

炭素繊維プレートによる鋼構造建物の長寿命化に関する研究 (その2) 山形鋼ブレース材の圧縮補強について

玉井 宏章* ・高松 隆夫* ・原 伸幸**
灰谷 徳治*** ・服部 明生***

(平成16年9月10日受理)

Life Prolongation of Steel Building Using Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate Part 2 Compressive force rehabilitation of angle brace

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Shinko HARA
Tokuji HAITANI and Akeo HATTORI

(Received Sep. 10, 2004)

Abstract

Aging and deterioration of existing Steel Structures necessitates the development of simple and efficient rehabilitation techniques. To enhance the usage life of existing Steel buildings, a tensile force strength fending method with bonding Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate has been developed by authors.

To enhance the Strength and plastic deformation of Steel structural member, it is required. a rehabilitation for method. Compressive force strengthening as well as for tensile force strengthening.

This paper reports the results of compression tests conducted on an angle steel brace before and after rehabilitation using CFRP plates. These results show enhanced axial rigidity, axial force carrying capacity and plastic deformation capacity and plastic deformation capacity of the brace due to bonding CFRP plate.

Key Words: Carbon fiber reinforced plastic plate, Compressive force strengthening, Rehabilitated steel brace.

1. はじめに

高い剛性と強度を有する新素材(炭素繊維, アラミド繊維)を接着して, 鋼構造物を補強する方法が著者らを含めた研究者により開発されつつある^{1)~9)}。

前報^{7)~9)}で指摘したように, 炭素繊維プレート, アラミド繊維プレート等, 高剛性・高強度繊維を用いた補強材は, 一般に引張力を負担させ主体構造部材の応力度を低減するといった引張補強に用いられる。

鋼構造部材はそれら部材断面形状を起因として, 本質的に引張力には強度を発揮するものの, 圧縮力は座屈現象が生じ, 耐荷力は著しくとぼしい場合が多い。鋼構造部材の保有耐力を上げるためには, 引張力抵抗性能を上げるのみならず圧縮力についても補強を要する。薄板で構成される圧縮部材の座屈現象を観測すると, たわみが比較的なだらかな弾性座屈波形が生じた後, 部分的に屈曲して塑性ヒンジが生じ, その屈曲した部分以外の変形は元に戻ると共に, その屈曲部に変形が集中するという塑性変形の局部位

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 東レ建設技術設計部

が生じる。この塑性変形の局所化が生じると耐力は急激に劣化して塑性変形性能は低下する。炭素繊維プレートのような高剛性・高耐力の材と鋼のような延性のある低耐力の材とを密実に接合した複合材は、地震荷重のような過大な荷重下及び座屈現象にみられる大変形下においても、同一断面は、塑性化部分と弾性部分が混在しうる（Contained Plasticity 状態）ため、除荷後において、構造材としての形状・性能は大きく欠損しない耐震構造的な冗長性を有すると考える。

このような背景から、本研究では、炭素繊維プレートによる鋼構造部材の圧縮補強への可能性を検討するため、山形鋼ブレースに炭素繊維プレートを接着した試験体を製作し、単調圧縮荷重試験を行って、その最大耐力、軸剛性及び塑性変形性能に対する補強効果について検討する。

2. 炭素繊維プレートの特徴

2.1 炭素繊維について

炭素繊維は、アクリル樹脂やピッチを繊維にしたものを特殊な熱処理をして作られる、グラファイト結晶構造をもつ繊維状の炭素で、無機繊維である。原材料・製造方法により PAN 系とピッチ系に分類される。

PAN 系は、高強度、高ヤング係数が得られ構造材として用いられる。

PAN 系炭素繊維には、高強度型と中弾性型の 2 種類がある。これらの 2 種類の炭素繊維の特徴を以下に示す。

- 1) 高強度、高ヤング係数を有し、破断時ひずみが比較的小さい。
- 2) 比重が軽い。
- 3) 耐薬品性、耐蝕性に優れており、工場地帯や海岸地帯など、苛酷な環境下で利用できる。

2.2 炭素繊維プレートについて

前述の高性能を有する繊維を一方向の配列し、エポキシ樹脂に十分含浸させ、一体化した繊維強化プラスチック（繊維プレート）が製造されている。実験に用いる繊維プレートは、繊維を一方向に引き揃え板状に成型したもので、樹脂は、加熱硬化型エポキシ樹脂を用いている。接着時に空気を接着剤とともに押し出し、接着不良を抑えることができるように、プレート幅は 50mm と細幅になっている。

この連続繊維プレートによる補強工法は、従来の鋼板補強、繊維シート工法に比べて、以下の特徴がある。

- 1) 補強による部材断面の形状変化、重量増加がほとんどない。
- 2) プレート 1 枚は、炭素繊維シートの 3～8 層分に相当し、シート工法の積層作業の軽減、品質確保が容易にできる。
- 3) 軽量であるため、鋼板補強と比較して足場が簡単なも

ので済み、また接着剤を使う接着工法のため溶接作業が不要である。

2.3 炭素繊維プレートの特性

今回使用した高強度型炭素繊維プレート（CFRP (TL)）、中弾性型炭素繊維プレート（CFRP (ML)）の引張素材試験結果を図 1、表 1 に示す。

図 1 には、各炭素繊維プレートの応力 σ ひずみ ϵ 関係を、表 1 には、ヤング係数、引張強度、破断ひずみを、それぞれ、示す。

これらの結果から、高強度型及び中弾性型炭素繊維プレートは鋼と比較して、0.8及び1.4倍のヤング係数と7.0及び5.0倍の強度を有し、また破断ひずみは、1.52及び0.71%と大きいことから、有効な補強材であることがわかる。

