

ノンコンプレッションブレース付き鋼構造骨組の復元力特性

高松 隆夫* ・玉井 宏章* ・小畑 寛行**

(平成17年9月9日受理)

Restoring Force Characteristics of Steel Framed Structure with Non-Compression-Braces

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Hiroyuki KOBATA

(Received Sep. 9, 2005)

Abstract

Non-compression braces have following advantages: 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 curve. 4) When the wedge device is installed at the brace-end, the conventional braces can be transformed into the non-compression braces. 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. The initial rigidity and the strength of the frames with the braces increased and the cyclic characteristics of the frames showed spindle-shaped.

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

1. はじめに

ブレースは耐震要素として使用されてきた。しかしながら、ブレースには圧縮力を受けると座屈を起こすこと、そして引張力により塑性伸びを生じるとスリップ現象を起こすことの2つの弱点を有している。これらの弱点を克服するために種々の工夫を施されたブレースが提案されている^{1)~3)}。

著者等も、圧縮力を受けることなく、引張力による塑性伸びが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。

このブレースの利点は、次のようなものである。1) 圧縮力を受けないために、座屈を生じない。2) 引張力による塑性伸びが生じてスリップ現象を起こさない。3) 対

にして使用すると紡錘型復元力特性を示す。4) ブレース材端部に楔デバイスを設置するのみで、在来型ブレースをノンコンプレッションブレースに変換できる。今までに、ノンコンプレッションブレースの性状を明らかにするために、いくつかの実験を行い、上述の利点を有していることを明らかにしている^{4), 5)}。

本論文においては、ノンコンプレッションブレースを既存建築物の耐震補強に適用できることを確かめるために、高力ボルト接合により既存の柱や梁に簡単に取り付けられるように設計したブレース材端部を使用したブレース付きラーメンの水平力載荷実験を行う。更に、在来型ブレースとノンコンプレッションブレースとの比較検討も併せて行い、ノンコンプレッションブレースによる耐震補強工法の優位性について明らかにする。また、ブレース補強にはX

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学大学院土木工学科専攻

型ブレースの他にK型ブレースも頻繁に使用されるので、K型ブレースについても実験を行うことにより変形状を明らかにする。

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図1。(a),(b)に、ブレース端部の詳細を図2に、それぞれ、示す。

両端にネジの付いた丸鋼棒が、楔を介してテーパのついた座金とダブルナットでフレームに引張ボルト接合されている。

楔やナットを受けるプレートには、スチフナが溶接されており柱や梁に摩擦ボルト接合されている。このプレートは、丸鋼棒からの引張力に対して十分な強度と面外曲げ剛性を有している。

楔とテーパ付座金は、大きな摩擦係数が確保されるようにショットブラスト処理ないしは発錆処理が施されている。また、楔の後方には、楔が貫入する方向に力が作用す

るようにバネが設置されている。

2.2 機構について

この方杖に、地震水平力が作用すると、方杖に対して引張方向の水平力に対して方杖材は効率よく抵抗し、方杖材全体は塑性変形して地震入力エネルギーを吸収する。一方、方杖に対して圧縮方向の水平力に対しては、方杖端部が離間し、方杖材には圧縮力は作用せず、従って座屈は生じない。この端部に離間が生じて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台との間に貫入して、方杖に緩みは生じない。

よって、文献4)に示されているとおり、ブレースの復元力特性には、スリップ現象は生じない。また、座屈現象は生じないことから、細長比の大きなブレースを利用でき、比較的長いスパンの架構に対してもブレース材の断面を過大することなく適用できる。

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、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

