

# 炭素繊維プレートによる接着補強角形鋼管圧縮材の耐荷性能

玉井 宏章\*, 國廣 智志\*\*, 塚本 涼太\*\*\*

## Loading Capacity of Rehabilitated Box Steel Column Bonding CFRP Plates

by

Hiroyuki TAMAI\*, Satoshi KUNIHIRO \*\*and Ryota TSUKAMOTO \*\*\*

The authors have developed a tensile force strengthening method using bonded carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate to enhance the life of existing buildings. A rehabilitation technique for compressive force strengthening as well as tensile force strengthening is required to enhance the strength and deformation of steel structural members. This paper reports the results of compression loading analysis conducted on an hollow section steel member before and after rehabilitation using CFRP plates. These results show enhanced axial force carrying capacity and plastic deformation capacity of the member by bonding CFRP plate and the proposed rehabilitation is effective for moderately slender compression member of steel structure.

**Key words** : Carbon fiber reinforced plastic plate , Hollow section steel member , Bonding , Buckling ,  
*Monotonic loading test*

### 1. はじめに

著者等は炭素繊維プレート(以下, CFRP)を補修材に選定し,これを鋼構造建築物に接着することによって,耐環境性能,耐震性能を向上させる,耐震補強工法,長寿命化技術の提案・開発を行っている<sup>1),2)</sup>. 鋼構造部材は,それら部材形状を起因として,引張力に対しては本質的に強いが,圧縮力に対しては座屈現象が生じ,耐荷力は著しく減少する場合がある.

炭素繊維プレートによる鋼構造トラス材の圧縮補強への可能性を検討するため,角形鋼管圧縮材に炭素繊維プレートを接着した試験体について,単調圧縮載荷試験を行って,その最大耐力や塑性変形性能に対する補強効果について検討している.

この角形鋼管圧縮材の補強設計を実際に行うためには,補強効果を単純に表現できる設計式や補強設計資料が必要となる.

この角形鋼管圧縮材について予備圧縮試験を行って有限要素解析手法の精度を明らかにするとともに,補

強角形鋼管圧縮材について座屈長さを変化させた試験体について単調圧縮解析を行い,細長比と座屈耐力の関係,いわゆるカラムカーブ(座屈耐力曲線)を求める.特に未接着補強部分の性状に着目して,圧縮補強時の留意点を抽出する.

### 2. 圧縮試験の概要

#### 2.1 試験体形状

図1に試験体形状,表1に試験体シリーズを示す.試験体は,角形鋼管(□-60x60x3.2,鋼種:STKR400)の両端に鋼板(L-250x250x12)をその中心を角形鋼管の図心に一致させて溶接し,角形鋼管圧縮材に炭素繊維プレート(幅50mm,鋼材との接着長は全長-20mmとする)を接着したものである.表2に接着剤,CFRP及び鋼材の素材特性を示す.

炭素繊維プレートの接着形式は,中弾塑性型炭素繊維プレート(CFRP(ML))を角形鋼管に2層(8枚)接着した

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

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

\*\*\* 工学部 (Faculty of Engineering)

形式とした．CFRPを二液硬化型エポキシ樹脂接着剤 (E258RS<sup>®</sup>)で貼付けている．

細長比を変化させるように材長1200mm,2000mm, 2800mmとした試験体を用意し，上述のCFRPによる補強をしたものとしいないもの計6体を用意した．

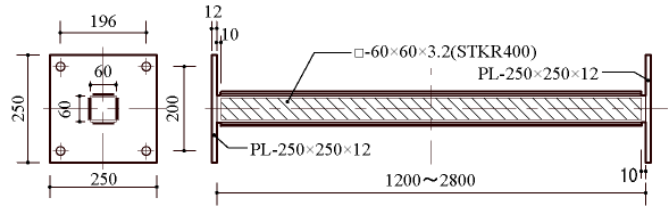


図1 試験体形状

## 2.2 試験装置

試験装置の全体，上端ピンの詳細を図2(a),(b)に示す．試験体の両端に，左右方向に自由に回転することのできるナイフエッジが取り付けられており，2000kN容量のアムスラー試験機により圧縮力が作用し，上端のピンが鉛直方向のみ移動するようになっている．载荷プログラムは，全試験体とも単調中心圧縮とした．

## 2.3 計測方法

材軸方向荷重  $P$  はアムスラー試験機の荷重計から，変位は図 3(a)に示すように試験体の中央たわみ量  $\delta_h$ ，角形鋼管圧縮材の図心から 150mm 離れた 2 点で材軸方向相対変位 ( $\delta_a, \delta_b$ ) を変位計でそれぞれ計測する．図 3(b)  $\delta_a, \delta_b$  の計測治具を示す．無補強試験体と補強試験体の各部の塑性を確認するため，無補強の試験体では鋼材表面に，補強試験体では CFRP に図 3(c)のように貼付ける．

変位の計測値から，試験体の軸縮み  $\delta_v$  を次式により算定した．計測諸量の模式図を図 3(b)に示す．

$$\delta_v = \frac{\delta_a + \delta_b}{2} \quad (1)$$

## 3. 有限要素法解析の概要

### 3.1 CFRP プレート

本節では，異方性のある炭素繊維プレート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，弾塑性応力-ひずみ関係式を示す．

