

# 1. 折返し式ブレースの構造特性に関する研究

## Study on Structural Characteristic of Folded Braces

波田雅也\*

### －概要－

本報告は、鉄骨造建物の耐震要素であるブレース部材の軸降伏変位を増大し、建物の一次設計用地震力に対する変形制限である層間変形角  $R=1/200\text{rad}$  程度の変形レベルまで軸降伏しない“折返し式ブレース”（以下、折返しブレース）という独自に考案された部材の構造特性に関するものである。筆者が2020年3月に日本大学から授与された博士(工学)の学位論文の内容について再編集して纏めた。

### －技術的な特長－

折返しブレースとは、断面の異なる3本の鋼材(内側から芯材、中鋼管、外鋼管)を、両端のエンドプレートを通じて一筆書きの要領で折り返して直列接合することにより、「軸降伏変位の増大効果」と「座屈拘束効果」という2つの構造性能を併せ持つ独創的なブレース部材である(図1)。まず、直列接合により実際の部材長さを見付けの部材長さ( $L$ )の約2.5倍( $2.5L$ )に長くすることで、軸降伏変位が約2.5倍増大する。さらに、3本の鋼材各々に作用する軸力(圧縮・引張)が互いに反転することで、芯材(圧縮材)の全体座屈を中鋼管(引張材)が拘束する座屈拘束効果を有する。この座屈拘束効果により、折返しブレース圧縮時の降伏耐力は引張時と同程度の値が発揮され、降伏後も安定した履歴性能が確保されるため、種別BAの耐震ブレースとして扱うことができる。

### －研究の目的と内容－

本研究は、折返しブレースの「部材構造特性」と、折返しブレースを鉄骨造建物に設置したときの「建物構造特性」の2項目を明確に示すことを目的とする。本論文では、まず、折返しブレースの部材構造特性(軸降伏変位の増大、座屈拘束効果)を実大実験により確認するとともに、折返しブレース特有の座屈拘束メカニズムを理論的に整理し、その妥当性を要素実験により確認した。つぎに、鉄骨造建物を1層1スパンに模擬したケーススタディを行い、純ラーメン構造や従来ブレース構造との比較から、折返しブレース構造の基本的な建物構造特性を確認した。さらに、実際の8階建て鉄骨造事務所ビルに折返しブレースを適用し、実施設計・製作および施工を通じて、折返しブレースの実用的価値を確認した。

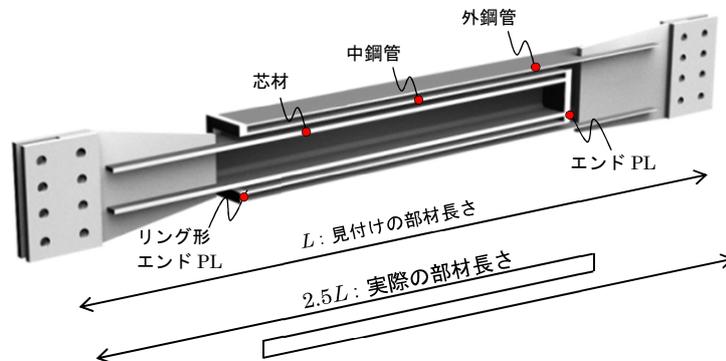


図1 折返しブレースの断面パース

※本報は、筆者が2020年3月に日本大学から授与された博士(工学)の学位論文(主査:日本大学理工学部海洋建築工学科 北嶋圭二 教授、DOI: info:doi/10.15006/32665A5568)を、青木あすなる建設技術研究所報として再編集したものである。

\*技術研究所 構造研究部

# 折返し式ブレースの構造特性に関する研究 Study on Structural Characteristics of Folded Braces

○波田 雅也\*  
Masaya HADA

## 1. 序論

### 1.1 研究背景

鉄骨造建物では、柱梁接合部を剛接合としたフレームに耐震ブレースを設置したブレース構造が広く採用されている。ブレース構造は、柱梁フレームのみで構成される純ラーメン構造に比べて少ない鋼材量で剛性や耐力を確保でき、合理的かつ経済的な設計を志向できる<sup>1)</sup>。しかし、従来の耐震ブレース(以下、従来ブレース)の軸降伏変位は小さく、層間変形角  $R=1/500\text{rad}$  程度の変形レベルで早期に降伏(または座屈)する。一方、フレームは一次設計用地震力に対する変形制限である  $R=1/200\text{rad}$  程度まで十分弾性であることが多く、 $R=1/500\text{rad}$  ではフレーム耐力が十分に発揮されない<sup>1)</sup>。そのため、従来ブレース構造は、部材の降伏を許容しない1次設計において地震力の大部分をブレースが負担しなければならない。結果的にブレースを多量に配置する必要があり、外観や機能面が優先されブレースを少量しか配置できない建物は、ブレース構造を断念して純ラーメン構造を採用せざるを得ない場合が多いという課題があった。この課題を解消するためには、弾性範囲の広いブレースが有効である<sup>2)</sup>。

そこで筆者らは、折返し方式でブレースの弾性範囲を広くし、 $R=1/200\text{rad}$  程度の変形レベルまで降伏しない「折返し式ブレース」(以下、折返しブレース)を考案した<sup>3)</sup>。

### 1.2 折返しブレースの概要

折返しブレースとは、断面の異なる3本の鋼材(内側から芯材、中鋼管、外鋼管)による3重構成で、各鋼材を両端のエンドプレートを通して一筆書きの要領で折り返して直列接合することにより、実際の部材長さを見付け長さ( $L$ )の約2.5倍( $2.5L$ )に長くしたブレースである(図1)。

折返しブレースは、部材長さに比例して軸降伏変位が約2.5倍増大するとともに、3本の鋼材各々に作用する軸力(圧縮・引張)が互いに反転することで、芯材(圧縮材)の全体座屈を中鋼管(引張材)が拘束する効果を有する(図2)。この折返しブレースを鉄骨造建物に設置することで、従来ブレースでは困難であったブレース少量配置が可能となり、1次設計レベルからフレーム耐力が有効に発揮される合理的なブレース構造が実現する(図3)。

### 1.3 本研究の目的と内容

本研究は、折返しブレースの「部材構造特性」と、折返しブレースを鉄骨造建物に設置したときの「建物構造特性」の2項目を明確に示すことを目的とする。

本論文では、まず、折返しブレースの部材構造特性(軸降伏変位の増大、座屈拘束効果)を実大実験により確認するとともに、折返しブレース特有の座屈拘束メカニズムを理論的に整理し、その妥当性を要素実験により確認する。つぎに、鉄骨造建物を1層1スパンに模擬したケーススタディを行い、純ラーメン構造や従来ブレース構造との比較から、折返しブレース構造の基本的な建物構造特性を確認する。さらに、8階建て鉄骨造実建物に折返

