

# 炭素繊維プレートによる接着補強山形鋼ブレース材の繰返し载荷試験

玉井 宏章\* ・高松 隆夫\* ・櫻庭 誠\*\*  
灰谷 徳治\*\*\* ・服部 明生\*\*\*\*

(平成18年10月30日受理)

## Cyclic Loading Test on Angle Steel Brace with Bonding CFRP Plates

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Makoto SAKURABA,  
Tokuji HAITANI and Akeo HATTORI

(Received Oct. 30, 2006)

### Abstract

To enhance the usage life of existing building a tensile force strengthening method with bonding carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate has been developed by the authors.

To enhance the strength and deformation of steel structure member, a rehabilitation technique for cyclic force strengthening as well as tensile force strengthening.

This paper reports the result of cyclic loading tests on an angle steel brace before and after rehabilitation using bonding CFRP plates. These results show enhanced compressive force carrying capacity and deformation capacity by bonding CFRP plates.

**Key Words:** CFRP plates, angle steel brace, buckling, cyclic loading testes

## 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様々な方法が著者らを含めた研究者により開発されつつある<sup>1)~6)</sup>。

鋼構造部材には、それら部材断面形状を起因として、本質的に引張力に対しては強度を発揮しうるものの、圧縮力に対しては座屈現象が生じ、耐荷力は著しく乏しい場合が多い。鋼構造部材の保有する耐力を上げるためには、引張力に対して抵抗性能を上げるのみならず圧縮力についても補強を必要とする。

文献6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、山形鋼ブレース材に炭素繊維プレートを接着した試験体を製作し、単調圧縮载荷試

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した結果、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圧縮耐力を1.9倍及び3.0倍に増大できること、山形鋼ブレースが座屈に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こと、等のことを明らかにした。

鉄塔に用いられる山形鋼主材の補強への適用を考えると、対象とする強風等の外乱は圧縮・引張を交互に与える繰返し荷重であるため、単調圧縮に対する検討のみならず、正負交番の繰返し荷重下に対しての補強効果や疲労特性についても、検討しておく必要がある。

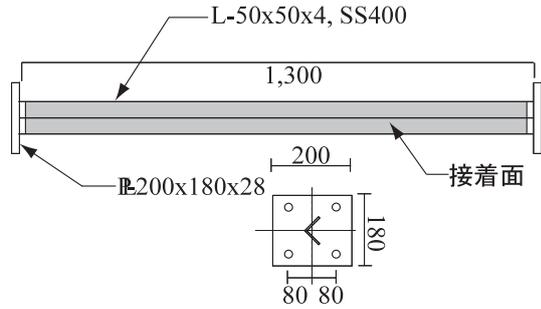
そこで、本研究では、補強した山形鋼ブレース材の正負交番漸増繰返し载荷試験と疲労試験を行い、圧縮・引張力

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

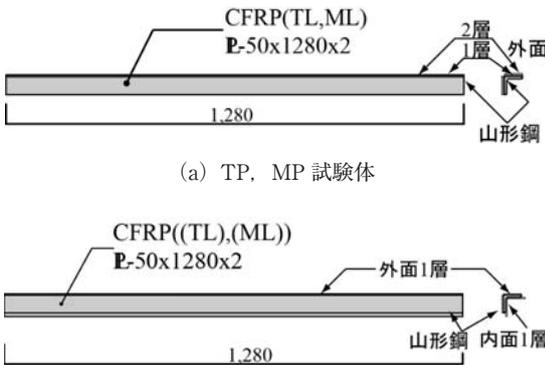
\*\*\* 東レ建設(株)理事

\*\*\*\* 東レ建設(株)技術設計部



断面積 :  $3.89 \times 10^4 \text{ mm}^2$   
 最小断面2次モーメント :  $3.76 \times 10^4 \text{ mm}^2$

図1 試験体形状



(a) TP, MP 試験体

(b) TW, MW 試験体

図2 炭素繊維プレートの貼付方法

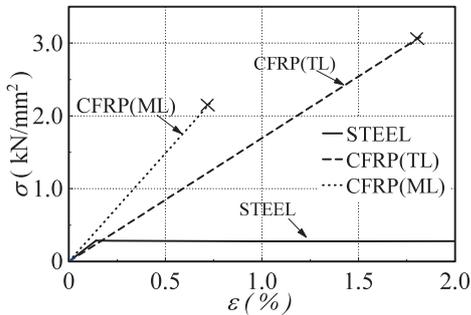


図3 炭素繊維プレートの応力-ひずみ関係

を交互に受ける鋼構造部材への炭素繊維プレート接着補強工法の適用限界を調べることを目的とする。

## 2. 山形鋼ブレース材の正負交番漸増繰返し試験

### 2.1 試験体

#### ○試験体シリーズ

試験体を図1に、炭素繊維プレートの貼付方を図2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28mmの鋼板(PL-200x180x28)をその中心を山形鋼の図心に一致させて溶接し、山形鋼全面に炭素繊維プレート(鋼材との接着長1,280mm)を接着したものである。