#### ○弾性応力-ひずみ関係式

炭素繊維プレートの応力-ひずみ関係は， $x, y, z$  の各座標について各方向の弾性材料定数を以下のように表し， $y, z$  平面内は，等方であると仮定したものをを用いる．

$E_i$  :  $i$  軸方向のヤング係数 ( $i=x,y,z$ )

$G_{ij}$  :  $i-j$  平面のせん断力弾性係数

$\nu_{ij}$  :  $i$  軸に直ひずみが作用した時に  $j(j \neq i)$  軸に生じる直ひずみの絶対値との比(ポアソン比)

直交異方性材である CFRP の弾性応力-ひずみ関係式は次式となる．

表1 試験体シリーズ

(a) 無補強試験体			(b) 補強試験体		
試験体名	$\ell$ mm	$\lambda$ -	試験体名	$\ell$ mm	$\lambda^*$ -
N-51	1200	51	C-30	1200	30
N-85	2000	85	C-50	2000	50
N-119	2800	119	C-69	2800	69

$i=23.65\text{mm}, \Lambda=92$        $i^*=40.75\text{mm}, \Lambda^*=56$

表2 素材試験結果

(a) 接着剤(E258RS<sup>®</sup>)の素材特性

ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	引張せん断接着強さ N/mm <sup>2</sup>
3100	34	29
JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850

(b) CFRP の素材特性

ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	破断ひずみ %
295000	2169	0.71

(c) 角形鋼の素材特性

降伏応力 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	加工硬化開始歪 %	破断伸び %	一様伸び %
394	446	1.77	31.5	10.4

$$\sigma_x = \frac{E_x}{(1+\nu_{yz}) \cdot (1-2 \cdot \nu_{xy} \cdot \nu_{yx} - \nu_{yz})} \cdot \left\{ (1-\nu_{yz}^2) \cdot \varepsilon_x + \nu_{yx} \cdot (1+\nu_{yz}) \cdot \varepsilon_y + \nu_{xz} \cdot (1+\nu_{yz}) \cdot \varepsilon_z \right\}$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{(1+\nu_{yz}) \cdot (1-2 \cdot \nu_{xy} \cdot \nu_{yx} - \nu_{yz})} \cdot \left\{ \nu_{xy} \cdot (1+\nu_{yz}) \cdot \varepsilon_x + (1-\nu_{xy} \cdot \nu_{yx}) \cdot \varepsilon_y + (\nu_{xy} \cdot \nu_{yx} + \nu_{yz}) \cdot \varepsilon_z \right\}$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{(1+\nu_{yz}) \cdot (1-2 \cdot \nu_{xy} \cdot \nu_{yx} - \nu_{yz})} \cdot \left\{ \nu_{xy} \cdot (1+\nu_{yz}) \cdot \varepsilon_x + (\nu_{xy} \cdot \nu_{yx} + \nu_{yz}) \cdot \varepsilon_y + (1-\nu_{xy} \cdot \nu_{yx}) \cdot \varepsilon_z \right\}$$

$$\tau_{xy} = G_{xy} \cdot \gamma_{xy} \quad , \quad \tau_{yz} = \frac{E_y}{2 \cdot (1+\nu_{yz})} \cdot \gamma_{yz}$$

$$\tau_{zx} = G_{xy} \cdot \gamma_{zx} \quad (2.a\sim f)$$

#### ○破壊条件

炭素繊維プレートの破壊条件を考える．

異方性を有し，圧縮力と引張力とで耐力が異なり，かつ，静水圧に依存して耐力が変化する材の破壊条件の一つとして Pariseau と Chen は，以下の条件を提案している<sup>3),4)</sup>．

