

炭素繊維プレートによる H 形鋼梁の補強工法に関する設計法

—— 既往の実験データに基づいた接着剤の破壊防止条件 ——

高松 隆夫*・玉井 宏章**・藤本 信介***・岩瀬 貴信****

(平成28年11月1日受付)

Design method for strengthening H-shaped steel beam using CFRP plate

—— Collapse prevention condition of bond based upon previous experimental results ——

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Shinsuke FUJIMOTO and Takanobu IWASE

(Received Nov. 1, 2016)

Abstract

The authors have investigated and proposed methods for strengthening H-shaped steel beams using CFRP plates bonded to the tension flange. This paper proposes a design method for strengthening beams using CFRP plates based upon previous experimental results that give relationship between shearing stress on an edge of the CFRP plates and tensile-shearing strength of the bond at collapse of the CFRP plates.

Key Words: *CFRP, Four points bending test, Fracture mechanism, Design method*

1. はじめに

著者等は、H 形鋼梁の引張側フランジに炭素繊維プレート（以降、CFRP）を貼付け、曲げ剛性の増大を図る補強工法の提案・研究を行っている^{1, 2)}。3点及び4点曲げ載荷実験より、剛性の向上を確認している。また、剛性は CFRP 貼付けによる有効断面 2 次モーメントを考慮した解析値と良好に対応し、評価方法の妥当性についても明らかにしている。更に、CFRP 部分貼付けにおいて CFRP 端部から剥離破壊を生じることがあり破壊メカニズムについての検証も行っている^{3, 4)}。破壊メカニズムについては、CFRP 端部に作用するせん断応力度に起因していると考えられ、特に、多層貼付けでは剥離破壊が生じやすく、CFRP4 層部分貼付けで比較的剥離破壊が生じやすいことが実験的に明らかとなっている。しかしながら、以前の实

験では鋼材の表面状況・養生条件等に起因して CFRP1 層部分貼付けにおいても剥離破壊が生じている。また、試験体数が少なく破壊メカニズムについて十分な検証を行ったとは言い難い。

そこで本論文では、養生条件等を改善した新しい試験体を用いた 4 点曲げ載荷実験を実施し、実験データに基づいて設計法の提案を行う。方法として、先ず、4 点曲げ載荷実験から得られた各試験体の CFRP ひずみ度分布を提案式により多項式近似する。次に、多項式近似に基づいてせん断応力度を予測し、接着剤の引張せん断強度との関係から設計法を提案する。

2. 既往の実験データに基づくせん断応力度の算定

本章では、先ず、代表例として 2 種類の実験結果を示し、CFRP 端部に作用するせん断応力度の傾向について明らか

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 長崎大学工学部工学科

*** 東レ建設(株) 技術部

**** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

にする。次に、既往の実験データからせん断応力度と接着剤の引張せん断強度の関係性について示し、後述の近似次数「 i 」を決定する。

2.1 試験体

表1に素材特性値を、表2に接着剤の力学特性を、図1に試験体形状を、それぞれ、示す。

試験体に用いる H 形鋼は H-250x125x6x9 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 20mm の鉄板を接着剤により貼付けている。CFRP は中弾性 (ML) 型、幅 50mm、板厚 2 mm を使用し、2 列貼付けとする。CFRP 貼付けに使用する接着剤は二液タイプ常温硬化型エポキシ樹脂であり、前述した鉄板貼付けの際にも使用している。CFRP を貼付ける部分はグラインダー及びベルトサンダーで H 形鋼の黒皮を除去し、サンドペーパー #240、#1,500 で表面処理を施した後に CFRP を貼付ける。尚、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 日以上の養生とした。

試験体は 1 層と 4 層の 2 種類とし、それぞれの試験体名称は CFRP1/1100fW、CFRP4/1100fW とする。尚、各試験体は基本的な通常貼付け工法としている。

2.2 荷重方法及び計測方法

図2に荷重装置を、図3に計測位置を、それぞれ、示す。

表1 素材特性値

部材	材質	ヤング係数 E (N/mm ²)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	破断伸び ϵ_y (%)
フランジ	SS400	205,000	322	447	26
ウェブ	SS400	205,000	352	462	28
鉄板	SS400	205,000	281	449	32
CFRP	ML	295,700	-	2,169	0.7

