

炭素繊維プレート接着補強鋼部材の有限要素法解析 その2 断面欠損のある小梁の補剛効果

玉井宏章*・中村憲一**・島津勝*

FEM Analysis of Rehabilitated Steel Member using CFRP Plates Part 2 Stiffening Effect on Subsidiary Beam with Faults

by

Hiroyuki TAMAI*, Kenichi NAKAMURA** and Masaru SHIMAZU*

The authors have developed a tensile force strengthening method using bonded carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate to enhance the life of existing building. This paper reports the result of loading tests and F.E.M. analyses on a subsidiary beam before and after rehabilitation using bonding CFRP Plates. These results show the required bonding length to recover the its original flexural stiffness. And rehabilitated effect could be evaluated by presented calculation to take an additional bonding length.

Key words: Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Steel Member, Nonlinear Finite Element Method

1 はじめに

高い剛性と強度を有する炭素繊維を鋼構造物に接着補強する方法が著者らを含めた研究者によって開発されつつある。

前報その1では、実大の送電鉄塔主材の補強山形鋼材について行った偏心圧縮試験について、3次元有限要素法複合非線形解析を行った。その際、炭素繊維プレートの異方性や破壊条件を精密にし、破壊限界を推定した。また文献4では、代表的鋼部材である小梁の曲げ補強を対象として、単純梁載荷試験を行って最適な適用方法の補強効果を検討した。

本報では、腐食等により下フランジ断面が欠損した梁が欠損した梁を想定して下フランジにCFRPを部分的に接着補強した試験体を作成し、単純梁載荷試験を行って、炭素繊維プレート接着による、下フランジの発生応力、発生ひずみの低減効果を示すとともに、実験結果について3次元有限要素法解析を行って、低減効果を詳細に検討する。接着した炭素繊維プレートも梁と一体として挙動するとした理論値と実験値及び有限要素解析値を比較し、補強設計の便を考慮して、理論値

により発生応力、発生ひずみの低減効果を予測しうる、炭素繊維プレートの必要接着長や接着層厚さを示す。

2 実験の概要

炭素繊維プレートを接着補強することによる断面欠損梁の発生ひずみ低減効果を明らかにするため、中央集中荷重を受ける単純支持梁の載荷実験を行った。加力装置の概要を図1に示す。ピンとローラー支持を取付けた反力梁上に試験体を設置し試験体中央部にピンとロードセルを介して、載荷フレームに固定した油圧ジャッキが取り付けられている。

載荷プログラムは、この油圧ジャッキを用いて単調に載荷した。

標準的な試験体形状を図2に断面欠損部の詳細を図3に示す。

試験体は全長4500mmの細幅H形鋼(BH-250×125×6×25,9)で上フランジ厚25mm、下フランジ厚9mmとし、下フランジ中央部500mmの領域の板厚を6mmと減厚したもの(減厚無補鋼強試験体)とその試験体の下フ

