

ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上に関する実験的研究

玉井 宏章*・高松 隆夫*
小持 明宏**・松尾 彰***

(平成15年9月12日受理)

Improvement of seismic performance on non-compression brace

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU,
Akihiro KOMOCHI and Akira MATSUO

(Received Sep. 12, 2003)

Abstract

Authors had proposed the brace that strength, remained plastic deformation capacity and energy absorption capacity can be easily evaluated under seismic loading.

Proposed brace consists of slender rod and tensile connected end with tapered washer and wedge. There is no buckling in the brace. The wedge slides between washer and stand so as to prevent the looseness of brace due to axial plastic deformation under repeated lateral loading. To improve the plastic deformation capacity of the brace, new tensile connected end with tapered washer and wedge are proposed.

To show the mechanism and performance of the brace, the repeated lateral loading tests are performed on one story one bay frame with tensile connected brace with wedge device.

Results and conclusion obtained from loading tests are summarized as follows.

1) The perfectly elasto-plastic hysteresis are observed until slide displacement of wedge reaches its maximum value. 2) Story shear, strength and energy absorption capacity are easily evaluated. 3) The remained plastic deformation capacity after earthquake can be evaluated by means of checking total slide displacement of the wedge. 4) Using new tensile connected end with tapered washer and wedge, it is possible to enhance the plastic deformation capacity.

Key Words: Braces, Wedge, Restoring force characteristics, Repeated load experiment

1. はじめに

2000年鳥取県西部地震そして2001年芸予地震において、鉄骨造建物の被害は軽微なものであった。その中で顕著な被害は、鉄骨造体育館のブレースの破断や座屈が挙げられる¹⁾。

鉄骨造体育館によく用いられる、棒鋼のブレースの場合

は、筋違は圧縮力にほとんど抵抗できないと共に、ブレース材が塑性座屈変形を起こした場合、建物の管理者からは大きな被害を受けた建物との判断が下され、立ち入り禁止や使用中止の処置が講じられることが多い。

従って、建物の損傷が容易に把握でき、スリップ型の復元力特性を示すことなく、地震入力エネルギーを効率よく吸収して、地震応答を低減するような耐震要素（例えば、

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学工学研究科土木工学専攻

*** 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

ブレース材・固定柱脚付剛節フレーム)が望まれている。

積極的に地震入力エネルギーを吸収する履歴吸収型ブレース材として、アンボンドブレース^{2),3)}、X型制振ブレース⁴⁾、Economical hysteretic damper⁵⁾等が提案されている。これらのブレースは、ブレース材の断面形状に制約があったり、機構がやや複雑となる傾向にある。このような耐震要素を効果的に利用するエネルギー吸収型建物の構造設計や制振補強設計では、ある特定層への損傷集中を防ぐため第2分岐層せん断剛性、適正層せん断耐力分布や所要のエネルギー吸収能力を設定・付与する必要がある^{6~8)}。

そのため、耐震要素について、地震荷重のような繰返し載荷下における耐力やエネルギー吸収能力を正確に把握、設定しうることが望まれている。

一方、著者等は、こうした要望に答えるため、露出柱脚についてアンカーボルトのナット部に楔を有する機構を考案し、そのスリップ型復元力特性を改善しうることを実験的に明らかにしている⁹⁾。

前報¹⁰⁾では、露出柱脚の機構をブレース材端部に適用し、ブレース材の復元力特性において問題となる、1)圧縮変形時に座屈を起こし、急激に耐力が劣化すること、2)繰返し変形時に履歴特性がスリップ型となりエネルギー吸収が十分に期待できないこと、の2点を解決でき、3)降伏耐力や降伏後剛性を容易に設定でき、4)エネルギー吸

収能力も把握しうるという性能設計上の2点の利点を有するブレース(以降ではノンコンプレッションブレースと呼ぶ)を提案した。

本報では、実用化のために、このノンコンプレッションブレースのエネルギー吸収性能を大幅に改善する機構を提案し、本ブレースを有する1層1スパン剛接架構の繰返し載荷実験を行って、基本的機構と耐震性能の向上について詳細に検討する。

2. ノンコンプレッションブレースの概要

2.1 構成について

提案するノンコンプレッションブレースを有するフレームを Fig.1 に、ブレース端部の詳細を Fig.2 に、Case I と Case II の2種類を、それぞれ、示す。両端にネジを切った丸鋼棒が、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対角方向に引張ボルト接合されている。楔を受けるプレートにはフレーム隅角部のガセットプレートとスチフナとが溶接されている。このプレートは、ブレース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、楔と梁のフランジ間には、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。

