

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1 材料異方性と破壊則の導入

玉井 宏章*・島津 勝*

FEM Analysis of Rehabilitated Steel Member using CFRP Plates Part 1 Treatment of Anisotropy and Failure Rule

by

Hiroyuki TAMAI* and Masaru SHIMAZU*

To enhance the usage life of existing building a tensile force strengthening method with bonding carbon fiber reinforced plastic (CERP) plate has been developed by authors. To enhance the strength and deformation capacity of steel structure member, it is required a rehabilitation technique for compressive force strengthening as well as tensile force strengthening.

There are two types of CFRP plate, TL (high-tenacity type carbon fiber) and ML (middle modulus type carbon fiber). This paper reports the result of loading tests and F.E.M analyses on a full scaled angle steel brace before and after rehabilitation using bonding CFRP plates. These results show enhanced compressive force carrying capacity and deformation capacity of brace by bonding CFRP plates could be predicted roughly through F.E.M. analysis results.

Key words : Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Steel Member, Buckling,
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¹⁾⁴⁾。文献1では炭素繊維プレートによる鋼構造部材の圧縮補強の可能性を実験的に検討し、山形鋼圧縮材の接着補強設計式である中心圧縮耐力評価式を提案し、文献2では実大の送電鉄塔主材の補強山形鋼材について偏心圧縮試験を行って本補強工法の有効性を示した。本実験では、補強山形鋼圧縮材の力学特性を詳細に検討するとともに、そのM-N 相関耐力評価式を導くことを目的に、文献2の実験について3次元有限要素複合非線形解析を行う。その際、炭素繊維

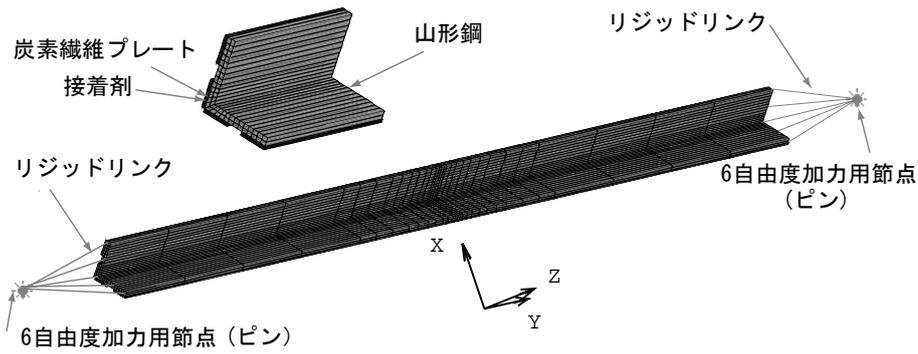
プレートの異方性や破壊条件を精密にし、破壊限界を推定し、実験値の剛性、耐力や破壊箇所と解析の破壊条件の値や、接着層の凝集破壊の位置などの情報を提供する。

2. 解析の概要

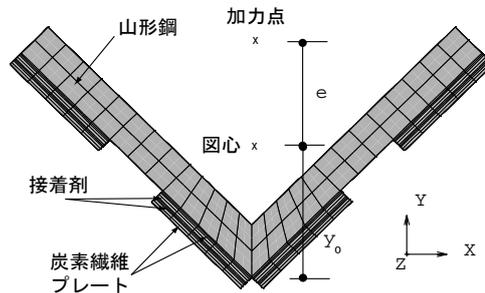
炭素繊維プレートは、高剛性・高強度の炭素繊維を一方方向に引きそろえ、加熱硬化型の樹脂で一体化し板状に加工した材であるため、繊維方向と繊維直交方向との弾性剛性、強度が異なる強い異方性を有している。本節では、これらの材の特性を追跡するために定式化

平成24年6月25日受理

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



(a) 全体モデル (NML2 試験体)



(b) 断面の要素分割

図1 有限要素解析モデル

した、弾性応力-ひずみ関係式、破壊条件式を示す。

2.1 弾性応力-ひずみ関係

炭素繊維プレートの応力-ひずみ関係を求める。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
に表すことにする。