表2 接着剤の力学特性

材質	ヤング係数 E (N/mm ²)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	引張せん断強度 σ_s (N/mm ²)
E258R エポキシ樹脂	3,000	81.5	37.3	24.7

尚、図3 (b), (c) は代表例として CFRP1/1100fW を示しており、CFRP4/1100fW においても同様の計測方法である。

荷重形式は、試験体中央部に等曲げ区間を設けた 4 点曲げとする。荷重は、単調荷重とし CFRP の剥離もしくは試験体 N の降伏荷重 ($P_y=125kN$) まで行う。試験体降伏荷重までの荷重としたのは、CFRP 補強の設計条件として、部材が降伏するまで剥離破壊が生じないことを目的としているためである。

計測方法として、荷重は荷重装置の油圧計測により計測する。変位は梁中央部及び支点に設けた変位計により計測する。ひずみ度はひずみゲージにより計測し、ひずみゲージ貼付け位置は図1に併せて示している。また、平面保持の仮定並びに有効断面 2 次モーメントの評価の妥当性を確認するため、750 断面、350 断面を設け (図1)、ひずみゲージを図3 (b), (c) の様に貼付けている。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、中央変位 δ は中央変位から両端支点変位の平均を差し引き算出する。

2.3 解析方法

2.3.1 ひずみ度

図4に解析値算出モデルを示す。

本節では、ひずみゲージ貼付け位置のひずみ度 ϵ の解析方法について示す。ひずみ度 ϵ は CFRP を考慮した有効断面 2 次モーメント I' を用いて、次式により算出する。

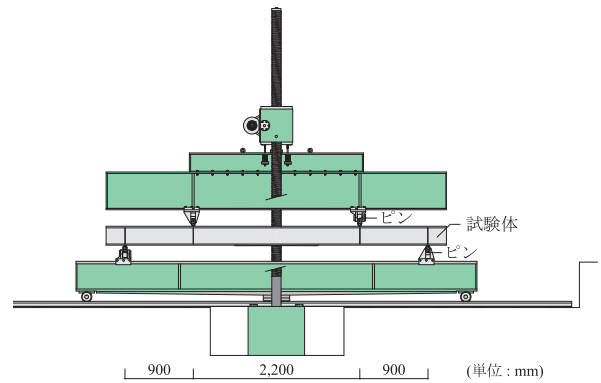
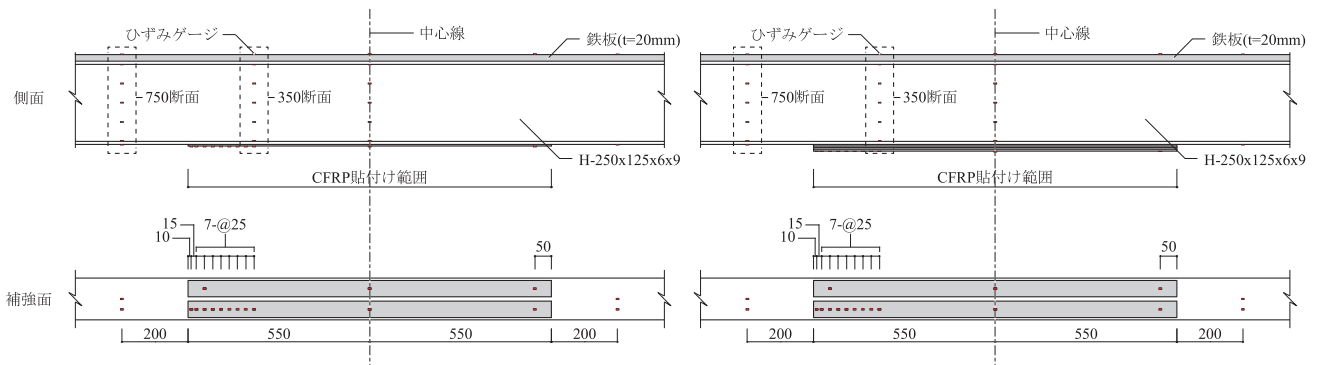