炭素繊維プレートとの接着として、文献6)の圧縮補強

表1 試験体名称

試験体名	種類	炭素繊維プレート
		貼付方法
TP	TL	山形鋼外面に、2枚重ね合わせ貼り
TW	TL	山形鋼の外面、内面の両面貼り
MP	ML	山形鋼外面に、2枚重ね合わせ貼り
MW	ML	山形鋼の外面、内面の両面貼り
N	-	-

TL: 高強度型炭素繊維プレート  
 ML: 中弾性型炭素繊維プレート

表2 炭素繊維プレートの素材特性

	ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	破断ひずみ (%)
CFRP(TL)	169.1(0.8)	3085.2(8.1)	1.52
CFRP(ML)	295.7(1.4)	2169.1(5.7)	0.71
Steel	205(1.0)	382.6(1.0)	28.4

表3 山形鋼ブレース材の素材試験結果

ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	降伏応力 ( $\text{kN/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	降伏比 (%)	硬化開始 ひずみ (%)	ひずみ 硬化率 (%)	伸び (%)
205	286.1	382.6	74.8	3.4	2.9	28.4

試験で補強効果を確認できた試験体を用意した。高強度型炭素繊維プレート(CFRP(TL))を用いて、山形鋼の外面全体に2層(4枚,全長5120mm)接着したTP試験体、山形鋼の内・外面全体に1層(4枚,全長5120mm)接着したTW試験体、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、TP試験体及びTW試験体と同様の貼付方法としたMP試験体及びMW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5体を用意した。これらの各試験体とも炭素繊維プレートの使用量は同量とした。表1に試験体名称を整理して示す。

#### ○素材特性

今回の実験で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))の素材試験結果を図3、表2に、山形鋼の1号試験片による引張素材試験結果を表3に、それぞれ示す。

図3には、各炭素繊維プレートの応力:σ-ひずみ:ε関係を、山形鋼のそれとともに示す。

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倍及び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。

#### ○接着について

接着剤の力学的特性を表4に、各試験体の接着層の層厚

表4 接着剤の力学的特性

ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張せん断 付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	衝撃強度 (kJ/m <sup>2</sup> )	ガラス 転移点 (°C)
2.28	55.8	59.0	34.8	25.5	4.2	65
JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111	—

表5 各試験体の接着層厚

	接着層厚(mm)	
	1層目	2層目
TP	1.22	1.3
TW	1.12	1.12
MP	1.35	1.06
MW	1.12	1.09

\*TW, MW試験体は、1層目を外貼り、2層目を内貼りの接着層厚とする。

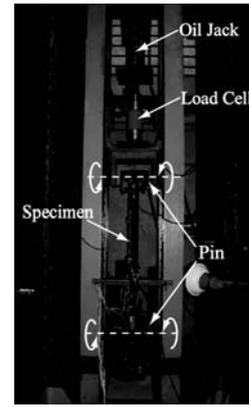


写真1 装置概要

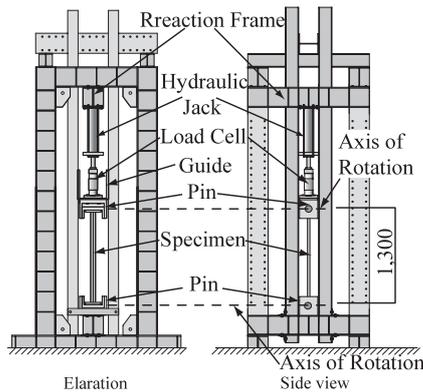


図4 装置概要

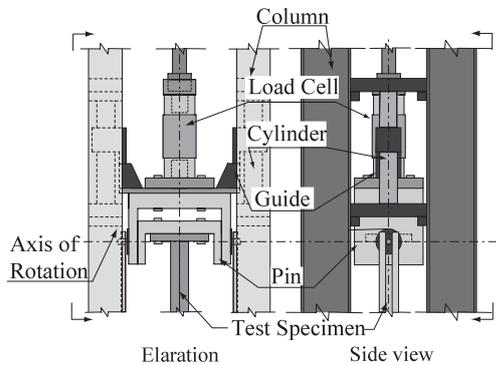


図5 ピンの詳細

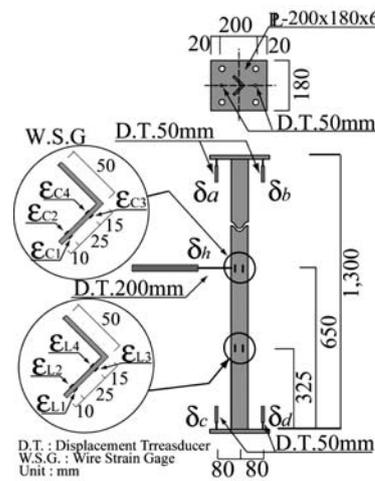


図6 変位計及びゲージ位置

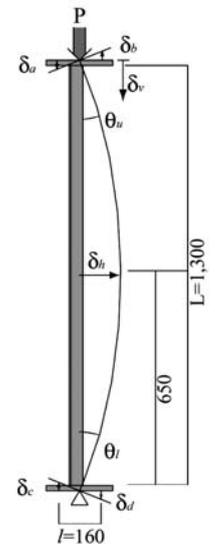


図7 計測諸量模式図

を表5に示す。試験体の接着は、まず山形鋼の表面をディスクサンダーでミルスケールを完全に除去し、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°C 以上で7日間養生した。