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

ν_{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)

いま, y,z 平面内は, 等方であると仮定すると, 各弾性係数間には, 次式が成立する。

$$E_y = E_z, \quad \nu_{zx} = \nu_{yx}, \quad \nu_{zy} = \nu_{yz}$$

$$G_{yz} = \frac{E_y}{2 \cdot (1 + \nu_{yz})}, \quad \nu_{xy} = \nu_{xz} \quad (1.a \sim d)$$

これらの弾性係数を使うと, 各ひずみは, 重ね合わせの原理から, 次式のように得られる。

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \cdot \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{zx} \cdot \frac{\sigma_z}{E_z}$$

表1 試験体形状と断面性能

Name	Angle	ta mm	CFRP 1st Layer	CFRP 2nd Layer	(EI)b kN・m ²	yo mm	ℓ' mm	ℓ mm	N _E kN	M _p kN・m	λ^* -
N	L-130x130x15	-	-	-	471.1	53.9	3400	4280	253.8	22.8	171
UTL2	L-130x130x15	1.2	TL	TL	607.6	52.3	3400	4280	327.4	102.2	151
UTM2	L-130x130x15	1.2	ML	TL	658.3	51.7	3400	4280	354.7	90.6	145
NML2	L-130x130x15	1.2	ML	ML	706.7	51.4	3400	4280	380.7	79.1	140

ta: 接着層厚, yo: 図心位置, ℓ' : 部材長, ℓ : ピン間距離
CFRPの断面は50x2mm, ML: 中弾性型, TL: 高強度型

表2 解析用素材特性

Material	TL(CFRP)	ML(CFRP)	Adhesive	Steel
E_x (Gpa)	169.1	295.7	2.28	205.8
E_y (Gpa)	10.0	7.0	2.28	205.8
G_{xy} (Gpa)	5.0	4.5	1.87	142.9
ν_{xy}	0.34	0.30	0.39	0.28
ν_{yz}	0.34	0.30	0.39	0.28

 E_x, E_y : Young's modulus, ν_{xy}, ν_{yz} : Poisson's ratio

 G_{xy} : Shear modulus

Material	TL(CFRP)	ML(CFRP)	Adhesive	Steel
tf σ_x (Mpa)	3058.2	2169.1	34.8	286
cf σ_x (Mpa)	-2485.3	-1676.1	-34.8	-286
tf σ_y (Mpa)	85.7	88.7	34.8	286
cf σ_y (Mpa)	-377.1	-390.4	-34.8	-286
f τ_{xy} (Mpa)	100	85	20.1	165

 tf $\sigma_x, tf\sigma_y$: Tensile Failure (Yield) stress

 cf $\sigma_x, cf\sigma_y$: Compressive Failure (Yield) stress

 f τ_{xy} : Shearing Strength (Yield stress)

$$\varepsilon_y = -\nu_{xy} \cdot \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{yz} \cdot \frac{\sigma_z}{E_y}$$

$$\varepsilon_z = -\nu_{xy} \cdot \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yz} \cdot \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \quad \gamma_{yz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu_{yz})}{E_y} \cdot \tau_{yz} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_{xy}} \quad (2.a \sim f)$$

また、エネルギー保存則から、たわみ性係数の対角項は、等しくなることから、次の関係が得られる。

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} \quad (3)$$

したがって、独立な材料定数は、 $E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yz}, G_{xy}$ の5つ

である。ちなみに、 $\nu_{zx} = \nu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \cdot \nu_{xy}$ となる。