平成24年12月17日受理

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

** 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

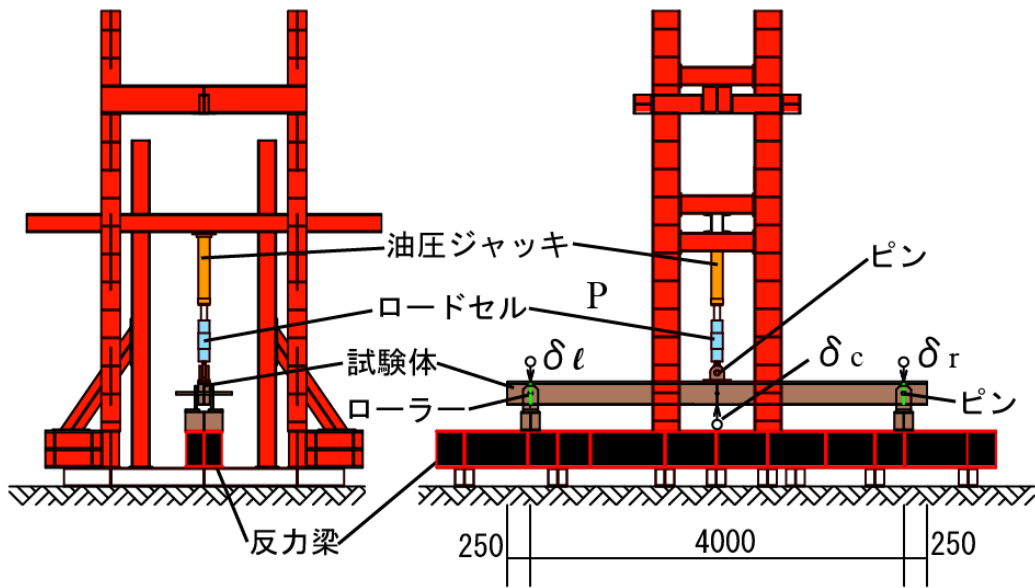


図1 加力装置の概要

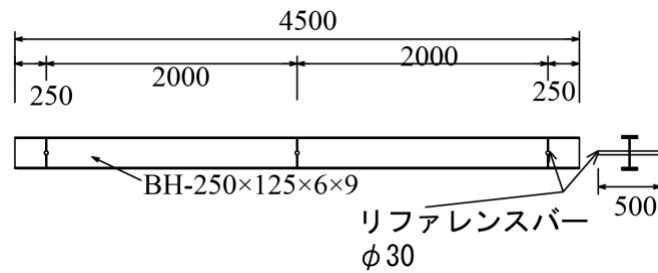


図2 試験体

表1 素材試験結果

試験体名称	CFRPの種類	接着層の厚さ (mm)		備考
		第1層	第2層	
N	-	-	-	無補強
NML2	NML	1.10	1.20	中弾性型CFRP
UTL2	TL	1.20	1.20	高強度型CFRP
UTM2	TL, ML	1.10	1.20	高強度・中弾性型CFRP

表2 CFRP と硬化後の接着剤の素材特性

	ヤング係数 kN/mm ²	降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断 ひずみ %
CFRP TL	169.1	-	3,085	1.52
CFRP ML	295.7	-	2,169	0.71

ヤング係数	曲げ強度	圧縮降伏強度	引張強度	引張せん断付着強度	衝撃強度
kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kJ/m ²
2.28	55.8	59.0	34.8	25.5	4.2
JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111