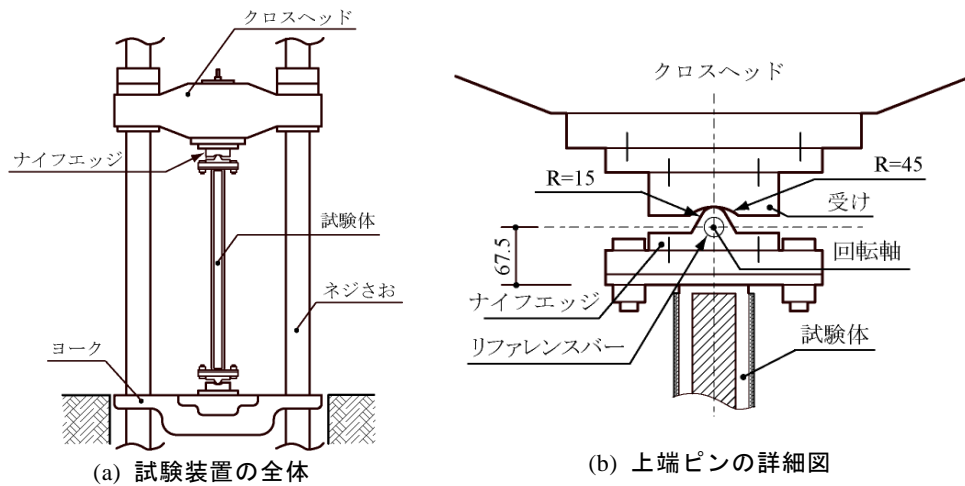


図2 試験装置の概要

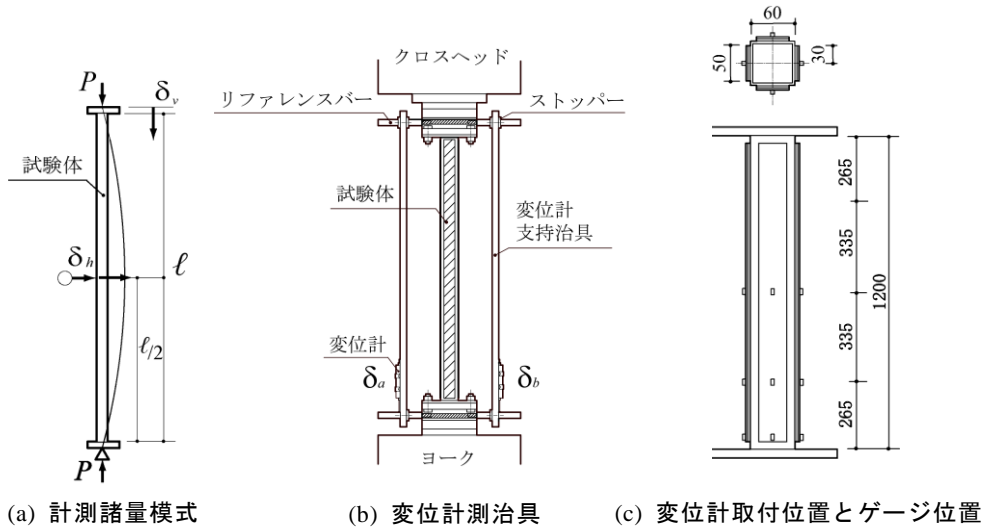


図3 計測諸量の模式

$$f(\sigma_{ij}) = \alpha_1(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \alpha_2(\sigma_y - \sigma_z)^2 + \alpha_3(\sigma_z - \sigma_x)^2 + \alpha_4\tau_{xy}^2 + \alpha_5\tau_{yz}^2 + \alpha_6\tau_{zx}^2 + \alpha_7\sigma_x + \alpha_8\sigma_y + \alpha_9\sigma_z = 1 \quad (3)$$

ここに  $f(\sigma_{ij})$  は、破壊関数、 $\alpha_1 \sim \alpha_9$  は、材料定数である。炭素繊維プレートの繊維方向に  $x$  座標を有する直交座標系を定義する。

いま、 $y$ - $z$  平面内は、等方であると仮定すると、(3)式の材料定数間には、次の関係が成立する。

$$\alpha_1 = \alpha_3, \quad \alpha_4 = \alpha_6, \quad \alpha_8 = \alpha_9, \quad \alpha_5 = 2 \cdot (\alpha_1 + 2\alpha_2) \quad (4.a \sim d)$$

(4.a~d)式を(3)式に代入、整理すると

$$f(\sigma_{ij}) = \left\{ \alpha_1(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right\} + \alpha_2(\sigma_y - \sigma_z)^2 + \alpha_4(\tau_{xy}^2 + \tau_{zx}^2) + 2(\alpha_1 + 2\alpha_2)\tau_{yz}^2 + \alpha_7\sigma_x + \alpha_8(\sigma_y + \sigma_z) = 1 \quad (5)$$

よって、未知材料定数は、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_7$  及び  $\alpha_8$  の5つである。

(5)式から得られる破壊曲面を図5に示す。

(5)式の炭素繊維プレートを材料定数は、以下の5つの材料試験結果により次式のように決定する。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2 \cdot \sigma_{cf} \sigma_x \cdot \sigma_x} + \frac{1}{\sigma_{cf} \sigma_x} + \frac{1}{\sigma_{cf} \sigma_x} \\ \alpha_2 &= -\frac{1}{\sigma_{cf} \sigma_y \cdot \sigma_y} + \frac{1}{2 \cdot \sigma_{cf} \sigma_x \cdot \sigma_x} \\ \alpha_4 &= \frac{1}{\tau_{cf}^2} \quad , \quad \alpha_8 = \frac{1}{\sigma_{cf} \sigma_y} + \frac{1}{\sigma_{cf} \sigma_y} \end{aligned} \quad (6.a \sim e)$$

ここに、

繊維方向の引張強度:  $\sigma_{cf}$ 、及び、圧縮強度:  $\sigma_{cf}$

繊維直交方向の引張強度:  $\sigma_{cf}$ 、圧縮強度:  $\sigma_{cf}$

せん断強度:  $\tau_{cf}$

ちなみに、 $\tau_{cf}$  を  $\sigma_{cf}$ 、 $\sigma_{cf}$ 、 $\sigma_{cf}$ 、 $\sigma_{cf}$  で表すと

$$\tau_{cf} = \sqrt{\frac{\sigma_{cf} \cdot \sigma_{cf} \cdot \sigma_{cf} \cdot \sigma_{cf}}{\sigma_{cf} \cdot \sigma_{cf} - 4 \cdot \sigma_{cf} \cdot \sigma_{cf}}} \quad \text{となる。}$$

