

ノンコンプレッ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 spindle-shaped 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スリップ現象を起こさない性状を持つノンコンプレッションブレース

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、ノンコンプレッ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ッ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、ノンコンプレッ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、ノンコンプレッ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. ノンコンプレッションブレースの概要

以下に、ノンコンプレッションブレースの概要を示す。

2.1 構成について

ノンコンプレッ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隙間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。この端部に隙間が生じると楔に取り付けられたバネの復元力により、楔がテーパ付座金と楔受けプレートとの間の隙間に貫入して、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型

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

ノンコンプレッションブレースを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ッ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ッ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本のノンコンプレッ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、ノンコンプレッ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-Type)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角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

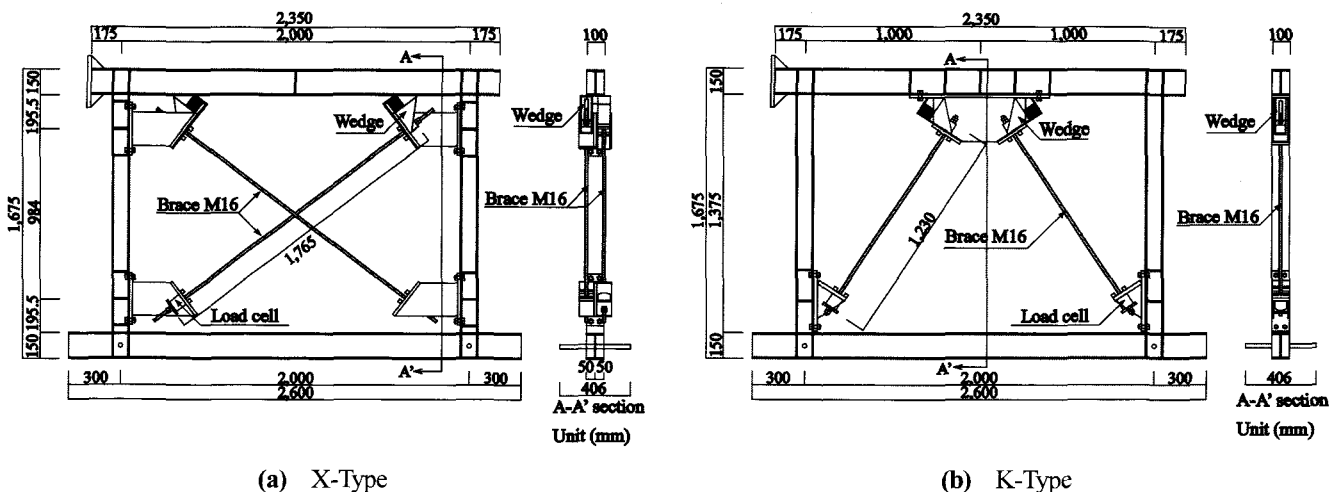


Fig.1 試験体概要

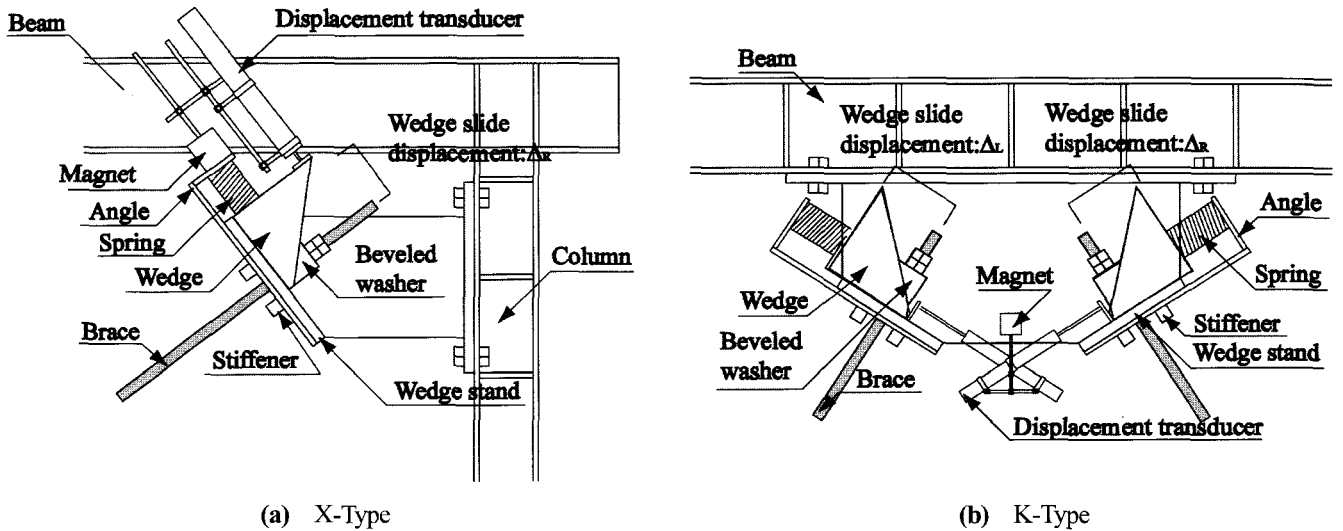


Fig.2 ノンコンプレッションブレース端部接合部詳細

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 荷重方法

荷重装置の概要を 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。