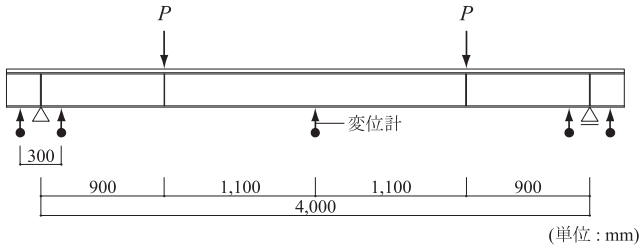
図2 荷重装置



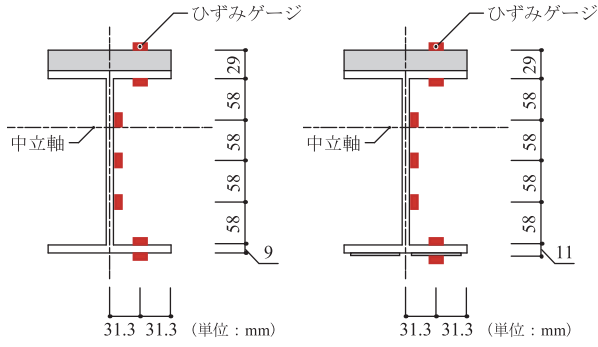
(a) CFRP1/1100fW

図1 試験体形状

(b) CFRP4/1100fW



(a) 変位計側位置



(c) 750 断面

(b) 350 断面

図3 計測位置

$$\varepsilon = \frac{M}{E_s \cdot I'} \cdot y \quad (1)$$

ここに、 M : 曲げモーメント、 E_s : 鋼材のヤング係数、 I' : 有効断面 2 次モーメント、 y : 複合材の中立軸からひずみゲージ貼付け位置までの距離である。

尚、有効断面 2 次モーメント I' は図 4 の定義を用いて、次式により導出している。

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

ここに、 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 CFRP の断面 2 次モーメント、 A_{ci} : i 番目 CFRP の断面積、 e_{ci} : 複合材の中立軸から i 番目 CFRP の図心間距離である。

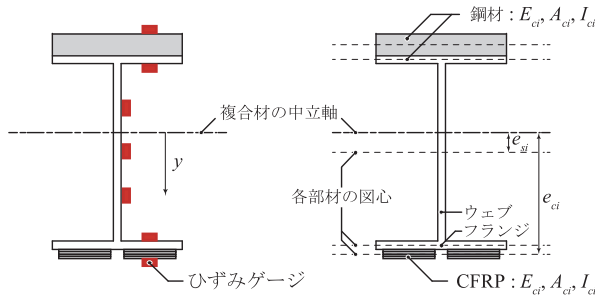


図4 解析値算出モデル

2.3.2 CFRP 端部のひずみ度

CFRP 端部 200mm の範囲のひずみ度を多項式で近似する。CFRP 端部からの距離 x の位置におけるひずみ度を下式により仮定する。尚、(3) 式は $x=0$, $\varepsilon=0$ 及び $x=200$, $\varepsilon=\varepsilon_{200}$ を満足する多項式である。

$$\varepsilon = (-1)^{i-1} \cdot \frac{\varepsilon_{200}}{200^i} \cdot (x-200)^i + \varepsilon_{200} \quad (3)$$

ここに、 i : 近似次数 (自然数)、 ε_{200} : CFRP 端部から 200mm の位置におけるひずみ度である。

2.3.3 CFRP 端部に作用する最大せん断応力度

CFRP の垂直応力度 σ は (3) 式を用いて、次式により算出する。

$$\sigma = E_c \cdot \varepsilon = (-1)^{i-1} \cdot \frac{E_c \cdot \varepsilon_{200}}{200^i} \cdot (x-200)^i + E_c \cdot \varepsilon_{200} \quad (4)$$

図 5 に示す CFRP の微小部分の力の釣り合いより、接着剤に作用するせん断応力度 τ は、次式で表される。

$$\tau = t \cdot \frac{d\sigma}{dx} = (-1)^{i-1} \cdot \frac{t \cdot i}{200^i} \cdot (x-200)^{i-1} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{200} \quad (5)$$