### 3.2 接着剤

接着剤の破壊は接着剤自体が塑性化して破断する凝集破壊と接着界面ではく離する界面破壊がある。以下に凝集破壊の取扱いを示す。

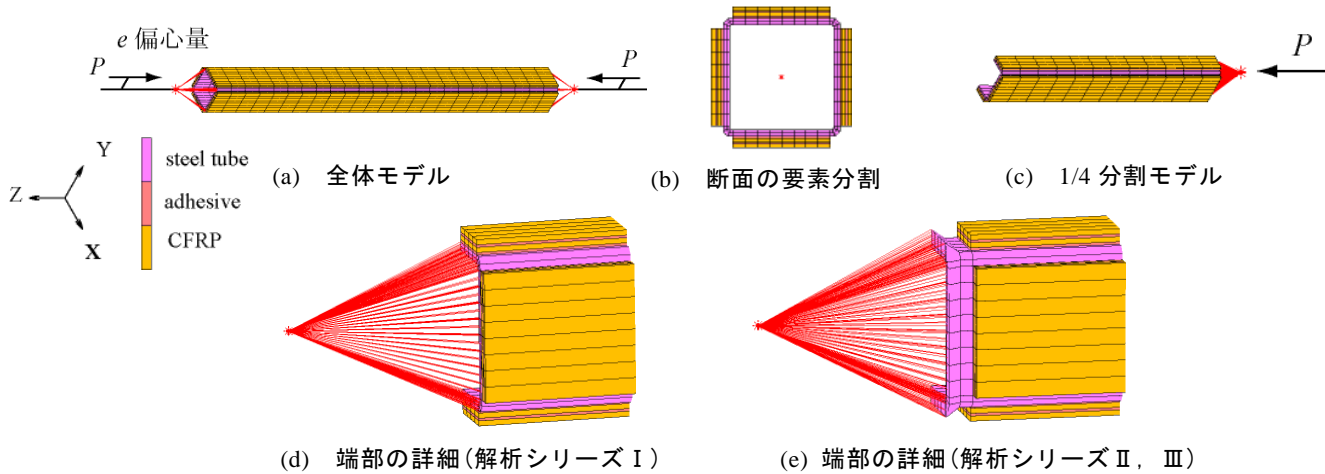


図4 断面の要素分割

## ○凝集破壊(降伏関数)

次に、接着剤の降伏条件について考える。

接着剤は、等方性を有すると仮定すると、(3)式の材料定数間には、次式の関係が成立する。

$$a_1 = a_2 = a_3 \quad a_4 = a_5 = a_6 = 2(a_1 + 2a_2) = 6a_1$$

$$a_7 = a_8 = a_9 \quad (7.a-c)$$

(7.a-c)式を(3)に代入して整理すると、

$$f(\sigma_{ij}) = \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]$$

$$+ 6a_1 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)$$

$$+ a_7 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

$$= 1 \quad (8)$$

また、(8)式のように接着剤の材料定数は、以下の2つの素材試験結果により次式のように決定する。

$$a_1 = -\frac{1}{2 \cdot \sigma_{cf} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad a_7 = \frac{1}{\sigma_{cf} \cdot \sigma_x} + \frac{1}{\sigma_{cf} \cdot \sigma_y} \quad (9.a,b)$$

ここに、

引張強度:  $\sigma_{cf}$ , 圧縮強度:  $\sigma_{cf}$

降伏関数からわかるように、せん断強度:  $\tau_{xy}$  と引張強度:  $\sigma_{cf}$ , 圧縮強度:  $\sigma_{cf}$  との間には、次の関数が成立する。

$$f \tau_{xy} = \sqrt{\frac{\sigma_{cf} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}{3}} \quad (10)$$

## 3.3 解析モデル

解析対象は、図4(a)に示す炭素繊維プレートを2層装着した角形鋼圧縮材(複合材)で、複合材の図心位置  $y_0$  から図の  $y$  軸に  $e$  だけ偏心させた点で加力用の6自由度節点を設け、強制圧縮変位  $\delta_v$  を  $z$  軸方向に与える。角形鋼管端面の節点とこの加力節点とはリジックリンクで結合する。端部詳細を図4(a),(e)に示す。(d)はCFRPを端まで延ばしたものの(解析シリーズI)及び(e)

表3 解析用素材特性

Material	ML(CFRP)	Adhesive	Steel
$E_x$ (GPa)	295.7	3.10	205.8
$E_y$ (GPa)	7.0	3.10	205.8
$G_{xy}$ (GPa)	4.5	1.11	79.0
$\nu_{xy}$	0.30	0.39	0.28
$\nu_{yz}$	0.30	0.39	0.28

Properties	ML(CFRP)	Adhesive	Steel
$E_x$ (GPa)	295.7	3.10	205.8
$E_y$ (GPa)	7.0	3.10	205.8
$G_{xy}$ (GPa)	4.5	1.11	79.0
$\nu_{xy}$	0.30	0.39	0.28
$f \tau_{xy}$	0.30	0.39	0.28

Properties	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{pst}^*$ (-)	$\epsilon_0^*$ (-)	m	C (N/mm <sup>2</sup> )	n
STKR400	389	0.014	0.005	6	1.613	0.097

は端部10mm区間を未接着部分とし、炭素繊維プレートと接着剤の端面の節点は自由になっているもの(解析シリーズII, III)を用意した。この区間には隅肉溶接の増厚部分が5mmある。

座屈によって  $x$  軸回りに中央からくの字に折れ曲がる対称変形を生じる。また、形状、変形の対称性から実際の解析は、1/4解析を行う。接着層の変形や炭素繊維プレートの板幅方向のせん断応力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節点立体要素(変位法モデル)を採用した。図3(c)のように接着層、炭素繊維プレートは1要素分割、鋼板の板幅方向分割は2要素分割とした。尚、初期不整は加力芯位置を  $e$  だけずらすことにより導入し、初期応力は考慮していない。

