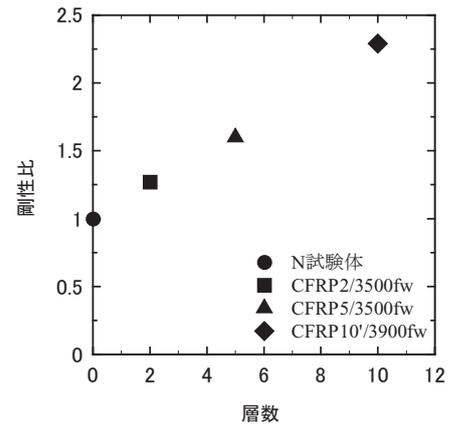
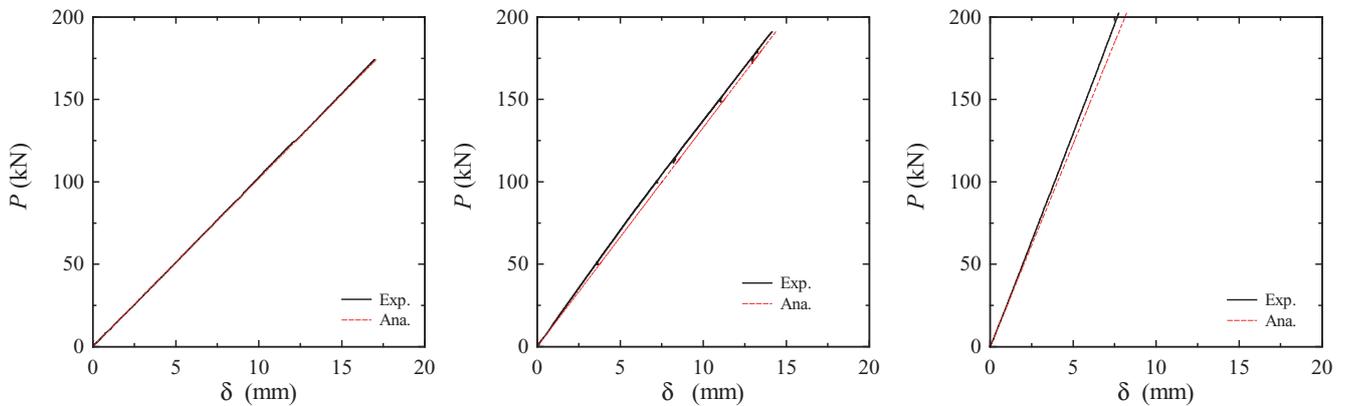


図 7 剛性比 - 層数関係



(a) CFRP2/3500 fw

(b) CFRP5/3500 fw

(c) CFRP10/3900 fw

図 8 弾性剛性

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 ($P=191$ kN) 近傍で定着長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 層の補強・補剛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、定着長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、補強・補剛対象区間全長貼付けを実施することにより、この度の試験条件であれば H 形断面の降伏荷重まで剥離などの破壊を発生することなく、剛性の増大を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 層数と弾性剛性

表 3、図 7 より、CFRP 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、定着長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。

- ・単一の定着長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長を追加する。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。

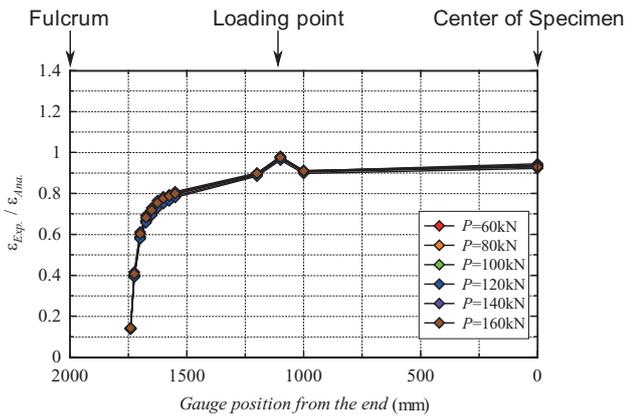
を、満足することで補剛設計が実施できることが分かる。

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。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。

