ノンコンプレションブレースで補強した鋼構造骨組の復元力特性

高 松 隆 夫*・玉 井 宏 章*加 藤 孝 昌**・小 畑 寛 行***

(平成18年10月30日受理)

Restoring Force Characteristics of Steel Framed Structure Strengthened by Non-compression Brace

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI Takamasa KATO and Hiroyuki KOBATA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

In this paper, horizontal loading tests of rigid frames with braces attached by high-strength bolts were carried out in order to examine the applicability of the non-compression braces to rehabilitation of existing structures. The K-shaped braces as well as the X-shaped ones were employed to clarify the deformation behavior of strengthened frames and the cyclic characteristics of the frames showed spindle-shaped. The following conclusions were drawn from the experimental results. 1) No buckling phenomenon happens. 2) No slip phenomenon due to plastic deformation of the brace happens. 3) The restoring force characteristics show spindleshaped curves.

Key Words: non-compression braces, repeated load experiment, restoring force characteristics, steel frame

1. はじめに

現在, ブレースは鋼構造の耐震補強要素として頻繁に採 用されている。しかしながら, 在来型ブレースは圧縮力を 受けると座屈を起こし, 引張力を受けるとスリップ現象を 生じるという2つの欠点を有している。これらの欠点を克 服するために様々な工夫を施したブレースが提案されてい る^{1)~3)}。

これまでに,著者等は,ブレース端部接合部に楔デバイ スを設置するのみで,圧縮力を作用させないことにより座 屈を起こさず,引張力により塑性伸びを生じてもスリップ 現象を起こさない性状を持つノンコンプレションブレース を提案している^{4),5)}。

このブレースは次のような利点を有している。1) 圧縮 力を受けないため,曲げ座屈や局部座屈を起こさない。2) 引張力による塑性伸びを生じてもスリップ現象を起こさな い。3)対にして使用すれば紡錘型復元力特性を示す。4) 在来型ブレース端部接合部に楔デバイスを設置するのみ で、ノンコンプレションブレースに変換できる。

本論文においては,既存鋼構造建築物の耐震補強にノン コンプレションブレースを適用することを試みる。そのた めに,鋼構造ラーメンに容易にブレースが取り付けられる ように,ブレース端部接合部とラーメンとの接合には高力 ボルト接合を採用している。ブレース設置形式としては X

^{*} 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建設工学専攻

^{***} 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

型と K 型の2種類を選び、ノンコンプレションブレース 付き門形ラーメンの繰返し水平載荷実験を行い、ノンコン プレションブレースによる耐震補強方法の有効性について 検討する。

2. ノンコンプレションブレースの概要

以下に、ノンコンプレションブレースの概要を示す。

2.1 構成について

ノンコンプレションブレースを有する1層1スパンのフ レームを Fig.1 (a), (b) に, ブレース端部の詳細を Fig.2 (a), (b) に, それぞれ, 示す。

転造ねじボルトの一端は、楔及びテーパーのついた座 金を介してダブルナットにより端部接合部に接合されてい る。端部接合部において、楔やナットを受けるプレートに は面外変形拘束のためにスチフナが溶接されており、柱や 梁に高力ボルト接合されている。

楔とテーパー付座金には、大きな摩擦係数が確保される ように発錆処理が施されている。また、楔の垂直面には楔 が間隙に滑らかに貫入するようにバネが設置されている。

2.2 機構

ブレース付き門形ラーメンに地震水平力が作用すると、 ブレースは引張り方向には効率よく引張抵抗し、ブレース 全体が塑性変形して地震エネルギーを吸収する。一方、ブ レースは圧縮する方向にはブレース端部が離間し、ブレー スには圧縮力が作用しないため座屈は生じない。この端 部に間隙が生じると楔に取り付けられたバネの復元力によ り、楔がテーパー付座金と楔受けプレートとの間の間隙に 貫入して、ブレースは緩みを生じない。よって、ブレース の復元力特性は、スリップ現象を生じることなく完全弾塑