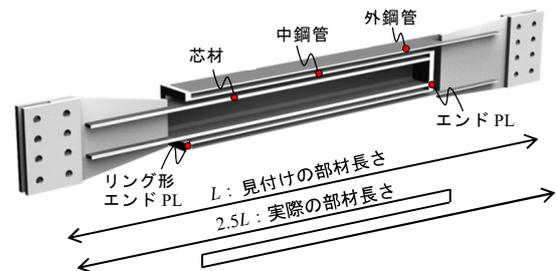


図1 折返しブレースの断面パース

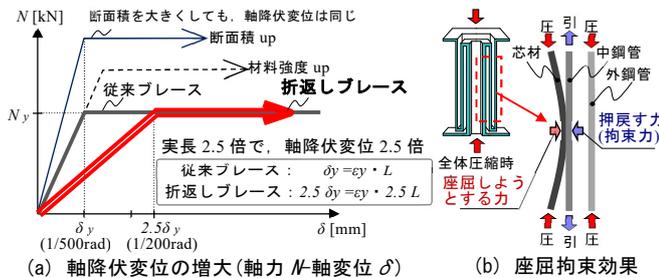


図2 部材構造特性の概念図

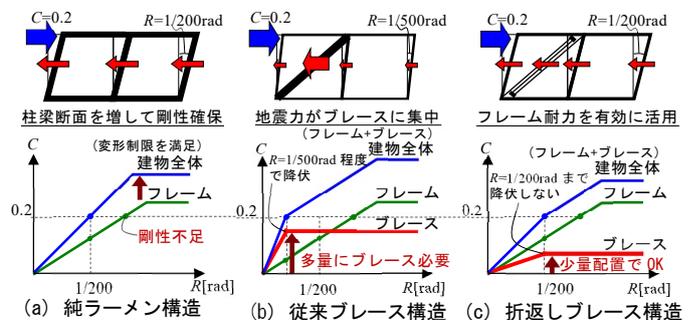


図3 建物構造特性の概念図(ベースシア係数  $C$ ・層間変形角  $R$ )

\*技術研究所 構造研究部

※本報は、筆者が2020年3月に日本大学から授与された博士(工学)の学位論文(主査:日本大学理工学部海洋建築工学科 北嶋圭二 教授, DOI: info:doi/10.15006/32665A5568)を、青木あすなる建設技術研究所報として再編集したものである。

しブレースを適用し、実施設計・製作および施工を通じて、折返しブレースの実用的価値を確認する。

## 2. 折返しブレースの実大実験

本章では、実大規模の荷重実験により、折返しブレースの部材構造特性を明らかにする。

### 2.1 試験体

試験体は、折返しブレースを1体、比較用として芯材単体ブレースを1体の計2体とする(図4、表1)。使用鋼材は、芯材がH形鋼(H-175×175×7.5×11.0, SN400B)を、中鋼管と外鋼管が組立鋼管(中:□-191×197×9.0×6.0, 外:□-213×213×6.0×9.0, ともにSM490A)である。各鋼材を一筆書きの要領で直列に接続しているため、折返しブレース全体の降伏軸力は、鋼材3本のうち最も小さな芯材の降伏軸力で決定する。また、折返しブレースの軸剛性(125kN/mm)は鋼材3本の直列剛性として算出され、芯材単体ブレース(327kN/mm)の約1/2.6である(表1)。ブレース取り付け角度 $\theta=45$ 度とすると折返しブレース降伏時の層間変形角 $R$ は1/206radであり、芯材単体ブレース(1/541rad)の約2.6倍に増大する設計である。なお、芯材の細長比は $\lambda=89$ であり、芯材単体では種別BCのブレースである。

### 2.2 実験方法

試験体は、実架構を模擬した柱と梁の間に、取り付け角度 $\theta=45$ 度で設置した(図5)。接合部は、一般的な高力ボルト摩擦接合により両端固定とした。荷重サイクルは、初めに許容軸力 $N_a$ (芯材の基準強度 $F_t$ と断面積 $A_t$ の積)まで荷重制御で荷重した後、層間変形角 $R$ を基準とした変位制御で $R=\pm 1/300$ (芯材単体ブレースのみ),  $\pm 1/200$ ,  $\pm 1/133$ ,  $\pm 1/100$ ,  $\pm 1/67$ ,  $\pm 1/50$  radに相当する軸変位で各2サイクルずつ正負交番の繰返し漸増荷重とした。

## 2.3 実験結果

軸力-軸変位関係の履歴曲線を図6に示す。図6には、降伏軸力と軸剛性の計算結果も併せて示している。まず、図6(b)より、芯材単体ブレースは、最初の圧縮荷重時に全体座屈が発生して耐力が低下( $_{exp}N_{max}=-1571$ kN)し、その後はサイクルを重ねるごとに圧縮耐力が低下していることがわかる。一方、図6(a)より、折返しブレースは、前述の座屈拘束効果により圧縮・引張荷重時ともに全体座屈せず芯材が軸降伏し、 $R=1/50$ radの変形レベルまで耐力・剛性とも安定した紡錘型の履歴を示していることがわかる。

軸力-軸変位関係の包絡曲線を図7に示す。太線が折返しブレース、細線が芯材単体ブレースであり、包絡曲線上の○印が許容軸力時(許容軸力 $N_a=F_t \times A_t$ )、●印が弾性限界時に到達した点を示している。弾性限界時は、見付け長さ $L$ の0.03%(1.16mm)オフセットした軸剛性(実験値)と包絡曲線の交点と定義した<sup>4)</sup>。図7中には軸剛性の計算値 $_{cal}K$ も併せて示している。図7より、折返しブレースと芯材単体ブレースの軸剛性は、いずれも実験値と計算値が良く対応しており、折返しブレースの軸剛性が芯材単体ブレースの

