

# 炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力 その3 端部未接着試験体の検討

玉井 宏章\*, 陣川 晃司\*\*, 御厨 健太\*\*

## Shear Bond Strength of Rehabilitated Steel Plate Bonding CFRP Plates. Part 3 Investigate Edge Unbonded Specimen

By

Hiroyuki TAMAI\*, Koji JINKAWA\*\* and Kenta MIKURIYA\*\*

To enhance the usable life of existing building, a strengthening method with bonding CFRP plates has been developed by authors. The CFRP plates is high-strength (2100MPa) in longitudinal normal stress. The composite of steel bonding CFRP may easily peel out under tensile loading because shear bonding stress is concentrated at the edge of CFRP Plates. In this paper, F.E.M. was performed to investigate the nature of the case of the non-adhesive edge of the CFRP Plates. Also, tensile loading tests of composite of steel bonding CFRP plates were performed to clarify failure condition of adhesive. Failure condition of adhesive was investigated by comparing with the theoretical solution.

**Key words:** Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Bonding Strengthening, Tensile Loading Test

### 1. はじめに

近年、高度成長期に建設された鋼構造物の多くが老朽化し、補修・補強が必要となる事例が増加している。

その解決法の1つとして、著者等は炭素繊維プレート(CFRP)を用いた接着補剛工法を提案している<sup>1)</sup>。

その2では提案破壊条件式の妥当性を検討するため、層厚の違う試験体を用い、多軸の応力状態を考慮した既往の破壊条件式と比較・検討を行った。

接着部端部ではCFRPプレート端部に発生する材軸方向への割れによって強度低下が予想される。その影響を緩和するため、図1に示すような接着部端部よりCFRPプレート端部を延長し、端部を未接着にすることでCFRP端部における損傷の影響を緩和する方法が提案されている。

本研究ではCFRP端部を未接着にした場合の性状を検討するため、有限要素法解析を用いて通常の接着条件との比較・検討を行う。

また、提案した破壊条件式の妥当性を検討するため、新たに剛性の違う接着剤を用いて引張試験を行い、破壊条件式の妥当性を示す。

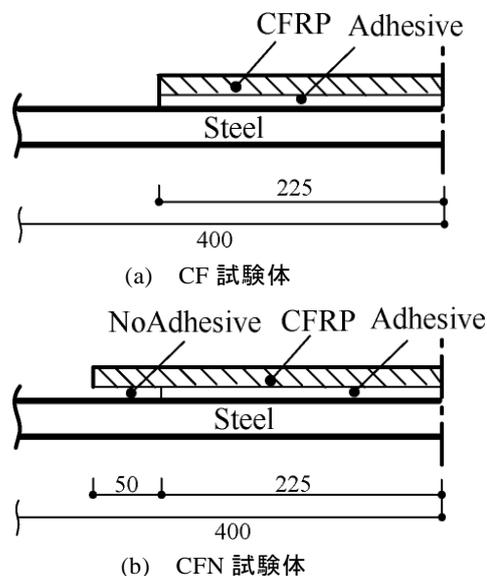


図1 解析対象

### 2. 端部未接着効果の検討

CFRP端部に発生する軸方向の割れによって予想される強度低下を緩和するため、接着部端部よりCFRP端部を延長し、端部を未接着にした場合の効果有限要素法解析を用いて検討を行う。

平成27年6月10日受理

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

2.1 端部未接着解析シリーズ

解析シリーズを表 1, 解析対象を図 1 に示す. 対象は板厚 6 mm, 幅 90 mm, 全長 800 mm の鋼材(鋼種: H-SA700)に, 中弾性型炭素繊維プレート(CFRP ML: 板厚 2 mm, 幅 50 mm, 全長 450mm)一層を両面に接着したものを CF 試験体とし, 接着部端部から CFRP を 50mm 延長し, CFRP 端部を未接着にしたものを CFN 試験体とした.

2.2 有限要素法解析

解析対象は平面ひずみ状態にあると仮定し, 2 次元問題として取扱った. また, 対象の対称性から 1/4 領域を解析した.

要素は定歪三角形要素を用い, 炭素繊維プレートは等方均質材料として取扱った. 幾何学的境界条件は, 鋼板下面を鉛直方向に鋼板中央を水平方向に変位を拘束した. 加力は自由端に強制変位を与えて行い, 材軸方向にx軸をとり原点を鋼板中央とした.