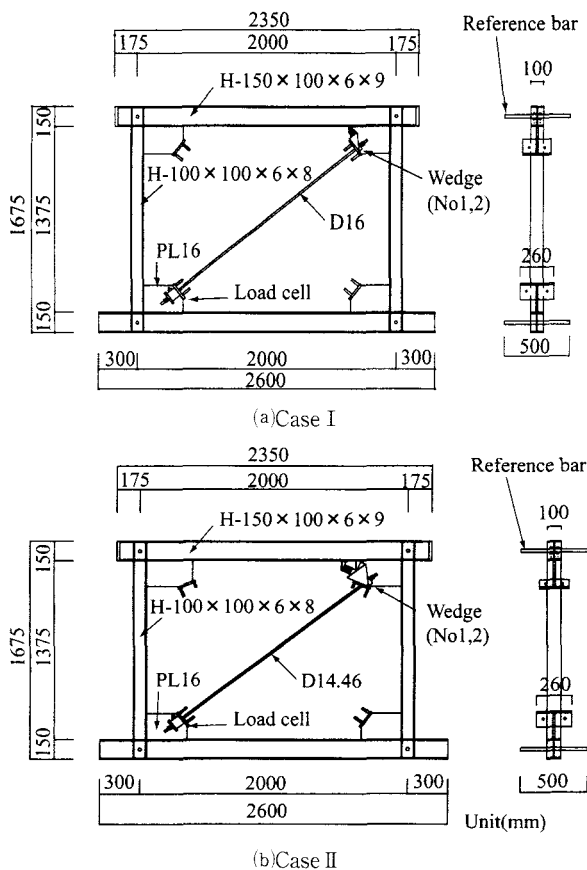


Fig.1 Test specimen

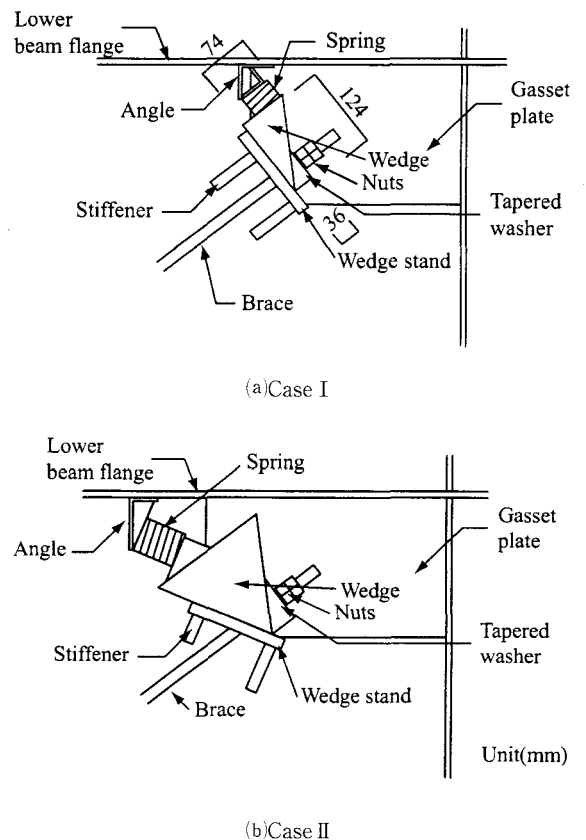


Fig.2 Device of connection in end of brace

2.2 機構について

本ブレース架構に、地震水平力が作用すると、ブレース引張方向の水平力に対してブレース材は効率よく抵抗し、ブレース材全体が塑性変形して地震入力エネルギーを吸収する。一方、ブレース圧縮方向の水平力に対しては、ブレース端部が移動し、ブレース材には圧縮力は作用せず、従って座屈は生じない。この端部に移動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プレートとの間に貫入するため、ブレースには緩みは生じない。

従って、左右対角方向に本ブレースを設置した架構は、ブレースの復元力特性にはスリップ現象は生じない。

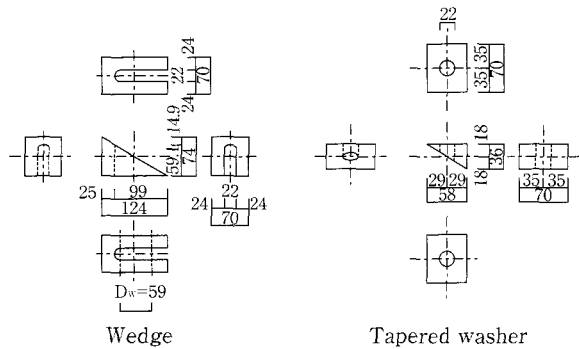
ネジ部の引張耐力を軸部の降伏耐力以上に設定しておけば、ブレース材全体が降伏し、所要のブレース材の塑性変形に対して、軸部の塑性化の程度をひずみ硬化域内に留めることができることから、ブレースの耐力や降伏後の剛性