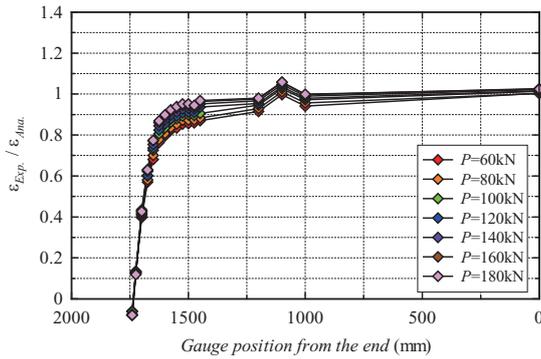
また図 8 より、各実験結果と計算結果とは整合しており、試験体の全体挙動が評価できていることが分かる。

5.3 定着長の定義

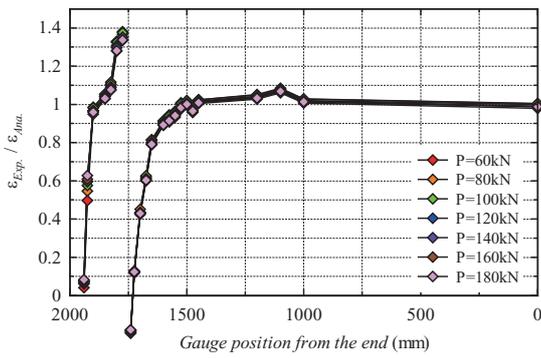
定着長とは、CFRP と H 形鋼梁との軸方向ひずみ差を接着層のせん断応力で伝播する領域を指す。定着長は、接着層の軸方向両端部に位置し、当該領域より内側にある CFRP



(a) CFRP2/3500 fw



(b) CFRP5/3500 fw



(c) CFRP10'/3900 fw

図9 CFRP表面の軸方向ひずみ分布 (0位置=試験体中央)

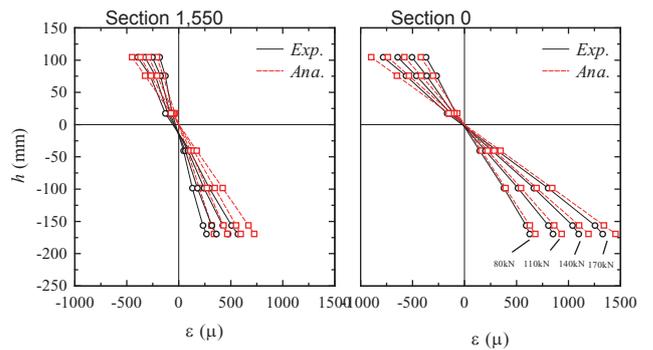
表3 実験結果

試験体名称	最大荷重 P (kN)	中央変位 δ (mm)	弾性剛性 K (kN/mm)	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	14.68	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