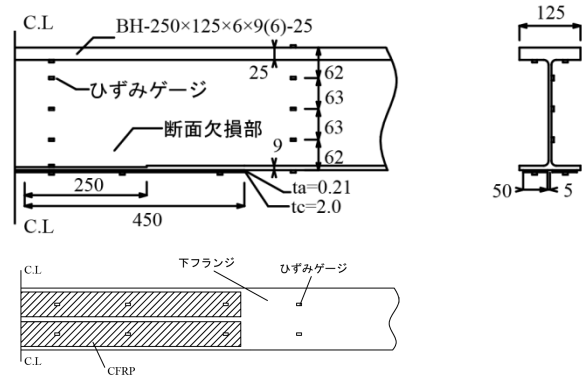


図3 ひずみゲージ貼付位置

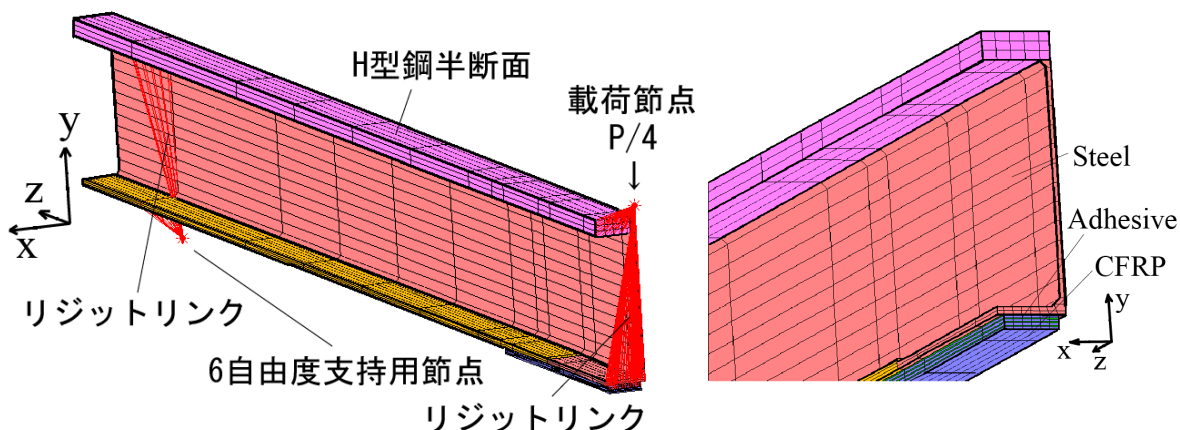


図4 有限要素解析モデル

ランジ下面に中弾性型炭素繊維プレート (ML 50mm×2mm) を両側 200mm の定着付加長を加えて長さ 900mm だけ2列2, 4層接着したもの (2層貼試験体, 4層貼補強試験体) 計3体の試験体を用意した. 試験体に用いたH形鋼梁の各部位の1号試験片による3体の引張り試験結果の平均値を表1に, 炭素繊維プレート, 硬化後の接着剤の素材特性を表2に示す.

計測は, 荷重の計測はジャッキ先端に取り付けたロードセルから中央集中荷重 P を, 変位の計測はローラー及びピン支持部の鉛直変位 δ_l, δ_r 及び中央点鉛直変位 δ_c を高精度変位計で計測した. また, 全試験体について図3に示す位置に検長5mmの一軸箔ひずみゲージを貼付して計12点の材軸方向直ひずみを計測した.

尚, 中央たわみ, w は次式により算定した.

$$w = \delta_c - \frac{\delta_l + \delta_r}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

3 解析方法

H形鋼梁の炭素繊維プレートによる接着補剛の効果と所要の接着長さを検討するため, 実験を行った接着補強試験体について有限要素法解析を行った.

炭素繊維プレートは, 高剛性・高強度の炭素繊維一方方向に引きそろえ, 加熱硬化後型の樹脂で一体化し板状に加工した材であるため, 繊維方向と繊維直方向との弾性剛性, 強度が異なる強い異方性を有している. これらの材の特性を追跡するために定式化した, 弾性応力-ひずみ関係式, 破壊条件, また鋼材の弾塑性応力-ひずみ関係式を利用した. これらの詳細並びに解析用材料定数は文献1を参照されたい.

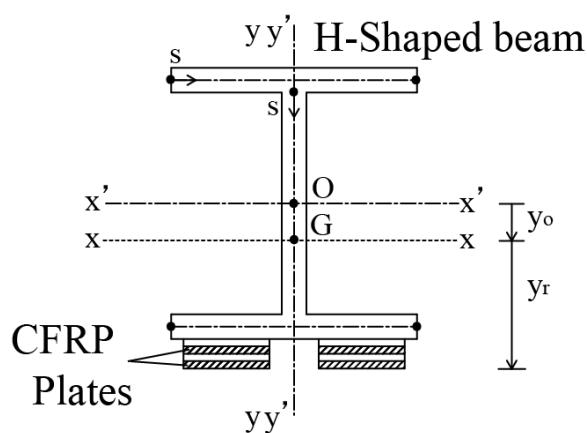


図5 CFRPを接着したH形鋼の断面

解析モデルを図4に示す. 加力点及び支持点に6自由度節点を設け強制圧縮変位を y 軸方向に与える. 加力用節点及び支持点断面の節点はリジットリンクで結合している. ひずみゲージの貼付位置に節点がかかるように要素分割を行った.

形状・変形の対称性から 1/4 領域の解析を行った. 接着層の変形や CFRP, 鋼板の板幅方向のひずみ分布を考慮するため, 1 節点, 3 自由度, セレンディピティ族の 20 節点六面体要素を採用した. 計測は中央点の荷重 P , 鉛直方向変位 w と下フランジゲージ位置の材軸方向垂直ひずみ ε は, 形状関数を重みとする平滑化法によって節点位置で求めた値を比較値として採用した. 尚, プレ, ポスト処理は Mentat2008, 解析は Marc2008 により実行した.