3. 引張試験

3.1 弾性応力分布理論式

CFRP と鋼との複合材の引張時の弾性応力分布は次式のように表される<sup>2),3)</sup>.

$$\tau_a = -\frac{P}{\lambda \cdot \cosh \frac{L}{2 \cdot \lambda}} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \cdot \sinh \frac{x}{\lambda} \quad (1.a)$$

$$\sigma_c = P \cdot \frac{E_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left( 1 - \frac{\cosh \frac{x}{\lambda}}{\cosh \frac{L}{2 \cdot \lambda}} \right) \quad (1.b)$$

ここに,  $\tau_a$  は接着剤のせん断応力,  $\sigma_c$  は CFRP の垂直応力であり,

$$\lambda^2 = \frac{t_a^2}{G_a \cdot A_a} \cdot \frac{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \quad (2)$$

ここに

$P$ : 引張力,  $L$ :接着長さ,  $\lambda$ :基準長さ

$E_c, A_c$ : CFRP のヤング係数, 断面積

$E_s, A_s$ : 鋼のヤング係数, 断面積

$G_a, A_a, t_a$ : 接着剤のせん断剛性, 断面積, 層厚である.

これらの応力解は, 炭素・鋼が単軸応力状態, 接着剤が純せん断応力状態と仮定して求められている.

表 1 解析シリーズ

試験体名	接着剤	端部	$\lambda$	$W_s$ mm	$t_s$ mm	$t_a$ mm
CF	KS	接着	18.58	90.0	6.00	1.00
CFN	KS	未接着	18.58	90.0	6.00	1.00

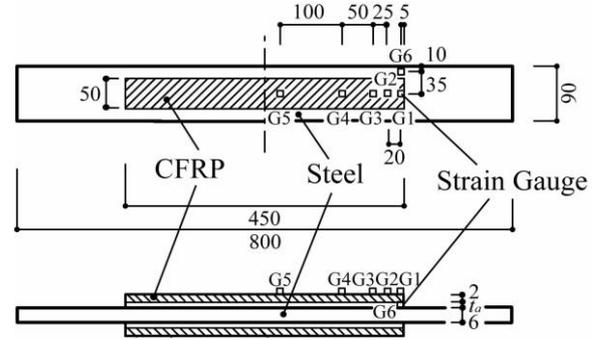


図 2 試験体形状

3.2 破壊条件式

提案する破壊条件は, (1.a)式の最大値が限界せん断応力  $\bar{\tau}_{cr}$  に達した場合に接着剤にはく離が生じるとすると, 以下の様に表される.

$$f(\sigma_{ij}) = \tau_a = \bar{\tau}_{cr} \quad (3)$$

接着長さ  $L$  が基準長さ  $\lambda$  の 10 倍以上あれば接着剤の  $\tau_a$  の最大値は, 接着端部で生じその値  $\tau_{a\max}$  は次式で近似できる.

$$\tau_{a\max} = P \cdot \sqrt{\frac{G_a}{A_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)}} \quad (4.a)$$

はく離荷重  $\bar{P}_{cr}$  が求めれば  $\bar{\tau}_{cr}$  は次式で得られる.

$$\bar{\tau}_{cr} = \bar{P}_{cr} \cdot \sqrt{\frac{G_a}{A_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)}} \quad (4.b)$$

3.3 低剛性接着剤試験体

2 節で示した, 提案破壊条件式の妥当性を検討するために, 従来の接着剤である KS 接着剤に比べ剛性が約 2/5 倍である EN 接着剤を用いて作成した CFRP と鋼板を接着した複合材の引張試験を行った.

試験体形状を図 2 に試験体シリーズを表 2, 鋼板, CFRP, 接着剤の素材特性を表 3, 4 に示す. 試験体は帯形状の板厚 6 mm, 幅 90 mm, 全長 800 mm の鋼材(鋼種:H-SA700)に, 中弾性型炭素繊維プレート(CFRP ML: 板厚 2 mm, 幅 50 mm, 全長 450mm)一層を両面に接着したものである.

接着剤は二液タイプの常温硬化型エポキシ樹脂(KS 及び EN)を使用する. KS 接着剤は主剤 2: 硬化剤 1, EN 接着剤は主剤 4: 硬化剤 1 の割合で調合し, CFRP 貼付け後, 気温 20℃以上の環境で 7 日以上養生した.

長崎大学研究報告

表 2 試験体シリーズ

試験体名	接着剤	$\lambda$	$W_s$ mm	$t_s$ mm	$t_a$ mm
KS1	KS	14.7	90.7	5.95	0.63
KS2	KS	15.7	90.8	5.99	0.71
KS3	KS	18.4	90.7	6.07	0.97
KS4	KS	19.3	90.2	5.98	1.08
KS5	KS	19.5	90.3	5.97	1.10
KS6	KS	25.3	90.8	6.05	1.84
EN1	EN	23.3	90.6	5.83	0.63
EN2	EN	29.6	90.8	5.76	1.02
EN3	EN	41.6	90.8	5.82	2.00
EN4	EN	42.2	90.7	5.90	2.05