以降では、幅 50mm の炭素繊維プレートを用いて山形鋼ブレースの補強を行った試験体について荷重試験を行う。

3. 補強山形鋼ブレース材の単調圧縮試験

炭素繊維プレート接着工法の鋼構造物圧縮部材補強への適用性を検討するため、補強山形鋼ブレース材の単調圧縮

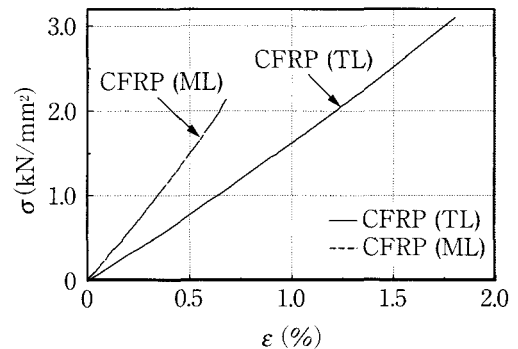


図 1 炭素繊維プレートの応力-ひずみ関係

表 1 炭素繊維プレートの素材特性

	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (%)
CFRP (TL)	169.1	3085.2	1.52
CFRP (ML)	295.7	2169.1	0.71

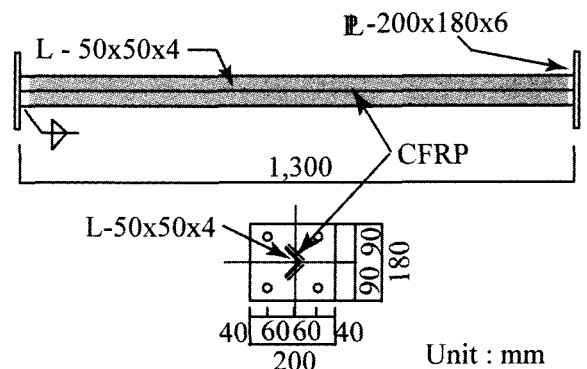


図 2 試験体形状

表2 試験体名称

試験体名	連続繊維プレート	
	種類	貼付方法
TP	CFRP (TL)	山形鋼外面に、2枚重ね合わせ貼り
TW	CFRP (TL)	山形鋼内面、外面の両面貼り
TV	CFRP (TL)	山形鋼外面に、山型貼り
MW	CFRP (ML)	山形鋼内面、外面の両面貼り
MV	CFRP (ML)	山形鋼外面に、山型貼り
N	-	-

表3 山形ブレース材の素材試験結果

ヤング係数 (kN/mm ²)	ひずみ硬化率 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比 (%)	硬化開始ひずみ (%)	伸び率 (%)
205	2.1	267	405	66	25	23.2

断面積：3.89×10²mm

断面2次モーメント：3.76×10⁴mm

表4 接着剤の力学的特性

ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断付着強度 (N/mm ²)	衝撃強度 (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

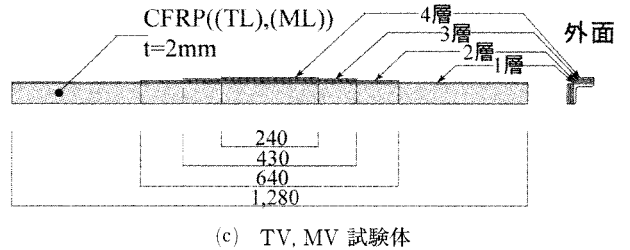
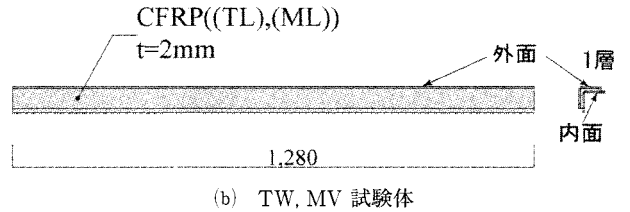
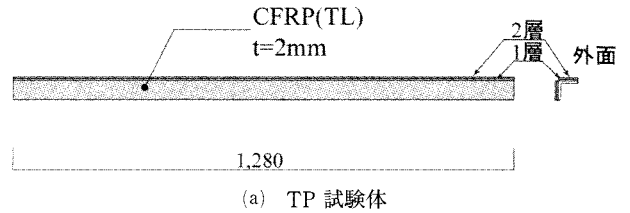


図3 炭素繊維プレート貼付方法

試験を行う。

3.1 試験体

試験体形状を図2に、炭素繊維プレートの貼付方法を図3に、それぞれ、示す。

試験体は、全長 1,300mm の山形鋼 (L-50x50x4) の両端に板厚 6mm の鋼板 (P-200x180x6) をその中心を山形鋼図心に一致させて溶接し、炭素繊維プレートを接着したものである。

炭素繊維プレートとして、高強度型炭素繊維プレート (CFRP (TL)) を用い、山形鋼の外面全体に2層 (4枚) 接着した TP 試験体、山形鋼の内・外面全体に1層 (4枚) 接着した TW 試験体、山形鋼の外面に炭素繊維プレートを1層目は、中央部の 1280mm に、2層目は、640mm に、3層目は、430mm に、4層目は、240mm に (8枚) 接着した TV 試験体と、炭素繊維プレートとして、中弾性型炭素繊維プレート (CFRP (ML)) を用い、TW 試験体及び TV 試験体と同様の貼付方法とした MW 試験体及び MV 試験体を各1体ずつ、また比較のため無補強の N 試験体を1体、計6体を用意した。表2に試験体名称を整理して示す。また、山形鋼の1号試験片による引張素材試験結果を表3に示し、接着剤単体の硬化後における力学的特性を表4に示す。

