

# 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2 接着剤破壊条件

玉井 宏章\*, 陣川 晃司\*\*, 中村 憲一\*\*, 御厨 健太\*\*\*

## Shear Bond Strength of Rehabilitated Steel Plate Bonding CFRP Plates. Part 2 Failure conditions of adhesive

By

Hiroyuki TAMAI\*, Koji JINKAWA\*\* and Kenichi NAKAMURA\*\*, 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 member of steel bonding CFRP Plates has enough bending strength when no bending moment works at the edge of CFRP Plates. 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, Tensile Loading Tests of composite of steel bonding CFRP Plates were performed to clarify the validity of the proposed formula.

**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おり、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>。

前報ではCFRPと鋼との複合材の弾性応力理論式を示し、接着剤の耐力を予測する簡便な破壊条件を提示した。実際の構造物は弾性範囲での多数回繰返し荷重が作用するので、接着補剛する場合、材料強度の比較的弱い接着剤の疲労破壊が問題となる。

CFRPの接着端部の接着層にはせん断応力の他に各垂直応力(引張側)も急激に増大する。

本研究では、接着層厚と接着剤せん断剛性を変化させたCFRPと鋼との複合材の引張試験及び有限要素法解析により、提案した接着剤の破壊条件の妥当性の検討を行い複合材の引張試験及び有限要素法解析と接着剤の破壊条件の妥当性を示す。

### 2. 破壊条件式

#### 2.1 弾性応力分布理論式

下フランジにCFRPを接着補剛したH型鋼梁の下フランジ部を図1のように取り出した。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)4)</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、

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

平成27年1月23日受理

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

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

\*\*\* 工学部構造工学科 (Department of Structural

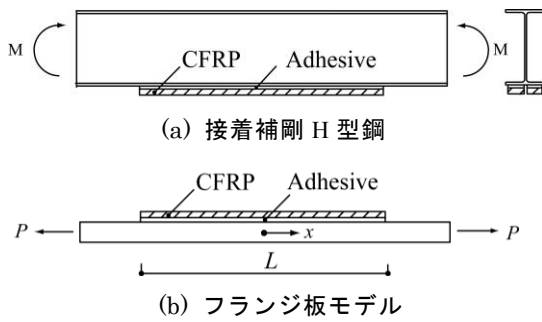


図1 接着補剛部材のモデル化

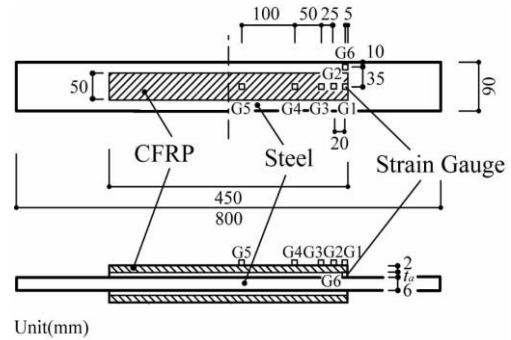


図2 試験体形状

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.

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

接着長さ  $L$  が基準長さ  $\lambda$  の 10 倍以上あれば接着剤の  $\tau_{xy}$  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.

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

一方, 垂直応力の影響を考慮しうる鋼の降伏条件でよく用いられるミゼズの条件を用いると以下のように表される<sup>5)</sup>.

平面応力状態では,

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} = \bar{\sigma}_{cr} \quad (5.a)$$

平面ひずみ状態では,

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot \tau_{xy}^2 \right\}} = \bar{\sigma}_{cr} \quad (5.b)$$

$\bar{\sigma}_{cr}$  ははく離荷重  $\bar{P}_{cr}$  を与えた時の弾性応力分布のうち  $f(\sigma_{ij})$  の最大値として求められる.

本研究は, 接着剤の破壊条件として提案式(3)式とミゼズの式(5.a), (5.b)式を比較検討する.

### 3. 引張試験法と解析方法

#### 3.1 引張試験

2 節で示した, 提案破壊条件式及びミゼズの条件式の妥当性を検討するために 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 1 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.

鋼板, CFRP, 接着剤の素材特性を表 2, 3 に示す.

接着剤は二液タイプの常温硬化型エポキシ樹脂(KS)及び接着シート(DA)を使用する. KS 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°C 以上の環境で 7 日以上養生した. DA 接着剤は CFRP 貼付け後, 気温 5°C 以上の環境で 7 日以上養生した.

剛性の異なるエポキシ樹脂接着剤 KS と DA について, 接着層厚  $t_a$  を KS 接着剤では 0.63~1.84mm, DA 接着剤では 0.45~0.78mm と変化させ計 10 ケースについて CFRP のはく離が生じるまで単調引張試験を行った.