性型となる。また, 座屈を生じないことから, 細長比の大 きなブレースを利用でき、比較的大スパンの架構に対して も,過大な断面寸法を有するブレースを用いる必要がない。

3. 試験概要

ノンコンプレションブレースを X 型及び K 型に設置 した場合の補強効果と復元力特性の差異を検討するため に、1層1スパンの鉄骨架構にノンコンプレションブレー スを設置した試験体を作製し、繰返し漸増振幅水平載荷実 験を行う。

3.1 試験体

試験体の概要及びノンコンプレションブレース端部の詳 細を Fig. 1 (a), (b) 及び Fig. 2 (a), (b) に, それぞれ, 示す。

試験体は, 柱と梁を剛接とした1層1スパンの門形ラー メンの対角方向に、丸棒鋼、楔と楔受けからなる2本のノ ンコンプレションブレースを高力ボルト接合により設置し た試験体 (X-Type) と、梁の中央部と下部の柱梁接合部 中心部を結ぶ軸心に、ノンコンプレションブレースを高力 ボルト接合により設置し補強した試験体(K-Tvpe)の2 種類および無補強試験体を用意した。X-Type は、架構構 面方向の図心から偏心距離 50mm の位置にブレースを設 置する。K-Type は、柱や梁の図心から偏心が生じないよ うに、柱及び梁のウェブ位置に設置する。楔・楔受けの傾 斜角度: θは 45°とした。

Fig.3 にブレース材の詳細を示す。

楔受けプレートとブレース軸心とを直交させた端部接合 部を柱及び梁フランジにボルト接合により設置する。

ブレース材には、ネジ部の引張耐力を軸部の降伏耐力以 上に設定されている、転造ネジ付き丸棒鋼(M16,軸部直







Fig.2 ノンコンプレションブレース端部接合部詳細

径 14.5, ABR400) を用いた。

また,柱には,H-100x100x6x8のSS400材を使用し,梁 には,H-148x100x8x9のSS400材を使用した。転造ネジ 付きブレースの素材特性をTable 1に示す。

3.2 載荷方法

載荷装置の概要を Fig.4 に示す。試験体は、反力梁の上 部に高力ボルト接合されている。反力柱に設置されたオイ ルジャッキから上部の柱梁接合部位置に水平力を作用させ る。架構の構面外変形を防止するために、加力点近傍を鋼 板で設け挟み込み、拘束することで構面外変形を防いでい る。反力梁と試験体との接合には、十分な数の高力ボルト を使用しているため、すべりは生じない。

載荷方法は、繰返し漸増振幅水平載荷とする。載荷プロ

	Ε	σ_y	σ_{u}	σ_y/σ	\mathcal{E}_u
	(kN/mm2)	(N/mm2	(N/mm2	u (%)	(%)
Brace	205	310	466	66	34
		1,850			
70		1,710			70
M16		ф 14.5			M16
				Un	ıt (mm)
				X- 7	Гуре
		1.370			
70		1,230		70	
M16	i	• 14.5		M16	
				Uni	t (mm)
				K-7	Гуре
					•

Table 1 転造ネジ付きブレースの素材特性

Fig.3 ブレース形状

グラムは,層間変形による変位制御とし,層間変形を階高 で除した層間変形角:θの振幅を1/1000,1/500,1/250, 1/150,1/100 [rad]の順に漸増し各振幅レベルで2サイク ル行う。楔が貫入限界に達するまで載荷を行い,貫入限界 に達した後,1サイクル行った時点で終了する。

尚, ブレースには, 降伏耐力の 50%を初期軸力として 与えた。

3.3 計測方法

荷重計測として,オイルジャッキの先端に取り付けた ロードセルから水平荷重:Qと,ブレース下部に取り付け たロードセルから左右のブレース軸力:TL,TRを計測 した。変位の計測として,梁中央点の水平方向変位:dの 計測は,下部の梁の中央位置を計測基準点とし計測冶具を 用いて計測した。