4 算定方法

鋼梁と炭素繊維プレートとの複合材断面の曲げ剛性と縁ひずみの算定方法を以下に示す。

○曲げ剛性算定式

図5に示すようにH形鋼の図心に原点Oとx'y'座標を置く。鋼材，n層の接着剤，CFRP板材の全断面についての図心回りの曲げ剛性 EI_c は次式のように求まる。

$$(EI)_c = \sum_{i=0}^n E_i \cdot I_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに，nは層数であり， E_i, I_i はi層要素のヤング率，断面二次モーメント（図心上の弱軸回り）である。 I_i は，次式で求まる。

$$I_i = I_i' - A_i \cdot y_0^2 \quad \dots\dots\dots(3.a)$$

y_0 はx'座標と図心との距離であり， I_i はx'座標回りの断面2次モーメント， A_i はi層要素の断面積であり次式で求まる。

$$A_i = 2 \cdot t_i \cdot L_i \quad \dots\dots\dots(3.b)$$

$$I_i' = \iint_A y_i'^2 \cdot dA = 2 \cdot \int_0^{L_i} y_i'^2 \cdot t_i \cdot ds \quad \dots\dots(3.c)$$

ここにs座標は，層要素の中心の座標である。図心距離 y_0 は，ヤング係数で重みを付けた断面1次モーメントと断面積から，次式で評価できる。

$$y_0 = \frac{\sum_{i=0}^n E_i \cdot S_i'}{\sum_{i=0}^n E_i \cdot A_i} \quad \dots\dots\dots(3.d)$$

ここに，

$$S_i' = \iint_{A_i} y_i' \cdot t_i \cdot ds \quad \dots\dots\dots(3.e)$$

さて，第i層の始点と終点のy'座標値を y_s', y_e' とするとi層要素の座標 y_i' は次式で表される。

$$y_i' = (y_e' - y_s') \cdot \frac{s}{L} + y_s' \quad \dots\dots\dots(4.a)$$

よって，(5.e)式の S_i' は，

$$S_i' = 2 \cdot \int_0^{L_i} y_i' \cdot t_i \cdot ds = t_i \cdot (y_e' + y_s') \cdot L_i \quad \dots\dots\dots(4.b)$$

また， I_i' は次式のように積分できる。

$$\begin{aligned} I_i' &= 2 \cdot \int_0^{L_i} y_i'^2 \cdot t_i \cdot ds = 2 \cdot t_i \cdot \int_0^{L_i} \left((y_e' - y_s') \cdot \frac{s}{L_i} + y_s' \right)^2 \cdot ds \\ &= \frac{2}{3} \cdot t_i \cdot L_i \cdot \left(y_e'^2 + y_e' \cdot y_s' + y_s'^2 \right) \quad \dots\dots\dots(4.c) \end{aligned}$$

○縁ひずみ算定法

鋼材，接着剤と炭素繊維プレートが一体となって挙動するとして古典梁理論のベルヌーイ・オイラーの仮定が成立するとすれば，本実験のような曲げを受ける単純梁の縁ひずみ ϵ_r は次式で表される。

$$\epsilon_r = \frac{M}{(EI)_c} \cdot y_r \quad \dots\dots\dots(5.a)$$

ここに， y_r は図心から縁までの距離，Mは曲げモーメントであり，ローラー支持点から評価点までの距離をzとすると

$$M = \frac{P}{2} \cdot z \quad \dots\dots\dots(5.b)$$

曲げモーメントは材軸方向に連続変化する。今回扱う梁は編断面であるので(5.a)式から得られる縁ひずみの材軸方向変化は不連続となる。

5 実験 解析結果とその考察

図6に全試験体の荷重-たわみ関係を図7に中央荷重Pを70kNとしたとき中央下フランジ下面の垂直ひずみを(a)2層貼試験体(b)4層貼試験体について示す。

図8は中央荷重を80kNとしたときの4層貼試験体における表層から1~4層の接着材のせん断ひずみ分布を示す。2層及び4層貼試験体の接着層厚 t_a は一層当たり0.21mmで，減厚部端からの接着付加長さ ℓ_c は両端から $\ell_c = 200\text{mm}$ となっている（ $x = 0 \square 450\text{mm}$ がCFRP接着長さとなっている）。

図6は縦軸の荷重は下フランジに減厚のない鋼梁の単位変形角荷重で無次元化した荷重 $P \cdot \ell^2 / 48 \cdot E \cdot I_s$ を横軸はスパン長さで無次元化したたわみ w/ℓ を示す。図7,8は，梁中央から材軸方向座標xと下フランジ下面の表層のCFRPプレート中央位置の垂直ひずみ ϵ を実験値0で，算定値を破線で，有限要素解を実線で示すとともに，併せて補強前・補強後の鋼材の垂直ひずみ ϵ を一点鎖線，破線で示す。