(3)式を考慮して(2.a~f)式から、逆関係を求めると次式の応力-ひずみ関係が得られる。

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

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

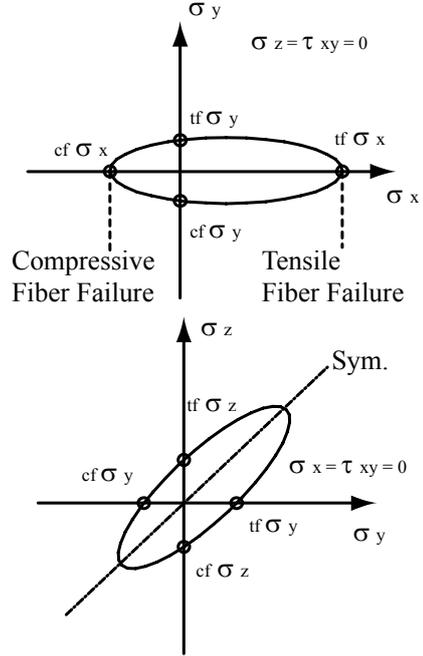


図2 応力空間のCFRPの破壊曲面

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

$$\tau_{xy} = G_{xy} \cdot \gamma_{xy} \quad \tau_{yz} = \frac{E_y}{2 \cdot (1 + \nu_{yz})} \cdot \gamma_{yz} \quad \tau_{zx} = G_{xy} \cdot \gamma_{zx} \quad (4.a \sim f)$$

2.2 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⁵⁾。

$$f(\sigma_{ij}) = \alpha_1 (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \alpha_2 (\sigma_y - \sigma_z)^2 + \alpha_3 (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \alpha_4 \tau_{xy}^2 + \alpha_5 \tau_{yz}^2 + \alpha_6 \tau_{zx}^2 + \alpha_7 \sigma_x + \alpha_8 \sigma_y + \alpha_9 \sigma_z = 1 \quad (5)$$