载荷プログラムは単調引張とし, CFRP のはく離破壊するまで载荷を行った. 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 に示す箇所には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, 45mm, 50mm, 100mm 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.

表 1 試験体シリーズ

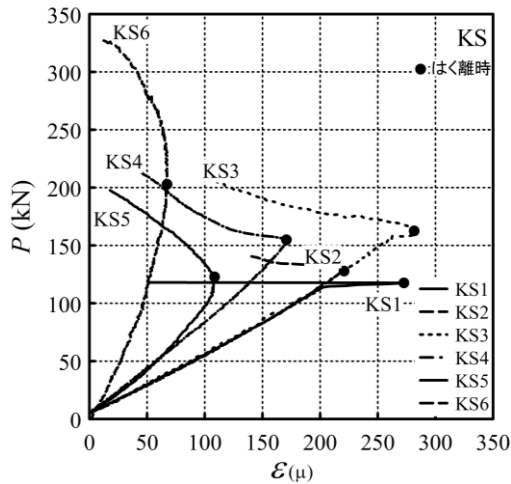
試験体名	接着剤	Ws mm	$t_s$ mm	$t_a$ mm
KS1	KS	90.7	5.95	0.63
KS2	KS	90.8	5.99	0.71
KS3	KS	90.7	6.07	0.97
KS4	KS	90.2	5.98	1.08
KS5	KS	90.3	5.97	1.10
KS6	KS	90.8	6.05	1.84
DA1	DA 1枚	90.7	5.97	0.45
DA2	DA 2枚	91.0	6.08	0.60
DA3	DA 2枚	90.6	6.05	0.61
DA4	DA 2枚	90.7	6.06	0.78

表 2 鋼材・CFRP の素材特性

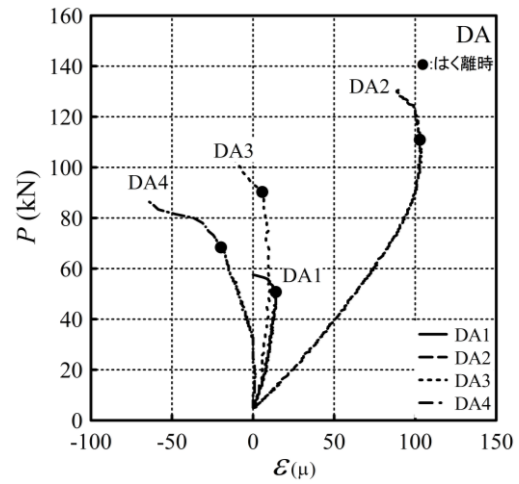
	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	降伏強さ N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	破断ひずみ %	一様伸び %
H-SA700	205000	795	862	11.70	6.6
CFRP (ML)	295000	—	2,169	0.71	—

表 3 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
DA	362	132	-	-	-	18



(a) KS 接着剤



(b) DA 接着剤

図 3 荷重—ひずみ関係

### 3.2 有限要素法解析

解析対象は平面応力状態また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、全要素分割数は4800とした。なお、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った。材軸方向にx軸をとり原点を鋼板中央とした。

全試験体について解析を行い、各材料の弾性応力分布を求めた。

### 4. 実験・解析結果とその考察

実験及び解析結果を図3～6、表4に示す。図3は各試験体の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)DA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。

図4はKS4試験体について、はく離荷重を与えたときの接着剤中央部での(a)せん断応力分布 $\tau_{xy}$ 、(b)垂直応力分布 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (板幅方向z、厚方向y、材軸方向x)を平面ひずみ状態を仮定した有限要素解析解を用いて示す。また、図4(a)には、ミゼズの条件 $f(\sigma_{xy})/\bar{\sigma}_{cr}$ の算定結果とともに併せて示す。

図5には荷重Pが70kNの時のCFRPの垂直応力分布を示す。KS3、DA3試験体については、CFRPの応力は実験値を○印で理論値を実線で、有限要素解析値は破線で示す。