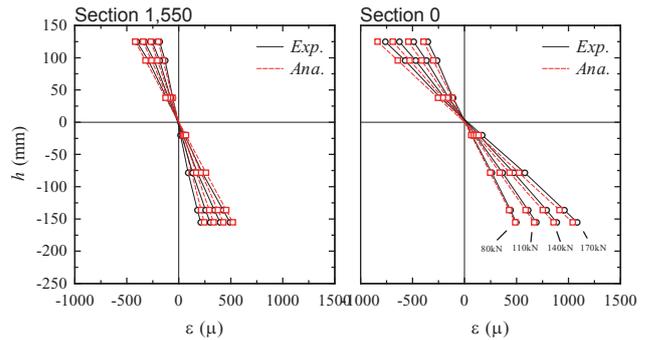
とH形鋼梁とは断面の一体性(平面保持の仮定が成立する)が期待できる。

5.3.1 CFRP表面軸方向ひずみの分布

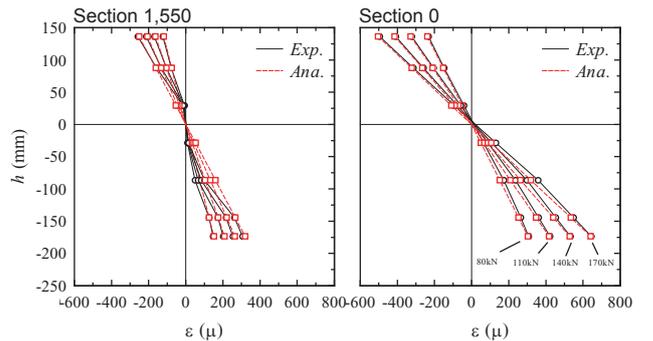
図9より、縦軸は、1.0を示せば断面の一体化が実現でき



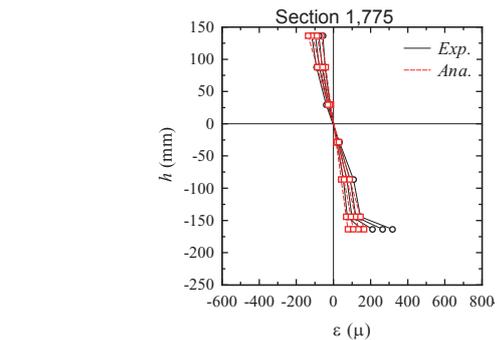
(a) CFRP2/3500 fw



(b) CFRP5/3500 fw



(c) CFRP10'/3900 fw



(c) CFRP10'/3900 fw

図10 断面高さ方向のひずみ分布と平面保持の仮定に基づいた計算値

た位置と判断できる。各ひずみ値は、CFRPの端部では0近傍に位置しているが、試験体中央方向に位置するにつれて1.0に漸近していく様が見取れる。また、1,550の位置では1.0に到達したと見なせる値を示しており、当該位置より内側にあつては断面の一体化が実現できたと判断できる。特に、10層の結果から、5層毎に定着長を確保するよう

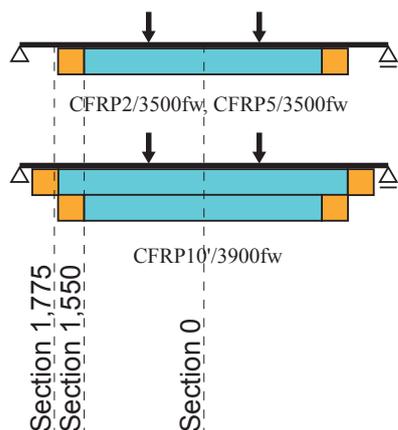


図11 ひずみゲージ貼付位置

に段状貼付けすれば適切に接着工法が実現することが分かる。ただし、著者等の研究では10層までの確認に留まっており、これを超過する積層数を必要とする場合は、改めて実験により検証を行べきである。

なお、荷重点では応力の乱れが生じており、若干大きな値を示している。また、10層試験体においては、CFRPが1～5層（1950～1750 mm 間）に位置では、断面形状が異なるためひずみは1.0を大きく超過している。

5.3.2 平面保持の仮定について

図10中には、CFRP と H 形鋼梁との一体性が得られていると仮定した場合の計算値も併せて示している。

同図より、実験結果のひずみ分布はいずれも線形的に分布しており、ここから断面の一体性が確保、すなわち定着長よりも内側の領域においては平面保持の仮定が成立することが分かる。但し、10層の1,775断面における CFRP 表面の値 ($h = -159 \text{ mm}$) には線形性を認められない。これは、5層目表面のひずみ値であるが、当該位置より 25 mm ほど試験体中央側に位置した点から開始する CFRP の 6～10層の定着長の影響によるものと考えている。

また、計算値との対応については、2層試験体の実験結果が計算値よりも低いものの、5層および10層は整合している。

以上より、CFRP 両端部 200 mm の位置に定着長が位置

し、これより内側において CFRP と H 形鋼との一体性が確保できることを総合的に判断できた。

6. 弾塑性実験概要

弾塑性実験は、実験装置の制限値などを加味し、CFRP を 4 層貼付した試験体を用いて実施する。

各部材の素材特性等については、3章に記した弾性荷重実験と同一である。また、接着工程、計測方法も同一であるので、ここでは記述を省略する。

図12に CFRP を貼付した試験体形状を示す。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 1 層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 は 4 層を通常貼付けし、3500 mm に CFRP を層数分貼付けている。試験体名は CFRP4/3500 fw とする。