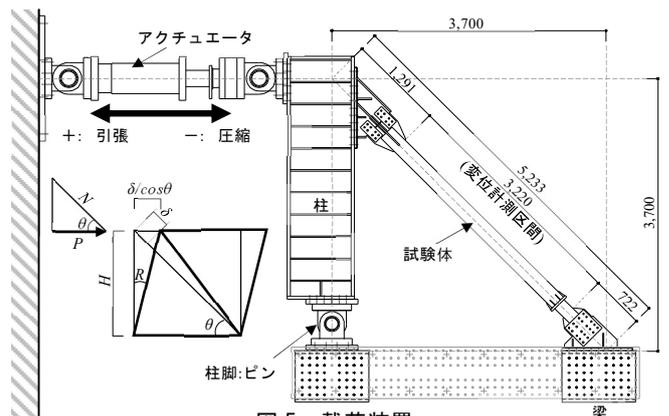


図5 荷重装置

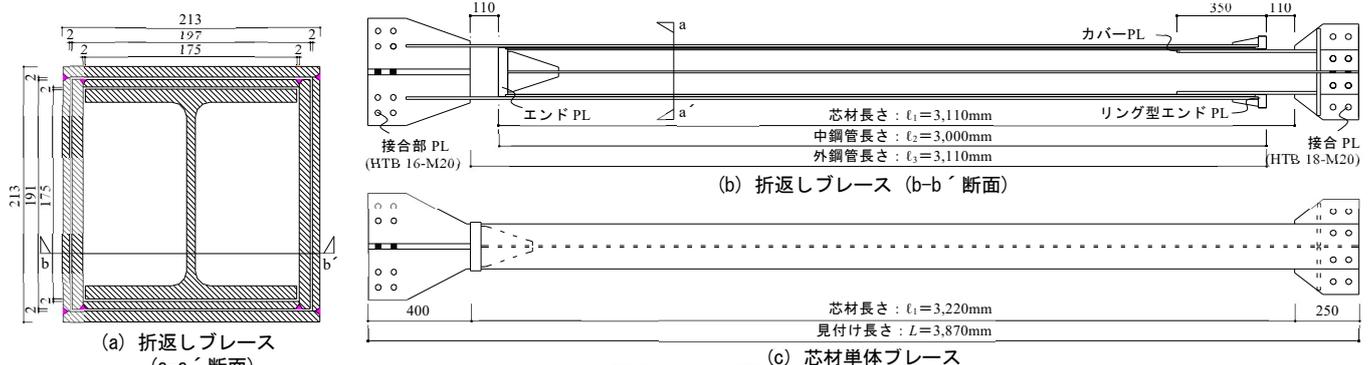


図4 試験体図  
表1 試験体諸元

試験体	断面形状 H-h×B×t <sub>w</sub> ×t <sub>r</sub> □-A×B×t <sub>w</sub> ×t <sub>r</sub>	各鋼材単体							部材全体				
		※1 降伏点	断面積	見付け 長さ	部材 長さ	※2 細長比	軸降伏 耐力	軸剛性	降伏 軸力	軸剛性	軸降伏 変位	降伏時 層間 変形角	
		$\sigma_y$	$A$	$L$	$\ell$	$\lambda$	$N_y$	$K$	$N_y$	$K$	$\delta_y$	$R_y$	
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	-	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm]	[rad]	
(a) 折返し ブレース	芯材	H-175×175×7.5×11.0	308	5,142	3,870	3,110	88	1,583	339	1583	125	12.70	1/206
	中鋼管	□-191×197×9.0×6.0	398	5,586		3,000	54	2,223	382				
	外鋼管	□-213×213×6.0×9.0	398	6,174		3,110	48	2,457	407				
(b) 芯材単体 ブレース	H-175×175×7.5×11.0	308	5,142	3,870	3,220	88	1,583	327	1,583	327	4.83	1/541	

※1: 降伏点は材料引張試験結果。 ※2: 細長比は座屈長さ=見付け長さ(3,870mm)として算出。

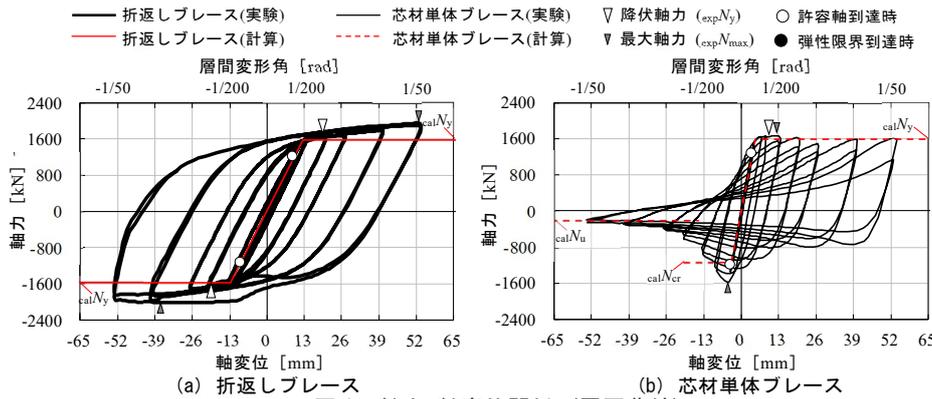


図6 軸力-軸変位関係(履歴曲線)

約1/2.6倍となっている。また、折返しブレースは、芯材単体ブレースに対して許容軸力時の軸変位 $\delta_a$ が約2.6倍に増大していることがわかる。なお、共通の0.03%オフセット変位を含む弾性限界時の軸変位 $\delta_e$ でも約2.3倍に増大し、折返しブレースは圧縮・引張とも $R=1/200\text{rad}$ 程度の変形レベルまで概ね弾性挙動を示している。

以上、ブレース部材の実大実験より、折返しブレースが1章で示した部材構造特性(軸降伏変位の増大と座屈拘束効果)を発揮することが確認された。

### 3. 座屈拘束メカニズムの検討

本章では、折返しブレース特有の座屈拘束メカニズムについて明らかにする。

#### 3.1 座屈拘束メカニズムと限界軸力 $N_c$

a) 検討モデル 1章(図2(b))より、折返しブレースは、ブレース全体に圧縮軸力が作用すると、芯材には圧縮、中鋼管には引張、外鋼管には圧縮といったように各鋼材には同一の軸力が正負反転して作用する。以下では、ブレース全体に圧縮軸力が作用し、芯材(圧縮材)が1次モードで全体座屈しようとするときの中鋼管(拘束材)による座屈拘束メカニズムについて検討する。