荷重方法は、繰返し漸増振幅水平荷重とする。荷重プロ

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荷重を行い、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器具を用いて計測した。

層間変形角： θ は計測した水平変位： d から次式により求めることができる。

Table 1 転造ネジ付きブレースの素材特性

	E (kN/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ϵ_u (%)
Brace	205	310	466	66	34

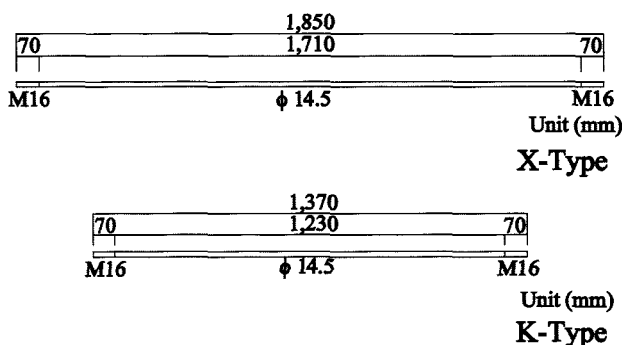


Fig.3 ブレース形状

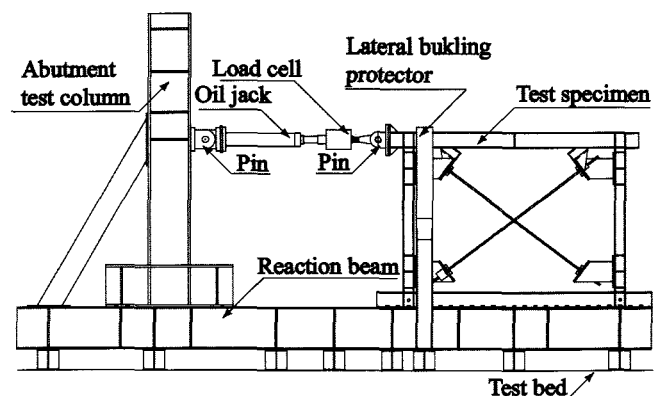


Fig.4 荷重装置概要

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

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 にノンコンプレッ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： $\varepsilon_L, \varepsilon_R$ 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。

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

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

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。

ノンコンプレッ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。

$$Q_b = 2 \cdot T_b \cdot \cos \alpha \cdots (3)$$

(2.a) 式と (3) 式より

$$Q_b = \frac{2 \cdot E \cdot A_b \cdot \cos^2 \alpha}{l_b} \cdot \delta \cdots (4.a)$$

$$K_b = \frac{2 \cdot E \cdot A_b \cdot \cos^2 \alpha}{l_b} \cdots (4.b)$$

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。

$$Q_r = \frac{2A \cdot E}{l_c^2 \left(\frac{l_B}{I_B} + \frac{l_C}{I_C} \right)} \cdot \delta \cdots (5.a)$$

ここに、 l_B は梁の長さ、 I_B は梁の断面二次モーメント、 l_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。