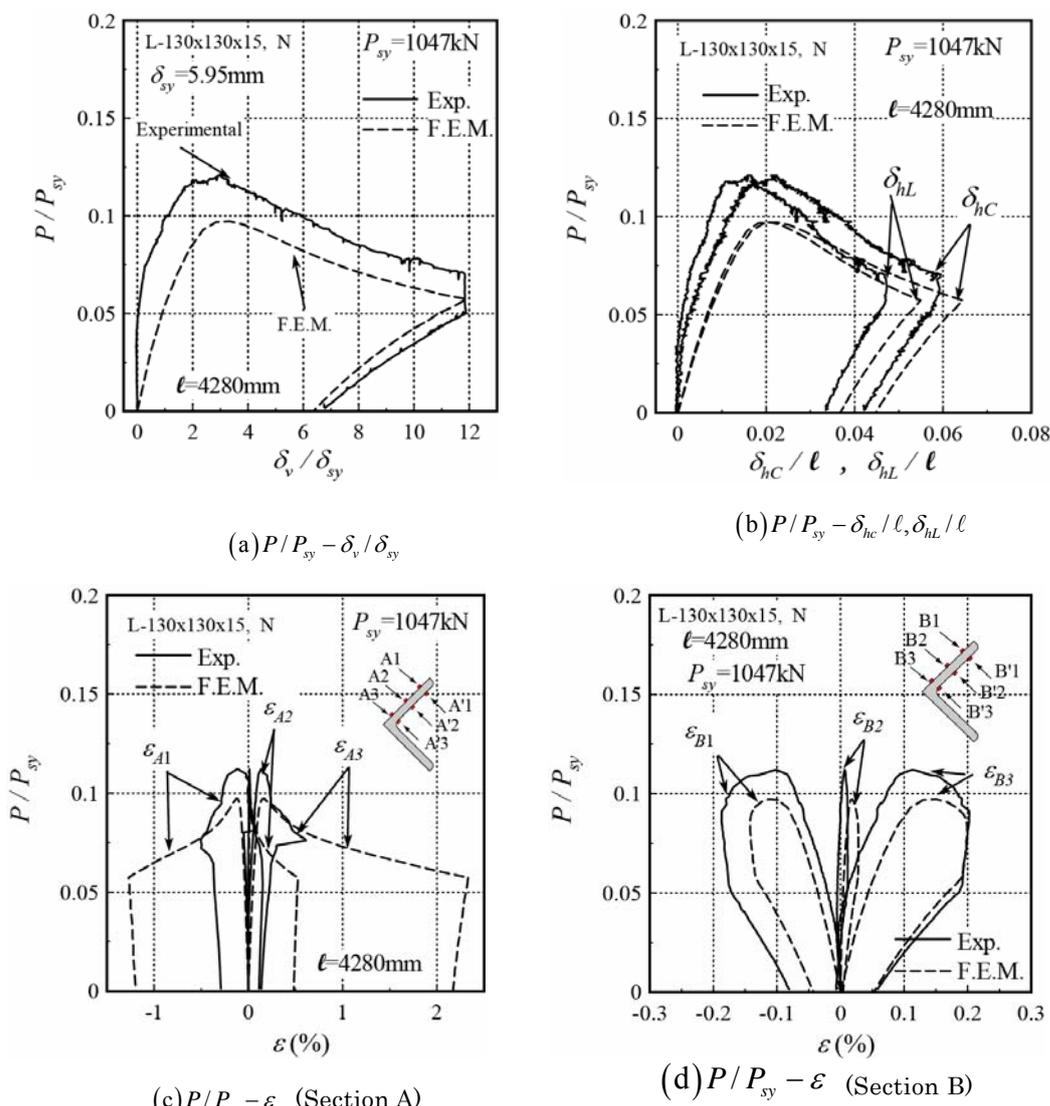


図3 N試験体(無補強試験体)の解析結果

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、(5)式の材料定数間には、次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_3, \alpha_4 = \alpha_6, \alpha_8 = \alpha_9 \\ \alpha_5 &= 2(\alpha_1 + 2\alpha_2) \end{aligned} \quad (6 \text{ a} \sim \text{d})$$

(6.a~d)式を(5)式に代入、整理すると、

$$\begin{aligned} f(\sigma_{ij}) &= \alpha_1 \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] \\ &+ \alpha_2 (\sigma_y - \sigma_z)^2 + \alpha_4 (\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ 2(\alpha_1 + 2\alpha_2)\tau_{yz}^2 + \alpha_7\sigma_x + \alpha_8(\sigma_y + \sigma_z) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

よって、未知材料定数は、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_7$ 及び α_8 の5つである。

(7)式から得られる破壊曲面を図2に示す。

(7)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。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{1}{2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_x} & \alpha_7 &= \frac{1}{\sigma_x} + \frac{1}{\sigma_x} \\ \alpha_2 &= -\frac{1}{\sigma_y \cdot \sigma_y \cdot \sigma_y} + \frac{1}{2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_x} & \alpha_8 &= \frac{1}{\sigma_y} + \frac{1}{\sigma_y} \end{aligned}$$