表 3 鋼材・CFRP の素材特性

	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	降伏強さ N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	破断ひずみ %	一様伸び %
H-SA700	205000	795	862	11.70	6.6
CFRP (ML)	295000	—	2169	0.71	—

表 4 接着剤素材特性

名称	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	せん断 弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	曲げ強さ N/mm <sup>2</sup>	圧縮強さ N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	引張せん断 付着強度 N/mm <sup>2</sup>
KS	3100	1115	58	71	35	29
EN	1230	442	-	28	10	14

剛性の異なるエポキシ樹脂接着剤 KS と EN について、接着層厚  $t_a$  を KS 接着剤は 0.63~1.84mm, EN 接着剤では 0.63~2.05mm と変化させ計 10 ケースについて単調引張試験を行った。

### 3.4 試験方法

載荷プログラムは単調引張とし、CFRP のはく離破壊するまで載荷を行った。試験装置は 2000 kN のアムスラー試験機を用いる。

計測は、荷重  $P$  はアムスラー試験機の荷重計から、ひずみは図 2 に示す箇所にひずみゲージを貼付し CFRP の材軸方向垂直ひずみを端部から、5mm, 25mm, 50mm, 100mm, 200mm 間隔に(G1, G2, G3, G4, G5) と並べて、また鋼板のひずみは CFRP 端部位置(G6)を箔ひずみゲージを用いて計測した。

荷重の増加に対して、G1 点の CFRP のひずみ値がピークとなり減少し始める荷重をはく離荷重  $P_{cr}$  として求めた。

### 3.5 解析方法

解析は引張試験体全体について解析を行い、解析方法は端部未接着試験体と同様の解析を行い、各材料の弾性応力分布を求めた。

## 4. 結果と考察

### 4.1 端部未接着効果解析

解析結果を図 4, 5 に示す。

図 4 は荷重  $P = 100\text{kN}$  を与えた時の CF 試験体及び CFN 試験体における CFRP の各軸方向応力((a)材軸方向応力:  $\sigma_x$ , (b)板厚方向応力:  $\sigma_y$ , (c)板幅方向応力:  $\sigma_z$ )及び CFRP のせん断応力:  $\tau_c$  の応力を有限要素解析を用いて示す。CF 試験体を実線、CFN 試験体

を破線で示している。

図 5 は荷重  $P = 100\text{kN}$  を与えた時の CF 試験体及び CFN 試験体における接着剤の(a)せん断応力分布,(b)各軸方向応力((a)材軸方向応力:  $\sigma_x$ , (b)板厚方向応力:  $\sigma_y$ , (c)板幅方向応力:  $\sigma_z$ )を示す。

図 4, 5 では、縦軸は各軸方向の応力を、横軸に基準化長さ  $l$  で接着部端部からの距離を無次元化したものを示す。

解析結果より以下のことが分かる。

- 1) 図 4 より、CFN 試験体の未接着部分(接着部端部より CFRP 端部部分を延長した部分)では CFRP の各軸方向の応力  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  はほぼ 0 になる。
- 2) 図 4(b)の板厚方向応力  $\sigma_y$  の応力分布より、CFRP における板厚方向応力  $\sigma_y$  は CFRP 端部近傍で最大となり、通常の接着条件である CF 試験体よりも CFRP 端部を未接着にした CFN 試験体のほうが最大値及び最小値と共に小さくなっている。これは、CFRP 端部を未接着にしたことによる効果だと考えられる。
- 3) また、図 4(d)の CFRP のせん断応力  $\tau_c$  の応力分布も同様の変化をしている。
- 4) 図 5(a)の接着剤のせん断応力  $\tau_a$  の分布より、CF 及び CFN 試験体において接着剤のせん断応力  $\tau_a$  は殆ど差はない。
- 5) 図 5(b)の接着剤の各軸方向応力分布  $\sigma_a$  より、接着剤の各軸方向応力は接着部端部近傍で最大となり、CFRP 端部を未接着にした CFN 試験体の接着剤の応力の最大値  $\sigma_{ax \max}^{\text{CFN}}, \sigma_{ay \max}^{\text{CFN}}, \sigma_{az \max}^{\text{CFN}}$  は CF 試験体での最大値  $\sigma_{ax \max}^{\text{CF}}, \sigma_{ay \max}^{\text{CF}}, \sigma_{az \max}^{\text{CF}}$  に比べ減少している。特に板厚方向の応力  $\sigma_y$  が大きく減少しているのは、CFRP 端部の板厚方向の応力  $\sigma_y$  による影響が大きいと考えられる。