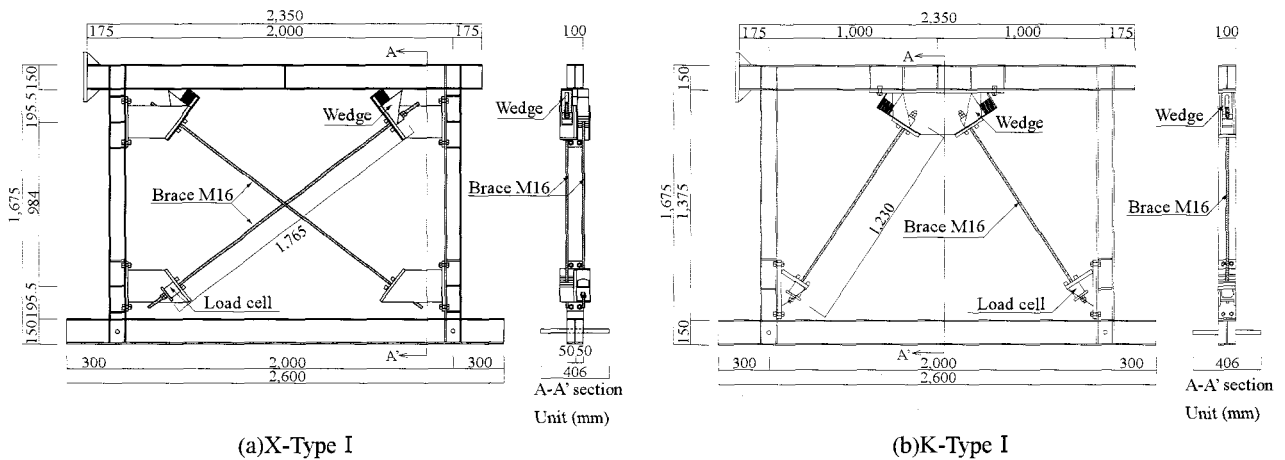


図1 試験体概要

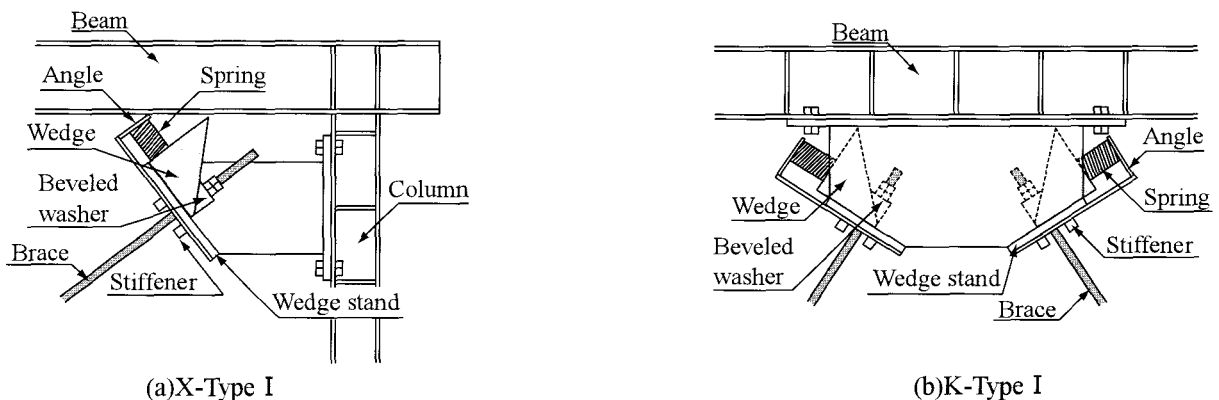


図2 ノンコンプレッションブレース端部詳細

スを設置した試験体を作製し、柱梁接合部に水平荷重を載荷する繰返し漸増振幅載荷試験を行う。

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図1.(a), (b) 及び図2に、それぞれ、示す。

試験体は、柱と梁を剛接とした1層1スパンの鉄骨架構に、両側対角方向に2本のノンコンプレッションブレースで補強した試験体(X-Type I)と、上梁部材の中心位置と下部の柱梁接合部中心位置を結ぶ軸心位置に、ノンコンプレッションブレースを設置し補強した試験体(K-Type I)及び、比較のため、X-Type IとK-Type Iのブレース端部に楔を設置せず、通常のブレースとして補強した試験体(X-Type II, K-Type II)と、無補強試験体(N)を採用した。X-Type I, IIは、柱部材の図心から架構外部50mmの位置にブレース材を設置している。K-Type I, IIについては、柱や梁の部材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している。ノンコンプレッションブレース端部の接合は、設置を容易にするため高力ボルト接合されている。また、Wedge standは、ブレース材の降伏耐力以上に設計しておけばブレース材のみでエネルギー吸収が期待できる。

楔・楔受け及びブレース材の詳細を図3に示す。

楔・楔受けの先端角度： θ は0.785radとした。楔受けプレートとブレース軸心とを直交させたものを、梁フランジ外部にボルト接合により設置する。

また、文献4)に示したように楔表面の摩擦係数が、0.7rad程度とすれば、方杖に対して傾斜面が0.540rad以

上となる先端角度を採用すれば、方杖に引張力が作用する場合、楔は押し戻されることはないことがわかっている。尚、楔・楔受けはSS400鋼ブロックから切削して作製している。

ブレース材は、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、転造ネジ付きブレース(M16, 軸部直径14.5, ABR400)を用いた。

尚、試験体に用いた、柱は、H-100x100x6x8のSS400材を、梁は、H-148x100x6x9のSS400材を使用した。転造ネジ付きブレースの素材特性を表1に示す。