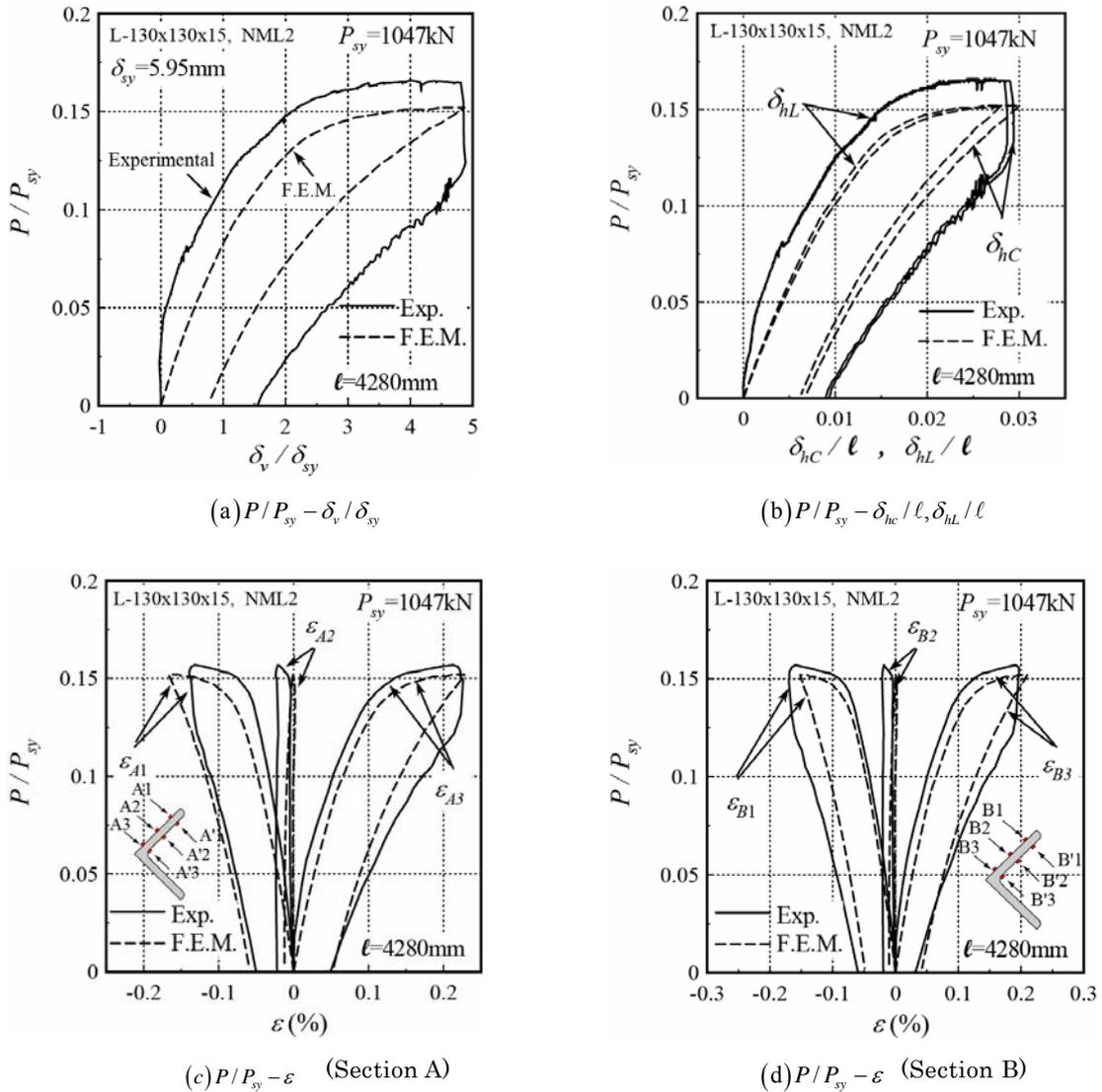


図4 NML試験体(補強試験体)の解析結果

$$\alpha_s = \frac{1}{f \tau_{sy}} \quad (8.a \sim e)$$

ここに,

繊維方向の引張強度: $f \sigma_x$, 及び圧縮強度: $c_f \sigma_x$
 繊維直交方向の引張強度: $f \sigma_y$, 圧縮強度: $c_f \sigma_y$,
 せん断強度: $f \tau_{sy}$

2.3 解析モデル

解析対象は、図1(a)(b)に示す炭素繊維プレートを2層接着した山形鋼縮材(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 δ_v を z 軸方向に与える。荷重の測定は、軸力 N , 変位の計測は、軸方向変位 δ_v , 中央弱軸方向横たわみ δ_h , ひずみの計測は、中央断面

(A断面) および中央部から500mm離れた点(B断面)の材軸方向直ひずみを計測した。山形鋼の圧延時の残留応力、接着層、炭素繊維プレートの接着剤硬化時の残留応力は考慮していない。形状の初期不整も考慮していない。尚、プレ・ポスト処理はMentant2011, 解析はMarc2011, により実行した。

2.4 解析シリーズ

解析シリーズは、L-130x130x15の山形鋼圧縮材でピン間距離が4280mmで無補強の試験体(N試験体)断面外側に、高強度型炭素繊維プレートTLを4枚2層接着した試験体(UTL2試験体), 第1層はTLを第2層に中弾性型炭素繊維プレートMLを重ねて同様に接着した試験体(UTM2), MLを4枚2層接着した試験体(NML2