長崎大学研究報告

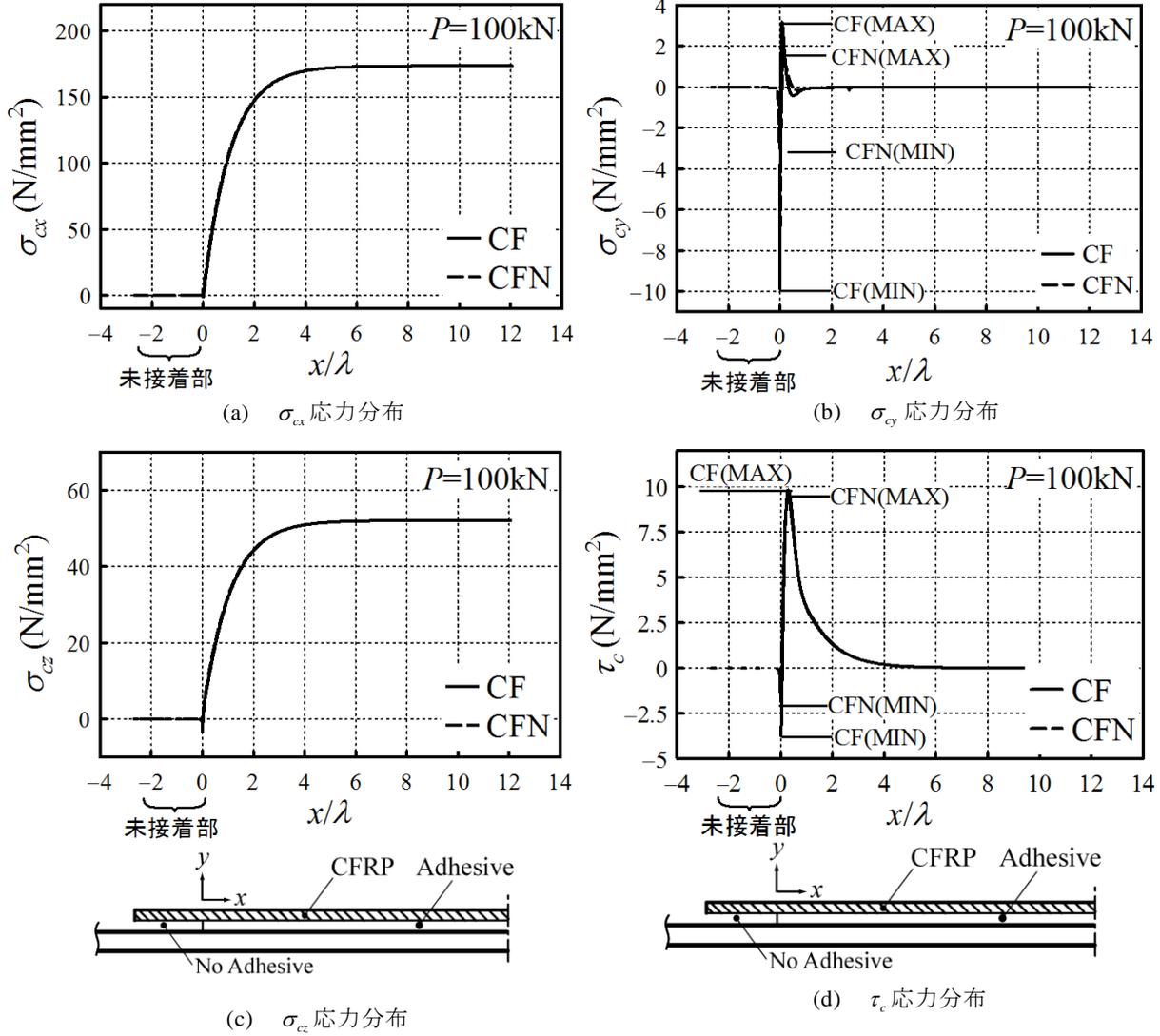


図4 各試験体のCFRPの応力分布

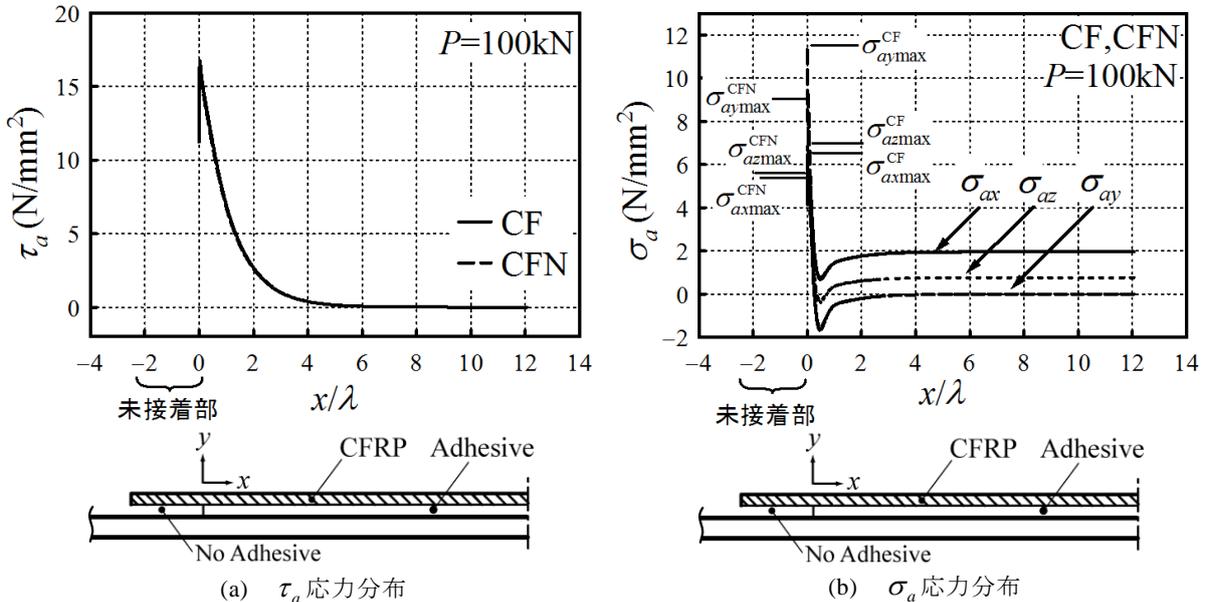


図5 各試験体の接着剤の応力分布

長崎大学研究報告

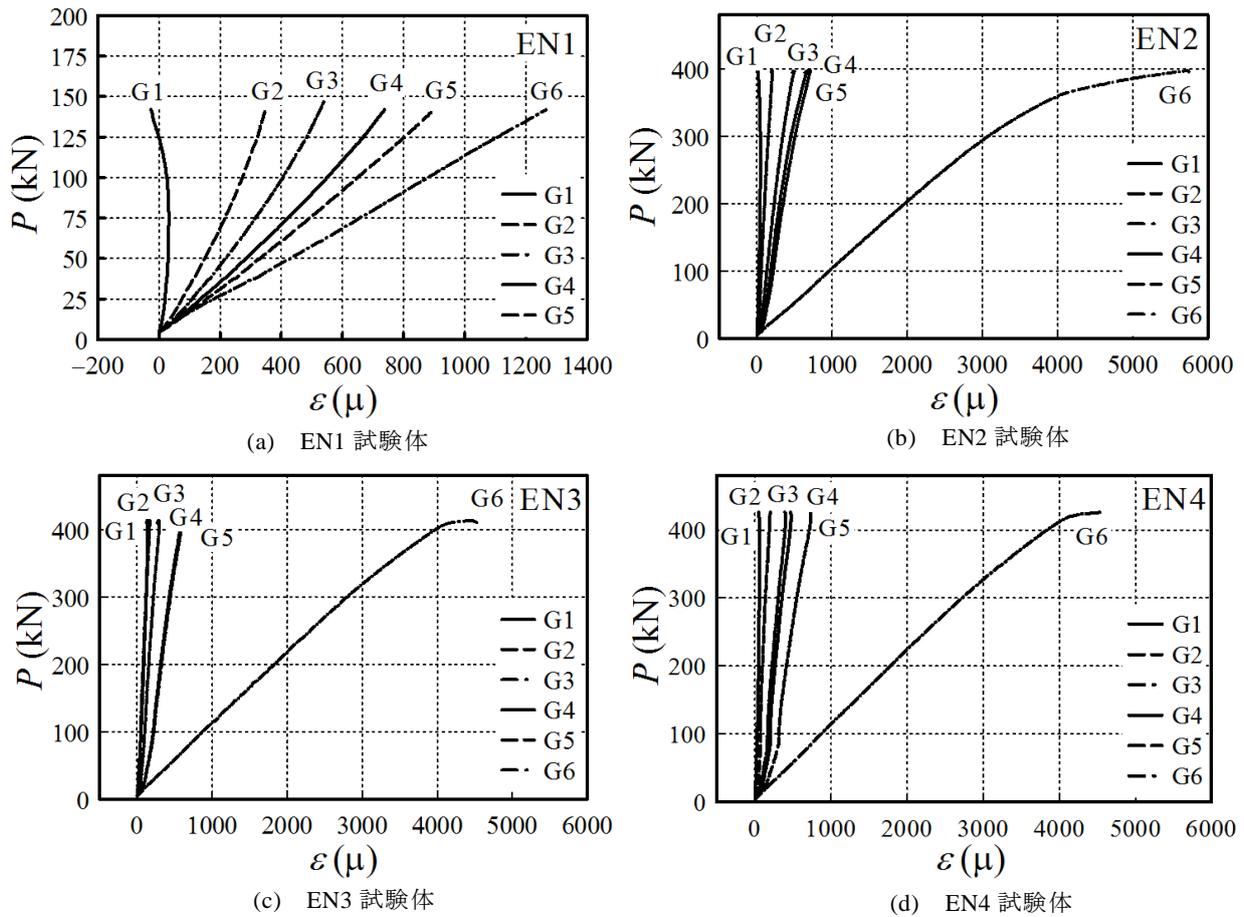


図5 荷重—ひずみ関係

4.2 低剛性接着剤試験体

従来の接着剤よりも剛性の低い EN 接着剤を用いて新たに作成した試験体の試験結果を表5, 図5-8に示す。表5, 図7, 8については参考としてKS試験体の実験結果を併せて示している。

表5は各試験体のはく離荷重  $P_{cr}$ , はく離荷重で求めた提案式相当応力の値  $\tau_a$ ,  $\bar{\tau}_{cr}$  を相当応力の平均値として求めた。提案条件  $\tau_a/\bar{\tau}_{cr}$  の値を求め, 各条件の1.0の値からのばらつきを変動係数(=(標準偏差)/(平均値))として示している。