M16	D16	M16
75	1850	75
2000		

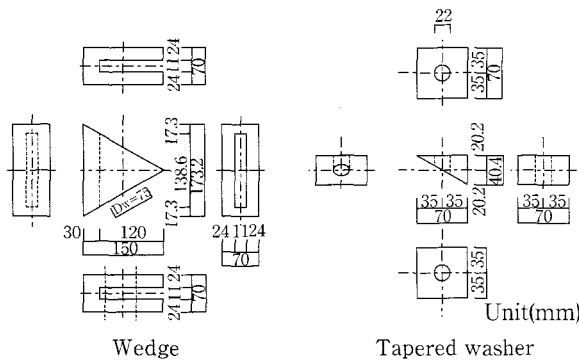
(a)Cutting thread brace (Case I)

M16	D14.46	M16
75	1850	75
2000		

(b)Rolled thread brace (Case II)



(c)Wedge set (Case I)



(d)Wedge set (Case II)

Fig.3 Detail of brace, wedge and tapered washer

は、軸部の全塑性軸力と0とで、力学的に明瞭に評価できる。

また、本ブレースは、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る。

従って、本ブレースと同様の良好な復元力特性を有するアンボンドブレース¹¹⁾と比較して、本ブレースは、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とすることなく適用できるという利点を有している。

2.3 楔及び座金のテーパ角度

ブレースに引張力が作用する時、引張力を伝達し、ブレースを効率よく塑性化させるためには、楔と座金との間と、楔と楔受けプレートとの間に滑りを生じさせなければ良い。Fig.4(a)に示すように、水平面上に置かれた楔にブレースからの圧縮力がテーパ付座金を介して作用し、摩擦力と釣り合って静止している状態を考える。

座金の摩擦面の外向き法線とブレースからの作用力 P とのなす角を θ とすると、摩擦面に垂直な力： N と平行な力： S は、それぞれ、次式で表される。

$$N = P \cos \theta, \quad S = P \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1.a,b)$$

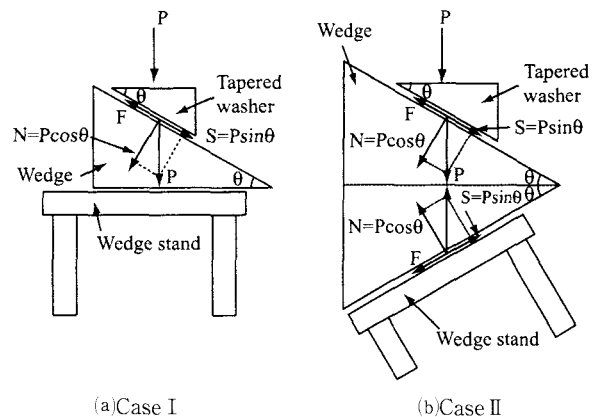
Table 1 Mechanical properties of materials

Point of material	E (kN/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	σ_y/σ_u	ϵ_{st} (%)	ϵ_f (%)
Brace (Case I)	205	318	453	0.68	2.36	26
Brace (Case II)	205	319	463	0.68	2.64	25
Beam and Column	205	318	436	0.72	2.34	29

E : Young's modulus, σ_y : Yield stress
 σ_u : Tensile strength, σ_y/σ_u : Yield ratio
 ϵ_{st} : Strain at hardening observed after yielding
 ϵ_f : Fracture strain (Elongation)

Table 2 Surface roughness for wedges

	Case I		Case II	
	No.1	No.2	No.1	No.2
Friction coefficient	0.701	0.718	0.699	0.750



(a)Case I (b)Case II
 Fig.4 Equilibrium of wedge and tapered washer

摩擦面の静止摩擦係数を μ とすると、静止摩擦力： F は次式で表される。

$$F = \mu \cdot N \dots\dots\dots (2)$$

座金に滑りが生じないためには、次式が成立する必要がある。

$$F \geq S \dots\dots\dots (3.a)$$

(1.a.b), (2)式及び (3.a) 式から

$$\theta \leq \tan^{-1} \mu \dots\dots\dots (3.b)$$

さて、ノンコンプレッションプレースのエネルギー吸収能力は、楔の限界貫入量と、テーパ角により決定される¹⁰⁾。このエネルギー吸収能力を楔の設置する空間を増やすことなく増大させるためには、テーパ角を大きくすれば良い。そこで、Fig.4(b)に示す、Case I の楔のテーパ角を約 2 倍にする機構 Case II を考える。Fig.4(b)に示す場合も同様に、楔と座金、楔と楔受けプレートの摩擦力の釣り合いは等しいので、座金に滑りが生じないためには、(3.b) 式が成立する必要がある。楔と座金との静止摩擦係数の最小値が、0.69 とすれば、Case I では楔のテーパ角 (θ) は 0.611rad 以下、Case II の楔のテーパ角 (2θ) は 1.222rad 以下の形状であれば、プレースからの圧縮力の大小にかかわらず、滑ることはない。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体を Fig.1 に、プレース端部の詳細を Fig.2 に、プレース、楔及びテーパ付座金の詳細を Fig.3 に、それぞれ、示す。