## 2.2 載荷方法及び計測方法

今回の実験で用いる試験装置の概要を図4、写真1に、上端ピンの詳細を図5に示す。試験体の両端に、試験体回転軸回りに自由に回転することのでき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・引張力が作用し、上端のピンが鉛直方向のみ移動する

ようになっている。上端ピンは、ガイドとシリンダーにより水平方向には動かないように固定してある。また、山形鋼ブレース材の全長が有効座屈長さにするため、ピン軸の中心と山形鋼の端部とが一致するようなくみになっている。尚、試験体設置において、偏心は、座屈現象に大きく影響を及ぼすので、加力点位置が山形鋼の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、荷重は、オイルジャッキ先端に取り付けられたロードセルから、材軸方向荷重:  $P$  を、変位は、図6に示すように試験体の弱軸方向の中央たわみ量:  $\delta_b$  を200mmストロークの変位計により、山形鋼の図心から弱軸方向に80mm離れた2点の上下エンドプレートの材軸方向変位: ( $\delta_a, \delta_b$ ), ( $\delta_c, \delta_d$ ) を50mmストロークの変位計により、それぞれ、計測した。また、ひずみは、中央部と端部との間の無補強試験体と炭素繊維プレートで補強した試験体の各部の塑性変形の様子を確認するため、無補強の試験体では鋼材表面に、補強した試験体では、炭素繊維プレート表面に試験体中央部の山形断面の先端部から15mmと40mmの位置に表裏4点、試験体の下端から325mmの

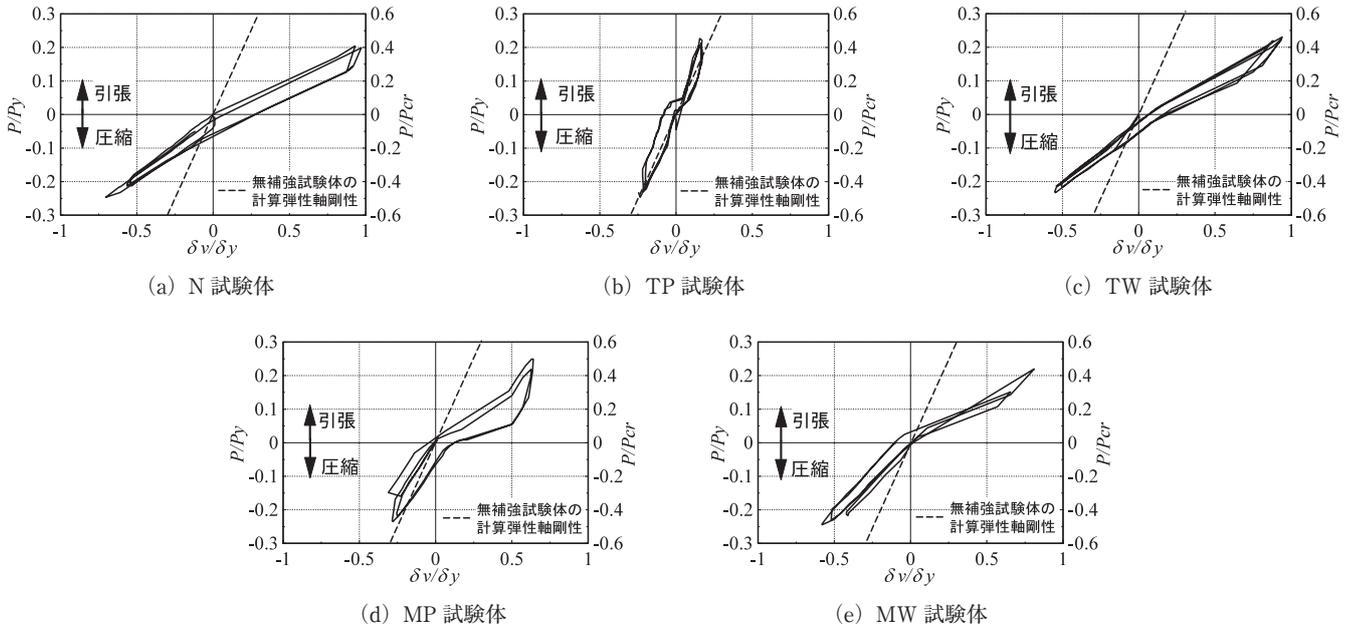


図8 荷重—軸縮み関係 (弾性荷重試験)