3.2 載荷方法

載荷装置の概要を図4に示す。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、加力点近傍に鋼板を設け挟み込むことで構面外変形を抑えている。反力梁と試験体の接合は、十分な高力ボルト接合をしているため、すべりは生じない。

載荷方法は、繰返し漸増振幅載荷を行う。載荷プログラムは、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.]と漸増し各振幅レベルで2サイクル行う。図5に載荷履歴を示す。

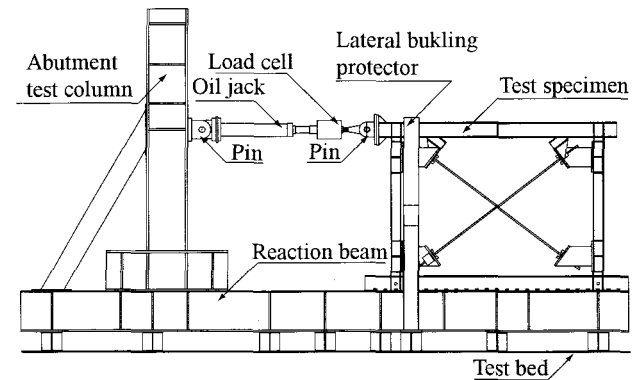


図4 試験装置の概要

表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

E : Young's modulus σ_y : Yield stress
 σ_u : Tensile strength σ_y/σ_u : Yield ratio ϵ_u : Elongation

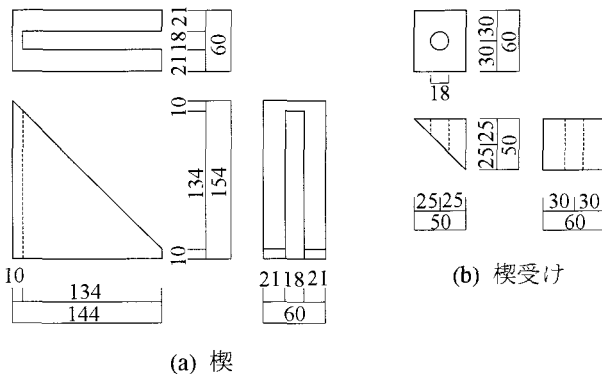
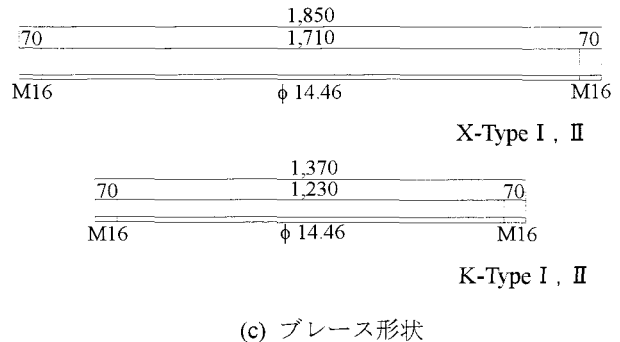