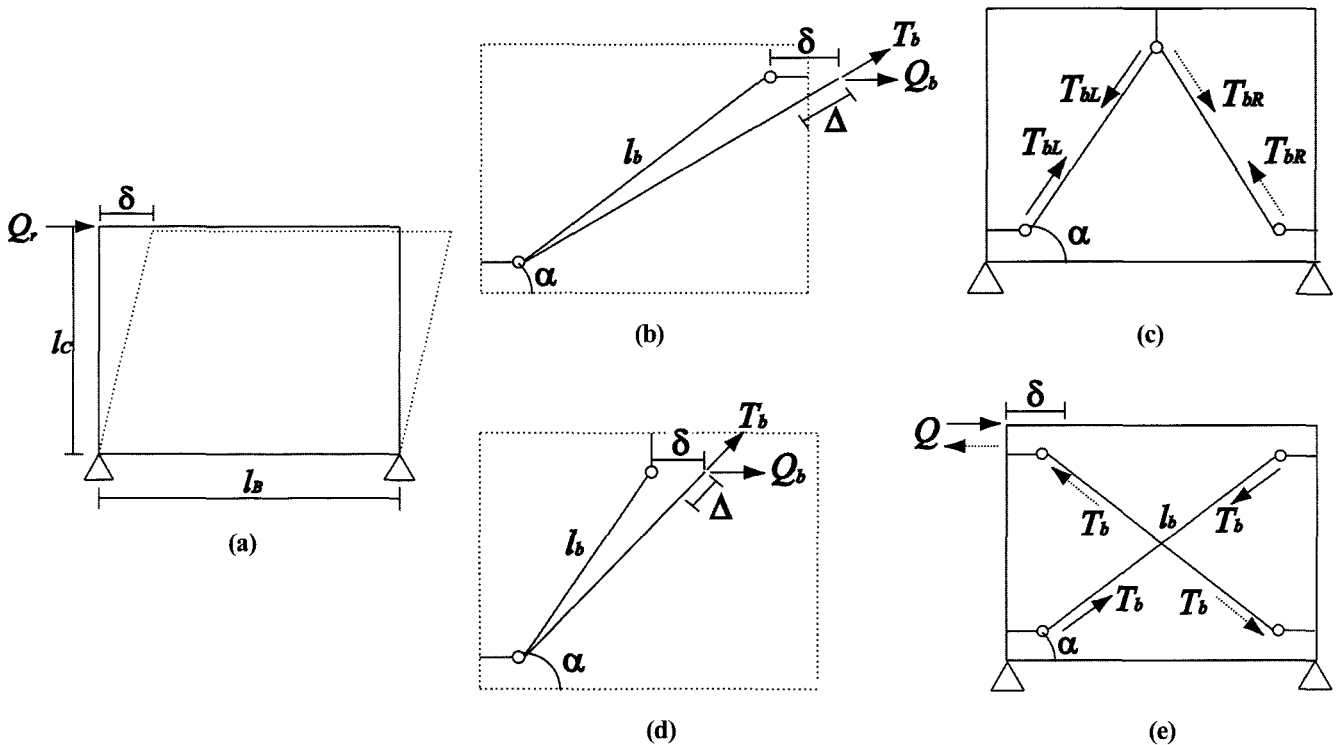


Fig.5 解析モデル

Table 2 試験体の基本特性

Test specimen	Q_{by}/Q (%)	K_b/K (%)	θ_r (rad)
X-Type	41	86	1/670
K-Type	34	84	1/565

Q_{by}/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_r :ブレース降伏時の架構の変形角

Fig. 5 (c) に示す, ノンコンプレッ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。

$$Q_{by} = T_{by} \cdot \cos \alpha \cdots (7.a)$$

$$\delta_{by} = \frac{Q_{by}}{K_b} \cdots (7.b)$$

ここに, δ_{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_y は次式となる。

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

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

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 にノンコンプレッ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

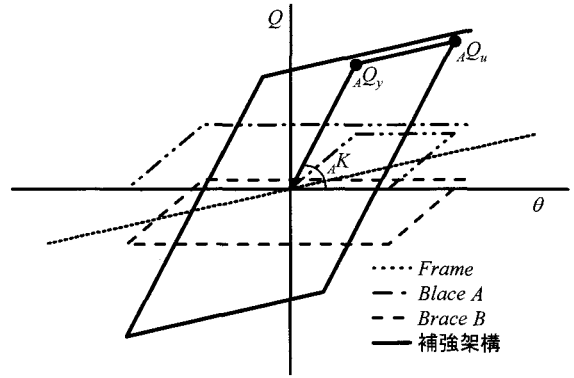


Fig.6 復元力特性モデル

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: ${}_E K$ 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: ${}_E Q_y$ と, 解析から求められる降伏水平荷重: ${}_A Q_y$ 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: ${}_E K'$ と ${}_E K' / {}_A K$ およびブレースが降伏したときの水平荷重: ${}_E Q_y'$ も併せて示す。Fig. 8 には, ブレース軸力: T_b とブレースひずみ: ϵ_R , ϵ_L の関係及び素材試験から求めた曲線も併せて示す。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: Δ_b 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。