尚、接着は、炭素繊維プレートと山形鋼の接着面を紙ヤスリ (#100) で目粗しした後、常温二液硬化型エポキシ樹脂接着剤 (コニシボンド E250R) で接着し室温20℃以上で7日間養生した。

3.2 載荷方法と計測方法

試験装置概要を図4と写真1に示す。試験体の両端に、試験体弱軸回りに回転するピンが取り付けられており、上部から 500kN 容量のオイルジャッキにより圧縮力が作用し、上部ピンが垂直方向に移動するようになっている。尚、試験体設置において、加力点位置が山形鋼図心と一致するように、トランシットにより位置決めを行った。

計測は、オイルジャッキ先端に取り付けたロードセルから、圧縮力： P を、変位は、図6に示すように試験体の強軸方向の中央たわみ： δ_v 山形鋼の図心から強軸方向に 80mm 離れた2点の上下エンドプレートの材軸方向変位： (δ_a, δ_b) 、 (δ_c, δ_d) を、それぞれ、計測した。またひずみは、試験体中央部と下端から 325mm の断面について、山形断面の先端部から 15mm と 40mm の位置の表裏に4点 (G1, G2, G3, G4)、計8点の材軸方向直ひずみを、検長 5mm の箔ひずみゲージにより計測した。

変位の計測値から、試験体の軸縮み： δ_v と、上下材端回転角： (θ_u, θ_r) を次式により算定した。

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

$$\theta_u = \frac{\delta_a - \delta_b}{l_d} \quad \dots\dots\dots (1.b)$$

$$\theta_r = \frac{\delta_c - \delta_d}{l} \quad \dots\dots\dots (1.c)$$

ここに、 l は、 δ_a と δ_b との計測点間距離 (=160mm) で

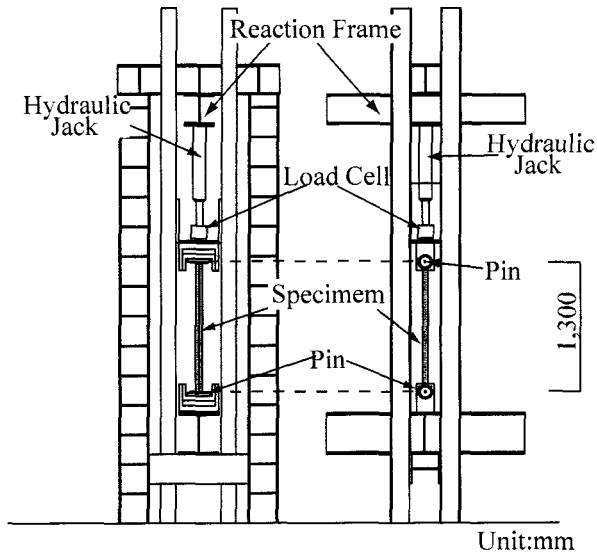


図4 試験装置の概要

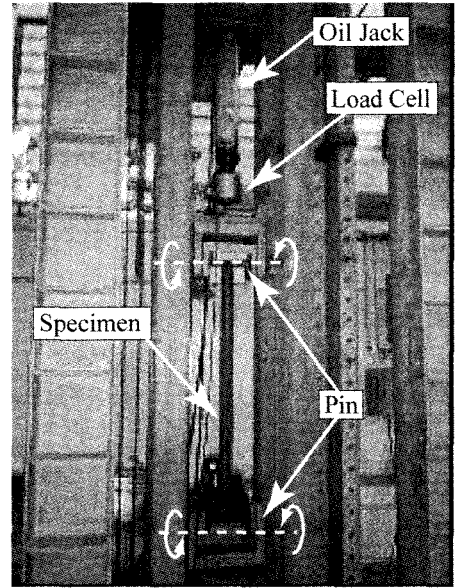


写真1 試験装置概要

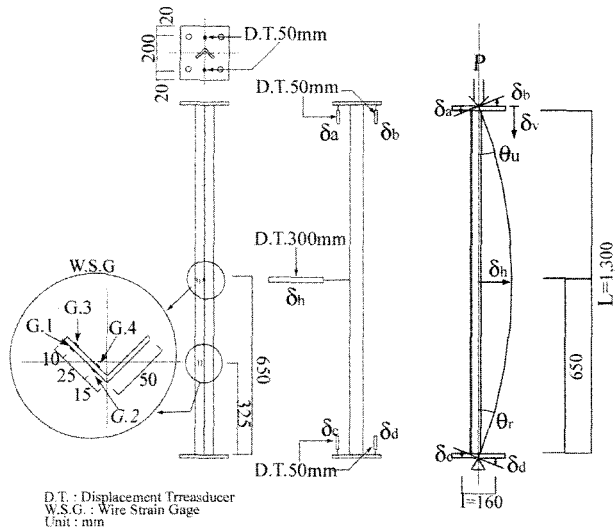


図5 変位計及びゲージ位置

図6 計測諸量の模式図

$$\delta_h = \frac{M_0}{P} \left(\frac{1}{\cos \frac{kL}{2}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\theta_u = \theta_r = \frac{M_0 L}{2EI} \cdot \frac{\tan \frac{kL}{2}}{\frac{kL}{2}} \quad \dots\dots\dots (2.b)$$