図3 楔・楔受け及びブレース形状



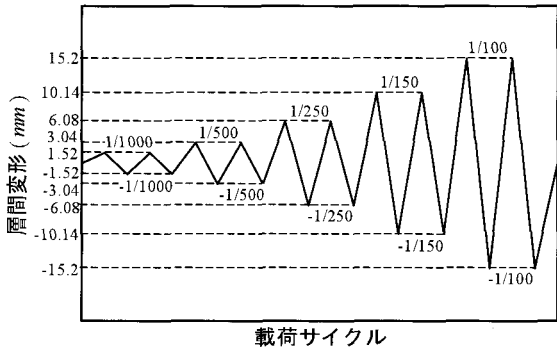


図5 荷重プログラム

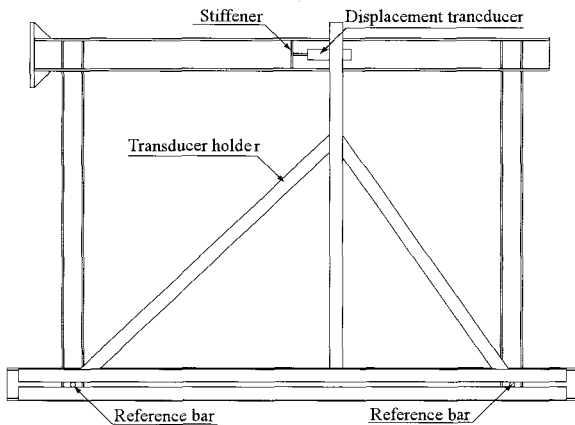
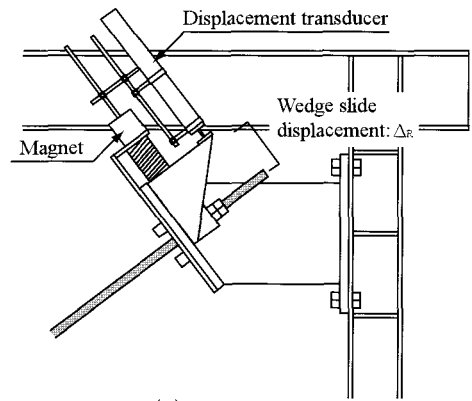
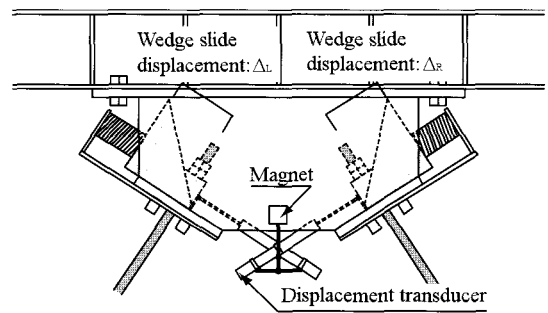


図6 水平変位計測治具

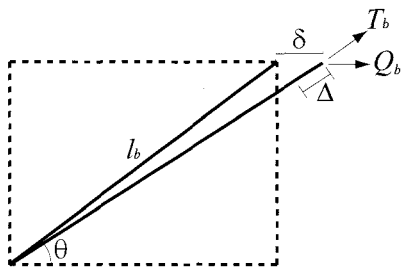


(a) X-Type I

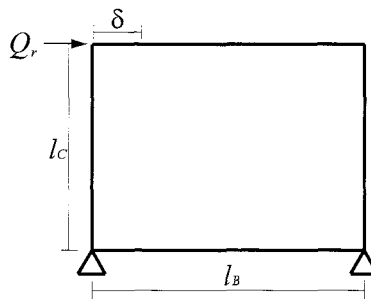


(b) K-Type I

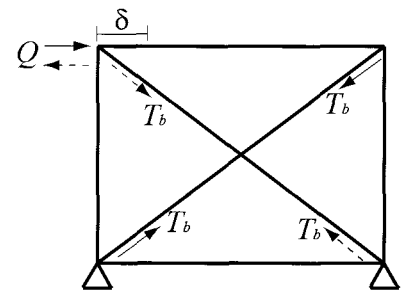
図7 楔貫入量の計測



(a) ブレース



(b) 架構



(c) ブレース付き架構

図8 解析モデル

X-Type I, K-Type Iについては、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とした。尚、ブレースには、降伏耐力の50%を初期軸力として導入している。

3.3 計測方法

計測は、荷重の計測は、オイルジャッキ先端に取り付けたロードセルから水平荷重： Q を、変位の計測は、図6に示すように、下部の柱梁接合部中心位置を不動点として支持治具を用いて梁中央点の水平方向変位： δ を計測した。楔貫入量： Δ_R, Δ_L は、楔の前部もしくは後部に変位計を設置し計測した。図7に楔貫入量の計測を示す。

4. 解 析

解析モデルを図8.(a)~(c)に示す。ノンコンプレッションブレースは、引張方向のみに作用することから図8.(a)からブレース軸力： T_b と軸方向変位： Δ の関係の式が得られる。

$$T_b = E \cdot A_b \cdot \frac{\Delta}{l_b} \quad \dots\dots\dots (1.a)$$

$$\Delta = \delta \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1.b)$$

ここに、 E はヤング係数、 A_b はブレース軸部断面積、 l_b はブレースのナット間距離である。

さらに、(1.a,b) 式から、ブレースが負担するせん断力： Q_b と水平変位： δ の関係を求めることができる。ノンコンプレッションブレースの場合、ブレース降伏後、除荷時には片側ブレースが弾性復活し、もう一方のブレースは、ゆるみが生じず引張り力に抵抗するため、常に、2本のブレースが水平荷重に対して作用していることから、以下の式が得られる。

$$Q_b = 2 \cdot T_b \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1.a) 式と (2) 式より

$$Q_b = \frac{2 \cdot E \cdot A_b \cdot \cos^2 \theta}{l_b} \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (3.a)$$

$$K_b = \frac{2 \cdot E \cdot A_b \cdot \cos^2 \theta}{l_b} \quad \dots\dots\dots (3.b)$$