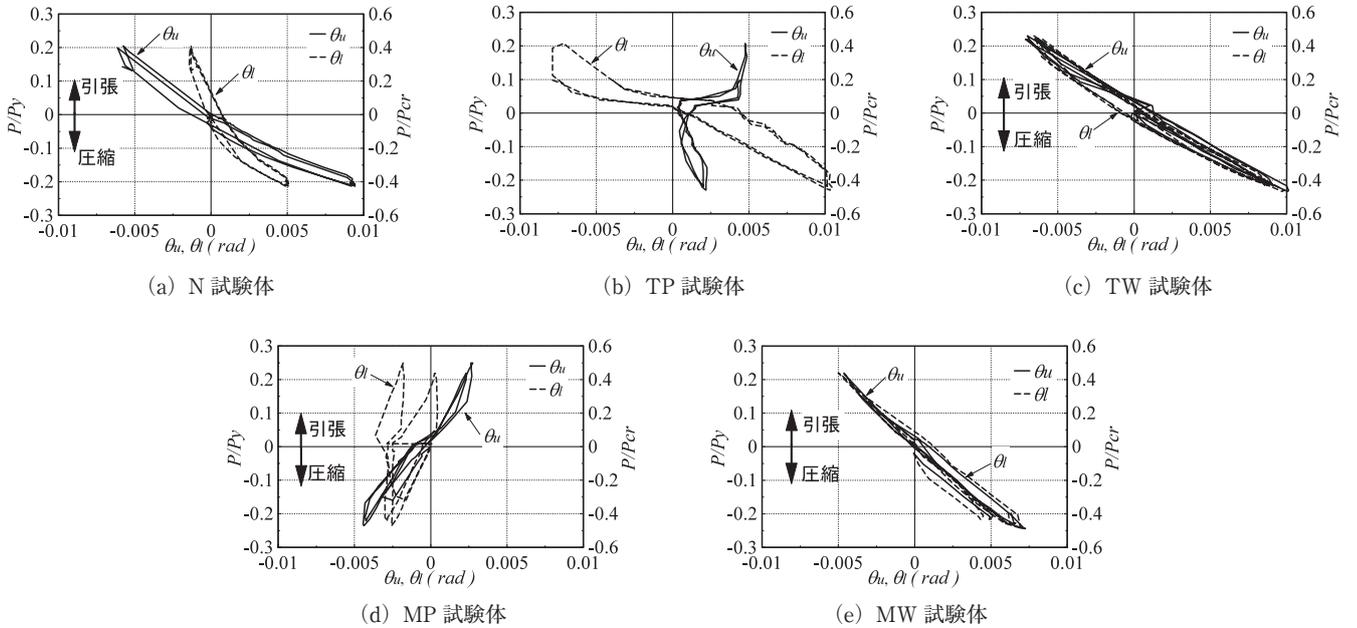


図9 荷重—材端回転角関係 (弾性荷重試験)

位置に山形断面の先端部から15mmと40mmの位置を表裏4点、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(図6参照)。

変位の計測値から、試験体の軸縮み： $\delta_v$ と、上下材端回転角 ( $\theta_u, \theta_l$ ) を次式により算定した。計測諸量の模式図を図7に示す。

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

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

$$\theta_l = \frac{\delta_c - \delta_d}{\ell_d} \dots\dots\dots (1.c)$$

ここに、 $\ell_d$  は、 $\delta_a$  と  $\delta_b$ 、 $\delta_c$  と  $\delta_d$  との計測点間距離 (= 160mm) である。

また、設計の便のため、実験により得られた最大圧縮荷重値： $P_{max}$  より各試験体の換算細長比： $\lambda$  として次式を用いて、求めた。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E_s A_s}{P_{max}}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $E_s$ 、 $A_s$  は、山形鋼ブレースのヤング率及び断面積である。