図5に各試験体の荷重—ひずみ関係を示す。ひずみは図2に示すG1~G6のひずみを示しており, EN1~EN4試験体についてそれぞれ(a)~(d)に示している。

図6に各試験体のG1ひずみゲージのひずみ値と荷重との関係を(a)KS接着剤, (b)EN接着剤について示す。また各試験体のはく離荷重  $P_{cr}$  のときのひずみ値を○で示す。EN2~EN4試験体では鋼板の降伏直前または降伏後にCFRP端部のひずみが最大となり, はく離が生じた。

図7に荷重  $P=70\text{kN}$  時のCFRPと鋼との垂直応力分布を(a)EN1, (b)EN4, (c)KS1, (d)KS5試験体について示す。

縦軸に応力, 横軸に表2に示す各試験体の基準化長さ  $\lambda$  で接着部端部からの距離を無次元化したものを示す。CFRPの垂直応力を実験値は○で, 理論値を実線で, 有限要素解析値は破線で示す。

図8は各条件式  $f(\sigma_{ij})/\bar{\tau}_{cr}$  と接着層厚  $t_a$  の関係を(a)KS接着剤, (b)EN接着剤に分けて示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

- 1) 図5, 6の各試験体の荷重—ひずみ関係より, EN1試験体を除いた, EN2~EN4試験体は鋼板の降伏直前及び降伏直後にはく離が生じている。
- 2) 図7の各試験体のCFRPと鋼との垂直応力分布より, EN1試験体では実験値と理論・解析値は良好に一致しているが, EN2~4試験体では実験値と理論・解析値が一致しない結果になった。これは温度による接着剤の材料定数の変化により, 実験結果と理論・解析結果に差が生じたと考えられる。
- 3) 表5, 図8より, 提案した破壊条件式の適合度を変動係数で比較してみるとKS試験体では0.09とばらつきは少ないが, EN試験体では0.33とばらつきが大きくなった。これは, 先に示した温度に

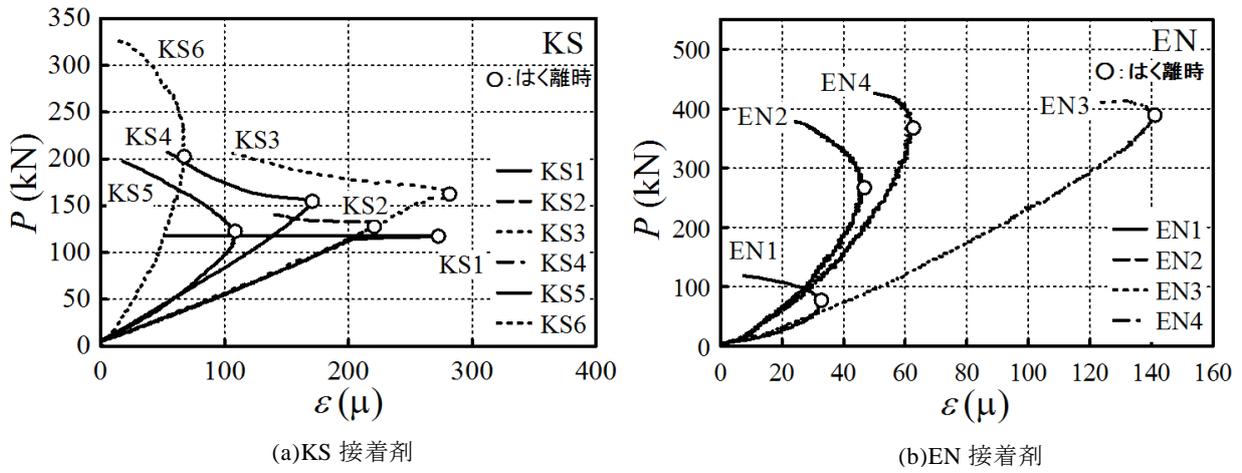


図6 荷重—ひずみ関係(G1)