ここに、

$$k^2 = \frac{P}{E \cdot I} \quad \dots\dots\dots (3.a)$$

$$M_0 = P \cdot e \quad \dots\dots\dots (3.b)$$

であり、EI は、材の曲げ剛性、L は、座屈長さである。

4. 試験結果とその考察

試験結果を図7～12、写真2、3及び表5に示す。図7には、無補強試験体の全塑性軸力で無次元化した荷重 (P/P_y) と座屈長さで無次元化した軸縮み: (δ_v/L) の関係を、図8には、(P/P_y) と座屈長さで無次元化した中央たわみ: (d_h/L) の関係を、(a)弾性範囲と、(b)弾塑性範囲とに分けて、全試験体について示す。図9及び図10には、(P/P_y) と上下材端回転角、(θ_u, θ_r) との関係を、TP, TW, MW 試験体及び TV, MV, N 試験体について示し、(a)弾性範囲、(b)弾塑性範囲とに分けて、それぞれ、示す。図8(a)、図9(a)、図10(a)には、(2.a)式、(2.b)式から、無補強試験体を対象に、偏心量: e を様々に変化させた場合の関係もあわせ示している。

図11には、(P/P_y) と中央部のひずみの関係を、図12には、(P/P_y) と下部ひずみの関係を、全試験体について、

ある。

荷重プログラムは、単調圧縮荷重とし、座屈が観測されるまでは、荷重速度をほぼ 3.0kN/min とし、それ以降は、変位速度をほぼ 1.0mm/min とした。

3.3 加力点の不整の検証法

座屈現象は、初期不整が大きな問題となる。特に、加力点の偏心が試験結果に影響する。

試験結果から、弾性範囲の荷重: P と中央点たわみ: δ_h 及び、材端回転角: θ_u, θ_r の関係が得られれば、偏心量: e は、推定できる¹⁰⁾。

材の弾性曲げ剛性が一樣で、上下端部の加力点の偏心量 e が同じと仮定すると、次式の関係が得られる。

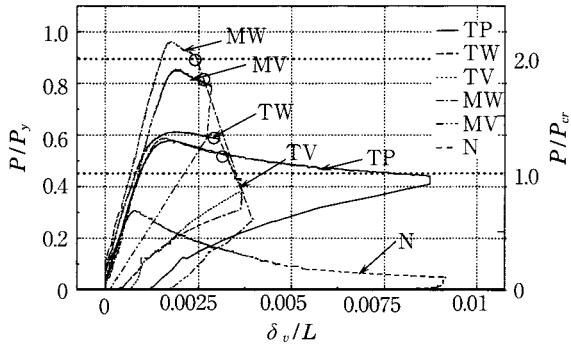


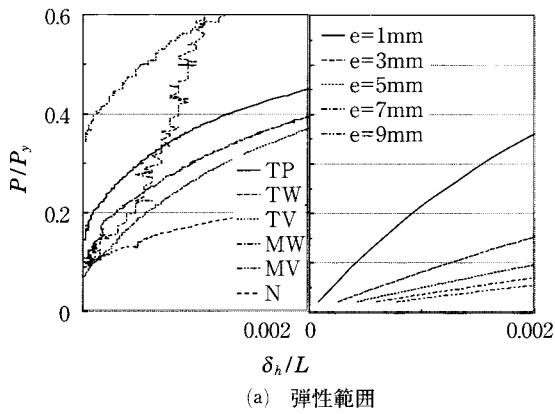
図7 荷重-軸縮み関係

それぞれ、示す。表4には、全試験体について、最大荷重、弾性軸剛性、最大荷重時の中央たわみ、最大軸縮みと最大中央たわみ、又は、破壊時の中央たわみ、残留中央たわみ、及び炭素繊維プレートの破壊形式を示す。

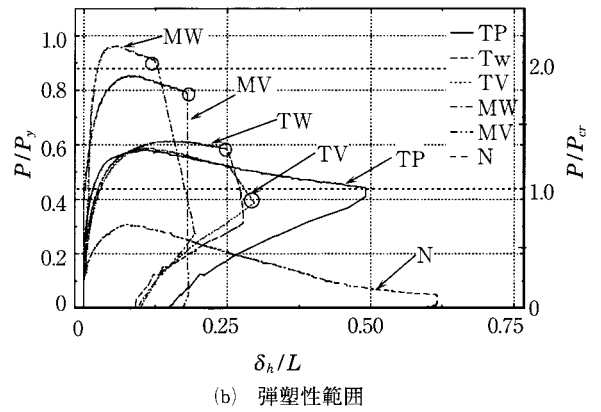
写真2には、TW, TV, MV, TV 試験体の炭素繊維プレートの破壊形状を、写真3には、TP, N 試験体の残留変形を、それぞれ、示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