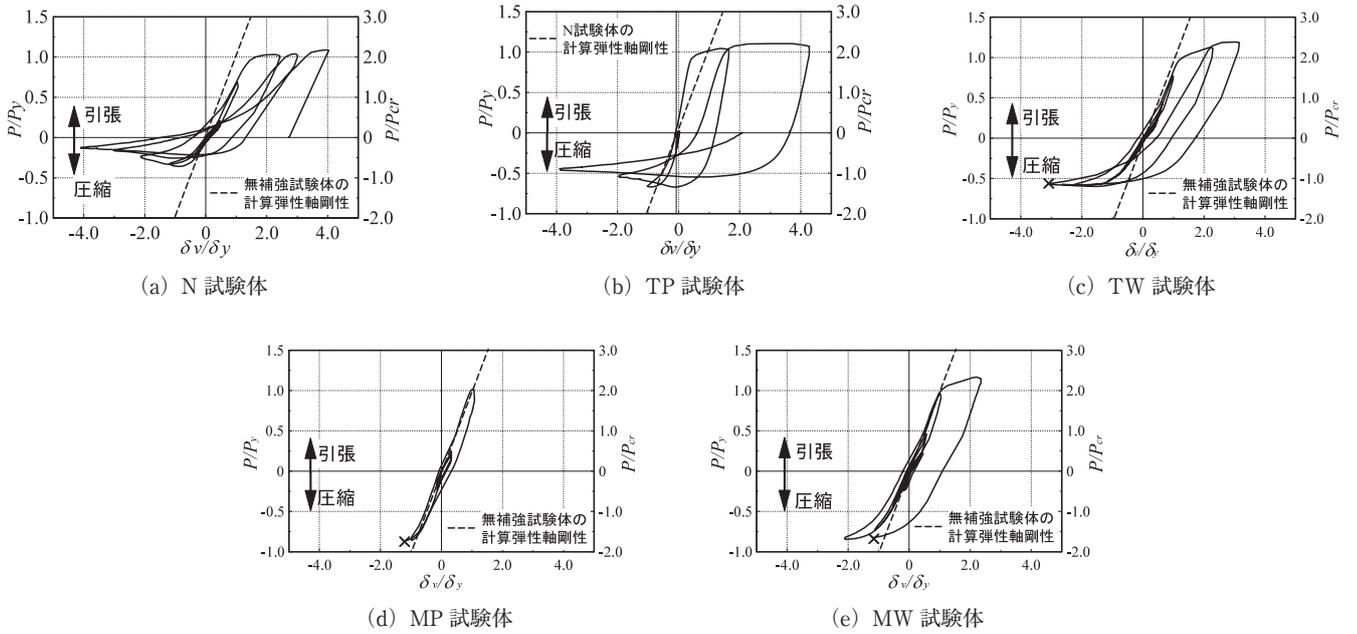


図 10 荷重—軸縮み関係 (弾塑性载荷試験)

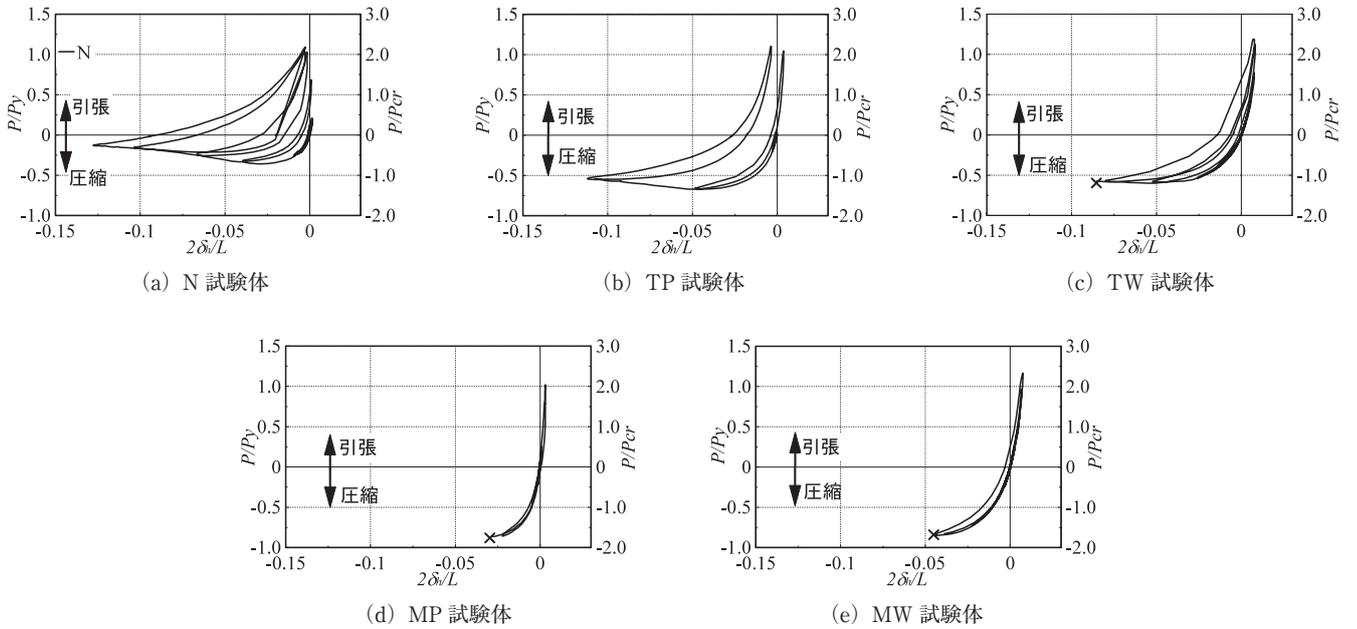


図 11 荷重—中央たわみ関係 (弾塑性载荷試験)