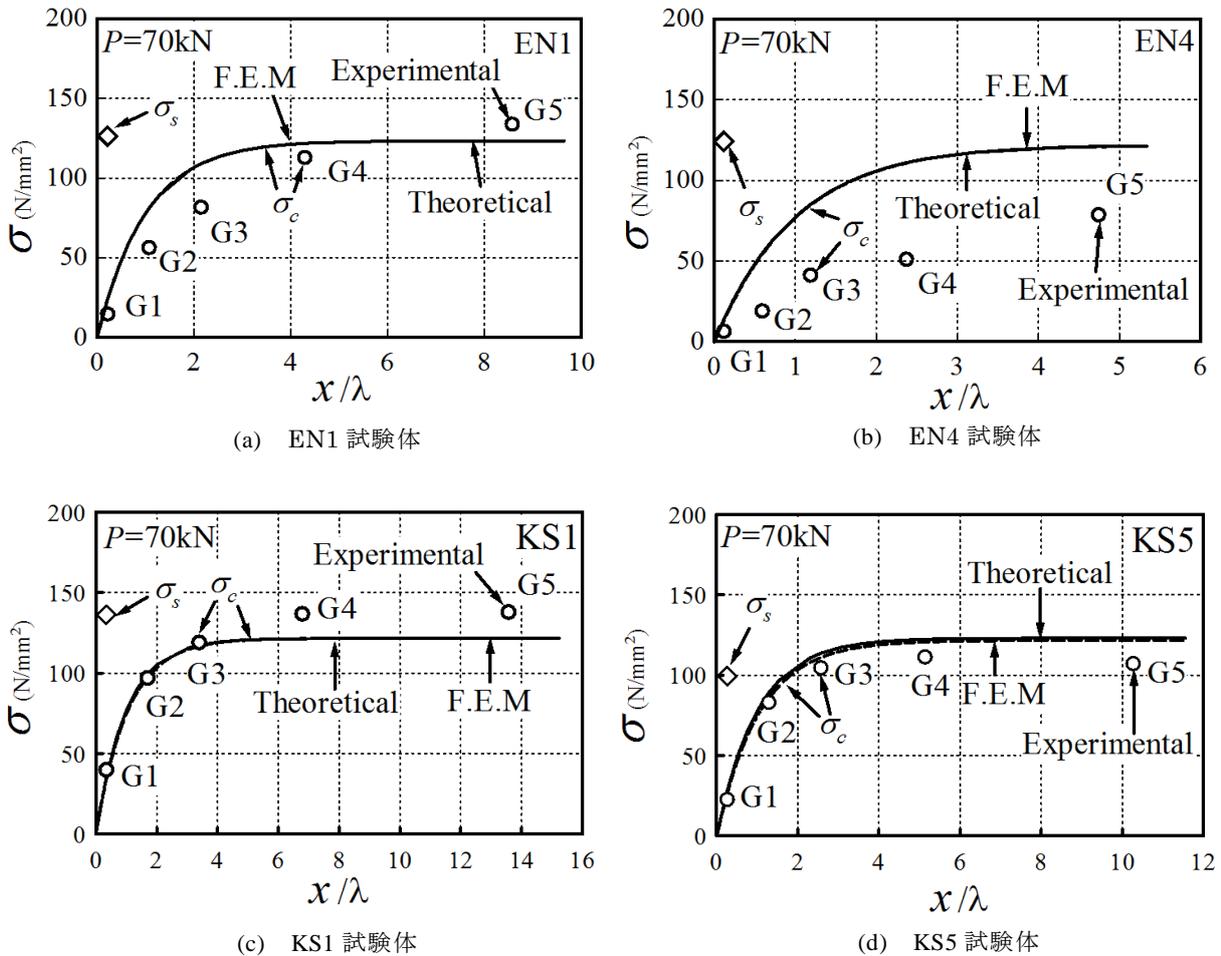


図7 CFRPと鋼との垂直応力分布

長崎大学研究報告

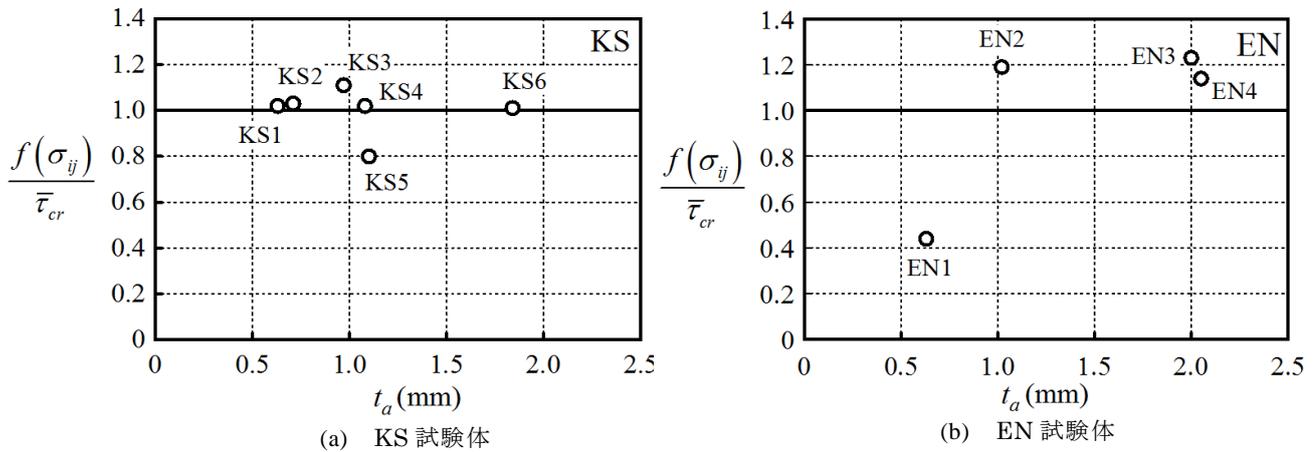


図8 破壊条件適合度

よる接着剤の材料定数の変化によってばらつきが大きくなったと考えられる。また、提案する破壊条件式は弾性範囲内ではく離を仮定しているため、鋼板の降伏直前及び直後にはく離が生じた EN2~4 試験体における破壊条件の適合性は、今後更なる検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究は CFRP と鋼との複合材において、CFRP 端部部分を未接着にした場合の性状を明らかにするために、有限要素法を用いて通常の炭素繊維プレート補剛鋼板との比較を行った。また、提案した破壊条件式の妥当性を検討するため、新たに剛性の低い接着剤を用いて引張試験を行い、破壊条件式の妥当性の検討を行った。

本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

- CFRP 端部部分を未接着にすることで、CFRP の板厚方向の垂直応力  $\sigma_y$  の最大値、最小値及び接着剤の板厚方向の垂直応力  $\sigma_{xy}$  の最大値は減少する。
- CFRP の未接着部分では CFRP の垂直応力はほぼ 0 になる。
- 低剛性接着剤での破壊条件式の妥当性の検討は、CFRP のはく離が鋼材の降伏前後に生じたため、弾性範囲内ではく離を想定した破壊条件式の妥当性の確認を得るまでには至らなかった。

今後の予定としては、今回解析で行った未接着試験体を実際に作成し、実験を行うと共に解析値との比較及び検討を行う。また、低剛性の接着剤を用いた試験体を新たに作成、実験を行い、破壊条件式の適合性についてさらなる検討を行う。

表5 実験結果・破壊条件

試験体名	はく離荷重 $P_{cr}$ (kN)	提案式 相当応力 $f(\sigma_{ij})$ (N/mm <sup>2</sup> )	試験体名	提案条件 $f(\sigma_{ij})/\bar{\tau}_{cr}$
KS1	117.66	27.75	KS1	1.02
KS2	127.90	28.24	KS2	1.03
KS3	162.62	30.41	KS3	1.11
KS4	154.95	27.93	KS4	1.02
KS5	122.88	21.95	KS5	0.80
KS6	202.85	27.59	KS6	1.01
平均	-	27.31	変動係数	0.09
EN1	77.19	11.67	EN1	0.44
EN2	267.04	31.98	EN2	1.19
EN3	389.04	32.99	EN3	1.23
EN4	367.56	30.47	EN4	1.14
平均	-	26.78	変動係数	0.33

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、高松隆夫(広島工大),服部明生,藤本信介(東レ建設),堀井久一(コニシ(株)),松井孝洋(東レ(株))の諸氏には、素材を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

- 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートによる鋼構造建物の補強法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, pp.239-246, 2004.11.
- 玉井宏章, 陣川晃司, 高松隆夫, 服部明生, 堀井久一: 炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力: 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.589-595, 2014. 11.
- 玉井宏章, 服部明生, 小澤吉幸, 高松隆夫, 灰谷徳治, 久保田啓仁, 炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着応力について, 日本建築学会学術講演梗概集, No22473, 945-946, 2013.8.