荷重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。荷重は単調荷重とし、試験体が終局状態に至る（最大荷重の 8 割程度まで荷重が低下、または極端な破壊現象が生じる）まで行う。尚、両端ピン支点から 900 mm の位置を荷重点とし、中央部を 2,200 mm の等曲げ区間とする。

7. 弾塑性荷重実験の実験結果と考察

実験結果として、図13に荷重 P -中央たわみ δ 関係を、図14に CFRP 表面の軸方向ひずみ分布を、図15に断面高さ方向ひずみ分布を、図16に荷重中および荷重後の試験体写真（図13中のアルファベットに対応した時点）を、それぞれ示す。

尚、図13右縦軸は H 形断面単体の降伏荷重で除した値、図15左縦軸は中立軸を 0 とした高さ h とする。また、図13中には試験体中央位置の弾性剛性を、図15には応力から算出した計算ひずみ値も併せて示す。

図13より、弾性剛性は計算値と整合しており、CFRP 両端部の定着長（200 mm）から試験体中央側の断面において

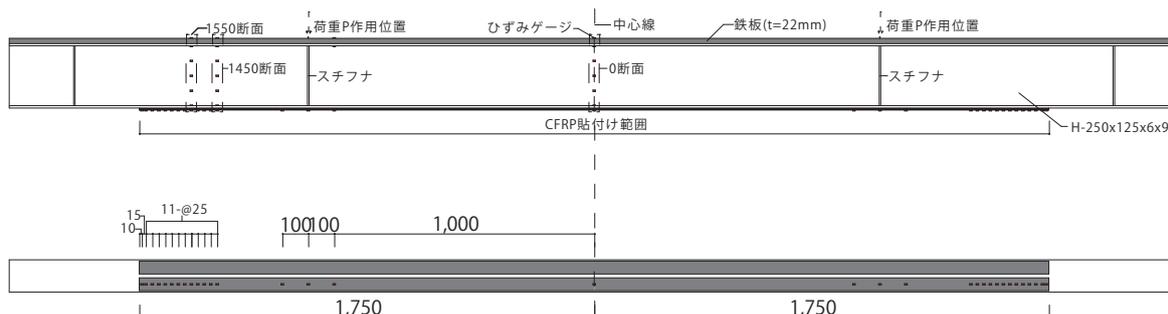


図12 試験体形状 (CFRP4/3500 fw, 弾塑性実験用)