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 Bi-linear 型復元力特性となる。これは, ブレースが座

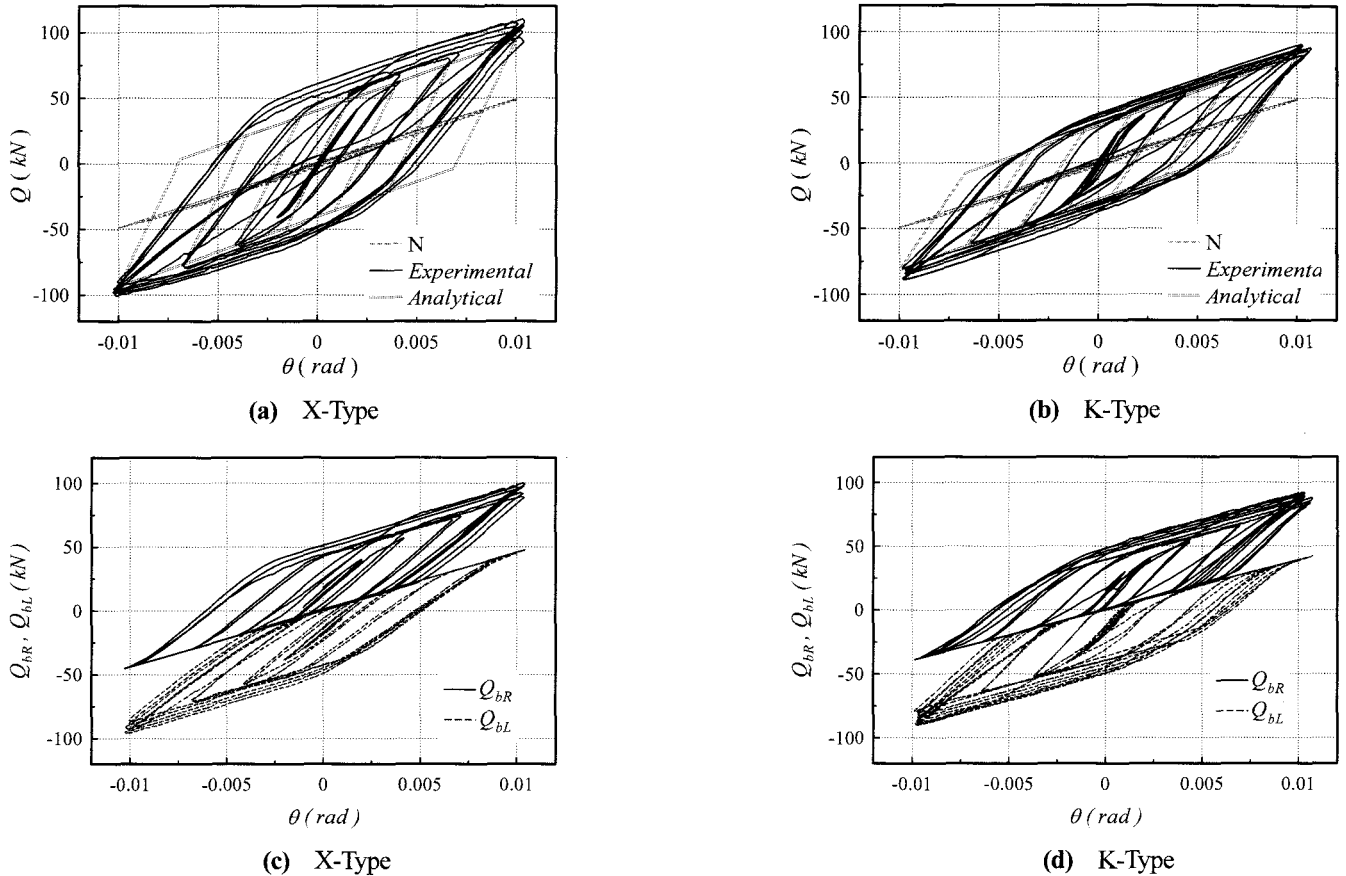


Fig.7 水平荷重-層間変形角関係

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ぼ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、ノンコンプレッ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