層間変形角:θは計測した水平変位:δから次式により 求めることができる。



Fig.4 載荷装置概要

 $\theta = \delta / H \cdots (1)$

ここに, Hは試験体高さである。

楔貫入量: Δ_L , Δ_R は, 左右の楔貫入量であり, K-Type では楔の前方変位であり, X-Type においては楔の後方か ら計測したものである。Fig.2にノンコンプレションブレー スの端部の詳細と併せて楔貫入量の計測方法を示す。

X-Type, K-Typeともに、ブレースの中央部に2枚の ひずみゲージを貼り、その2枚のゲージの平均をブレース 軸ひずみ: ε_{L} 、 ε_{R} とする。

4. 解析

解析モデルを Fig. 5 (a) ~ (d) に示す。フレームの解 析モデルを (a) に, X-Type を (b), (c) に, K-Type を (d), (e) に, それぞれ,示す。以下の解析方法は X-Type を例に取 り説明する。ただし,K-Type も同様に求められる。Fig.5 (b) からブレース1本当たりの軸力: T_b と軸方向変位: Δ の関係式が次のように求められる。

$$T_b = E \cdot A_b \cdot \frac{\Delta}{l_b} \quad \cdots \quad (2.a)$$

 $\Delta = \delta \cdot \cos \alpha \cdots (2.b)$

ここに, E はヤング係数, A_b はブレース断面積, l_b はブ レースの有効長さ, α はブレース設置角度である。 ノンコンプレションブレースの場合には、常に、2本の ブレースが水平荷重に対して抵抗していると考えることより、次式が得られる。

$$Q_{b} = 2 \cdot T_{b} \cdot \cos \alpha \cdots \quad (3)$$

$$(2.a) \quad \vec{x} \geq \quad (3) \quad \vec{x} \geq 0$$

$$Q_{b} = \frac{2 \cdot E \cdot A_{b} \cdot \cos^{2}\alpha}{l_{b}} \cdot \delta \cdots \quad (4.a)$$

$$K_{b} = \frac{2 \cdot E \cdot A_{b} \cdot \cos^{2}\alpha}{l_{b}} \cdots \quad (4.b)$$

ここに, K_b はブレースによるせん断剛性である。

尚, ブレースの初期軸力として,降伏耐力の50%を導入しているため,初期剛性は*K*_bを採用する。

次に, Fig. 5 (a) から, フレームが負担するせん断力: Q_r と水平変位: δ の式が得られる。

$$Q_r = \frac{24 \cdot E}{I_c^2 \left(\frac{I_B}{I_B} + \frac{I_C}{I_C}\right)} \cdot \delta \cdots$$
(5.a)

ここに、 I_B は梁の長さ、 I_B は梁の断面二次モーメント、 I_C は柱の長さ、 I_C は柱の断面二次モーメント、 K_r はフレームのせん断剛性である。



Fig.5 解析モデル

Table 2 試験体の基本特	野性
-----------------	----

Tast spaaiman	Q_{by}/Q	K_{b}/K	θ_r
Test specimen	(%)	(%)	(rad)
Х-Туре	41	86	1/670
К-Туре	34	84	1/565

 $Q_{b}/Q:$ ブレースと補強架構の耐力比 $K_b/K:$ ブレースと補強架構の剛性比

θ:ブレース降伏時の架構の変形角

Fig. 5(c) に示す, ノンコンプレションブレースで補強 された架構全体のせん断剛性:Kとせん断力:Qは次式に なる。

$$K = K_r + K_b \cdots$$
 (6.a)

$$Q = Q_r + Q_b \cdots (6.b)$$

ブレースの降伏せん断力: Q_{by} は、ブレース降伏軸力: T_{by} の水平成分であることから次式が得られる。

$$Q_{by} = T_{by} \cdot \cos \alpha \cdots \quad (7.a)$$
$$\delta_{by} = \frac{Q_{by}}{K_b} \cdots \quad (7.b)$$