ここに、 K_b はブレースのせん断力剛性である。尚、今回の実験では、初期軸力をブレース降伏耐力の50%を導入しているため、初期剛性は K_b を採用する。

次に、架構について図8.(b)から、架構が負担するせん断力： Q_r と水平変位： δ の式が得られる。

$$Q_r = \frac{24 \cdot E}{l_c^2 \left(\frac{l_b}{I_b} + \frac{l_c}{I_c} \right)} \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (4.a)$$

$$K_r = \frac{24 \cdot E}{l_c^2 \left(\frac{l_b}{I_b} + \frac{l_c}{I_c} \right)} \quad \dots\dots\dots (4.b)$$

ここに、 l_b 、 l_c は梁及び柱の長さであり、 I_b 、 I_c は、梁及び柱の断面2次モーメント、 K_r は架構のせん断剛性である。

よって、図8.(c)に示す、ノンコンプレッションブレースで補強された、架構全体の剛性： K と、せん断力： Q は以上の式になる。

$$K = K_r + K_b \quad \dots\dots\dots (5.a)$$

$$Q = Q_r + Q_b \quad \dots\dots\dots (5.b)$$

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以下の式が得られる。

$$Q_{by} = T_{by} \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (6.a)$$

$$\delta_{by} = \frac{Q_{by}}{K_b} \quad \dots\dots\dots (6.b)$$

ここに、 δ_{by} はブレースが降伏する水平変位である。よって、架構全体での降伏せん断力： Q_y は以下の式となる。

$$Q_y = Q_r + Q_{by} \quad \dots\dots\dots (7.a)$$

$$Q_r = K_r \cdot \delta_{by} \quad \dots\dots\dots (7.b)$$

以上の式は、X-Typeの解析モデルを用いたが、同様の式を用いてK-Typeでも適用できる。

5. 実験結果と考察

繰返し漸増振幅載荷試験結果を表2及び図9～11に、それぞれ、示す。

表2は、各試験体について、層間変形角が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、解析結果からのせん断剛性： ${}_A K$ を示す。また、ブレースが降伏したときのせん断荷重： ${}_E Q_y$ と、解析結果からの降伏せん断荷重： ${}_A Q_y$ 、1/100radの2サイクル目が終了した時点での最大せん断荷重： Q_u も示す。

図9.(a)～(d)には、水平荷重： Q と層間変形角： θ の関係を示す。比較のため、各試験体の解析モデルと無補強試験体(N)の実験結果も併せて示す。図10.(a)～(d)には、ブレース負担せん断力： Q_b と層間変形角： θ の関係を示す。架構が負担するせん断力： Q_r を無補強試験体のせん断力とし、補強試験体(X-Type I, II, K-Type I, II)のせん断力から Q_r を差し引いたものをブレース負担せん断力： Q_b としている。図11.(a)には、水平荷重： Q と楔貫入量： Δ_R 、 Δ_L の関係を示す。X-Type Iでは Δ_R をK-Type Iでは Δ_L の楔貫入量を採用した。また、1/150rad以降の楔貫入経路をX-Type IはA～Y、K-Type IはA～B'の記号で示している。尚、図11.(b)には、水平荷重： Q と層間変形角： θ における楔貫入経路も併せて示す。

試験結果から、以下のことがわかる。

5.1 耐力の検討

表2及び図9から、ノンコンプレッションブレースで補強した試験体(X-Type I, K-Type I)と通常ブレースで補強した試験体(X-type II, K-type II)を比較すると、X-Type I, K-Type Iは降伏せん断耐力では20%程度低

表2 載荷試験結果

Test specimen	${}_E K$ (kN/rad)	${}_A K$ (kN/rad)	${}_E Q_y$ (kN)	${}_A Q_y$ (kN)	Q_u (kN)
X-Type I	20.0x10 ³	41.9x10 ³	54.5	48.7	110.2
X-Type II	23.6x10 ³	41.9x10 ³	67.1	48.7	96.8
K-Type I	24.9x10 ³	25.1x10 ³	36.3	36.7	90.9
K-Type II	27.9x10 ³	25.1x10 ³	48.7	36.7	80.1