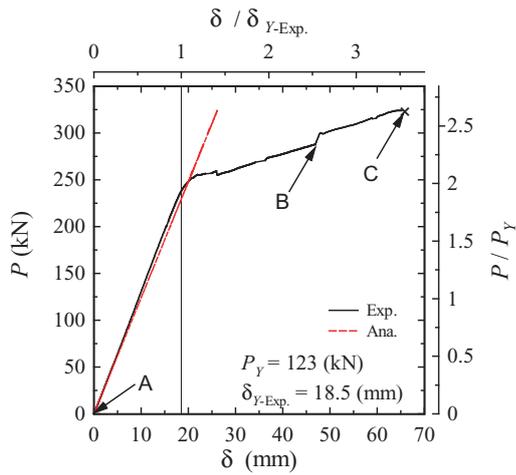


図13 荷重 P -中央たわみ δ 関係

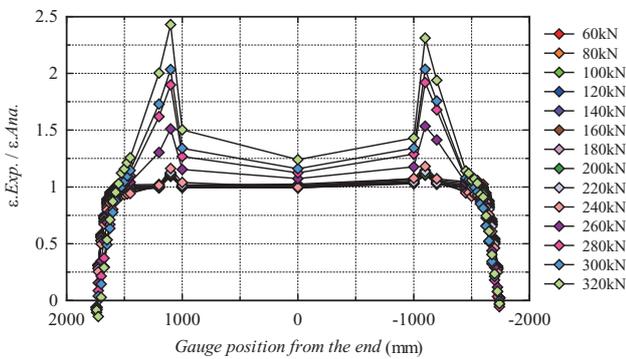


図14 CFRP 表面の軸方向ひずみ分布

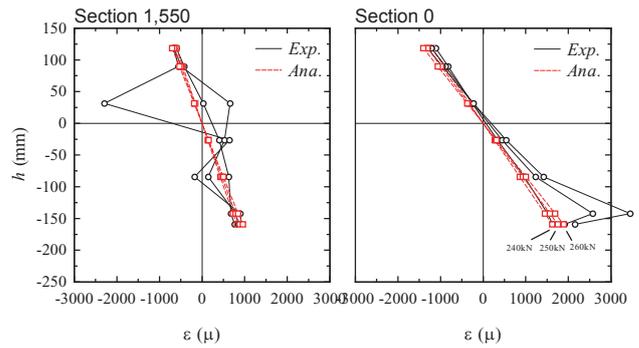


図15 断面高さ方向のひずみ分布と平面保持の仮定に基づいた計算値

CFRPとH形断面の一体性が確保できている。その後、240 kNを超えてから剛性が低下するが、二次勾配を保持しながら塑性変形し、塑性率が3.5、荷重が325 kNに達した時点でCFRPの1層目が剥離して実験を終了した。当該塑性化挙動を、各種データに基づいて以下に纏める。

図16 (a), (b) より、支持点～荷点間のH形鋼梁ウェブのせん断変形が卓越しており、崩壊機構はウェブせん断降伏で決定していることが分かる。これは、図16 (c) のB時点におけるウェブ表面の黒皮が剥離していることから判断できる。

一方、図16 (d) にCFRPの端部近傍の写真を示しているが、B時点においてはCFRPの剥離などは見られない。



図16 試験体の写真 (CFRP4/3500 fw)

更に、図14および図15より、CFRP 表面のひずみ値は計算値に比較して大きくなっているものの、ひずみ集中と判断できるほどの値ではない。また、図15の H 形鋼断面に位置するひずみは大きく乱れており、ここからも CFRP に先行して H 形鋼が降伏しているものと判断できる。

次に、図16 (e), (f), (g) に CFRP 剥離後の H 形鋼および CFRP の写真を示しているが、CFRP は全面に渡って瞬間で剥離した。剥離は、端部数 cm の範囲では接着剤の凝集破壊が発生して (図16 (e)) いるが、それ以外は 1 層目 CFRP の層内破壊 (図16 (f)) により剥離しており破壊後の H 形鋼には同 CFRP の一部が全面に渡って残っていた。また、CFRP の 2 層～4 層は端部が著しく損傷していたが、それ以外は無損傷であった。

以上より、CFRP 接着により十分な補強効果 (本試験体では弾性限界を 2 倍程度確保) が得られ、更に、定着長を比較的応力の小さい位置に設置しておけば、CFRP を積層した部材においても塑性変形能力が確保できることが分かった。また、CFRP を貼付することで曲げに対して補強することは可能であるが、ウェブとフランジのバランスが崩れるため、本実験結果のようにウェブのせん断降伏等で弾性限界が決定することに留意しなければならない。

6. 結 論

1) 補剛・補強対象区間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) 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、かつ各段の定着長を確保すればよいことを 10 層貼付け試験体で確認した。
- 3) 定着長は 5 層までであれば 200 mm として設計・施行可能であり、10 層においても段状とすることで対応できることを確認した。
- 4) 定着長を比較的応力の小さい領域に設けることにより、H 形鋼梁ウェブのせん断降伏により崩壊機構が定まり、弾性限界以後も二次勾配を保持して塑性率 3.5 程度まで変形した。
- 5) CFRP 接着により十分な補強効果が期待できる。

文 献

- 1) 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, CDROM 論文番号 -22502, 2016.8
- 2) 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