表 3 実験・解析結果

試験体名称	最大圧縮耐力 kN	最大中央点 横たわみ mm	中央から500mm の最大横たわみ mm	破壊指標の 解析値 —	破壊時のCFRP 最大ひずみ μ	破壊状況
NML2	174 (0.91)	126.0 (1.02)	123.0 (0.97)	0.373	2,284	CFRP中央部材直交方向破断
UTM2	162 (0.90)	151.0 (1.02)	147.4 (0.97)	0.483	2,503	CFRP中央部材直交方向破断
UTL2	139 (0.98)	221.2 (1.00)	201.2 (1.01)	0.228	3,888	CFRP中央部材直交方向破断
N	127 (0.80)	254.8 (1.08)	202.6 (1.05)	—	-	中央部が局部変形

()内は、解析値との比

試験体)について偏心量 e を 100mm とした実験を解析するジリーズとした。

解析に用いた試験体の形状、断面性能を表 1 に、解析用の素材特性を表 2 に示す。表中の t_a は接着層厚、 $(ED)b$ は複合材の曲げ剛性、 y_o は図心位置、 l は部材長 l ピン間距離、 N_E はオイラー座屈耐力 M_p は複合材の全塑性モーメント λ^* は複合材の換算細長比である。

3. 解析結果と考察

解析結果を、図 3~6、表 3 に示す。図 3 には、山形鋼材の全塑性軸力 P_y で無次元化した軸力 (P/P_y) と、塑性伸び変形 δ_y で無次元化した。材軸方向変位 (δ_x/δ_y) との関係を(a)に、 (P/P_y) と、座屈長さ λ で無次元化した。中央横たわみ (δ_{ML}/l) 、と中央から 500mm 離れた点の横たわみ (δ_{500}/l) 、との関係を(b)に (P/P_y) と、中央断面及び中央から 500mm 離れた断面の表面のひずみ $(\epsilon_{A1}, \epsilon_{A2}, \epsilon_{A3})$ 及び $(\epsilon_{B1}, \epsilon_{B2}, \epsilon_{B3})$ との関係を(c)及び(d)に、N 試験体について実験値とともに示す。図 4 には、図 3 と同様の関係を NML2 試験体について示す。図 5 は、NML2 試験体の第 1 層接着材の最大変形時における、相当応力と相当塑性ひずみの分布を CFRP の端部について示す。図 6 は NML2 試験体の第 1 層目、第 2 層目の CFRP の最大変形時における破壊指標の分布を材中央部について示す。表 3 には実験で得られた最大圧縮軸力、最大中央変位、中央から 500mm の最大横たわみ、破断時の CFRP 最大ひずみ、破断状況と、F.E.M 解析から得られた、最大変形時の(7)式から求めた破壊指標の値 $f(\sigma_y)$ を示す。最大圧縮軸力、最大横たわみについては、実験値に対する F.E.M 解析値との比を()内に示す。

○最大圧縮耐力と残留変形状

図 4(a)、表 3 より、ML を接着するもの(NML2、UTM2 試験体)は、最大圧縮耐力を向上させるのに効果的であり、無補強試験体と較べ NML2 試験体で約 1.40 倍、

UTM2 試験体で約 1.30 倍最大圧縮耐力を向上させることができる。有限要素解析値の軸力-軸縮み関係は、実験値のそれと較べ 20~25%程度軸力が小さいものの、炭素繊維プレート補強による耐力上昇の程度を良好に予測している。