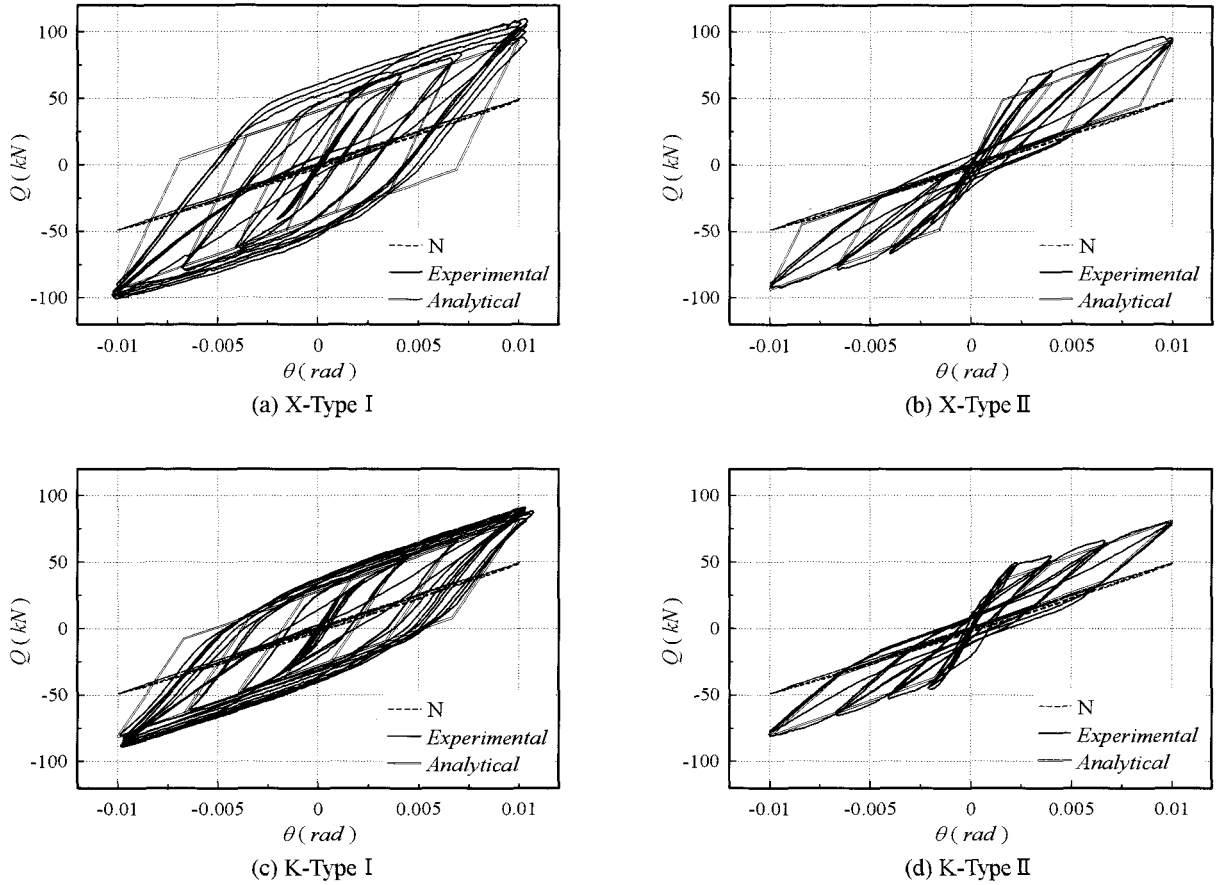


図9 水平荷重-層間変形角関係

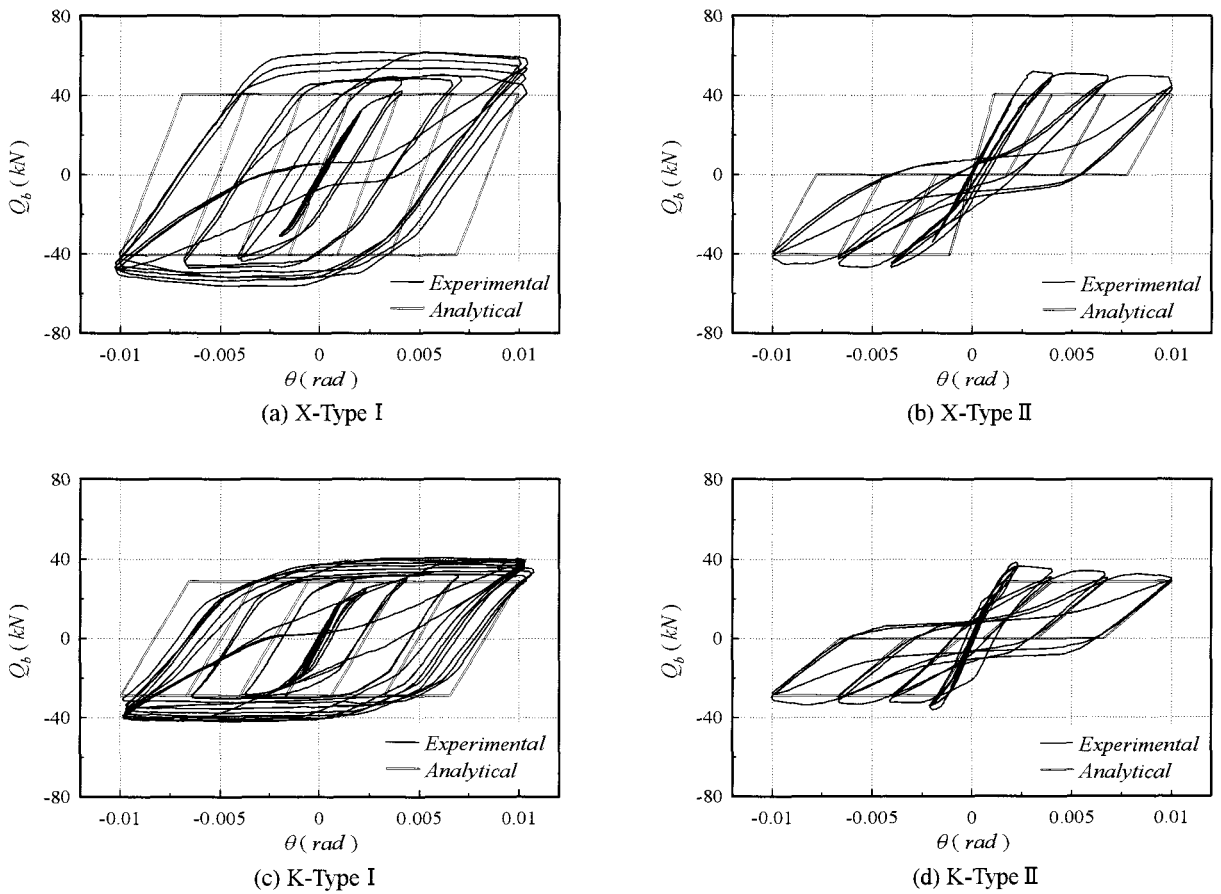


図10 ブレース負担せん断力-層間変形角関係

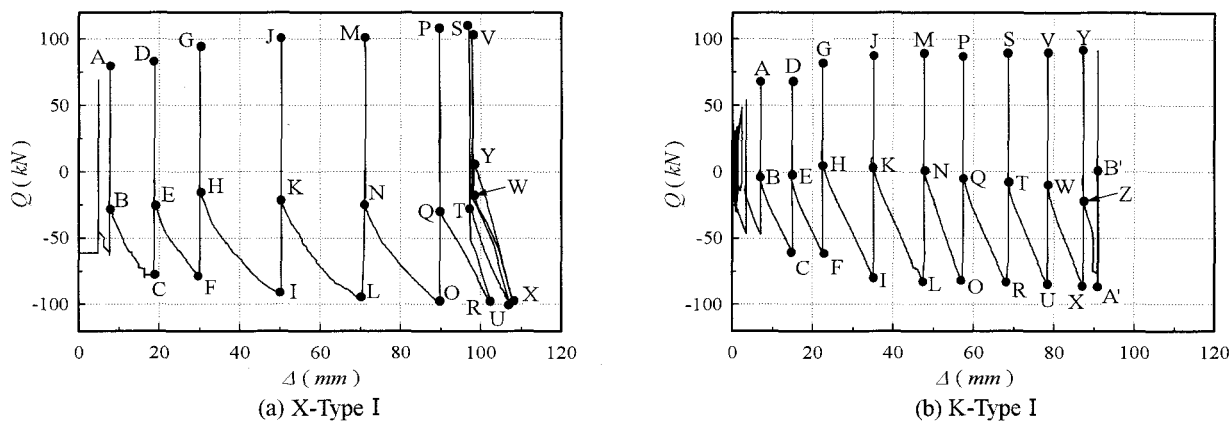


図 11. (a) 楔貫入変位

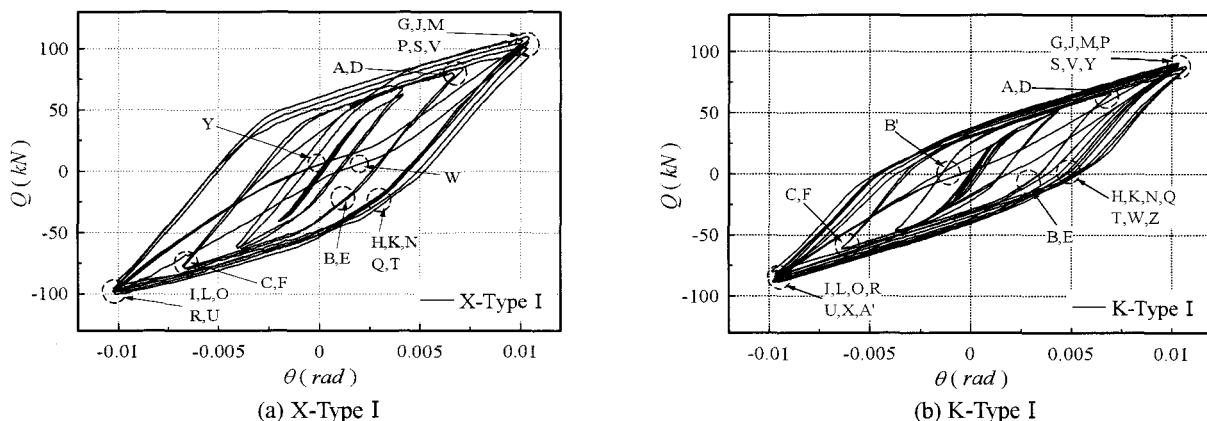


図 11. (b) 水平荷重一層間変形角関係における楔貫入経路

いものの、最大せん断耐力では 15% 程度高くなっている。これは、ノンコンプレッションブレースは圧縮力にはまったく抵抗しないため、降伏せん断耐力は低くなるが、降伏後ひずみ硬化の影響で最大せん断耐力は上昇する。実験値と解析値を比較すると、X-Type I, X-type I では良好に評価できているが X-Type II, X-type II は、低めの値となった。これは、解析する際、ブレース材の細長比が大きいため圧縮力には抵抗してないと仮定したためである。

5.2 復元力特性の検討

復元力特性について、X-Type I, K-Type I では、座屈が生じないため紡錘型の Bi-linear 完全弾塑性型復元力特性となり、K-Type I において解析モデルと良好に対応している。X-Type I は、楔の設置上、解析モデルとは異なった形状になったため誤差が生じ、剛性は解析値より低い値になっている。X-Type II, K-Type II では、ブレースを固定しているためブレースに圧縮力が生じ座屈を起こすため、スリップ型復元力特性となる。このことは、エネルギー吸収という面では X-Type I, K-Type I の方が有効である。