座屈拘束メカニズムの検討モデルを図8に示す。図8(a)は、検討モデルの全体図を表している。芯材および中鋼管とも座屈拘束区間 $L$ において一端をピン支持、他

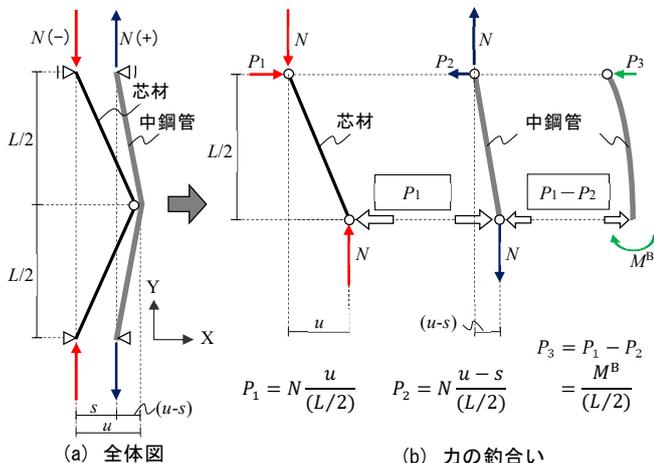


図8 座屈拘束メカニズムの検討モデル

端をローラー支持とする。芯材については、全断面が軸降伏して曲げ

剛性を喪失した状態を仮定し、部材中央( $Y=L/2$ )もピン節点の3ピン構造でモデル化する。中鋼管については、弾性範囲で座屈拘束した状態を仮定し、曲げ剛性を有する単純梁でモデル化する。芯材に圧縮軸力 $N$ が作用すると、部材中央に隙間 $s$ だけ横撓みが生じたところで、芯材が中鋼管に接触する。芯材の撓み量が $u$ のとき、中鋼管には $u-s$ の撓みが生じ、拘束力を発揮する。このとき、中鋼管には引張軸力 $N$ が作用している。図8(b)はその状態の釣合い式を表している。芯材と中鋼管には、式(7a), (7b), (7c)のように水平力( $\sum X=0$ ), 鉛直力( $\sum Y=0$ ), 部材中央曲げモーメント( $\sum M=0$ )の釣合い条件が成立する。

$$\sum X = 0 : P_1 - P_2 - P_3 = 0 \quad (7a)$$

$$\sum Y = 0 : -N + N = 0 \quad (7b)$$

$$\sum M = 0 : -N \cdot u + N \cdot (u - s) + M^B = 0 \quad (7c)$$

ここで、 $P_1$ : 横撓み $u$ の芯材が圧縮軸力で中鋼管を押す力、 $P_2$ : 横撓み $u-s$ の中鋼管が引張軸力で芯材の横撓みを押し戻す力、 $P_3$ : 横撓み $u-s$ の中鋼管が曲げ抵抗で芯材の横撓みを押し戻す力、 $M^B$ : 中鋼管の部材中央における曲げモーメント

図8(b)より、水平力の釣合いに着目すると、まず芯材と中鋼管に隙間が無い理想的な状態( $s=0$ )では、芯材と中鋼管の軸力が一直線上に作用することから、芯材の圧縮軸力で中鋼管を押す水平力 $P_1$ に対して、中鋼管の引張軸力で芯材を押し戻す水平力 $P_2$ が逆向きに作用することで釣合い状態が成立し、折返しブレースは座屈しない。しかし、実際には隙間 $s$ が空いており、前述の $P_1$ と $P_2$ のみでは釣り合わないため、中鋼管の曲げモーメントで芯材を押し戻す水平力 $P_3$ が $P_1$ に対して逆向きに作用することで、釣合い状態が成立する。 $P_1$ と $P_2$ は、いずれも軸力 $N$ を用いて式(8a), (8b)のように表される。また、 $P_3$ は $M^B$ を用いて式(8c)のように表される。

$$P_1 = N \frac{u}{(L/2)}, \quad P_2 = N \frac{u-s}{(L/2)}, \quad P_3 = \frac{M^B}{(L/2)} \quad (8a), (8b), (8c)$$

b) 限界軸力 $N_c$ の誘導 以下では、水平方向( $\sum X=0$ )の釣合い式を展開し、「折返しブレースの芯材が全体座屈



る芯材単体の結果も示しており、中鋼管を有する他の試験体に比べて極めて小さな軸力(最大軸力  $N_{max}=11.1kN$ )で弾性座屈していることがわかる。隙間  $s$  が異なる試験体4体を比較すると、 $N_{0.03}$ ,  $N_{0.2}$ ,  $N_{max}$ ともに隙間  $s$  が小さくなるにつれて大きくなり、前述の式(10)で示した関係が実験で得られていることがわかる。なお、いずれも  $N_{max}$  が芯材降伏軸力( $N_{1y}=74.5kN$ )より十分小さく、意図した通り軸降伏せず限界軸力に達して芯材が全体座屈した。

**d) 中鋼管の曲率分布** 弾性限界時( $N_{0.03}$  到達時)における中鋼管の曲率分布を図13に示す。図13より、各試験体とも縁ひずみ( $\epsilon_{0.03}=1776\mu$ )は同じであるにもかかわらず、隙間  $s$  が小さい試験体ほど曲率が小さくなっていることがわかる。これは、隙間  $s$  が小さいほど中鋼管に作用する曲げモーメントが小さく、負担できる引張軸力が大きくなることを示しており、図12の結果(隙間  $s$  が小さいほど  $N_{0.03}$ ,  $N_{0.2}$  が大きくなったこと)と良く対応している。また、各試験体とも部材中央(iii)の曲率が最も大きく、両端に向かうにつれて小さくなっており、検討モデルと同じ1次モードの変形状態であることがわかる。

**e) 限界軸力  $N_c$  の実験値と計算値の比較** 前述の式(12)の妥当性を確認するため、弾性限界時における限界軸力  $N_c$  の実験値( $N_{0.03}$ )と計算値( $_{0.03}N_c$ )と相関を図14に示す。図14より、隙間  $s$  が異なる試験体4体ともに、実験値と計算値が良く対応していることがわかる。

以上、芯材(圧縮材)と中鋼管(引張材)の関係を模擬した要素実験より、折返しブレース特有の座屈拘束メカニズムに基づく限界軸力  $N_c$  算定式の妥当性が確認された。