## 3.4 解析シリーズ

解析シリーズは、 $\square$ -60×60×3.2(STKR400)角形鋼管に2層炭素繊維プレート(ML50×2)を四面に接着し、端部未接着部がないもので(図4(d)参照)、ナイフエッジ、エンドプレート高さを考慮し、有効座屈長さが

1335mm, 2135mm, 2935mm とした C-30-I, C-50-I, C-69-I 試験体, 偏心量  $e=0.1\text{mm}$  としたもの(解析シリーズ I), 有効座屈長さは同じで, C-30-II, C-50-II, C-69-II 試験体及び, 炭素繊維プレートを接着しないもの N-51-II, N-85-II, N-119-II 試験体で偏心量  $e=1\text{mm}$  で端部 10mm 区間は未接着部分としたもの(解析シリーズ II), 偏心量  $e=2\text{mm}$  とした N-51-II と同形状の N-51-III 試験体(解析シリーズ III)計 10 ケースとした. 加力は軸方向縮み  $\delta_v$  が 16mm まで単調に載荷した. 表 3 には解析用の素材特性を示す. 尚, 鋼材については大きな塑性化を示すため, 表 3 に示す  $n$  乗硬化則を用いた.

#### 4. 中心圧縮耐力算定式

本節では, 提案する炭素繊維プレートで補強した角形鋼管圧縮材の中心圧縮耐力算定式を示す. 以下に設定した仮定を示す.

- 1) この複合材の圧縮応力は, 鋼材のみの断面積で基準化する.
  - 2) 複合材の降伏応力度には, 鋼材の降伏ひずみ分で生じる炭素繊維プレートの寄与軸力を加算できる.
- 角形鋼管圧縮材の圧縮耐力  $\sigma_e$  を次式で算定する<sup>2)</sup>.

$$\lambda^* > \Lambda^* \text{ のとき} \quad \lambda^* \leq \Lambda^* \text{ のとき}$$

$$\sigma_e = \frac{\alpha \cdot \sigma_y^*}{\left(\frac{\lambda^*}{\Lambda^*}\right)^2}, \quad \sigma_e = \left\{ 1 - (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{\lambda^*}{\Lambda^*}\right)^2 \right\} \cdot \sigma_y^* \quad (5.a, b)$$

ここに,

$$\Lambda^* = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_s}{\alpha \cdot \sigma_y^*}}, \quad \lambda^* = \frac{\ell}{i^*}$$

$$i^* = \sqrt{\frac{(EI)_b}{E_s \cdot A_s}}, \quad \sigma_y^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_{c,i} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{E_s} \cdot A_{c,i} + \sigma_{sy} \cdot A_s}{A_s} \quad (6.a \sim d)$$

- $\alpha$  : 非弾性領域を表す実験定数 ( $\alpha=0.6$ )  
 $\lambda^*, \Lambda^*, \sigma_y^*, i^*$  : 複合材の細長比, 限界細長比, 換算降伏応力, 換算断面 2 次半径  
 $\ell$  : 座屈長さ  
 $E_s, A_s, \sigma_{sy}$  : 角形鋼管圧縮材の弾性係数, 断面積, 降伏応力度  
 $E_{c,i}, A_{c,i}$  :  $i$  層目の炭素繊維プレートのヤング係数と断面積  
 $n$  : 炭素繊維プレートの層数 ( $n < 5$ )  
 $(EI)_b$  : 複合材の曲げ剛性  
 圧縮耐力  $\sigma_e$  から軸耐力  $P_e$  を求める際には, 次式を用いる.
- $$P_e = \sigma_e \cdot A_s \quad (7)$$

#### 5. 結果と考察

解析結果を解析シリーズ III は図 5 に, 解析シリーズ I は図 6 に, 解析シリーズ II は表 4 に, 図 7~10 それぞれ示す. 図 5 には N-51-III 試験体の荷重  $P$  と中央横たわみ  $\delta_h$  の関係を実験値と解析値について示す.

図 6 には補強試験体(C-30-I, C-50-I, C-69-I 試験体)について, (a)鋼管の全塑性軸力で無次元化した縮み量  $\delta_v/\delta_{sv}$  の関係, (b)- $P/P_{sv}$  と有効座屈長さで無次元化した中央たわみ  $\delta_h/\ell$  との関係, また(c) C-30-I 試験体について - $P/P_{sv}$  と中央断面での CFRP における両端表面の軸方向垂直歪  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  との関係を示す.

図 7, 8 は, 図 6 同様の関係を補強試験体(C-30-II, C-50-II, C-69-II 試験体)無補強試験体(N-51-II, N-85-II, N-119-II 試験体)について示す.

(c)のひずみは, 中央断面での鋼管における両端表面の軸方向垂直歪である.

表 4 には無補強・補強試験体(解析シリーズ II)について, 最大圧縮耐力, 最大中央横たわみ, 前後の最大荷重時の CFRP の垂直歪及び破壊モードを示す. 図 9 には補強試験体について圧縮縮み  $\delta_v=16\text{mm}$  時の  $x$  方向変位コンター図(局所変形状態)を示す.

図 10 は C-30-II 試験体について圧縮縮み  $\delta_v=16\text{mm}$  の時の鋼管及び CFRP 1, 2 層の垂直歪と接着層 1, 2 層のせん断歪の分布を中央部から端部までの長手方向距離  $x$  を用いて示す.