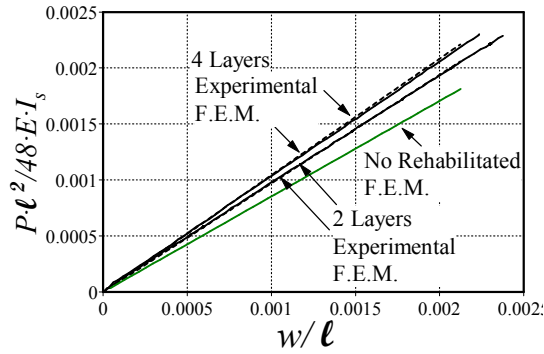
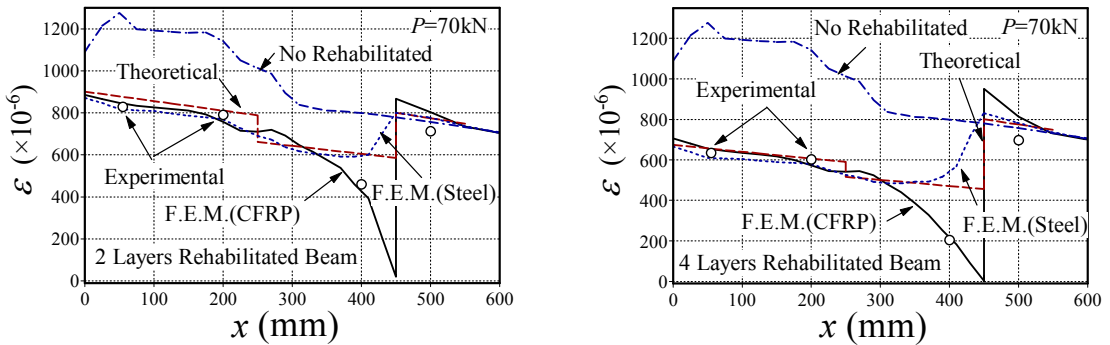


図6 荷重-たわみ関係



(a) 2層貼試験体の結果

(b) 4層貼試験体の結果

図7 下フランジ下面のひずみ分布 (P=70kN)

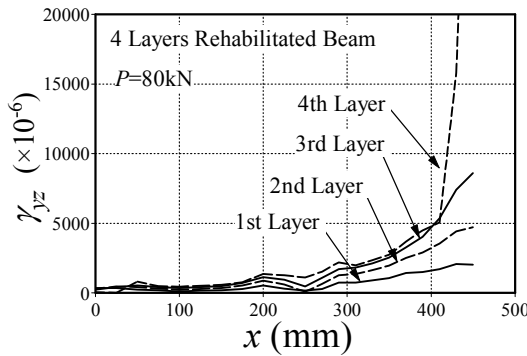


図8 接着材のせん断ひずみ分布 (表面から1~4層の中央での値)