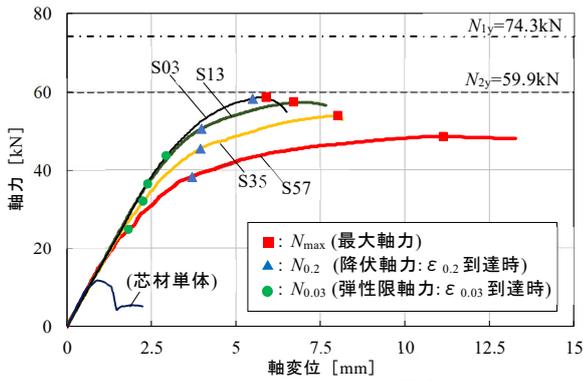


図12 軸力-軸変位関係

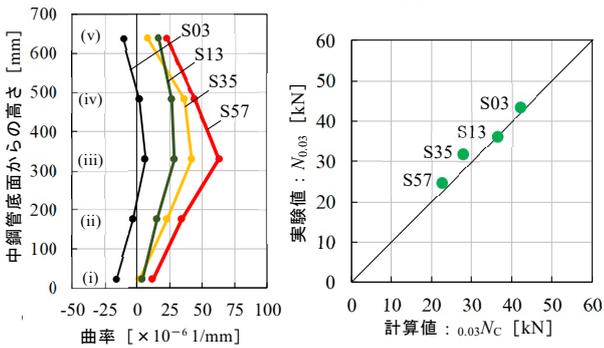


図13 曲率分布 (弾性限界時)

図14 限界軸力  $N_c$  の実験値と計算値と相関(弾性限界時)

4. 建物構造特性に関するケーススタディ

本章では、鉄骨造建物の基本性能が1層1スパンに模擬したバイリニアモデルで把握できるものと仮定して、柱梁フレームの耐力と降伏変形をパラメトリックに変化させたケーススタディを行い、折返しブレース構造の建物構造特性を明らかにする。

4.1 検討方法

まず、1次設計は  $C_1=0.2$  の地震力に対して弾性設計かつ変形制限を  $R_1 \leq 1/200rad$  とし、2次設計は  $R=1/100rad$  時の保有水平耐力  $C_u \geq$  必要保有水平耐力  $C_{un}(=0.25)$  とする。つぎに、柱梁フレームは、降伏層間変形角  $rR_y$  が  $1/150$ ,  $1/125$ ,  $1/100rad$  の3ケースについて、保有水平耐力  $rC_u$  を0から0.40に変化させ、1次または2次設計時においてフレームに不足する耐力をブレースで補う。従来ブレースの降伏層間変形角は  $_{従}bR_y=1/500rad$ 、折返しブレースの降伏層間変形角は  $_{折}bR_y=1/200rad$  とし、いずれも種別BAとする。ここで、フレーム耐力  $rC_u=0.25$  で、 $rR_y$  が  $1/150$ ,  $1/125$ ,  $1/100rad$  のケースについて図15に例示する。従来ブレース耐力  $_{従}bC_u$  は  $R=1/500rad$  でのフレーム負担水平力  $rC_1$  と  $C_1=0.2$  の差として求め、折返しブレース耐力  $_{折}bC_u$  は  $R=1/200rad$  での  $rC_1$  と  $C_1$  の差として求める。

4.2 検討結果

フレーム耐力  $rC_u$  とブレース耐力の関係を図16に示す。(a)が従来ブレース耐力  $_{従}bC_u$ 、(b)が折返しブレース耐力  $_{折}bC_u$ 、(c)がブレース耐力比  $_{折}bC_u/_{従}bC_u$  である。(a)と(b)中の  $rC_u=0.25$  における  $_{従}bC_u$  の値は、図15中の  $_{従}bC_u$  と対応している。 $_{従}bC_u+rC_u=0.25$  の黒の実線は2次設計( $C_{un}=0.25$ )で決まるブレース耐力を示している。まず、(a)の従来ブレース構造は、 $rC_u \geq 0.072$  の領域で  $_{従}bC_u$  が1次設計により決定される。その後  $rC_u$  の増加に伴い  $_{従}bC_u$  は減少していくが、1次設計時のフレーム負担水平力  $rC_1$  が  $1/200rad$  で0.2となる  $rC_u$  ( $rR_y=1/150rad$ :  $rC_u=0.27$ ,  $rR_y=1/125rad$ :  $rC_u=0.32$ ,  $rR_y=1/100rad$ :  $rC_u=0.40$ )で、いずれの  $rR_y$  であっても  $_{従}bC_u$  は0.12となる。すなわち、従来ブレース構造は、フレームが1次設計の変形制限を僅かに満たさないだけでも、 $_{従}bC_u=0.12$  のブレースが必要となることを示している((a)中の一点破線)。一方、(b)の折返しブレース構造は、 $rR_y=1/150rad$ :  $rC_u \geq 0.20$ ,  $rR_y=1/125rad$ :  $rC_u \geq 0.13$ ,  $rR_y=1/100rad$ :  $rC_u \geq 0.10$  の領域で  $_{折}bC_u$  が1次設計により決定される。その後、 $rC_u$  の増加に伴い  $_{従}bC_u$  は