ここに、 t : CFRP 板厚である。

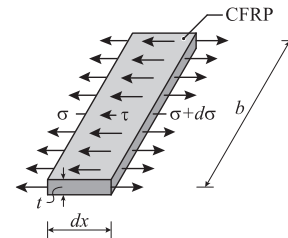


図5 CFRP の微小部分の力の釣り合い

(5) 式より、最大せん断応力度 τ_{max} が CFRP 端部 $x=0$ の位置に作用するとし、最大せん断応力度 τ_{max} を、次式により算出する。

$$\tau_{max} = \frac{t \cdot i}{200} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{200} \quad (6)$$

2.3.4 仮定剥離面のせん断応力度

(6) 式により算出された最大せん断応力度は CFRP 最上層とその下層との間に作用するせん断応力度である。従って、CFRP 多層貼付けの場合、各 CFRP 層間に同等のせん断応力度が作用すると仮定して仮定剥離面のせん断応力度を、次式により算出する。尚、実際の CFRP 層間のひずみ度を実験的に確認することは計測上困難であるため上記の仮定を用いている。

$$\begin{aligned} \tau' &= n \cdot \tau_{max} \\ &= n \cdot \frac{t \cdot i}{200} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{200} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 n : CFRP 層数である。

2.4 実験結果及び考察

2.4.1 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試験体 N の実験結果も併せて示している。

図 6 より、CFRP1/100fW、CFRP4/1100fW 共に無補強

表3 実験結果

試験体	P_{max} (kN)	δ (mm)	弾性剛性 K (kN/mm)	弾性剛性比
試験体N	125.0	16.68	7.527	1.00
CFRP1/1100fW	125.3	15.52	8.095	1.08
CFRP4/1100fW	125.3	14.58	8.634	1.15

P_{max} : 最大荷重 δ : 中央変位 K : 弾性剛性

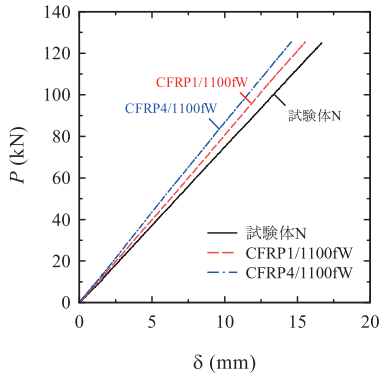
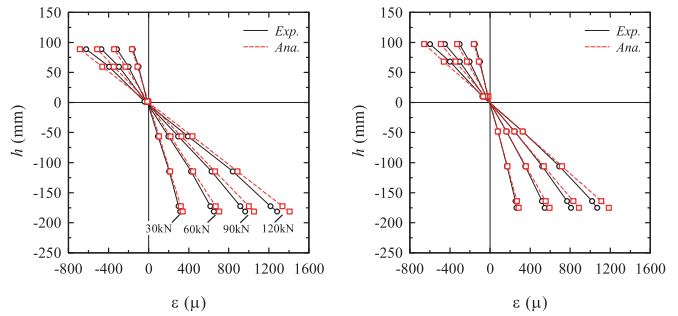
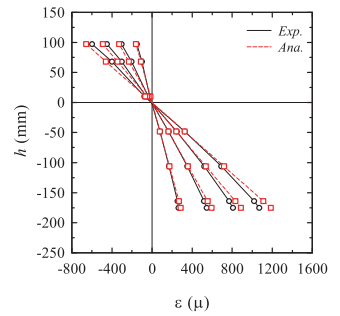