1) 各試験体とも、偏心量は2~3mm程度と比較的小さ

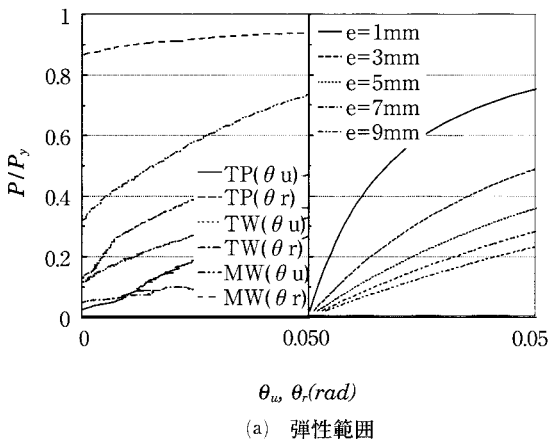


(a) 弾性範囲

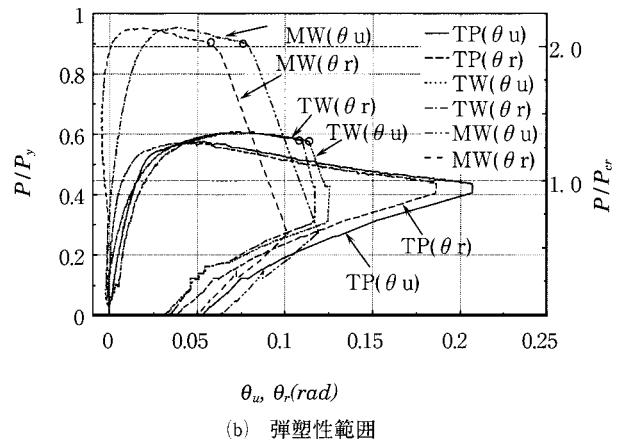


(b) 弾塑性範囲

図8 荷重-中央たわみ関係

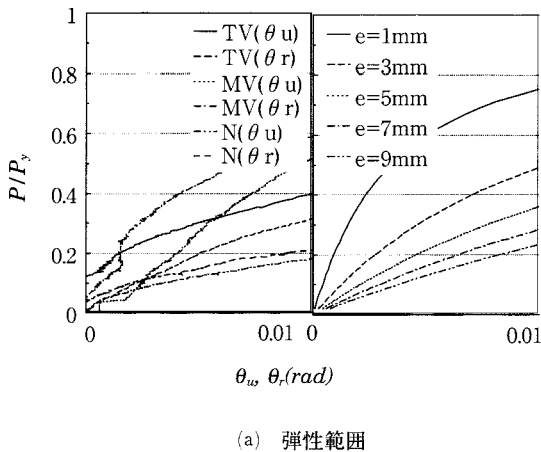


(a) 弾性範囲

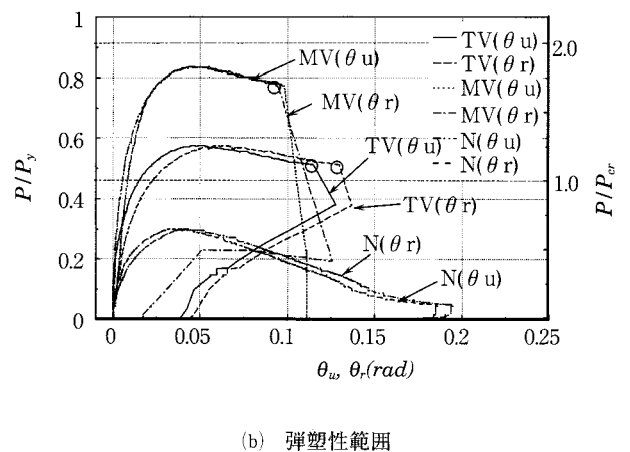


(b) 弾塑性範囲

図9 荷重-上下材端回転角関係 (TP, TW, MW 試験体)



(a) 弾性範囲



(b) 弾塑性範囲

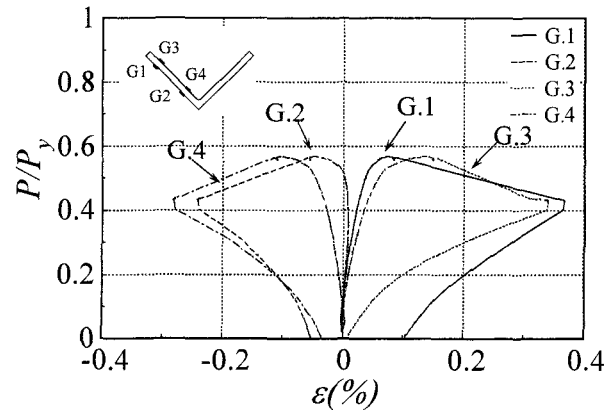
図10 荷重-上下材端回転角関係 (TV, MV, N 試験体)

い。TP, TV, MV 試験体の偏心量は, N, TW, MW 試験体のそれより大きい傾向にある。

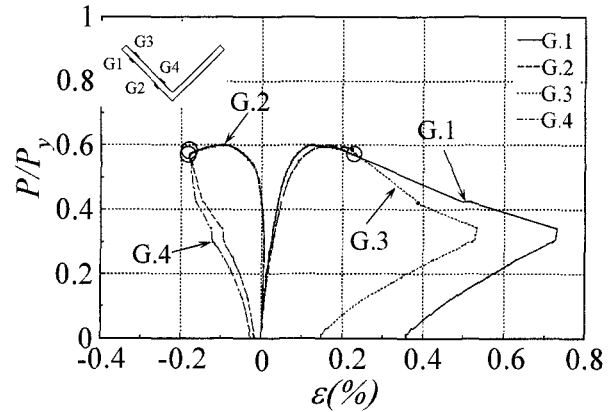
- 2) 炭素繊維プレートを接着することにより最大荷重値, 弾性軸剛性とも増大することができる。特に, 中弾性型炭素繊維プレートを用いた MW, MV 試験体の増大率は大きい。
- 3) 炭素繊維プレートの使用量を同一として, 山形鋼の外面に均等に貼った TP 試験体と, 同様の位置に山形

状に貼った TV 試験体の結果を比較すると最大荷重はほぼ一致し, TV 試験体では, 早期に2層目ではく離した。一般に部分的に複数層接着すると接着不良が生じやすく, また, こうした貼り方をする効果は少ない。