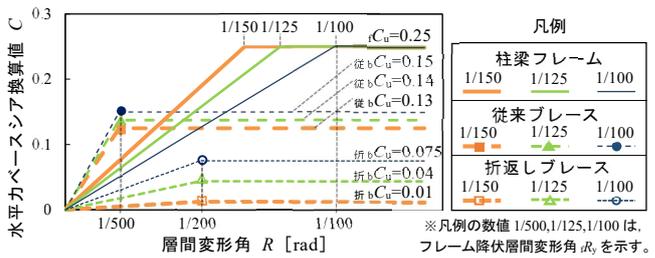


図15 フレーム耐力  $rC_u=0.25$  のケースの例示

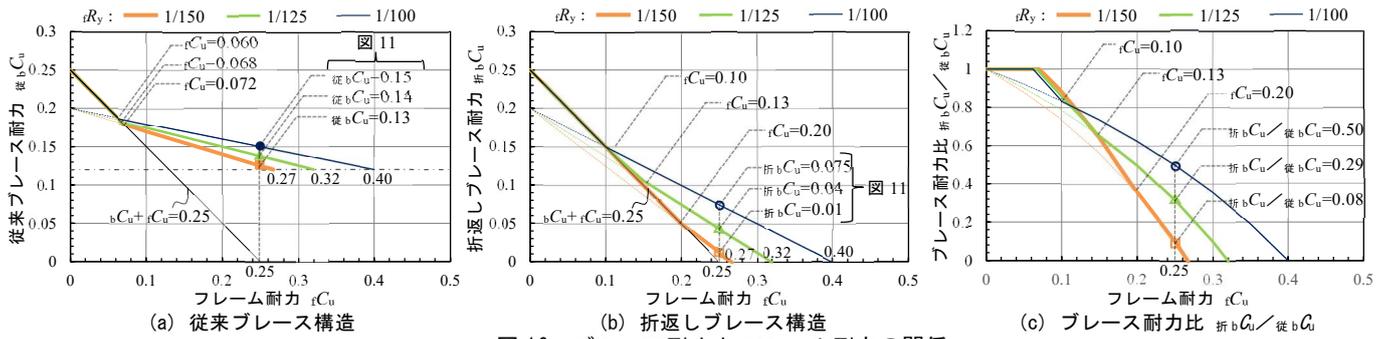


図 16 ブレース耐力とフレーム耐力の関係

0 まで連続的に減少していく。すなわち、折返しブレース構造では、フレームが 1 次設計の変形制限を僅かでも満たさない場合には、その不足分のみを負担するブレースを設置すれば良い。(c)のブレース耐力比  $\frac{\text{折}bC_u}{\text{従}bC_u}$  をみると、およそ  $r_{Cu}=0.07$  以下の領域ではブレース耐力が 2 次設計で決まるため  $\frac{\text{折}bC_u}{\text{従}bC_u}=1.0$  であるが、 $r_{Cu}$  の増加に伴い  $\frac{\text{折}bC_u}{\text{従}bC_u}$  が顕著に減少し、少量配置が可能となることがわかる(例えば  $r_{Cu}=0.25$  のとき  $\frac{\text{折}bC_u}{\text{従}bC_u}=0.08 \sim 0.50$ )。また、折返しブレースの実長は見付け長さの約 2.5 倍であるため、同一耐力(耐力比 1.0)である従来ブレースの剛性より  $1/2.5(=0.4)$  倍小さくなる。すなわち、(c)のブレース耐力比を 0.4 倍した値がブレース剛性比であり、折返しブレースの軸剛性は従来ブレースに比べ極めて小さく、偏心配置が可能となることもわかる。

以上、建物構造特性に関するケーススタディより、折返しブレース構造の構造計画上の優位性が確認された。

## 5. 実建物への適用と効果の確認

本章では、実際の 8 階建て鉄骨造事務所ビル新築工事に折返しブレースを適用し、その効果を確認することで、折返しブレースの実用的価値を明らかにする。

### 5.1 建物概要

a) 構造計画 建物概要を表 4 に、外観写真を写真 1 に示す。また、折返しブレースの配置を示した平面図を図 17 に、軸組図を図 18 に示す。一般的にブレース構造を検討する際、外観や機能面からブレースの配置箇所は制約を受ける場合が多い。本建物においても制約が多く、XY 方向ともブレースの配置可能な箇所が少ない。特に X 方向は、D 通り 1 箇所のみ偏心配置とせざるを得ず、応力集中やねじれの問題から、従来であればブレース構

造を断念していた。しかし、少量かつ偏心配置が可能な折返しブレースを採用することで、従来ブレース構造では成し得ないブレース配置を実現している。

b) 折返しブレースの設計 折返しブレースの諸元(一例)を表 5 に示す。偏心への配慮や支点反力の観点から、ブレースの負担が過度にならないように、ブレースの耐力は、1 次設計時の水平力分担率がブレース 1 スパンあたり 20%程度となるように設定した。芯材の座屈判定は、前述の式(12)を、文献 5)に準拠して隙間  $s$  を 2 倍(=両側合計の隙間)にするとともに、元たわみ  $a(=L/2000)$  を考慮した式(13)を用いた。中鋼管は、式(13)に外鋼管の特性値を代入することで座屈判定

し、外鋼管については外鋼管単体の座屈耐力が式(13)の右边を上回るように設計した。

表 4 建物概要

構造種別	鉄骨造
用途	事務所
階数	地上 8 階
架構形式	ブレース付き
基準階階高	3.64m
軒高	31.38m
建築面積	558m <sup>2</sup>
延床面積	3,267m <sup>2</sup>
基礎構造	杭基礎
床構造	合成デッキ
外壁	金属パネル



写真 1 外観写真

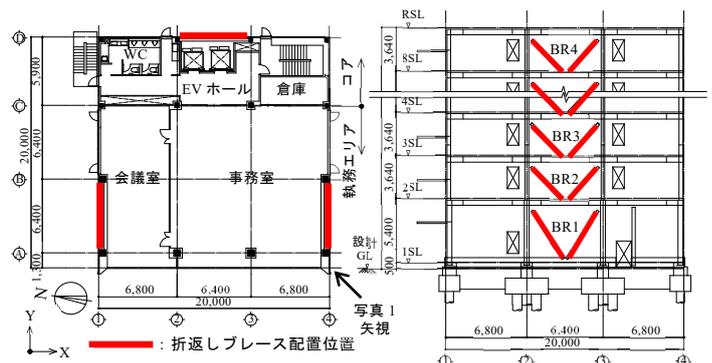


図 17 基準階平面図

図 18 軸組図(D 通り)

表 5 実建物に適用した折返しブレースの諸元(一例)

部材	鋼種	断面形状	各鋼材単体											折返しブレース(全体)				
			断面積 $A_{1,2,3}$ [mm <sup>2</sup> ]	見付け長さ $L$ [mm]	部材長さ $L_1, L_2, L_3$ [mm]	基準強度 F値 [N/mm <sup>2</sup> ]	※2 細長比 $\lambda$	単体の短期許容軸力 $N_y$		断面係数 $Z^B$ [cm <sup>3</sup> ]	曲げ耐力 $M^{By}(0)$ [kN·m]	※3 隙間 $s$ [mm]	限界軸力 $N_{1c}, N_{2c}$ [kN]	外鋼管の座屈荷重 $N_{3c}$ [kN]	ブレース材の短期許容軸力 $N_y$		座屈拘束安全率 $\min N_c / N_y$	
								引張 [kN]	圧縮 [kN]						引張 [kN]	圧縮 [kN]		
BR1 (1階)	芯材	SN400B	H-200x200x8x12	6,353	4,473	3,969	235	90	1,493	924	—	—	3.0	2,256	—	1,493	1,493	1.51
	中鋼管	BCR295	□-250x250x9	8,398	—	3,673	295	46	2,477	2,120	639	188,505	3.0	2,785	—			
	外鋼管	—	□-300x300x9	10,200	—	4,178	295	38	3,009	2,705	946	279,070	—	—	2,857			
BR4 (5~8階)	芯材	SN400B	H-125x125x6.5x9	2,982	3,454	3,064	235	111	701	—	—	—	3.0	1,230	—	701	701	1.48
	中鋼管	BCR295	□-150x150x9	4,798	—	2,819	295	62	1,415	—	205	60,475	3.0	10,355	—			
	外鋼管	—	□-175x175x6	3,932	—	3,214	295	51	1,160	958	210	61,950	—	—	10,544			