試験体は、柱 (H-100×100×6×8, SS400) と梁 (H-150×100×6×9, SS400) を剛接した 1 層 1 スパンの架構に、片側対角方向に、表裏 2 本のノンコンプレッションプレースを設置したものである。

テーパ角 0.538rad の楔とテーパ付座金を用い、楔受けプレートとプレース軸心とを直交させたもの、Case I 及びテーパ角の 1.047rad の楔と、テーパ角 0.523rad のテーパ付座金を用い、楔受けプレートとプレース軸心とを 1.047rad 傾斜させたもの、Case II を各 1 体、計 2 体用意した。

プレース材は、Case I は、切削ネジ付プレース^{注1)} (M16, D16, SS400) を、Case II は、転造ネジ付プレース (M16, D14.5, SS400) を用いている。

柱・梁及びプレース材の素材試験結果を Table1 に示す。

プレースに緩みが生じる際に楔が貫入するよう、梁下フ

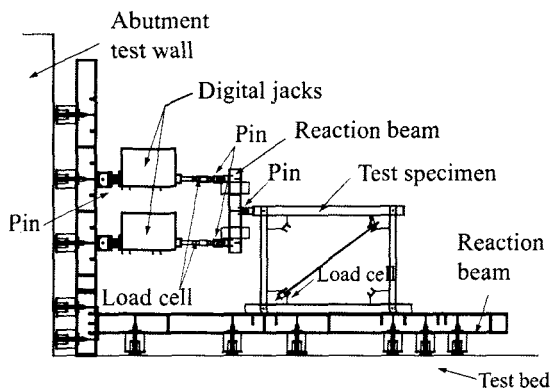


Fig.5 Test apparatus

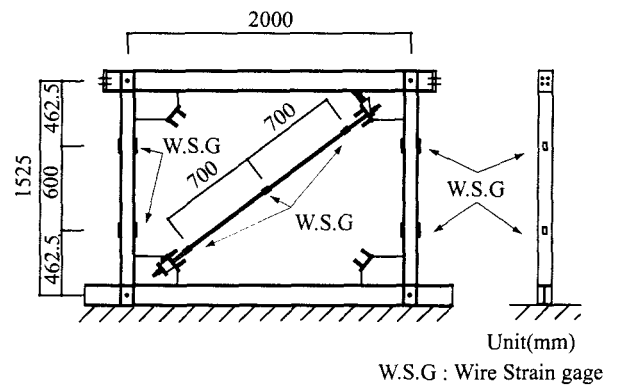
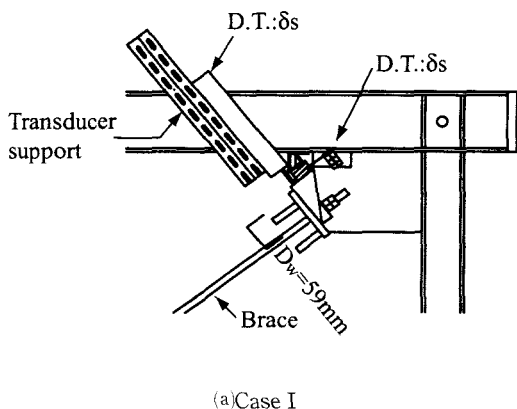
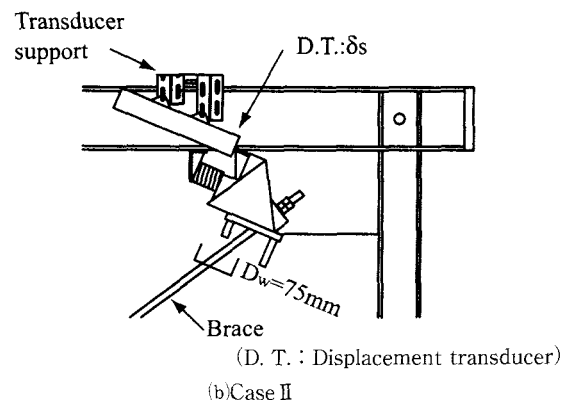


Fig.7 Locations of wire strain gage



(a) Case I



(D. T. : Displacement transducer)
(b) Case II

Fig.6 Wedge slide displacement, δs

ランジと楔との間に圧縮コイルバネ（唱和発条製，バネ定数 1.62~1.86N/mm）を設定した。尚，楔とテーパ付座金は，十分な摩擦係数が確保されるように，ショットブラスト処理（Case I）ないしは，発錆処理（Case II）を施した。各楔の摩擦係数を Table 2 に示す。