図 10 から、X-Type I, K-Type I は Bi-linear 完全弾

塑性型復元力特性となり、ブレースが引張方向に対して効率よく塑性化しエネルギー吸収されているのに対し、X-Type II, K-Type II はスリップ型復元力特性となり、エネルギー吸収は期待できない。

5.3 楔の貫入量

図 11. (a) から、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。特に、ブレース降伏後その現象が顕著に見られる。また、各振幅での楔貫入量はほぼ一定である。図 11. (b) から、正載荷の除荷時においてブレースの剛性が 0 になったとき貫入が始まる。

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と通常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、ブレースが負担するせん断力-層間変形角関係においてモデル化の容易な Bi-linear 完全弾塑性型復元力特性となり、K-Type I に関して解析結果とは良好に対応している。
- 3) X-Type と K-type を比較すると、最大耐力は K-type のほうが低い。しかし、K-type は、ブレースが交差しないためブレース断面を大きくできることから、耐力上昇は容易にできる。
- 4) 楔は、引張方向に対して押し戻されることなく滑らか貫入する。また、各振幅で一定の貫入量を示していることから、楔貫入量を把握できる。
- 5) 貫入開始位置は、正載荷の除荷時においてブレースの剛性が0になったときである。

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 完全弾塑性型復元力特性となりエネルギー吸収が期待できることから、既存建築物の耐震補強に有効である。

ブレースを設置するスペースが少なく X-Type に施工できない場合でも、K-type のブレース断面積を大きくすることで十分な剛性・耐力が期待できる。また、K-type は、ブレース材長が短くなるため小さな層間変形角でも降伏しエネルギー吸収が十分に期待できる。しかし、今回の補強法では、梁に下方向の鉛直荷重が作用し、たわみを生じさせてしまうが、K-type を上下逆にして取り付けることにより、上方向の鉛直荷重を作用させることができる。このことは、実構造物において梁に作用する自重を低減させる効果あると考えられる。

今回、X-Type について、解析値と実験値の剛性に誤差が生じた。これは、楔の設置上、試験体の形状と解析モデルの形状が異なったためと考えられる。今後、詳細に解析

モデルの検討を行う必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、2005 年度広島工業大学卒業生、加藤孝昌、山本礼司、田中博之、諸君の協力を得た。また、試験体作製にあたりフルサト工業株式会社には、転造ネジ付きブレースを提供していただきました。ここに記して謝意を表します

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ダンパーに関する研究, 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