### 2.3 载荷プログラム

载荷プログラムは、無補強試験体の設計強耐力 (20kN) を荷重振幅とする正負交番定荷重繰返し载荷試験 (弾性载荷試験) と軸方向変位を 2 mm ずつ漸増させ、各振幅で 1 回繰返す正負交番漸増振幅繰返し载荷試験 (弾塑性载荷試験) を行った。

### 3. 補強山形鋼ブレース材の繰返し疲労試験

定荷重・定振幅を受ける場合の補強山形鋼ブレース材の疲労特性を確認するため、繰返し疲労試験を行う。今回の試験では、TP 試験体を用いた。試験体製作、計測方法等は、前節と同様である。

また、载荷プログラムは、引張側を無補強時の全塑性軸力の 90% の荷重値 (82kN) で、圧縮側は、座屈荷重 90% 時の軸方向変位 (1.6mm) で繰返しを行った。

### 4. 試験結果と考察

正負交番漸増繰返し試験の弾性载荷試験結果を図 8、図 9 に、弾塑性载荷試験結果を図 10 ~ 13、表 6 及び写真 1 ~ 2 に、疲労試験結果を図 14 に示す。

図 8 には、無補強試験体の全塑性軸力:  $P_y$  ( $= 91kN$ ) で、無次元化した荷重:  $(P/P_y)$  と無補強試験体の降伏軸縮み:  $\delta_y$  ( $= 1.5mm$ ) で無次元化した軸方向縮み:  $(\delta_v/\delta_y)$  との関係を示す。図 9 には、無補強試験体の全塑性軸力無次元化し

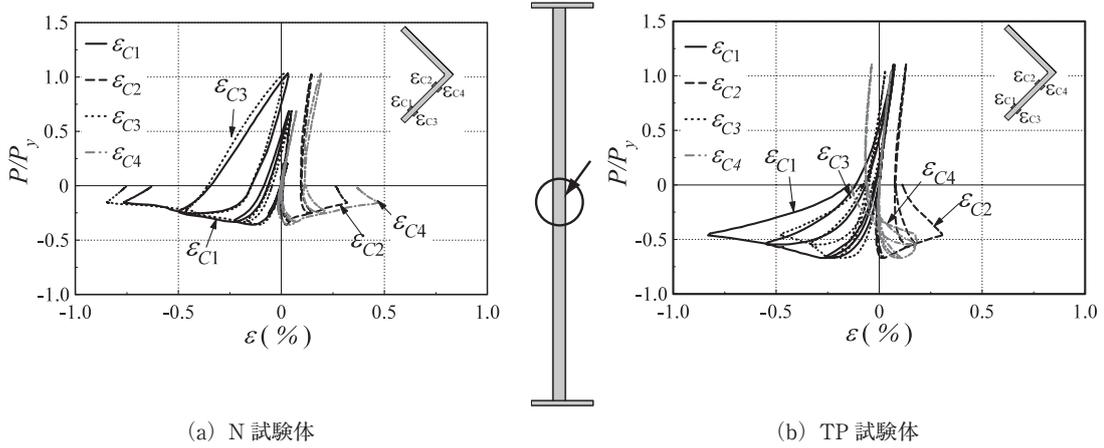


図 12 荷重—中央ひずみ関係 (弾塑性載荷試験)

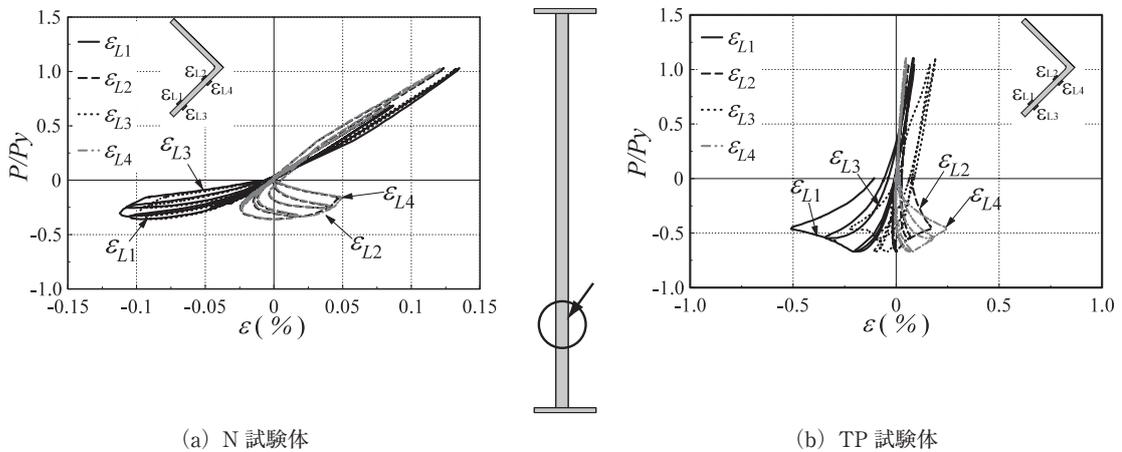


図 13 荷重—下部ひずみ関係 (弾塑性載荷試験)