図 11 には最大応力度  $\alpha(=P_{max}/A_s)$  と換算細長比  $\lambda^*$  との関係を示した 2 層 CFRP で接着補強した時の中心圧縮耐力算定式とともに示す.

以下に各項目に分けて考察を示す.

##### ○解析精度

図 5 より, 偏心量  $e=2\text{mm}$  の解析値は荷重  $P$ -中央横たわみ  $\delta_h$  関係の最大値と耐力劣化特性が良好に一致し, 工学上十分な精度を有することがわかる.

##### ○最大圧縮耐力

図 7, 8, 表 4 より端部に CFRP 未接着部分がある場合においても炭素繊維プレートを 2 層接着する補強によりいずれの換算細長比においても 2.0~1.5 倍の最大圧縮耐力を上昇しうることがわかる.

##### ○耐力劣化特性

無補強試験体は最大耐力後には横たわみが急激に増加するとともに急激に耐力低下する. 一方, 補強試験体の耐力低下は, 全体座屈が生じているものの緩やかに耐力低下する. C-30-II では図 9 からわかるように両側の鋼管端部で面外にふくらむ局所座屈も生じている. これに基因して耐力が低下したと考えられる. また, 図 10 より鋼管端部に大きな歪が生じている

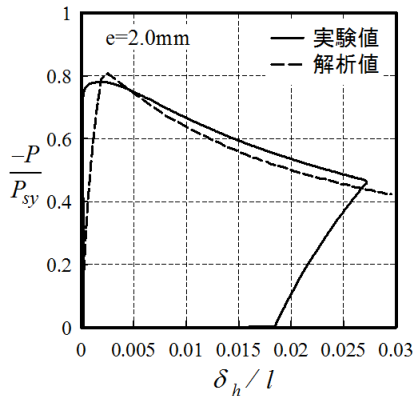
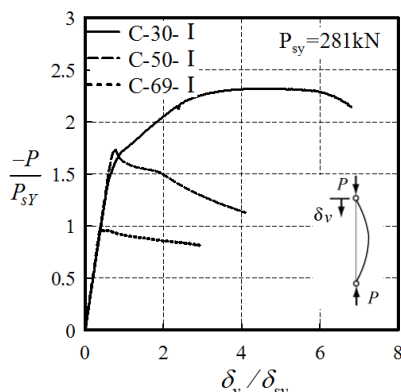


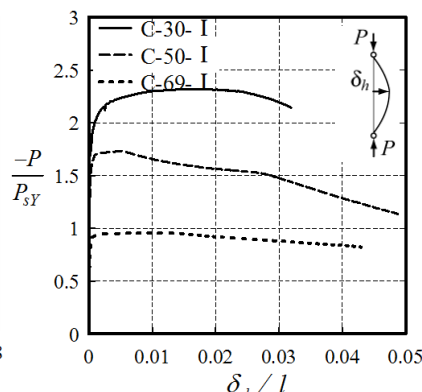
図5 解析精度の検証(解析Ⅲ)  
(N-51-III試験体)

表4 解析シリーズⅡの解析結果

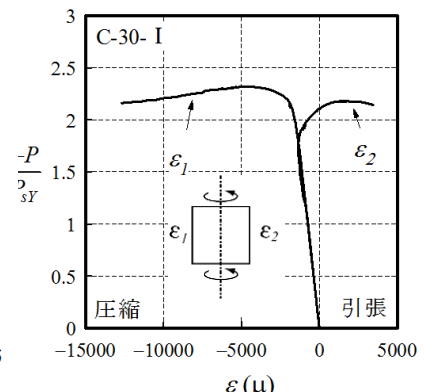
試験体名	最大圧縮耐力 kN	最大荷重時の 中央横たわみ mm	最大荷重時の CFRPひずみ μ	破壊モード
N-51-Ⅱ	244.4	1.54	—	局部座屈
N-85-Ⅱ	155.7	14.4	—	全体座屈
N-119-Ⅱ	85.3	39.3	—	全体座屈
C-30-Ⅱ	416.9	19.3	23876	局部座屈
C-50-Ⅱ	387.3	21.8	24031	全体座屈
C-69-Ⅱ	260.6	39.3	22828	全体座屈