また、図 3(c、d)、4(c、d)、より、塑性変形の局所化による横たわみの挙動変化、残留変位等も良好に再現していることがわかる。

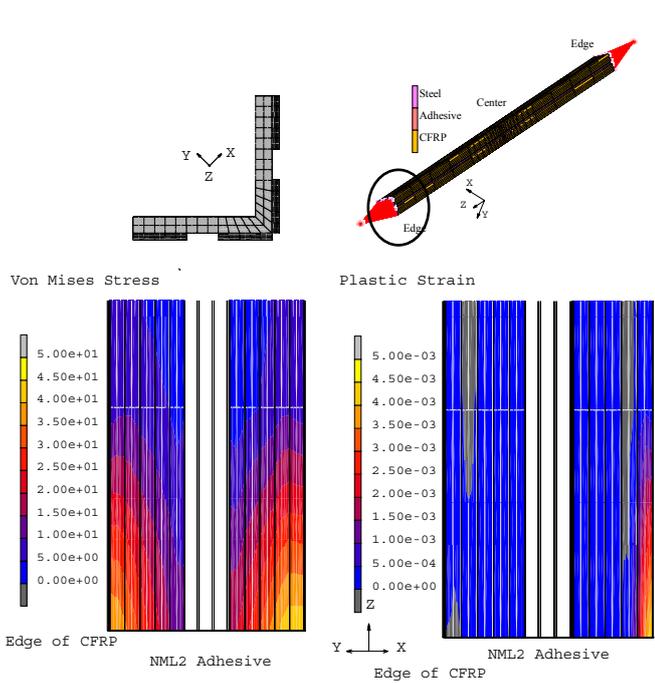
○破壊性状と接着特性

図 3(c、d)、4(c、d)、表 3 より、補強試験体はすべて、破壊は接着界面ではなく炭素繊維プレートの中央の軸方向に破断し、破断時の炭素繊維プレートのひずみは、NML2 試験体で 2000μ、UTL2 試験体で 4000μ、UTN2 試験体で 2600μ、であり、直下の鋼材は塑性化が生じているにも関わらず接着剤で破壊が生じていない。図 5 から第 1 層の接着材の CFRP 端部において、端部から 150mm の長さの範囲の相当応力が高くなるものの最大変形時において、端部隅角部に、0.45%程度のわずかな相当塑性ひずみが、NML2 試験体のみに見られた。このことから、採用した接着剤は十分な接着性能を有することがわかる。図 6、表 3 から、CFRP の破壊指標 ((7)式の $f(\sigma_y)$)は NML2 試験体の第 2 層表面、材中央で最大となるが、その値は 0.373 である。より詳細な応力評価するとともに、より精度の高い破壊指標を検討する必要があると考えられる。

補強試験体すべてについて、炭素繊維が幅方向に破断した事実は、全強度まで新素材である炭素繊維プレートの優れた性能を利用できた補強が可能であることを示唆している。

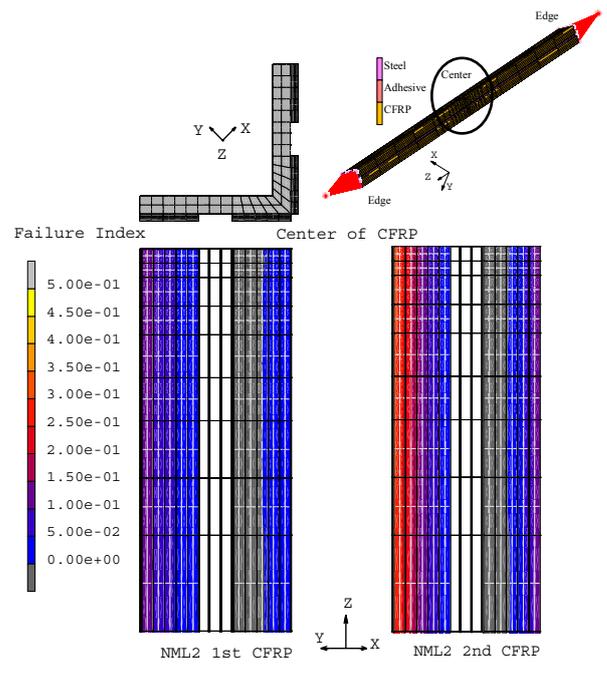
4. まとめ

炭素繊維プレートによる山形鋼圧縮材に対する補強の実用化を推進するため、実大試験体について単調偏心圧縮座屈試験について、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