3.2 荷重装置と計測方法

○荷重装置

荷重装置を Fig.5 に示す。2 台のデジタルアクチュエーターからの水平力： Q は反力りを介して試験体の梁-柱接合部に作用する。荷重は，層間変位： Δ をフィードバック制御する変位制御とした。

○計測方法

変位計測治具は Case I と Case II 共に，前報¹⁰と同様のものを使用し，楔の貫入変位計測治具を Fig.6 に，(a) Case I, (b) Case II に分けて，それぞれ，示す。変位の計測は，層間変位： Δ ，フレームの左下-右上，右下-左上対角方向 δ_L, δ_R ，楔の貫入変位： δ_s ^{註2} について行い，特に楔の貫入変位については，ストローク 2mm のカンチレバー型変位計とストローク 200mm の変位計とで計測した。各変位量は，試験体の表裏に設置した 2 本の変位計からの計測値を平均して求めた。

試験体のゲージ貼付位置を Fig.7 に示す。荷重，内力及びひずみの計測は，層せん断力： Q ，フレームの左下-右上対角方向プレースの軸力： T_L ，フレームが負担するせん断力： Q_f ，プレース左下端，中央，右上端の軸方向ひず

み： $(\epsilon_L, \epsilon_M, \epsilon_R)$ について行った。

層せん断力： Q は，デジタルジャッキ先端のロードセルから，プレース軸力： T_L は，プレース下端部に設置したロードセルから，それぞれ，計測した。内力であるフレームの負担せん断力： Q_f は，試験体の柱 8ヶ所に貼付したひずみ値から次式により算定した。

$$Q_f = \frac{M_a - M_a^*}{l_a} - \frac{M_b - M_b^*}{l_b} \dots\dots\dots(4)$$

ここに， (M_a, M_a^*) ， (M_b, M_b^*) ：左側及び右側柱における上下 2 点の曲げモーメント

l_a, l_b ：左側及び右側柱における曲げモーメント計測点間距離 ($l_a = l_b = l$)

柱の断面両端のひずみ値： (ϵ_T, ϵ_B) から，各断面の曲げモーメントは次式で算定できる。

$$M = -E \cdot I \cdot \kappa \dots\dots\dots(5.a)$$

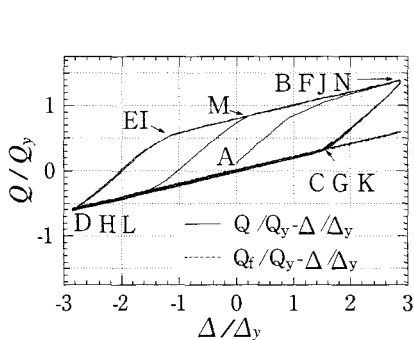
ここに，

$$\kappa = \frac{\epsilon_T - \epsilon_B}{D} \dots\dots\dots(5.b)$$

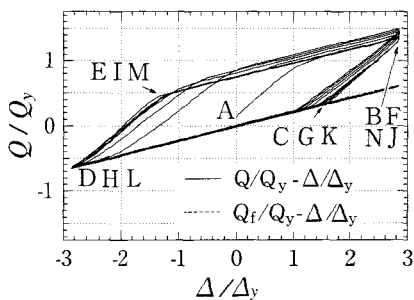
であり， E, D, I は柱のヤング率，せい，断面 2 次モーメントである。

3.3 荷重プログラム

荷重プログラムは，層間変形角の振幅を 1/150rad とした定変位振幅繰返し荷重試験とし，楔の貫入変位が，限界貫入変位に達するまで繰返し荷重した。尚，いずれの試験体もプレース初期張力： T_0 は 9.0kN に設定した。