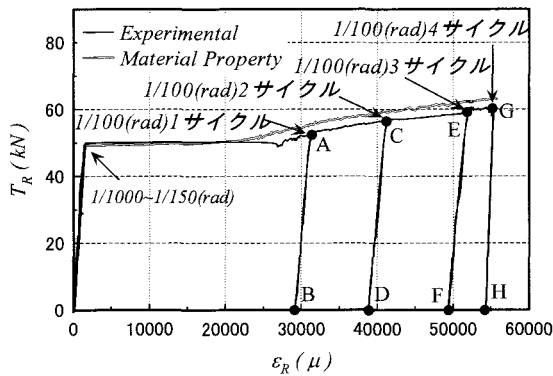
Fig. 8及びFig. 9から、楔はブレース軸力が0になると引張方向に対して押し戻されることなく滑らかに貫入する。特に、ブレース降伏後その現象が顕著に見られ、等振幅での楔貫入量はほぼ一定である。

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、

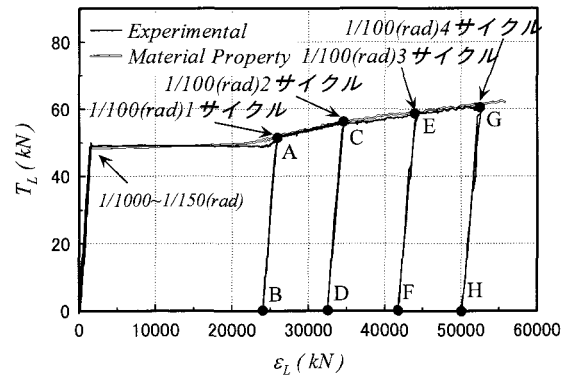
Table 3 載荷試験結果

Test specimen	$E K$ (kN/rad)	$E K'$ (kN/rad)	$A K$ (kN/rad)	$E K / A K$	$E K' / A K$	$E Q_y$ (kN)	$E Q_y'$ (kN)	$A Q_y$ (kN)
X-Type	20.0×10^3	20.7×10^3	41.9×10^3	0.48	0.49	48.4	48.1	48.7
K-Type	24.9×10^3	25.4×10^3	25.1×10^3	0.99	1.01	36.3	36.6	36.7

$E K$:初期剛性
 $A K$:解析からのせん断剛性
 $E Q_y$: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
 $A Q_y$:解析からの降伏水平荷重
 $E K'$:ブレースと無補強試験体の剛性の和
 $E Q_y'$:ブレース降伏時の水平荷重

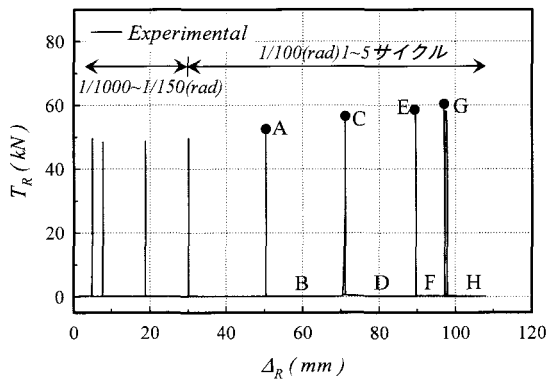


(a) X-Type

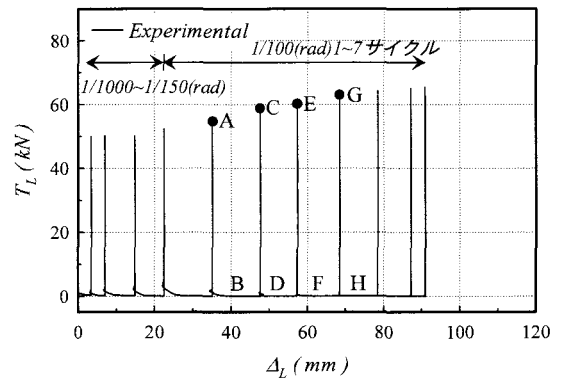


(b) K-Type

Fig.8 ブレース軸力-ブレースひずみ関係



(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				K-Type			
	1/100				1/100			
	Cycle	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd
$T_b - \Delta$ (mm)	21.4	19.4	20.7	8.1	11.8	12.1	11.3	11.6
$T_b - \Delta_b$ (mm)	20.6	19.5	21.1	8.6	12.2	12.3	11.5	11.7

$T_b - \Delta$:ブレース軸力-楔貫入量
 $T_b - \Delta_b$:ブレース軸力-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ッ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。

- 1) ノンコンプレッションブレースには、圧縮力は作用せず座屈は生じない。
- 2) ノンコンプレッ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ッションブレースは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の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る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、ノンコンプレッ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: ノンコンプレッ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: ノンコンプレッ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.