図6 P- δ 関係

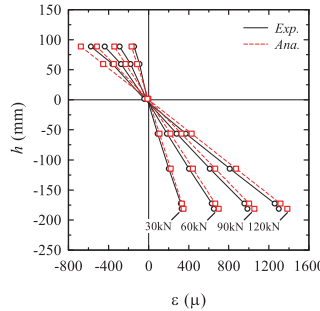


(a.1) 750 断面

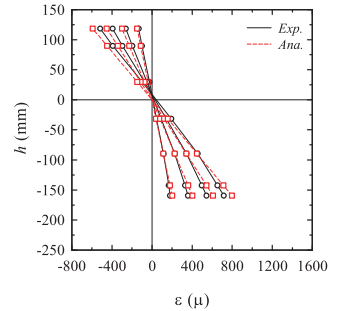


(a.2) 350 断面

(a) CFRP1/1100fW



(b.1) 750 断面



(b.2) 350 断面

(b) CFRP4/1100fW

図7 各断面のひずみ度分布

表4 仮定剥離面のせん断応力度

試験体	P_{max} (kN)	層数	τ_{max} (N/mm ²)					τ' (N/mm ²)
			$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	
CFRP1/1100fW	125.3	1	9.9	13.2	16.5	19.8	23.1	23.1
CFRP4/1100fW	125.3	4	6.7	9.0	11.2	13.5	15.7	27.0

P_{max} : 最大荷重 τ_{max} : 最大せん断応力度 τ' : 仮定剥離面のせん断応力度

試験体Nより、剛性が向上していることがわかる。また、本試験体においては、部材の降伏限界まで載荷してもCFRPの剥離破壊は生じていない。

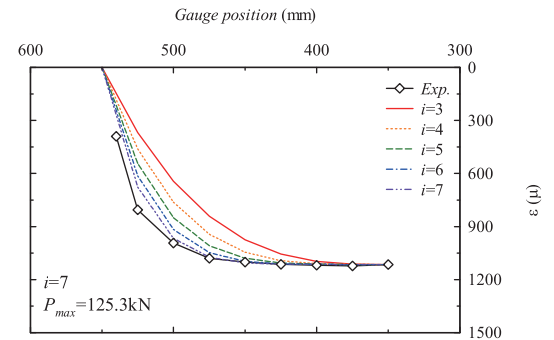
2.4.2 平面保持の仮定

図7に各断面のひずみ度分布を示す。尚、図7には、(1)式により算出した解析値を併せて示し、図中記載の荷重のひずみ度分布を示している。また、縦軸の h は中立軸からのひずみゲージ位置を示しており、中立軸位置を0と定義している。

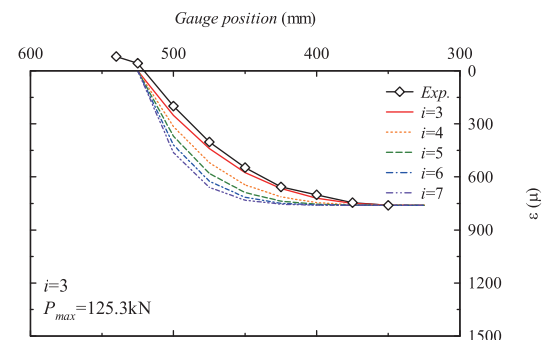
図7より、各断面のひずみ度は直線的な分布を示していることから平面保持の仮定が成立しているといえる。特に、CFRP 端部から200mmの位置に相当する350断面も平面保持の仮定が成立し、(1)式により概ね評価できていることがわかる。若干実験値の方が(1)式で評価した解析値より小さい値を示しているが、これは設計上安全側の評価であるといえる。

2.4.3 CFRP 端部のひずみ度分布とせん断応力度

表4に仮定剥離面のせん断応力度を、図8にひずみ度分布と(3)式による多項式近似を、それぞれ、示す。尚、表



(a) CFRP1/1100fW



(b) CFRP4/1100fW

図8 ひずみ度分布と(3)式による多項式近似

4の赤字で示しているのは算定に用いた最大せん断応力度である。また、図8は、最大荷重時のひずみ度分布を示し、(3)式により近似した曲線 ($i=3\sim7$) を併せて示している。図中左下には決定した i と最大荷重を記している。

表4より、CFRP1/1100fWの仮定剥離面のせん断応力度は 23.1N/mm^2 、CFRP4/1100fWの仮定剥離面のせん断応力度は 27.0N/mm^2 である。このことから、CFRP層数が増加するとせん断応力度も増加し、剥離破壊が生じやすいことがわかる。特に、CFRP4/1100fWのせん断応力度は接着剤の引張せん断強度 24.7N/mm^2 を超えており、CFRP4層部分貼付けでは剥離破壊を生じる可能性が高いことがいえる。また、近似次数 i はCFRP1/1100fWで7、CFRP4/1100fWで3であった。近似次数と層数の関係については、2.4.4項で後述する。