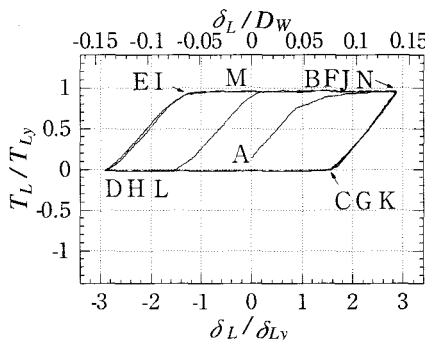


(a)Case I

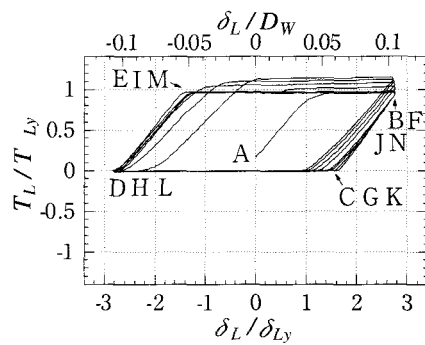


(b)Case II

Fig.8 $(Q/Q_y), (Q_f/Q_y) - (\Delta/\Delta_y)$ relations

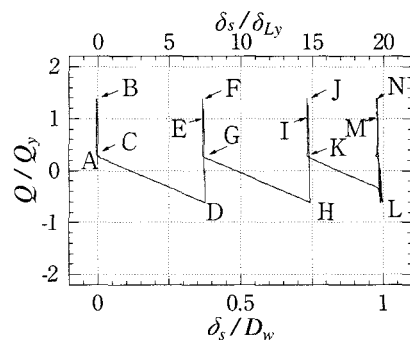


(a)Case I (Cutting thread brace)

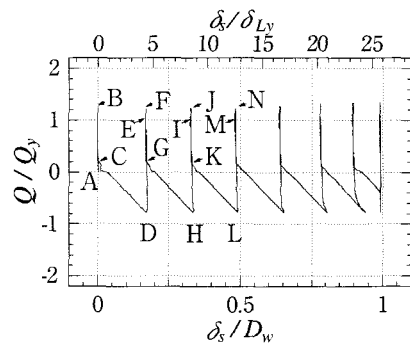


(b)Case II (Rolled thread brace)

Fig.9 $(T_L/T_{Ly}) - (\delta_L/\delta_{Ly})$ relation



(a)Case I (Taper angle 0.538rad)



(b)Case II (Taper angle 1.047rad)

Fig.10 $(Q/Q_y) - (\delta_s/D_w)$ relation

4. 実験結果と考察

実験結果を Fig.8~Fig.10, Photo.1~Photo.4 に、それぞれ、示す。Fig.8 に、ブレース降伏時の層せん断力で無次元化した層せん断力： (Q/Q_y) と、ブレース初期降伏時の層間変位で無次元化した層間変位： (Δ/Δ_y) との関係、Fig.9 に、ブレースの全塑性軸力で無次元化したブレース軸力： (T_i/T_{iy}) とブレース降伏時のフレーム対角方向変位で無次元化したフレーム対角方向変位の関係： (δ_i/δ_{iy}) を、Fig.10 に、 (Q/Q_y) と楔の限界貫入変位で無次元化した楔の貫入変位： (δ_i/D_w) との関係、(a)Case I, (b)Case II に分けて示す。尚、Fig.8~Fig.10 には荷経路を A~N の記号で併せ示しており、Fig.8 には、参考のため、ブレース降伏時の層せん断力で無次元化したフレームが負担する層せん断力： (Q_f/Q_y) と (Δ/Δ_y) との関係も併せ示している。Photo.1, Photo.2 には、Case I (テーパ角が 0.538rad の楔) 及び Case II (テーパ角が 1.047rad の楔) の楔の各荷経段階での貫入状況を示す。また、実験後のブレースの変形状況を、Case I, 切削ネジ付ブレースについて

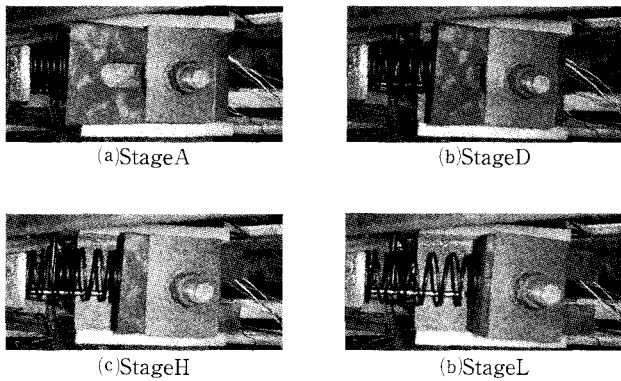


Photo.1 Appearance of the right-upper corner wedge under loading test (Case I)

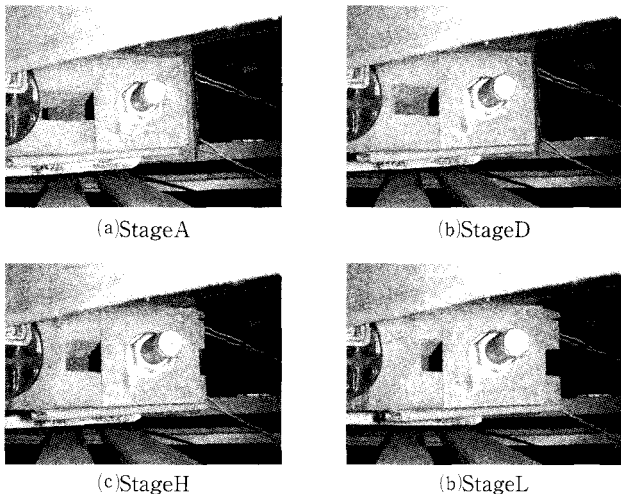


Photo.2 Appearance of the right-upper corner wedge under loading test (Case II)