※1:見付け長さ=両端接合部のボルト中心間距離

※2:座屈長さ=見付け長さとして算出

※3:鋼板スパーサーを用いて隙間を設計値とする

$$N_{1c} = \frac{M_{2y(0)}^B}{(2 \cdot s + M_{2y(0)}^B / N_{2y}^B)} \geq \alpha \cdot N_{1y} \quad (13)$$

ここで、 $N_{1c}$ ：芯材が全体座屈しない限界軸力、 $s$ ：芯材と中鋼管の隙間、 $M_{2y(N_c)}^B$ ：中鋼管の降伏軸力、 $M_{2y(0)}^B$ ：中鋼管の降伏曲げモーメント(軸力  $N=0$ )、 $a$ ：元たわみ( $=L/2000$ )、 $\alpha$ ：安全率( $=1.3$ )、 $N_{1y}$ ：芯材の降伏軸力(=短期許容軸力)

## 5.2 建物の耐震性能(X方向の荷重増分解析結果)

X方向の層せん断力  $Q$ -層間変形角関係  $R$ を図19に示す。(a)は建物全体を示し、(b)は2層部分のフレームと折返しブレースの負担せん断力を分離して示している。折返しブレース降伏時の層間変形角は $R=1/200\text{rad}$ 程度であり、フレームのみで不足する耐力と剛性を折返しブレースにより効率よく補うことで、1次設計時( $C_0=0.2$ )からフレームの耐力が有効に発揮される合理的なブレース構造が実現していることがわかる。従来ブレース構造では、早期に降伏するブレースへの応力集中と断面変更の収斂計算を行う必要があった。しかし、折返しブレースを適用することで、ブレース少量配置が可能となり、収斂計算せずとも意図した通りに20%程度の耐力を付加できた。

## 5.3 折返しブレース構造の適用効果(鋼材量の比較)

同等の保有水平耐力を有する純ラーメン構造を設計し、建物全体の総鋼材量の比較した結果を図20に示す。図より、折返しブレース構造は純ラーメン構造に比べて総鋼材量が約20%低減している。すなわち、純ラーメン構造はフレームの曲げ・せん断力で剛性や耐力を確保するために大きな柱梁断面を必要とするのに対して、折返しブレース構造はフレームに不足する剛性や耐力を少量のブレースによって効率よく補うため、柱梁断面を小さくでき、総鋼材量を低減できることが確認された。

## 5.4 折返しブレースの製作と施工

折返しブレースの製作状況を写真2に、建方状況を写真3に示す。折返しブレースは、特殊な鋼材や溶接を用いないため、製作は特殊な技術を必要とせず、JASS6<sup>6)</sup>等の標準的な仕様に準じて製作管理できることが確認された。また、折返しブレースとフレームの接合部は、従来ブレースと同様の高力ボルト摩擦接合であり、建方にも特殊性は無く容易に施工できることが確認された。

## 5.5 実建物に採用した折返しブレースの構造実験

a) 試験体と加力装置 実建物の骨組写真を写真4に、骨組の詳細を図21に、加力装置を図22に示す。試験体は、前述した8階建て鉄骨造ビルの5階で使用される折返しブレース(表5のBR4)であり、従来ブレースに対して

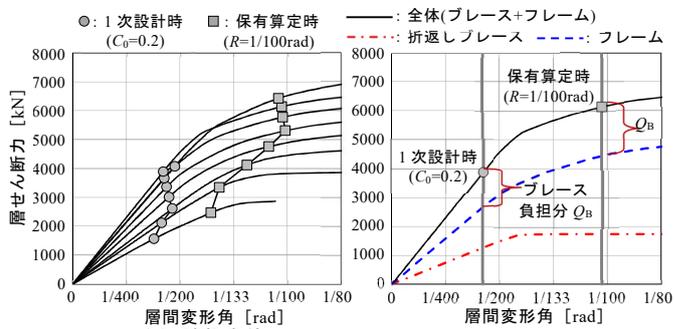


図19 層せん断力  $Q$ -層間変形角  $R$ 関係

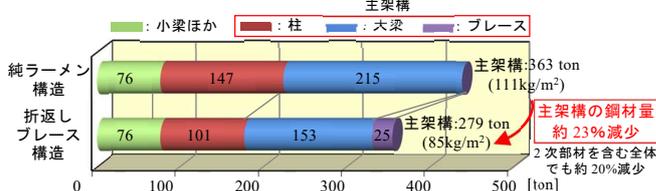


図20 総鋼材量の比較



写真2 製作状況



写真3 建方状況



写真4 骨組写真

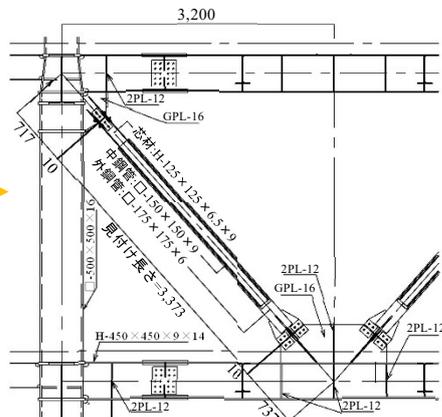


図21 骨組詳細

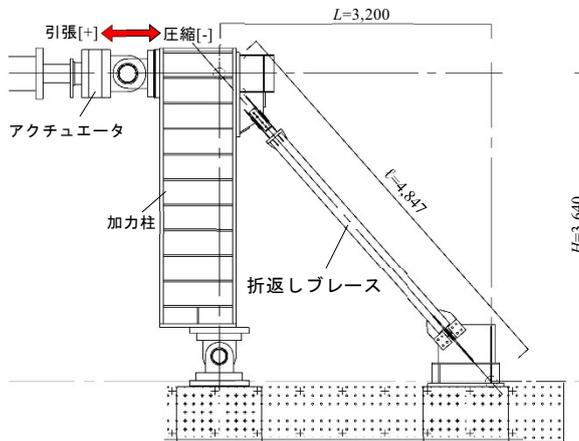


図22 加力装置

軸降伏変位が約 2.3 倍増大する設計となっている。芯材の細長比は 108 であり、芯材単体では種別 BC に相当する。本実験では、実際の架構に組込んだ状態における構造性能を確認するため、階高  $H(3.64\text{m})$ 、スパン  $L(3.2\text{m})$ 、取付け角度  $\theta$  および取付け部材(ガセットプレート)は実建物を再現し、脚部ピンの加力柱を介して、柱頂部に取付けたアクチュエータによって試験体に加力する。