2.4.4 実験データのまとめ

2.4.3項では、2種類の試験体について、実験結果に基づいた仮定剥離面のせん断応力度を示した。本項では、既往の実験データを含めた全試験体の実験結果を総括し、仮定剥離面のせん断応力度を算定した一覧表を示す。

表5に仮定剥離面のせん断応力度一覧表を、図9に各試験体のひずみ度分布と(3)式による多項式近似を、それぞれ、示す。尚、表5、図9は2.4.3項の試験体も内包している。また、著者等が提案している継手貼付け工法⁵⁾によ

る実験結果も、破壊メカニズムが同様であるため実験結果として加えている。

表5、図9より、層数が増加することに伴い近似次数 i が小さくなる傾向にあることがわかる。これは、層数が多いと定着部が長くなる傾向にあり、それに伴ってCFRPひずみ度分布の曲線が滑らかになるためである。この傾向により、層数が少ない場合 i が大きくなり、CFRP1層貼付け試験体であっても仮定剥離面のせん断応力度が接着剤の引張せん断強度 24.7N/mm^2 に近い値を示す場合がある。

表5より、仮定剥離面のせん断応力度を接着剤の引張せん断強度と比較すると、全てのCFRP4層貼付け試験体で接着剤の引張せん断強度を超えており、その内の2体は剥離破壊を生じている。仮定剥離面のせん断応力度が 24.7N/mm^2 を超えると剥離する可能性が高まり、CFRP4層貼付けは剥離破壊の危険性が高いことがいえる。一方で、CFRP3層貼付け試験体CFRP3/1100fWは 22.5N/mm^2 で層内破壊を生じており、接着剤の引張せん断強度に到達する前にCFRPで破壊が決定している。これは、CFRP切出し時に生じたCFRP断面部の微小亀裂が要因であることがわかっており、端部無接着貼付けにより回避することが可能である⁶⁾。

2.4.5 CFRP層数に対する近似次数「 i 」の決定

2.4.4項の実験結果に基づき、CFRP層数に対する近似

表5 仮定剥離面のせん断応力度一覧表

試験体	図	P_{max} (kN)	層数	τ_{max} (N/mm ²)					τ' (N/mm ²)
				$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	
CFRP1/1100fW	(a)	125.3	1	9.9	13.2	16.5	19.8	23.1	23.1
CFRP1/1100fjW	(b)	125.3	1	10.3	13.7	17.2	20.6	24.0	24.0
CFRP1/1100fjW	(c)	125.9	1	9.9	13.3	16.6	19.9	23.2	19.9
CFRP2/1100fW	(d)	125.3	2	8.7	11.6	14.5	17.4	20.3	23.3
CFRP2/1100fjW	(e)	125.1	2	8.3	11.0	13.8	16.6	19.3	27.6
CFRP2/1100fjW	(f)	125.1	2	8.5	11.3	14.2	17.0	19.8	17.0
CFRP3/1100fW	(g)	123.3* ¹	3	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5
CFRP4/1100fW	(h)	125.3	4	6.7	9.0	11.2	13.5	15.7	27.0
CFRP4/1100fjW	(i)	92.3* ¹	4	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	25.6
CFRP4/1100fjW	(j)	106.0* ²	4	5.2	6.9	8.6	10.3	12.1	27.6