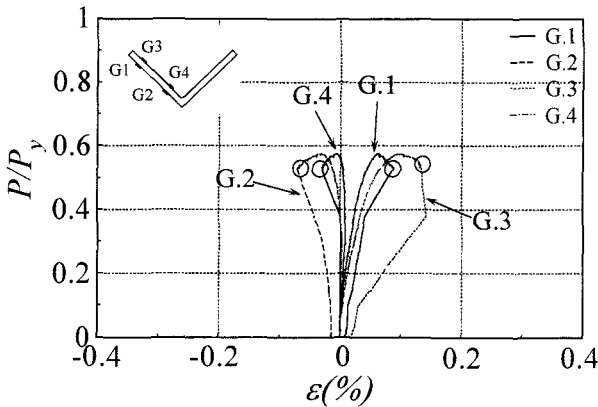
- 4) TP 試験体と TW 試験体とを比較すると TW 試験体の方が最大荷重は大きく, また内面に貼付したプレートがはく離するため変形性能は低い。これは, 内外面



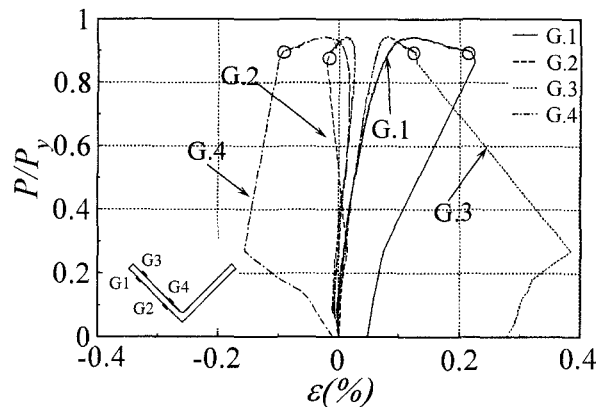
(a) TP 試験体



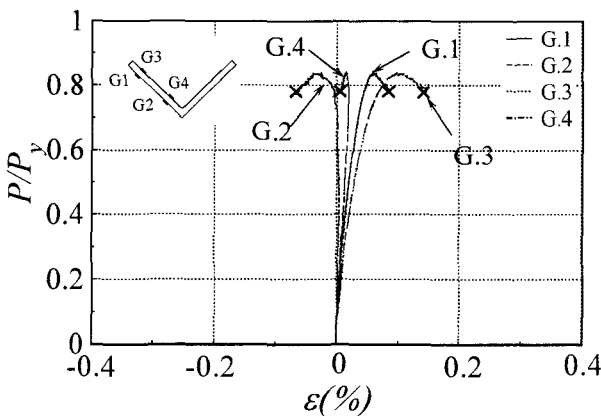
(b) TW 試験体



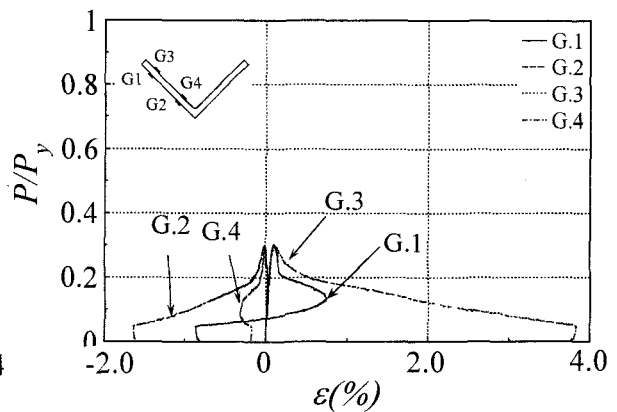
(c) TV 試験体



(d) MW 試験体



(e) MV 試験体



(f) N 試験体

図11 荷重-中央ひずみ分布関係

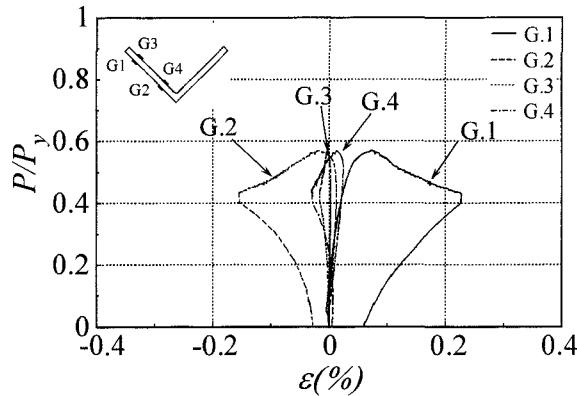
に1層ずつ接着した場合には、偏心量は小さくなること、また、内面に貼付けした炭素繊維プレートは、フイレットの存在によりその全面が完全に鋼板と接着しないためと考えられる。

5) N 試験体では、中央部の山形鋼が塑性化すると軸耐力は減少し、ひずみ値は、急激に増大するのに対し、下部ではひずみ値が減少する。除荷時には、中央たわみ・軸縮みともに、その最大値と同等量が残留変形と

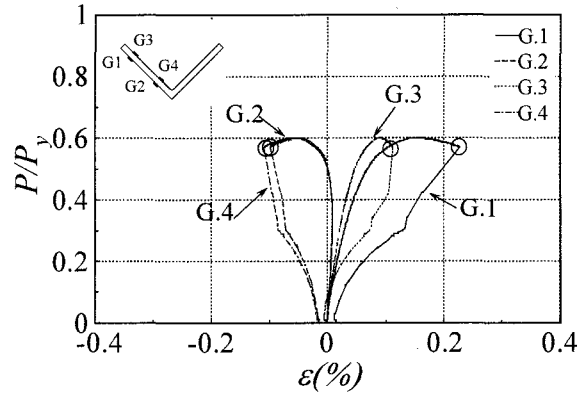
なる。これは、試験体中央部に塑性変形の局所化が生じたためである。

6) 一方、TP 試験体では、中央部及び下部ともに、山形鋼には塑性化が生じるものの除荷時には、中央たわみ・軸縮みともに原点に近づき、残留変形は小さい。また、中央部のひずみ値は比較的小さく、塑性変形の局所化は生じない。