ここに,
$$\delta_{\scriptscriptstyle by}$$
はブレースが降伏する時の水平変位である。

よって、ブレースが降伏する時の架構全体のせん断力: *Q*, は次式となる。

$$Q_y = Q_r + Q_{by} \cdots \quad (8.a)$$

$$Q_r = K_r \cdot \delta_{hv} \cdots$$
 (8.b)

K-Type の場合には,梁は十分大きな曲げ剛性および曲 げ耐力を有していると仮定する必要がある。

門形ラーメン架構のみの降伏耐力: Q_{ry} は、70.1 (kN) となり、降伏水平変位: δ_{ry} は20 (mm) となった。Table 2 には、ブレースと補強架構の耐力比: Q_{by}/Q 及び剛性比: K_b/K 、ブレース降伏時の架構の変形角: θ_r を示す。また、 Fig. 6 にノンコンプレションブレースで補強した架構の復 元力特性モデルを示す。併せて、ブレースと架構の復元力 特性モデルも示す。

5. 実験結果と考察

繰返し漸増振幅水平載荷実験結果を Fig. 7~9 及び Table 3 に, それぞれ, 示す。

Fig. 7(a), (b) には, 各試験体における, 水平荷重: *Q* と層間変形角: θの関係を示す。また, 予め, ブレース補



Fig.6 復元力特性モデル

強していない無補強試験体の載荷実験を行ったので, そ の結果と解析結果を併せて示す。(c).(d)には、ブレー ス下部に設置したロードセルから計測した左右それぞれの ブレース軸力:T_{bL}, T_{bR}より求めたブレースが負担するせ ん断力に,無補強試験体が負担するせん断力を加えた値: Q_{bL} , Q_{bR} と層間変形角: θ の関係を示す。Table 3 は, 各 試験体について, 層間変形角:θが1/1000rad までの弾性 範囲において水平荷重: Qと層間変形角: θから求めら れる初期剛性: Kと、解析から求められるせん断剛性: $_{A}K を示す。併せて _{E}K/_{A}K も示す。また、ブレースが降伏$ したときの水平荷重: $_{E}Q_{v}$ と、解析から求められる降伏 水平荷重:₄Q_vも示す。比較のため、ブレース及び無補強 試験体の復元力特性から求められる初期剛性: _EK'と _EK' $/_{_{x}}K$ およびブレースが降伏したときの水平荷重: $_{_{F}}Q_{_{y}}$ 'も併 せて示す。Fig. 8 には、ブレース軸力: T_b とブレースひず す。X-Type では ε_R を, K-Type では ε_L のブレースひずみ を採用した。Fig. 9には、ブレース軸力: T_b と楔貫入量: Δ_R, Δ_L の関係を示す。X-Type では Δ_R を, K-Type では Δ_L の楔貫入量を採用した。また, Fig. 9 に 1/100rad 以降の 楔貫入経路をA~Hの記号で示し、ブレースが弾性であ る層間変形角:θが1/150rad までとブレースが降伏する 1/100radの位置を図中に併せて示す。尚, Fig. 8 にも, ブ レース軸力: T_b とブレースひずみ: ϵ_R , ϵ_L における楔貫入 経路を併せて示す。楔は、ブレースに軸力がかかっている 時(A点)には貫入せず、ブレースの軸力が0(B点)に なると貫入する。Table 4 には、ブレース軸力: T_b と楔貫 入量: Δ_{R} , Δ_{L} の関係及びブレース軸力: T_{b} とブレース軸力 より求めたブレースの伸び量: *A*_bの関係を示す。X-Type では $\Delta_R \epsilon$, K-Typeでは $\Delta_L o$ 楔貫入量を採用した。