表 6 弾塑性試験結果

試験体 名称	弾性軸剛性 kN/mm	最大圧縮荷重 kN	最大引張荷重 kN	残留軸縮み mm	換算 細長比	破壊時の 中央ひずみ $\mu$	破壊状況
TP	578.2(3.41)	59.9(1.83)	100.2(1.09)	-7.7	114	5000以上	—
TW	187.5(1.10)	54.5(1.70)	108.4(1.16)	-5.2	120	4516	外面で接着破壊
MP	263.1(1.55)	78.7(2.41)	92.5(0.99)	-2.4	99	1325	1層目で層内破壊
MW	211.5(1.25)	75.2(2.35)	106.0(1.13)	-4.2	102	2195	内、外面で層内破壊
N	169.1(1.0)	32.6(1.0)	93.1(1.0)	-8.5	155	—	—

()の中の値は、N試験体との比を示す。

た荷重： $(P/P_y)$ と上下材端回転角： $(\theta_u, \theta_l)$ との関係を示す。

図 10 には、 $(P/P_y)$ と $(\delta_v/\delta_y)$ との関係を、図 11 には、 $(P/P_y)$ と座屈長さの半分で無次元化した中央たわみ： $(2\delta_h/L)$ の関係を示す。

尚、図 8～11 の右縦軸には、無補強試験体の弾性座屈荷重： $P_{cr}$ で無次元化した荷重を、図 8 には、無補強試験体の計算弾性軸剛性から求めた直線を併せ示している。

図 12 及び図 13 には、(a) N 試験体、(b) TP 試験体について、無次元化した荷重： $(P/P_y)$ と、中央ひずみ： $(\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}, \epsilon_{c3}, \epsilon_{c4})$ との関係及び、 $(P/P_y)$ と下部ひずみ： $(\epsilon_{L1}, \epsilon_{L2}, \epsilon_{L3}, \epsilon_{L4})$ との関係を、それぞれ示す。写真 2 には、炭素繊維プレート及び接着剤層で破壊した、TW, MP, MW 試

験体の試験後の破壊状況を、写真 3 には、N 試験体、TP 試験体の試験後の残留変形状況を示す。

表 6 には、全試験体について、弾性軸剛性、最大圧縮荷重、最大引張荷重、最大軸縮み、最大圧縮荷重から換算した細長比、破壊時の中央ひずみの最大値、破壊状況を、それぞれ示す。また、図 14 には、 $(P/P_y)$ 、 $(P/P_{cr})$ と $(\delta_v/\delta_y)$ との関係を、1000 回の繰返し荷重を作用させた時の炭素繊維プレート補強した TP 試験体の荷重と軸方向変位を示す。

以下に各項目毎に分けて考察を示す。

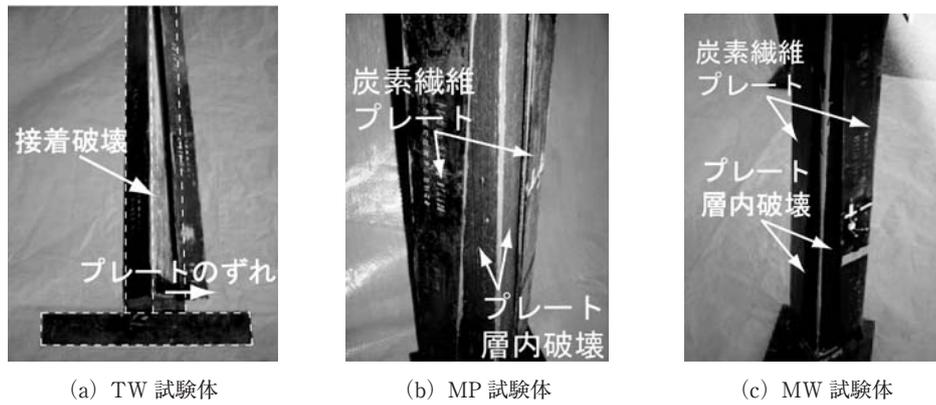


写真2 炭素繊維プレートの破壊状況

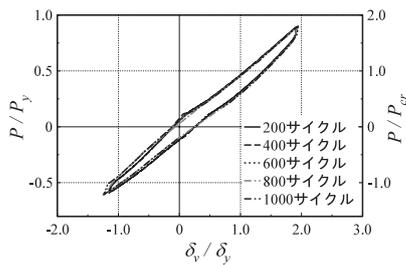


図14 荷重—軸方向変位関係 (1000 回繰返し)

○弾性軸剛性

図8, 9より初期不整や炭素繊維プレートを貼付たために生じる心ずれにより, 上下材端に初期段階から回転が生じる傾向にあり, いずれの試験体も軸剛性は, 無補強試験体と比べて大きく下回る傾向にある。しかし, TP試験体の軸剛性は無補強試験体と比べて大きくなり, また, 図9 (b)の弾性載荷時の材端回転角が他の試験体とは異なる挙動を示し, 初期不整の影響が, 初期段階より顕著に表れていることがわかる。