P_{max} :最大荷重 (*¹:層内破壊,*²:界面破壊) τ_{max} :最大せん断応力度 τ' :仮定剥離面のせん断応力度

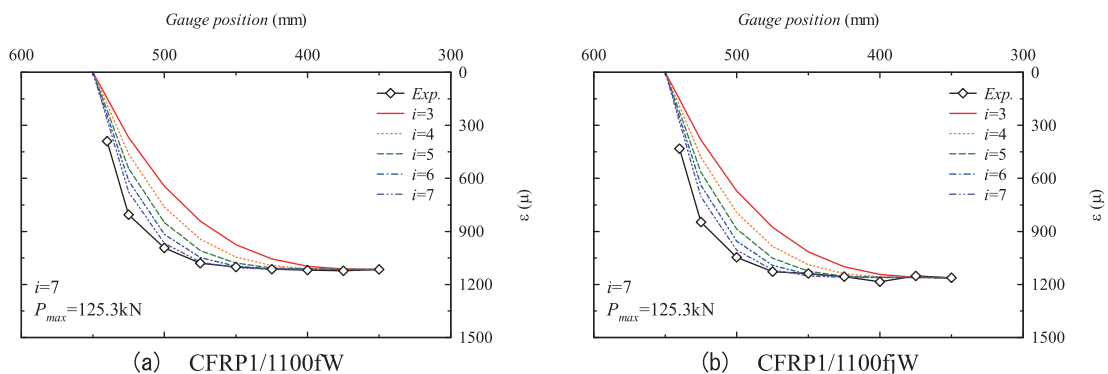


図9 各試験体のひずみ度分布と(3)式による多項式近似 (a), (b)