5.1 復元力特性

復元力特性について, Fig. 7より X-Type, K-Type と も Bi-linear 型復元力特性となる。これは、ブレースが座



Fig.7 水平荷重 – 層間変形角関係

屈しないために,安定した引張性能が得られ,更に,楔デ バイスを設置することで,スリップ現象が解消されている ことに基因する。また,ブレースが引張力に対して効率よ く塑性化するため,エネルギー吸収が十分に期待できる。 楔貫入限界に達した後の1サイクルは楔が機能しなくな り,ナットとwedge standの間に離間が生じ,従来のブレー スと同様,スリップ現象を示した。

補強架構全体の復元力特性と、ブレース及び無補強試験体の復元力特性を組み合わせたものは Table 3より X-Type, K-Type ともに初期剛性やブレース降伏時の水平荷重がほ ぽ一致しているため良好に対応していると言える。

Table 3 より, せん断剛性について, K-Type においては, 実験値と解析値はほぼ良好に対応しているものの,最大振 幅のサイクルでは解析値よりも若干低くなった。これは, ブレース端部に曲げ変形が生じたためである。X-Typeで は解析値の約 1/2 の剛性になった。解析ではブレース端部 接合部は完全な剛体と仮定しているが,楔の設置上,設置 形式を片持ち梁の形式にしたため,ブレース端部接合部の 剛性がブレースの引張力に対して小さくなり,弾性変形が 生じたためだと考えられる。降伏耐力については,実験値 と解析値はほぼ対応している。

5.2 軸力とひずみの関係

ブレース軸力とブレースひずみの関係では, Fig.8の実 験結果において圧縮側に値が出ていないため, ブレース には圧縮力が作用していないことがわかる。そのため, ノ ンコンプレションブレースは効率よく機能していると言え る。

また,素材試験から求めた曲線と実験結果とはひずみ硬 化開始は若干異なるが,良好に対応している。これは,実 験では先にねじ部が塑性したためだと考えられる。

5.3 楔貫入量

Fig. 8 及び Fig. 9 から, 楔はブレース軸力が0 になると 引張方向に対して押し戻されることなく滑らかに貫入す る。特に,ブレース降伏後その現象が顕著に見られ,等振 幅での楔貫入量はほぼ一定である。

また、ブレースが弾性状態である 1/150rad までは、ブ レースの弾性変形に伴う、圧縮側のブレースのナットと wedge stand の離間によって貫入量は決まる。1/100rad のサイクルは、Table 4にも示すように、ブレースがひず み硬化になっていることから各サイクルでのブレース伸び 量はほぼ一定であり、楔貫入量とブレース伸び量は一致し ている。X-Type の4サイクル目は貫入限界に達したため、

Test specimen	_E K (kN/rad)	_E K' (kN/rad)	_A K (kN/rad)	$_{E}K/_{A}K$	$_{E}K'/_{A}K$	$_EQ_y$ (kN)	$_{E}Q_{y}$ ' (kN)	$_{A}Q_{y}$ (kN)
X-Type	$20.0 \text{x} 10^3$	20.7×10^3	41.9×10^{3}	0.48	0.49	48.4	48.1	48.7
К-Туре	24.9×10^3	25.4×10^3	25.1×10^3	0.99	1.01	36.3	36.6	36.7

Table 3 載荷試験結果

EK:初期剛性

EK:ブレースと無補強試験体の剛性の和

_AK:解析からのせん断剛性

 $_{E}Q_{y}$:ブレース降伏時の水平荷重

EQy:ブレース降伏時におけるブレースと無補強試験体が負担する水平荷重の和

AQy:解析からの降伏水平荷重



(a) X-Type

(b) K-Type





Fig.9 楔貫入量

Table 4 ブレース軸力と楔貫入量及びブレース伸び量

Test specimen	X-Type			К-Туре				
δ/H	1/100 1/100							
Cycle	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
$T_b - \Delta (\text{mm})$	21.4	19.4	20.7	8.1	11.8	12.1	11.3	11.6
$T_b - \Delta_b (\text{mm})$	20.6	19.5	21.1	8.6	12.2	12.3	11.5	11.7