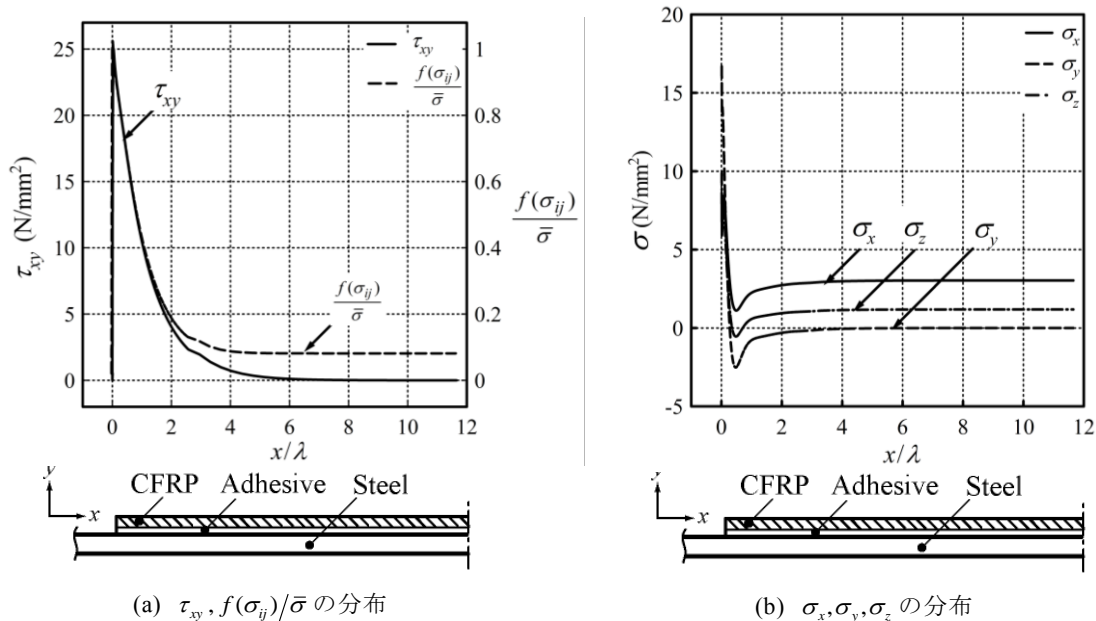


図4 KS4 試験体の弾性応力分布解析値

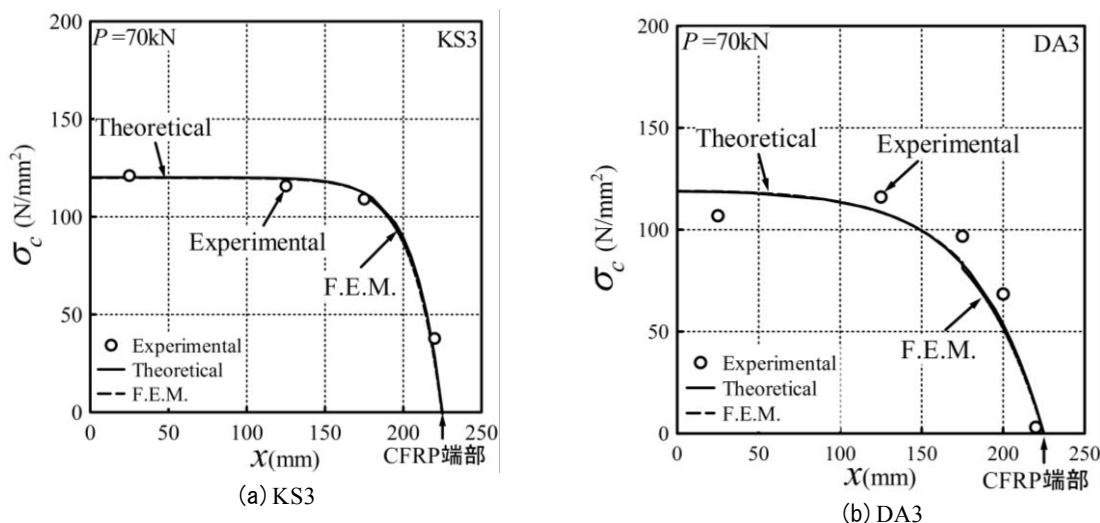


図5 CFRP と鋼との垂直応力分布

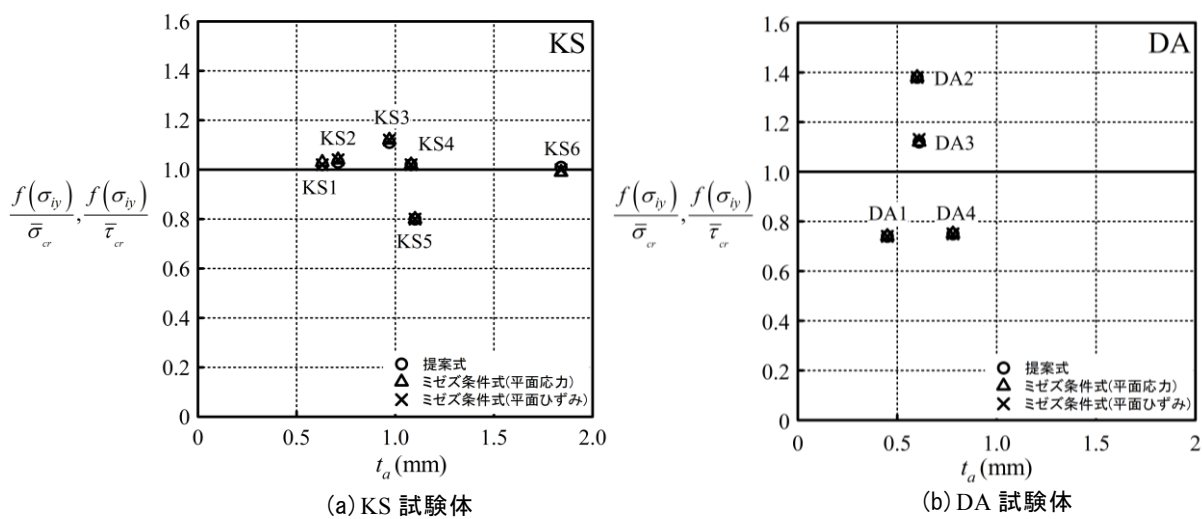


図6 接着剤破壊条件の適合度

表 4 実験結果と相当応力, 接着剤破壊条件

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> )	ミゼズ式相当応力 $f(\sigma_{ij})$ (N/mm <sup>2</sup> )		試験体名	提案条件 $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$	ミゼズ条件 $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$	
			平面応力	平面ひずみ			平面応力	平面ひずみ
KS1	117.66	27.75	46.11	43.72	KS1	1.02	1.03	1.02
KS2	127.90	28.24	46.66	44.47	KS2	1.03	1.04	1.04
KS3	162.62	30.41	50.14	47.78	KS3	1.11	1.12	1.12
KS4	154.95	27.93	45.99	43.68	KS4	1.02	1.02	1.02
KS5	122.88	21.95	36.15	34.35	KS5	0.80	0.80	0.80
KS6	202.85	27.59	44.69	42.71	KS6	1.01	0.99	1.00
平均	-	27.31	44.96	42.79	変動係数	0.09	0.10	0.10
DA1	50.78	4.86	8.33	7.91	DN1	0.74	0.74	0.74
DA2	110.92	9.04	15.48	14.80	DN2	1.38	1.38	1.38
DA3	90.30	7.35	12.59	12.05	DN3	1.12	1.12	1.13
DA4	68.40	4.91	8.42	8.04	DN4	0.75	0.75	0.75
平均	-	6.54	11.21	10.70	変動係数	0.27	0.27	0.27

表 4 は各試験体のはく離荷重  $P_{cr}$ , 提案式及びミゼズ式(平面応力, 平面ひずみ)の値  $f(\sigma_{ij})$ , 相当応力を同一接着剤のはく離荷重で求めた平均値として求めた, 提案条件及びミゼズの条件(平面応力, 平面ひずみ),  $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$ ,  $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$  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))として示した.