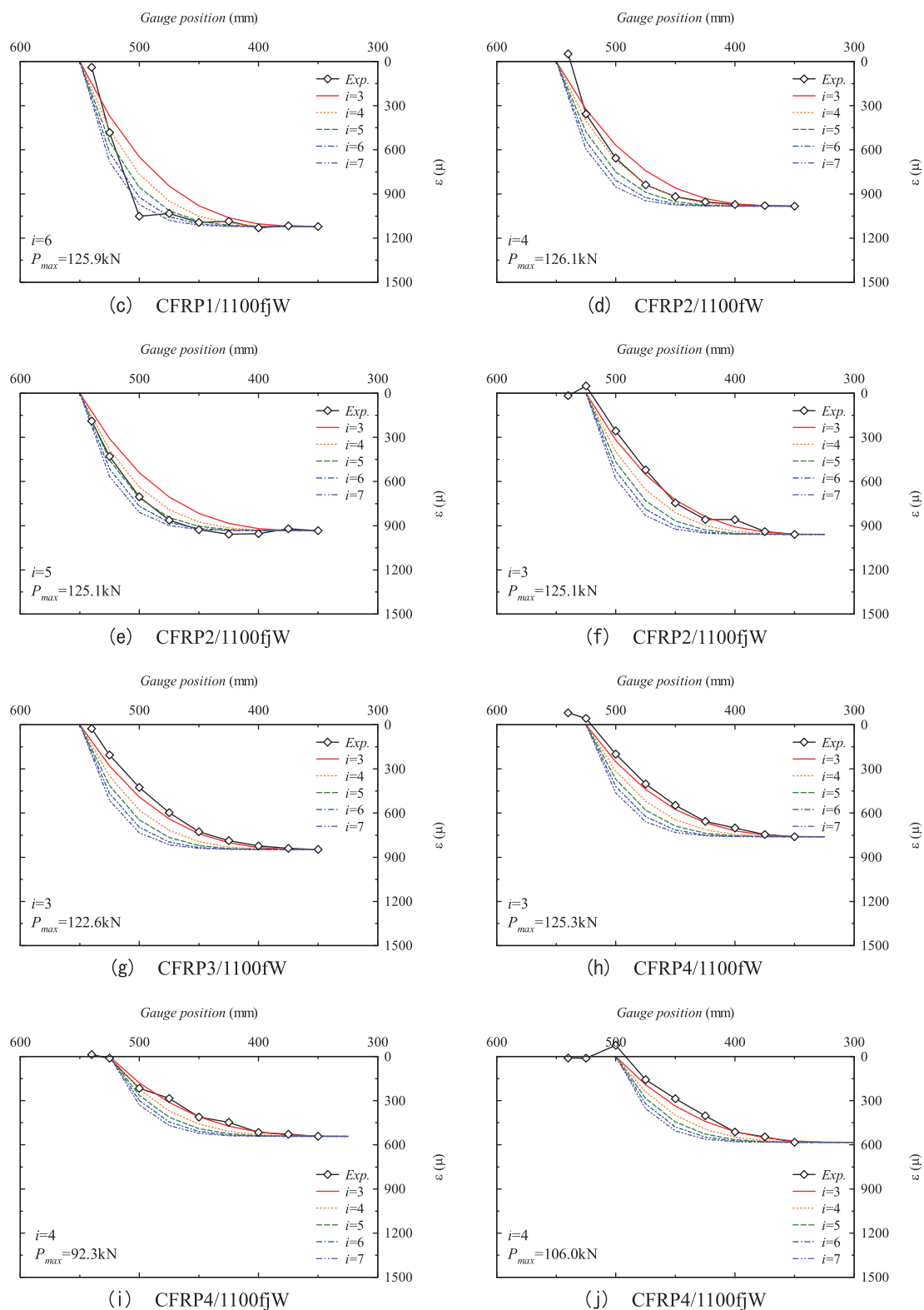


図9 各試験体のひずみ度分布と (3) 式による多項式近似 (c)~(j)

次数「 i 」を決定する。表6にCFRP層数に対する近似次数 i を示す。

本論文における近似次数 i は表6に示す通りである。尚、CFRP3層の実験データは1つしかないため、本論文においては $i=3$ とした。また、 i については図9からもわかる

通りばらつきが大きく今後更に試験体数を増やし検証する必要がある。

表6 CFRP層数に対する近似次数 i

CFRP層数	1	2	3	4
i	7	4	3	3

3. 接着剤の破壊防止条件

存在曲げ応力に対して CFRP 部分貼付け補強を施し、有効断面 2 次モーメント I' により必要な断面性能を満たしている段階で、接着剤の破壊防止条件を適用することとする。接着剤の破壊防止条件に関する設計は、以下の手順ならびに提案式で行う。

1. 存在曲げ応力並びに有効断面 2 次モーメントより CFRP 端部から 200mm の位置におけるひずみ度を 2.4.2 項の平面保持の仮定に基づいて、(8)式により仮定する。

$$\varepsilon_{200} = \frac{M}{E_s \cdot I'} \cdot y \quad (8)$$

ここに、 M : 存在曲げ応力、 E_s : 鋼材のヤング係数、 I' : 有効断面 2 次モーメント、 y : 複合材の中立軸からひずみゲージ貼付け位置までの距離である。

2. 仮定剥離面のせん断応力度 τ' を、(9)式により算出する。

$$\tau' = n \cdot \frac{t \cdot i}{200} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{200} \quad (9)$$

ここに、 n : CFRP 層数、 t : CFRP 板厚、 i : 近似次数 (表 6)、 E_c : CFRP のヤング係数である。

3. 仮定剥離面のせん断応力度 τ' は、接着剤の引張せん断強度と安全率を用いて、(10)式を満足するように設計する。

$$\tau' < \frac{2}{3} \cdot \sigma_s \quad (10)$$

ここに、 σ_s : 接着剤の引張せん断強度 (=24.7N/mm²) である。

4. 結 論

本論文では、実験結果に基づいて接着剤の破壊防止条件について明らかにし、破壊防止条件の設計法を提案した。得られた知見を以下に示す。

1. H 形鋼梁に CFRP を部分貼付けすることで、剛性は向上する。
2. CFRP 端部から 200mm の位置における断面は平面保持の仮定が成立する。
3. CFRP 端部のひずみ度分布を (3)式により近似できる。
4. CFRP4 層部分貼付け試験体の実験結果より、仮定剥離面のせん断応力度 τ' が接着剤の引張せん断強度 24.7 N/mm² を越えると、剥離破壊の可能性が高まる。
5. 近似次数 i と (8)~(10)式を用い、接着剤の破壊防止条件に関する設計ができる。

本論文では、鋼材の表面状況・養生条件等が改善され

CFRP1 層部分貼付けにおいても剥離破壊は生じず一定の実験成果が得られた。しかしながら、一部の実験データは少なく十分な検証を行っていない。今後、試験体数を増やし近似次数 i について十分な検討を行う。更に、補強効果の向上を目指し、CFRP 層数を増加した試験体についても実験的検証を行う。

謝 辞

本実験においては高松研究室の学生諸氏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) 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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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