○最大圧縮耐力

表6より, 高強度型炭素繊維プレート及び中弾性型炭素繊維プレートを2枚接着する補強により, 最大圧縮耐力を無補強試験体と比べて70%及び135%増大し, 細長比に換算して155を, 120及び102に改善することができる。中弾性型炭素繊維プレートの補強効果が高強度型炭素繊維プレートのそれに比べて高いのは, 炭素繊維プレートの繊維方向のヤング係数が鋼材と比べて1.4倍と高いためである。

○最大引張耐力

図10, 表6より, 補強試験体の最大引張耐力の増加は, 無補強試験体の全塑性軸力の10%と小さい。これは, ブレース全体の最大引張耐力が, 炭素繊維プレートを貼り付けていない材端部の断面で決まるためである。



写真3 試験後の残留変形状態

○破壊性状

図11, 写真2より, 補強試験体を含むすべての試験体では, 圧縮荷重下において弱軸方向に座屈して, 大きな中央たわみが発生する。TW, MP, MW試験体では, この圧縮荷重時に破壊が生じた。TW試験体は, 外面の炭素繊維プレートと接着剤の界面で, MP及びMW試験体では, 早期に炭素繊維プレート層内で破壊した。文献6)の試験結果と同様に, 中弾性型炭素繊維プレートは, プレート層内の破壊が先行するという素材特性がある。MW試験体の外面は, 山形鋼の一辺が50mmであり, 山形頂部にRがとってあるので, 幅50mmの炭素繊維プレートを貼ると端部に未接着の領域が2~3mm生じる。この面のみ接着界面に破壊が生じることから, 接着方法として, プレート全面を鋼材に接着すべきであると考ええる。

○残留変形と接着特性

図12, 13及び写真3より, 無補強試験体と炭素繊維プレートに破壊を生じなかったTP試験体との中央たわみ特性及び中央部下部ひずみ特性を比べると, 圧縮荷重下には, 中央たわみは, 同程度生じるものの除荷した時点の中央たわみは, 無補強試験体のものは, 最大中央たわみの80%残留するのに対し, TP試験体は, 最大中央たわみの10%

程度しか残留しない。N 試験体は、中央部に正負の曲げひずみが繰返し大きく生じ、累積塑性ひずみ量は大きく、また下部のひずみ値は非常に小さく、中央部にひずみが集中している。一方、TP 試験体は、中央部、下部ともに一方方向の曲げひずみが生じ、ブレース材全体が座屈波形に応じた変形をしており、中央部の累積塑性ひずみ値は比較的小さい。また上下端部の炭素繊維プレートに接着していない部分が引張時に塑性化して、ひずみが集中すること等がわかる。大きな圧縮引張の軸変形させても、TP 試験体の炭素繊維プレートは、剥離しなかった。中央部のひずみは、圧縮時で  $-700 \mu$ 、引張時で  $800 \mu$  程度となっている。引張時には、炭素繊維プレートを接着していない部分で塑性化が生じるため、大きな引張軸変形が生じて、接着面下の鋼材のひずみは、弾性範囲に留まったため剥離が生じなかったと考えられる。

#### ○疲労試験結果

図 14 より、弾性範囲限界に近い荷重が 1000 回作用しても同じ履歴を通り、試験体に剛性の低下等がなく、試験体の性状、炭素繊維プレートの接着性能に問題がないことがわかる。

## 5. ま と め

炭素繊維プレートによるブレース材の繰返し載荷時の補強効果を検討するため、L-50x50x4 断面の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、正負交番繰返し載荷試験と疲労試験を行った。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 中弾性型炭素繊維プレートは、早期にプレート層内で破壊する。
- 2) 炭素繊維プレートを接着していない断面で、最大引張軸力は決定される。
- 3) 高強度型炭素繊維プレートを山形鋼外面に 2 枚接着する補強により、圧縮耐力を 80% 増加させることができる。
- 4) 炭素繊維プレートの全面を鋼材に接着しなければ早期に剥離が生じる。
- 5) 引張力には、炭素繊維プレートを接着していない部分が塑性化するので大きな引張軸変形が生じて、接着面下の鋼材のひずみは、弾性範囲内に留まり、炭素繊維

プレートに全面に接着しておけば、剥離は生じない。

- 6) 弾性限界に近い荷重を 1000 回程度繰返し作用させても試験体性状に変化はなく、この程度の繰返しには、問題がない。

## 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施されました。実験実施にあたり、2005 年度、2006 年度広島工業大学工学部建築工学科玉井研究室の学生諸君には、多大の協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Tamai, H., Takamatsu, T., Sumida, A., Haitani, T., Hattori, 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.
- 5) 玉井宏章, 高松隆夫, 原 伸幸, 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ばりの曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.523-530, 2005. 11.
- 6) 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.