図 6 は各条件式  $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$ ,  $f(\sigma_{ij})/\bar{\sigma}_{cr}$  と接着層厚  $t_a$  の関係を(a)KS 接着剤, (b)DA 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.

- 図 4 より CFRP 端部における接着剤の垂直応力は,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  とともに引張応力が集中して発生する. これは引張の静水圧成分が上昇している.
- 同様にせん断応力も端部から基準長さ  $\lambda$  の 5 倍から値が大きくなる. またその変化は, ミゼズの条件式  $f(\sigma_{ij})/\bar{\gamma}_{cr}$  とほぼ同じ変化となる.
- 表 4 より, 提案式及びミゼズ式(平面応力, 平面ひずみ)のはく離時の各相当応力  $f(\sigma_{ij})$  は試験体平均で KS 接着剤では 21.95~30.41N/mm<sup>2</sup> となり, 平均 27.59 N/mm<sup>2</sup> で  $\bar{\sigma}_{cr} = \bar{\sigma}_{cr}/\sqrt{3}$  とすれば, これらの値もほぼ等しい.
- 図 5, 表 4 から, DA 接着剤でのばらつきは大きいものの, 接着剤の破壊条件式は, いずれの条件式もその変動係数値は同等であることから, CFRP 端部の接着剤の垂直応力の上昇を考慮することなく, 単純にせん断応力のみに着目した提案条件式を用いれば, 同様の精度で接着剤のはく離を判定することができる.

## 5. まとめ

本研究では提案破壊条件式の妥当性を検討するため, 剛性の違う接着剤や層厚の違う試験体などを用い, さらに平面応力状態および平面ひずみ状態での応力を用いた既存式と比較・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出来る.

- KS 接着剤については提案破壊条件式は剛性や接着層厚によらず適用することができる.
- 接着剤の破壊は提案破壊条件式を用いることで複雑な応力状態を考慮した既往の破壊条件式と同等に判定しうる.

## 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.
- 大沼康二, 金属外版接着部の応力分布と強さ特性について, 日本航空学会誌第 7 巻, 第 60 号, 1959.1.
- 嶋津孝之, 福原安洋, 中山昭夫, 高松隆夫, 森村毅: 鋼構造(第 2 版), 森北出版, 2012.

## 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.