て Photo.3 に、Case II, 転造ネジ付ブレースについて Photo.4 に、それぞれ、示す。

これらの結果から以下のことが分かる。

○復元力特性について

Fig.8, Fig.9 から、1) Case I は、初期降伏層せん断力は Q_y よりも 2 割程度、Case II は 0.5 割程度小さいこと、2) Case I は、2 サイクルまで、Case II は 5 サイクルまでは Bi-linear 型の復元力特性を示すこと、3) Case I, Case II とも、ブレースには、圧縮力は生じないこと、4) Case I は、半サイクル以降のブレース最大引張力は全塑性軸力に一致し、ブレースの降伏後の剛性は 0 であること、また、Case II は、5 サイクル以降、ブレース軸部のひずみ硬化により上昇している等のことから Case I の切削ネジブレースの復元力特性からブレース

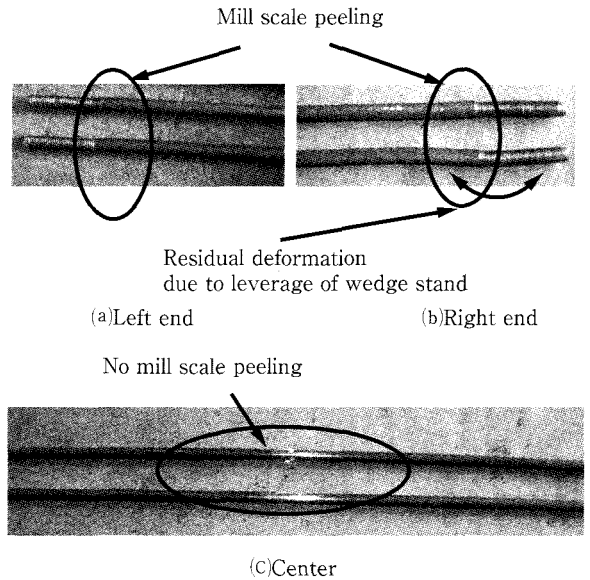


Photo.3 Residual deformation of brace after test (Case I, Cutting thread brace)

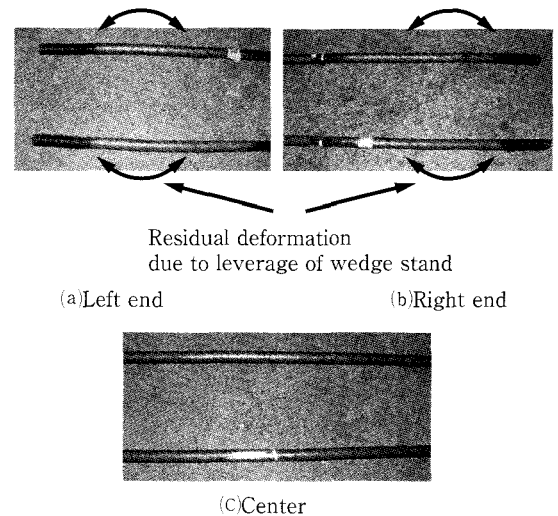


Photo.4 Residual deformation of brace after test (Case II, Rolled thread brace)

は、ネジ部から降伏し、ひずみ硬化によりその部分の耐力が上昇した後、ブレース軸部全体が降伏と考えられる。また、実験中、両試験体のブレースには、座屈によるブレースの面外変形は全く生じなかった。

○楔の貫入変位について

Fig.10, Photo.1 及び Photo.2 から、1) ブレース軸力が正から 0 に推移する時点で楔の貫入変位は増大すること、2) Case I の荷重過程 C-D 間、G-H 間、Case II の荷重過程 C-D 間、G-H 間、K-L 間に生じる楔の貫入変位の増分量は対応するサイクルで生じたブレースの軸方向塑性変形量に一致すること、3) Case I は、3 サイクルまで、また、Case II では、6 サイクルまでは、楔は滑らかかつ正方向に単調に増大し、ブレースに引張軸力が作用する時には、楔の貫入変位は保持され、押し戻されることはないこと、4) Case I の 3 サイクル以降、また、Case II の 6 サイクル以降では、楔の貫入変位は、その限界値に達し、ブレースに緩みが生じて、圧縮力に抵抗しなくなることを等しいことがわかる。