(a)  $-P/P_{SY}-\delta_v/\delta_{sy}$  関係

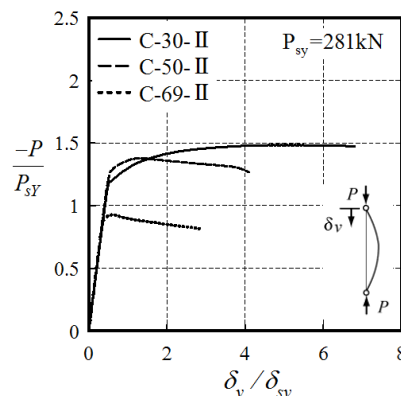


(b)  $-P/P_{SY}-\delta_h/l$  関係

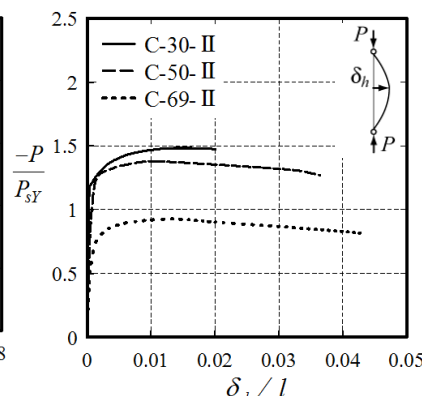


(c)  $-P/P_{SY}-\epsilon$  関係

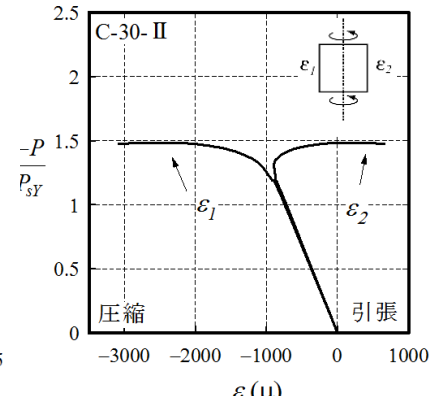
図6 補強試験体の解析結果(解析Ⅰシリーズ) (C-30-I試験体)



(a)  $-P/P_{SY}-\delta_v/\delta_{sy}$  関係

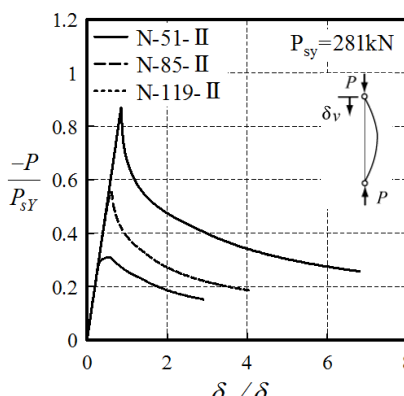


(b)  $-P/P_{SY}-\delta_h/l$  関係

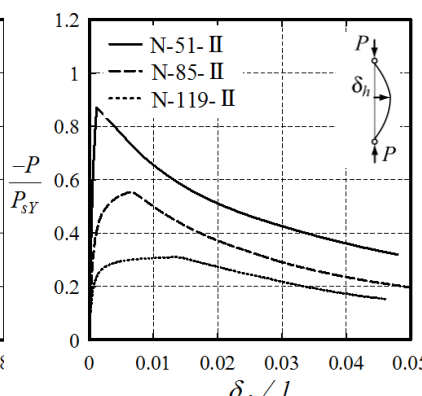


(c)  $-P/P_{SY}-\epsilon$  関係

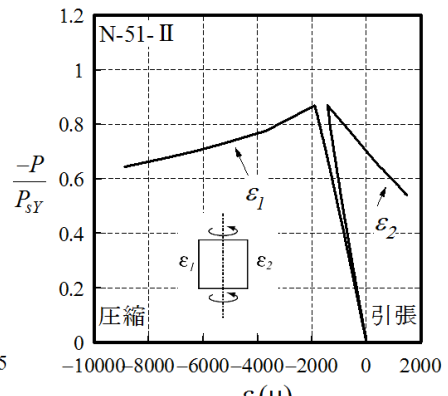
図7 補強試験体の解析結果(解析Ⅱシリーズ) (C-30-II試験体)