**b) 加力計画** 折返しブレースは、軸降伏変位の増大効果を有する種別 BA のブレースとして扱うため、設計時に想定する構造性能として、i)短期許容応力度設計時の軸変位の増大、ii)軸剛性が鋼材 3 本の直列剛性で算定できる、iii)圧縮耐力を引張耐力と同値にできる、iv)保有水平耐力算定時( $R=1/100\text{rad}$ )を超える大変形下でも安定した挙動を示すことなどが挙げられる。これらの構造性能を確認するため、加力サイクルは、弾性限軸変位  $\delta_{el}=10\text{mm}$  ( $\mu=1.0$ )を基準とした変位制御で正負交番载荷とする。まず、塑性率  $\mu=1.0\sim 2.0$  に相当する軸変位を各 2 サイクル行い、次に  $\mu=2.5$  において 1 サイクル加力した後、加力柱の先端を 36.4mm 持ち上げて、 $R=1/100\text{rad}$  に相当する面外強制変形を与えた状態で 2 サイクル加力し、元に戻して 1 サイクル加力する。その後、試験体が破壊するまで  $\mu=3.0$  で加力を繰り返す。加力方向は引張側を正とし、計測項目は 2 章(実大実験)と同じである。

**c) 実験結果(軸力-軸変位関係)** 実験で得られた軸力-軸変位関係を図 23 に示す。図中には、折返しブレースおよび芯材単体ブレースの骨格曲線の設計値を合わせて示している( $N_y$  は材料引張試験に基づく降伏軸力)。図より、折返しブレースは、軸剛性が引張・圧縮ともに設計値と良く一致し、短期許容軸力到達時の軸変位が芯材単体に比べて約 2.3 倍に増大していることがわかる。また、折返しブレースは、圧縮時も全体座屈せず引張耐力と同等の圧縮耐力を発揮し、軸変位  $\pm 30\text{mm}$  ( $\mu=3.0:R=1/75\text{rad}$  相当)の大変形を多数回繰り返しても安定した紡錘型の履歴形状を示した。面外変形の有無で履歴形状に有意差は見られず、 $R=1/100\text{rad}$  相当の面外変形を与えた状態でも所定の構造性能を発揮した。最終的には、軸変位  $\pm 30\text{mm}$  ( $\mu=3.0$ )の 14 サイクル目の圧縮ピーク時において、

繰返し加力の影響により短期許容軸力の約 1.7 倍まで荷重上昇し、高力ボルト摩擦接合部にすべりが発生したため、実験を終了した。以上より、折返しブレースは前述の構造性能 i)~iv)を十分に満足することが確認された。

## 6. 結論

本論文では、軸降伏変位が増大することで  $R=1/200\text{rad}$  程度まで降伏しない折返しブレースの「部材構造特性」と、それを鉄骨造建物に設置した「建物構造特性」を明確に示すことで、より合理的なブレース構造の設計を可能とする新たな手段を提示した。各章の結論を以下に示す。

- 1) 2 章の実大実験より、折返しブレースは、芯材単体ブレースに比べて軸降伏変位が約 2.6 倍に増大し、 $R=1/200\text{rad}$  程度の変形レベルまで弾性挙動を示した。また、座屈拘束効果により引張耐力と同等の圧縮耐力を発揮し、全体座屈する事なく  $R=1/50\text{rad}$  の変形レベルまで安定した紡錘型の履歴を示したことから、折返しブレースの部材構造特性が明確となった。
- 2) 3 章では、芯材(圧縮材)の全体座屈を中鋼管(引張材)が拘束する座屈拘束メカニズムについて検討し、「全体座屈しない軸力の限界値(限界軸力  $N_c$ )」の算定式を誘導した。さらに、芯材と中鋼管の関係を模擬した要素実験の結果、実験値と計算値が良く対応し、限界軸力  $N_c$  算定式の妥当性が確認されたことから、折返しブレース特有の座屈拘束メカニズムが明確となった。
- 3) 4 章では、1 層 1 スパンに模擬したケーススタディにより鉄骨造の建物構造特性を検討した結果、折返しブレース構造がブレース少量・偏心配置できることを定量的に示し、構造計画上の優位性が明確となった。
- 4) 5 章では、鉄骨造実建物に折返しブレースを適用し、その効果を確認した。結果、従来ブレースでは不可能なブレース配置(少量かつ偏心配置)が成立すること、同等の保有耐力を有する純ラーメン構造に比べて総鋼材量が約 20%低減することが確認された。また、適用した実部材の製作や施工が容易であること、構造実験により設計通りの性能を有することも確認され、折返しブレースの実用的価値が明確となった。

【日本大学リポジトリ】

URI : <http://repository.nihon-u.ac.jp/xmlui/handle/11263/1696>

【参考文献】

- 1) 内田直樹, 福田俊文, 清水敬三, 高橋泰彦, 大越俊男, 福田豊: 最近のブレース工法, 建築技術, No. 481, pp.101-141, 1991.4
- 2) 波田, 北嶋ほか: 折返し部材のブレース材適用の有効性に関する検討, その 1~その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造-III, pp.975-976, 2010.7, pp.861-862, 2011.7
- 3) 波田, 北嶋ほか: 折返しブレースの構造特性に関する実験的研究(その 1~7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.747-750, 2012, pp.1287-1292, 2013, pp.1051-1052, 2014, pp.1077-1078, 2015
- 4) 日本機械学会: 機械工学便覧, A4(材料力学), pp.137-138, 1989.9
- 5) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, 2009.11
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 JASS 6 鉄骨工事, 2018.1

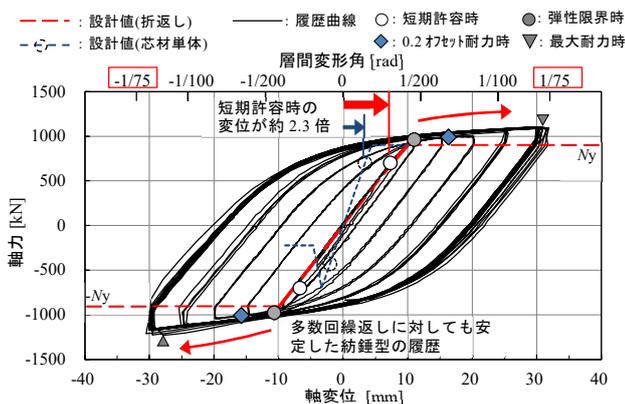


図 23 軸力-軸変位関係(履歴曲線)