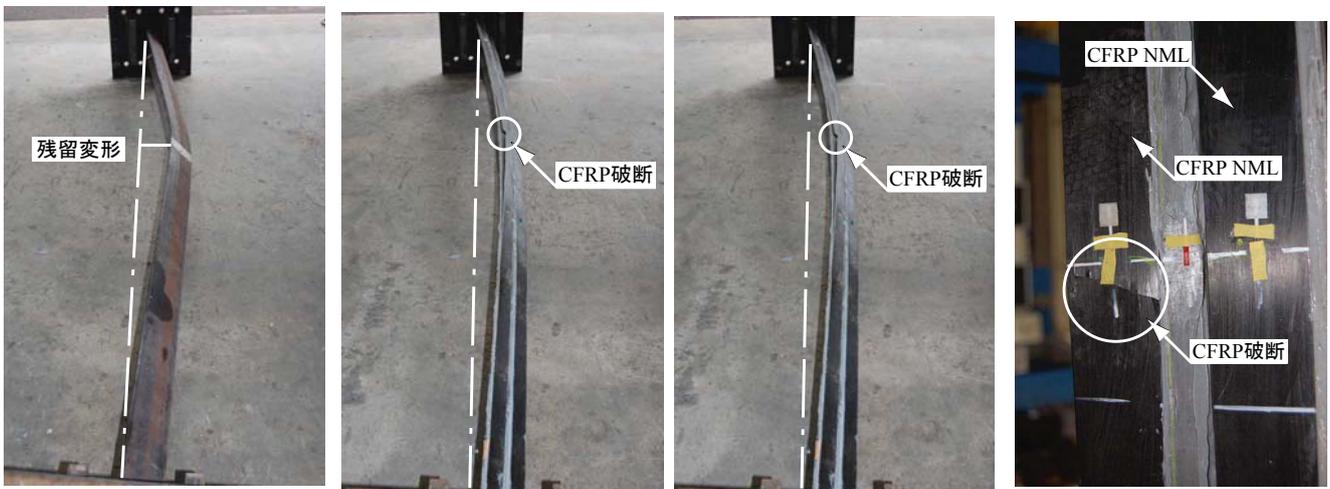
(a) 相当応力 (b) 塑性ひずみ

図5 接着材の相当応力, 相当塑性ひずみ分布 (NML2 試験体, 第1層端部)



(a) 第1層 (b) 第2層

図6 CFRP 破壊指標値の分布 (NML2 試験体, 第1,2層中央部)



(a) N 試験体 (b) NML2 試験体 (c) UTL2 試験体 (d) NML2 試験体 (詳細)

写真1 試験終了後の状況

トの異方性や破壊条件を精密にし、有限要素法解析により補強山形鋼ブレース材の炭素繊維プレートの破断限界の推定を行った。

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所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) NML2 及び UTM2 の接着形式では、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) 無補強試験体では、中央部の横たわみが大きく生じる座屈波形となり、残留横たわみが大きい一方、NML2, UTM2 の形式で炭素繊維を接着すれば、残留横たわみは大幅に軽減できる。
- 4) 中弾性型炭素繊維プレートの初期製造目粗面を上面とする接着をすれば、炭素繊維プレートは大

きな変形に追従し接着界面ではなくプレートが破断する。

- 5) NML2, UTM2 の接着形式によれば、炭素繊維プレートの強度を十分に引き出す補強が、実大山形ブレースについても実施できる。
- 6) 提案した破壊指標は、破壊時に 0.23~0/48 程度となり、より高精度の破壊則が必要である。

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 上の Marc/Mentat2011 を利用させていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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659号, pp.175-183, 2011.1.
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 小澤吉幸 :炭素繊維プレートによる補強実大山形鋼ブレースの座屈実験, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.619-626, 2008.11.
- 3) El Damatty, A.A, Abushagur, 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.
- 4) 渡辺憲市, 板垣一也, 鈴木博之 :炭素繊維補強化樹脂版による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.679-682, 2000.11.
- 5) W.F.Chen, D.J.Han: Plasticity for Structural Engineering, pp. 99-116, Springer-Verlag, 1988.