(a)  $-P/P_{SY}-\delta_v/\delta_{sy}$  関係



(b)  $-P/P_{SY}-\delta_h/l$  関係

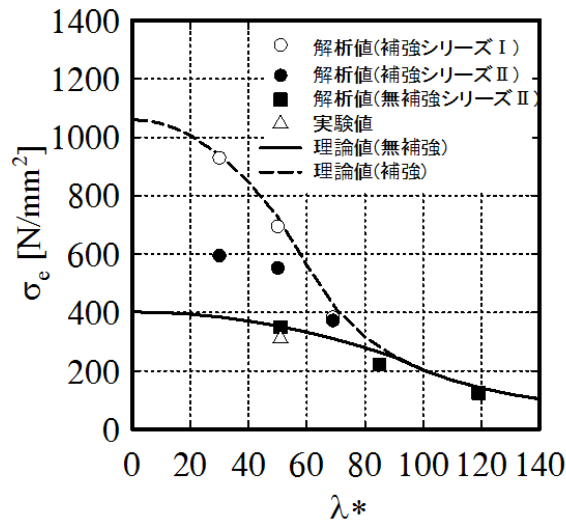
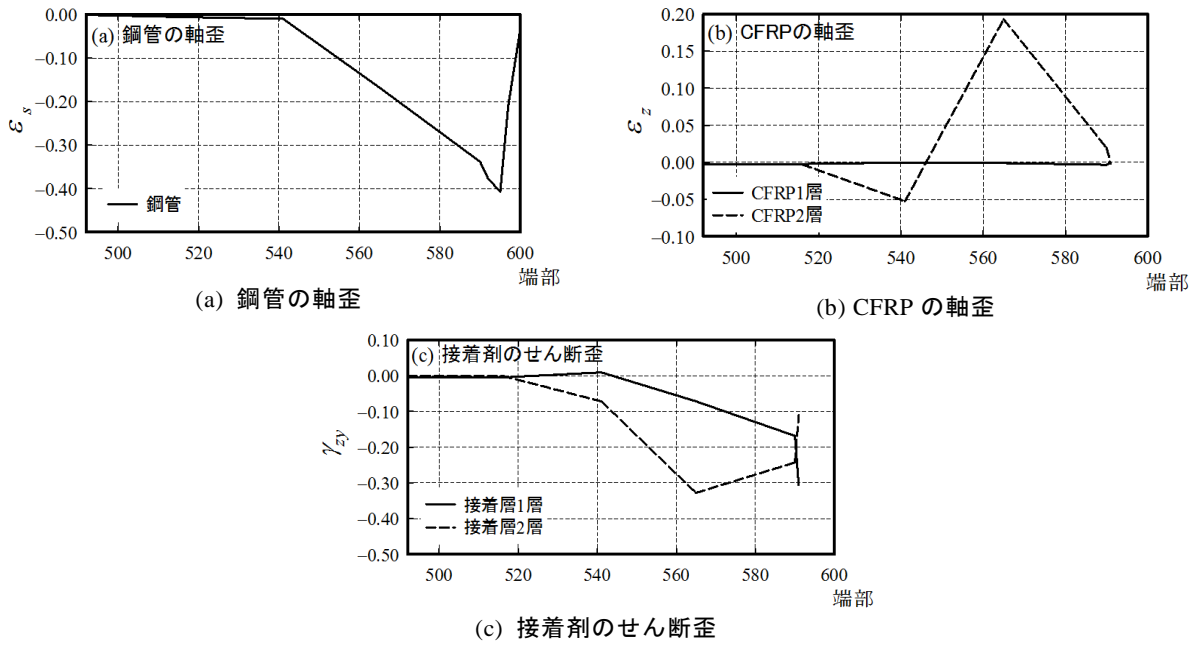
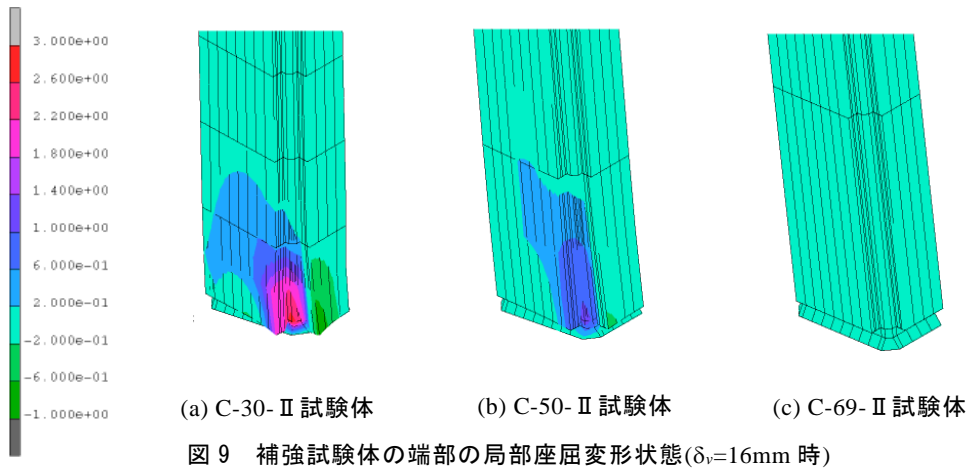


(c)  $-P/P_{SY}-\epsilon$  関係

(N-30-II試験体)

図8 無補強試験体の解析結果(解析Ⅱシリーズ)

炭素繊維プレートによる接着補強角形鋼管圧縮材の耐荷性能



### ○中心圧縮耐力算定式の精度

図 11 より端部に未接着部分のない試験体の座屈耐力はほぼ提案する中心圧縮耐力算定式に一致するものの、端部に CFRP の未接着部分がある補強試験体は中心圧縮耐力算定式と比べ、 $\lambda^*=30$  のとき耐力は 50%程度となった。また、未接着部のない試験体は鋼管の降伏応力度の 1.5~2.0 倍以上の耐力が得られているが、鋼管のほぼ全断面について CFRP で接着補強するため端部は内側に入りこみ、局部座屈せず塑性化後、加工硬化により耐力上昇している。

### 6. まとめ

炭素繊維プレートによる角形圧縮材に対する補強の効果を検討するため、試験体について単調圧縮座屈試験の複合非線形有限要素解析を行って、補強効果を吟味した。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、未接着部の塑性化の程度を調査した。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 解析値は、炭素繊維接着補強による耐力上昇の程度や塑性変形の局部化による挙動変化や残留変形等を良好に再現している。
- 2) 2 層の接着補強では、最大圧縮耐力は約 1.4~1.3 倍

増大できる。また、塑性率で 2 までは炭素繊維は変形に追従する。

- 3) 2 層の接着補強をすれば、炭素繊維プレートの強度を十分に引き出す補強が可能である。
- 4) より良い補強を行うためには未接着部分を極力少なくする工夫が必要である。

### 謝辞

本研究の CFRP プレート及び接着剤は藤本信介(東レ建設(株))及び堀井久一((株)コニシ)両氏から提供いただきました。ここに記して謝辞を表す。

### 参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭 誠, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる山形鋼ブレース材の圧縮補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.553-560, 2005.11.
- 2) 服部明生, 玉井宏章, 山西央朗, 高松隆夫, 小澤吉幸: 炭素繊維プレートによる山形鋼圧縮材の接着補強設計式に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, pp.175-183, 2011.1.
- 3) Pariseau, W.G, "Plasticity Theory for Anisotropic Rocks and Solids", Proc. of Tenth Symposium of Rock Mechanics, chapter 10, Univ. of Texas, Austin, 1968.
- 4) Cheu, W.F., Han, D.J., "Plasticity for Structural Engineers" "Springer-Verlag, pp.101~103, 1988