T_b-Δ:ブレース軸力-楔貫入量

T_b-Δ_b:ブレース軸力ーブレース伸び量

貫入量は他の3サイクルに比べ少なくなっている。また, 架構の弾性変形で貫入する量はブレース伸び量より小さい ことから,ブレース降伏後の楔貫入量はブレースの伸び量 によって決まる。

6. 結 論

本研究では、設置形式の異なる2種類のノンコンプレ ションブレースを設置した1層1スパンの鉄骨架構に繰返 し載荷試験を行い、X-TypeとK-Typeの復元力特性につ いて検討した。

得られた知見は以下のように要約できる。

- ノンコンプレションブレースには、圧縮力は作用せず 座屈は生じない。
- ノンコンプレションブレースで補強することにより、 X-Type, K-Typeともにモデル化の容易な Bi-linear 型復元力特性となる。
- 3) 楔は、引張方向に対して押し戻されることなく滑らか に貫入する。また、ブレース降伏後の等振幅載荷での ブレース伸び量は一定であり、楔貫入量とブレース伸 び量はほぼ一致している。

以上のことから、ボルト接合で設置するノンコンプレ ションブレースは Bi-linear 型復元力特性となり、エネル ギー吸収できることから既存建築物の耐震補強に有効であ る。しかし、ボルト接合で設置した場合には、本論文で採 用した X-Type ようにブレース端部接合部が弾性変形を生 じ、剛性をうまく評価できない場合があるため、今後、ブ レースの剛性より高い剛性を有するような端部接合部の設 計法を考える必要がある。また、スパンの長い構造物にお いては、K型に設置することでブレースを短くし、楔の寸 法も小さくできとともに開口部等をとることが可能になる が、K型ではブレースの引張力による梁の変形が問題とな るため、梁は十分大きな曲げ剛性および曲げ耐力を有する 設計を考慮する必要がある。また、ノンコンプレションブ レースは座屈を起こさないため、ブレースデザインの自由 度が増大して、ブレースを見える位置に設置できる。楔貫 入量を目で観察できるので、楔の貫入量よりブレースの伸 び量を求めることができ、ブレースのメンテナンスが容易 にできるようになる。

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 の一環として実施しました。また、実験実施にあたり、平 成15年度科学研究補助金(研究代表者 玉井宏章,課題 番号15510152)で賄われた。また、試験体作製にあたり フルサト工業株式会社には、転造ねじアンカーボルトを提 供していただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1)長尾直治,高橋茂治:角鋼管を鉄筋コンクリートで 被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状,その2. 解析的考察,日本建築学会構造系論文集,第422号, pp.45-56,2001.11.
- 2)中村庄滋,矢部喜堂,真瀬伸治,堀富博,石川二巳穂, 宮本秀樹:極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレース に関する研究,その3.アンボンドブレースダンパー を有する建物の試設計,日本建築学会大会学術講演梗 概集, c-1,構造Ⅲ, pp.411-412, 1995.8.
- 3) 玉井宏章,近藤一夫,花井正実:X型制振ブレース 付架構の機構と弾塑性性状について、(その1)引張 接合型ブレース架構,日本建築学会構造系論文集,第 515号,pp.139-146,1999.1.
- 4) 高松隆夫,玉井宏章,小持明宏:ノンコンプレショ ンブレースの履歴性状とエネルギー吸収性能につい て,鋼構造年次論文報告集,第11巻,pp.129-136, 2003.11.
- 5) 玉井宏章,高松隆夫,松尾彰: ノンコンプレションブ レースの耐震性能向上について,日本建築学会構造系 論文集,第 595 号, pp.131-138, 2005.9.