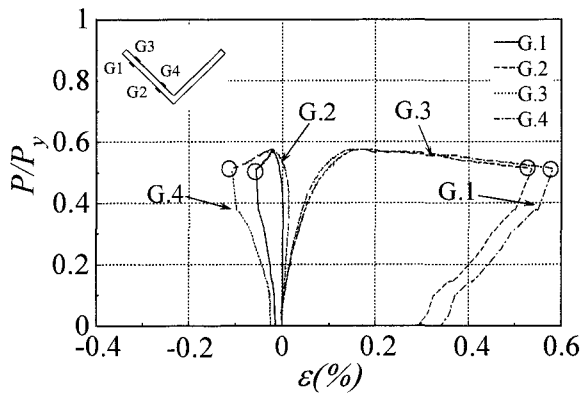
7) 写真3の残留たわみ分布からわかるように、高耐力の



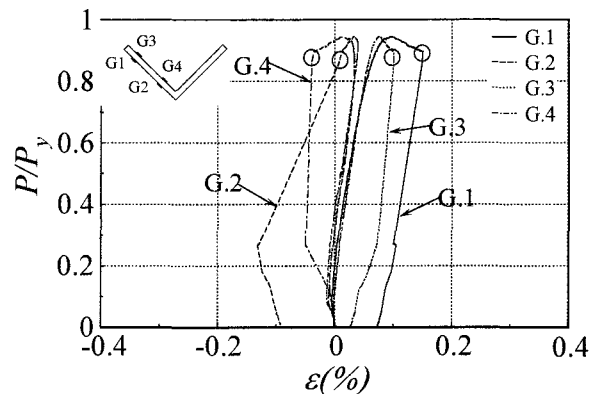
(a) TP 試験体



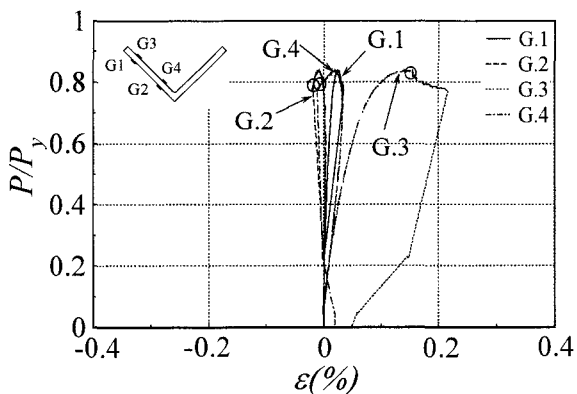
(b) TW 試験体



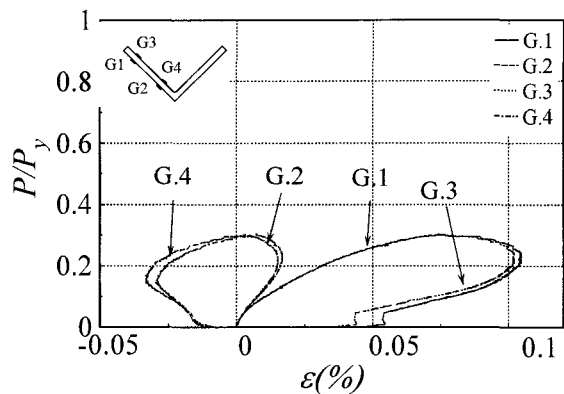
(c) TV 試験体



(d) MW 試験体

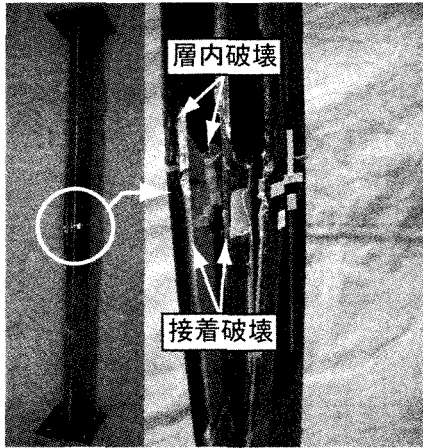


(e) MV 試験体



(f) N 試験体

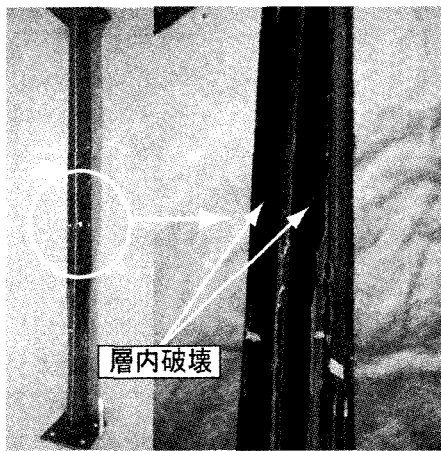
図12 荷重-下部ひずみ分布関係



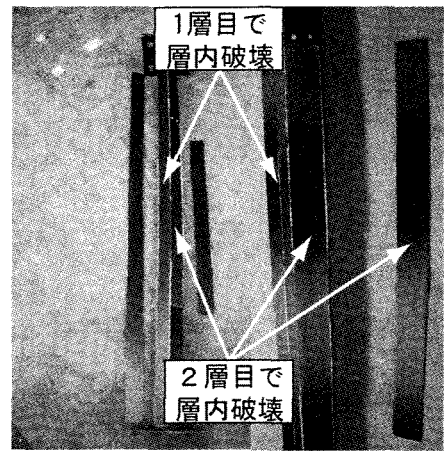
(a) TW 試験体



(b) TV 試験体



(c) MW 試験体

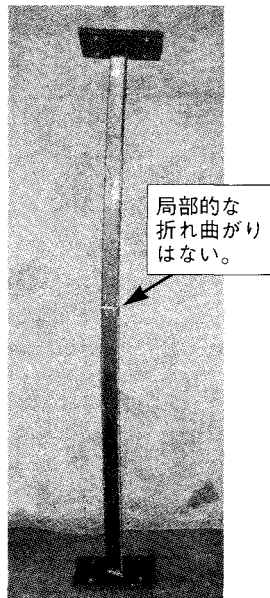


(d) MV 試験体

写真2 試験体の破壊形状



(a) N 試験体



(b) TP 試験体

写真3 試験体の残留変形状

材と延性のある低耐力の材とを、接合した複合材であれば、過大な荷重と座屈のような大きな変形を受けた際にも、材断面には、塑性化部分と広い弾性部分とが混在する（いわゆる Contained Plasticity 状態となる）

ため、除荷後において構造材として形状・性能は大きく欠損することはないといった耐震構造的な冗長性 (Redundancy) を有する。

8) 平滑な面に比較的長い接着長さで連続した炭素繊維プレートを接着すれば、塑性変形性能を十分に確保しうる、鋼構造部材の圧縮補強は可能である。

5. ま と め

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検討するため、山形鋼ブレースに、炭素繊維プレートを接着した試験体を製作し、圧縮載荷試験を行った。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 炭素繊維プレートを接着することにより弾性軸剛性、及び最大荷重値を1.9倍および3.0倍に増大させることができる。特に、中弾性型炭素繊維プレートをを用いた場合の効果が高い。
- 2) 高強度型炭素繊維プレートを山形鋼外面に接着すれば、山形鋼ブレースが座屈より塑性化しても、ある部分に塑性化が集中して進行することはなく、完全除荷時に生じる残留中央たわみ、残留軸縮みは非常に小さい。

表5 実験結果

試験体名称	最大荷重	弾性軸剛性	最大荷重時の中央変位	最大軸縮み	最大中央たわみ	破壊時の中央たわみ	残留中央たわみ	炭素繊維プレートの破壊形式
	kN	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm	
TP	57.9 (1.88)	376.8	14.64	11.3	63.9	-	19.2	-
TW	61.3 (1.99)	364.1	22.29	3.9	-	32.46	11.8	内側プレートの層内破壊
TV	58.5 (1.9)	315.8	15.63	4.8	-	32.73	12.7	2層目で層内破壊
MW	96.3 (3.13)	388.0	8.50	5.1	-	18.1	23.7	内側プレートの層内破壊
MV	85.5 (2.78)	418.1	11.91	3.7	-	23.58	22.5	1層目で層内破壊
N	30.7 (1.0)	215.5	9.69	11.3	80.1	-	75.5	-