○ブレースの塑性変形について

Photo.3, Photo.4 から、1) 楔受けプレートのご作用により、切削ネジ付ブレース (Case I) では、切削ネジ部に曲げ変形が残留する一方、転造ネジ付ブレース (Case II) では、ブレース全体に曲げ変形が分散して残留すること、2) 切削ネジ付ブレース (Case I) では、ネジ切削加工部より内側 50mm のブレース両端に激しく黒皮の剥離が観察される一方、転造ネジ付ブレース (Case II) にはほとんど黒皮の剥離はみられないこと、等しいことがわかる。転造ネジ部は、ロール形成して、ネジ部の耐力を軸部の耐力と同等となるよう加工されている一方、切削ネジ部は加工上ネジ部の耐力は、軸部の耐力より低くなる。このため、切削ネジ付ブレースでは、転造ネジ付ブレースと比べ、塑性残留変形の局所化が生じたものと考えられる。

5. ま と め

本研究では、楔のテーパ角度の異なる 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 スパンの剛節フレームについて繰返し荷重試験を行い、その機構と復元力特性、エネルギー吸収性能を検討した。

得られた知見は以下のように要約される。

- 1) ブレースに圧縮力は作用せず、座屈は生じない。
- 2) 摩擦係数が 0.7 程度の表面粗さであれば、楔のテーパ角度を 1.047rad にした場合についても、楔は滑らかにかつ押し戻されることなく貫入する。
- 3) ブレースの復元力特性が完全弾塑性に保たれる範囲を使用限界と仮定すると、楔のテーパ角を 2 倍とすれば、エネルギー吸収性能は 2 倍となる。また、残されたエ

ネルギー吸収性能は、楔の貫入変位量で容易に評価することができる。

- 4) 楔受けプレートを楔のテーパ角の半分だけブレース軸心に対して傾斜させる機構により、ノンコンプレッションブレースのエネルギー吸収性能は、大幅に増大させることができる。
- 5) 切削ネジよりも転造ネジを施す方が、塑性変形をより分散させることができる。
- 6) 限界貫入変位に達するまでの範囲では、ブレースの層せん断力-層間変位関係はモデル化の容易な完全弾塑性型復元力特性となる。
- 7) ブレースの軸力-フレーム対角方向相対変位関係は Bi-liner となることから、ブレース軸部の全塑性軸力から繰返し荷重下における層せん断耐力を正確に把握できる。

謝 辞

本研究の一部は、日本鉄鋼連盟「第 8 回 (平成 14 年) 建築鋼構造研究助成金」で賄われた。また、本研究を実施するにあたり、2002 年度広島工業大学卒論生、香川修三、藤井邦昭、2003 年度広島工業大学卒論生、中川哲二、西希、水田新也、山口康治、の諸君から協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：2000 年鳥取県西部地震災害調査報告 2001 年芸予地震災害調査報告，pp.17-155, pp.332-352, 2001.10.
- 2) 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，構造系論文集，No422, pp.45-56, 1991.4.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Christopher Higgins, James Newell: Development of Economical Hysteretic Dampers, パッシブ制振構造シンポジウム 2001, p.193-201, 2001.12.
- 6) 金沢 寛，玉井宏章：エネルギー吸収型建物の制振評価方に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第 10 巻，pp.435-442, 2002.11.

- 7) たとえば, 日本鋼構造協会鋼材倶楽部: 履歴ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法, pp.83-188, 1998.9.
- 8) 小川厚治, 井上一郎, 小野聡子: 柱・梁を弾性域に留める履歴ダンパー付架構の設計耐力 (1 質点系による考察), (多質点系のベースシヤール係数), 鋼構造論文集, 第5巻, 117号, pp.13-28, pp.29-44, 1998.3.
- 9) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第10巻, pp.499-506, 2001.11.
- 10) 高松隆夫, 玉井宏章, 小持明宏: 改良復元力特性を有する軸組筋違に関する研究, 広島工業大学紀要, 研究編, 第37巻別冊, pp.141-146, 2003.2.
- 11) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 渡辺厚, 人見泰義: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 構造工学論文集, Vol.34B, pp.249-258, 1988.3.
- 12) 玉井宏章: 変動軸力と繰返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験-変動軸力下の半剛接特性-, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp.149-156, 2003.5.

注

- 注1) ブレースは, ブレース全体の伸び性能を確保するために, ネジ部断面の軸耐力を軸部断面の降伏耐力以上となるよう設定する。ネジ部と軸部との断面積比と, ネジ切り比及び使用鋼材の破断までの応力ひずみ関係から文献12に示す方法で, 限界変形量を算定できる。
- 注2) 楔の貫入変位は楔受けと楔との相対ずれ量として計測している。Fig.3 からわかるように初期設置状態からの貫入変位は, Case I, Case II について, それぞれ, 59mm, 75mm となる。