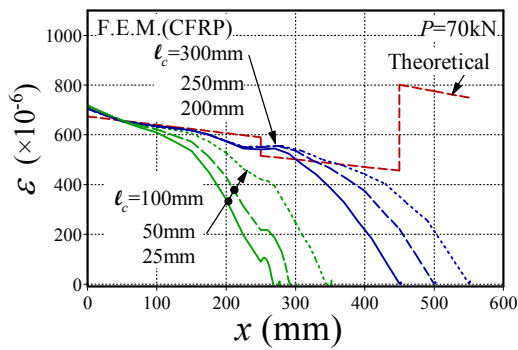


図9 接着長さを変化させた場合の表層CFRPの垂直ひずみ分布

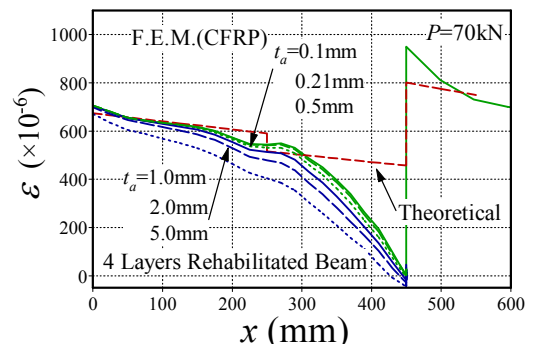


図10 接着厚さを変化させた場合の表層CFRPの垂直ひずみ分布

これらの図より以下のことがわかる

- 1) 部分貼補強により 2 層貼で 14% 4 層貼で 21% 曲げ剛性が上昇し欠損なし試験体と同等のたわみに回復することができる。
- 2) ベルヌーイ・オイラーの仮定に基づく算定値と比べ、CFRP 表層の垂直ひずみ ε は、接着端から 150mm の範囲では小さく、それ以降ではほぼ一致する。この傾向とひずみ値は実験値と有限要素解析値とがほぼ一致することから有限要素法における解析手法が有効であるといえる。
- 3) 減厚部下フランジ下面 ($0 < x < 250\text{mm}$) の鋼材の垂直ひずみは無補強の場合 1200 μ まで突出し弾性限まで達する一方、2 層貼、4 層貼の補強を行えば、接着部 ($0 < x < 450\text{mm}$) の垂直ひずみを大幅に低減できる。
- 4) 弾性限の荷重 $P = 70\text{kN}$ から 80kN まで荷重を大きくした時接着層では、最下層(第 4 層)から表層(第 1 層)に向けて、生じるせん断ひずみは小さくなる。最下層の接着端部において、大きなせん断ひずみが生じるがこれは塑性化に伴うものであり、実験ではこの部分から塑性化した後、接着材の破壊が生じたと考えられる。

図 9 には 4 層貼試験体において、減厚部からの接着付加長さ l_c を両端に $l_c = 25, 50, 100, 200, 250, 500\text{mm}$ と変化させた場合の表層 CFRP 表面の垂直ひずみ分布を、図 10 には接着層厚 t_a を一層当り 0.1, 0.21, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 と変化させた場合の同様の垂直ひずみ分布、それぞれ、示す。

これらの図より、

- 1) 接着付加長さを 100mm 以下に短くすると減厚部 ($x \leq 250\text{mm}$) において CFRP が一体化してない領域が生じる一方 l_c を 200mm 以上確保すれば、CFRP は一体であると考えられる。
- 2) 接着層厚 t_a が 1mm 以上と厚い場合は、CFRP プレートに生じる垂直ひずみは低下する。一方、 t_a を 1mm 以下としておけば、CFRP プレートに生じる発生ひずみは十分確保できる。

これらの知見は、鋼材・CFRP と接着材の剛性比や減厚長さ比に依存すると考えられるため、それらの影響は今後検討する予定である。

6 まとめ

下フランジ中部に断面欠損を有する H 形鋼梁に炭素

繊維プレートを接着補強した試験体について、載荷試験を行うとともに、炭素繊維プレートの異方性を考慮した有限要素解析を行い、その有効性を示した後に、その有限要素解析手法を用いて接着付加長さと接着層厚の補鋼効果を検討した。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 弾性範囲内であれば、荷重-変位関係、下フランジひずみ分布は、実験値と有限要素解析値は良好に一致することから、接着補剛効果は本有限要素解析法で十分追跡しうる。
- 2) 限られたパラメータでの結果であるが、接着付加長さ $l_c = 200\text{mm}$ 以上接着層厚 1.0mm 以内としておけば、減厚部の発生ひずみを健全な値まで抑えることができ、またその発生ひずみは、一般のベルヌーイ・オイラーの仮定に基づく算定方法で十分な精度で予測しうる。

上述の結果から、腐食等により下フランジ部に減厚が部分的に生じた場合の補修設計に利用でき、経済的な補修に寄与できると考えられる。

謝辞

本研究の計算実施にあたって共同研究施設である九州大学情報基盤研究開発センター内の日立 SR16000、AIX OS の Marc/Mentat2011 を利用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 島津勝: 炭素繊維プレート接着補強部材の有限要素法解析, その 1 材料異方性と破壊則の導入, 長崎大学大学院工学研究科報告, 第 42 巻第 79 号, pp. 21-28, 2012.7.
- 2) EI Damatty, A.AAbushagur, M Yousserf, M. A. : Experimental and analytical investigation of steel beams rehabilitated using GFRP sheets, Steel and Composite Structures, Vol.13, No6, pp.421-438, 2003.3.
- 3) 渡辺憲市, 板垣一也, 鈴木博之: 炭素繊維補強強化樹脂板による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告書集, 第 8 巻, pp.679-682, 2000.11.
- 4) 原伸幸, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる鋼構造建物小梁の曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告書, 第 13 巻, pp.523-530, 2005.11.