3) 平滑な面に比較的長い接着長さで連続した炭素繊維プレートを接着すれば、塑性変形性能を十分に確保しうる、鋼構造部材の圧縮補強は可能である。

この引張力のみならず、圧縮力に対しても補強しようと言う事実は、今後、鋼構造物を対象とする炭素繊維プレート接着補強工法の適用性を更に拡大しうることを示唆している。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、2004年度広島工業大学卒論生、櫻庭 誠、藤本真弘、河内秀樹、並河賢一、諸君の協力を得た。また、試験体製作にあたり東レ(株)鈴木 研二、早川 敏弘、コニシ(株)若原直樹、榎本 真也にはご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小野絃一、杉浦邦征、佐々木敦、若松直樹、小牧秀之：CFRPによる補強された鋼管の曲げ挙動、鋼構造年次論文報告集、第8巻、pp. 671-678, 2000. 11.
- 2) 渡辺憲市、石田圭吾、林和彦、山口隆裕、池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強、構造工学論文集、vol. 48A, pp. 689-696, 2000. 11.
- 3) 大倉一郎、福井唯夫、中村圭吾、村上泰三、祝賢治：炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用、鋼構造年次論文報告集、第8巻、pp. 689-696, 2000. 11.
- 4) 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. 3, No. 6, pp. 421-438, 2003. 3.

- 5) 渡辺憲市、板垣一也、鈴木博之：炭素繊維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.
- 6) 野坂克義、金子大作、古川喬朗、鈴木研二、西出靖：CFRP板接着補強において被接着体厚さが補強に与える影響に関する実験的研究、鋼構造論文集、第10巻、第38号、pp. 61-68, 2003. 6.
- 7) 玉井宏章、高松隆夫、角田敦、灰谷徳治、服部明生：連続繊維プレートによる鋼構造物の長寿命化に関する基礎的研究、広島工業大学紀要研究編、第38巻、pp. 153-160, 2004. 2.
- 8) 服部明生、玉井宏章、高松隆夫、灰谷徳治、角田敦、原伸幸：連続繊維プレートによる鋼構造物の長寿命化に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp. 1043-1048, 2004. 8.
- 9) Tamai, H., Takamatsu, T., Sumida, A., Haitani, T., Httori, A., Life Prolongation of Steel Building Using Continuous Fiber Reinforced Plastic Plates- Performance Enhancement of Rehabilitated Beams-, proc.of the 2nd international conference on Steel and Composite Structures, CDROM, 0533, 2004. 9.
- 10) S.P.Timosheuko, J.M.Gere, Theory of Elastic Stability Second Edition, McGraw-Heib, pp. 1-45, 1961.