

5. 層間変形角 $1/200 \text{ rad.}$ まで降伏しない“折返しブレース”の適用事例

Application of “Folded Brace” Not Yielding at an Inter-Story Drift Angle of Less Than $1/200 \text{ rad.}$

波田雅也* 村井克綺** 竹内健一*** 北嶋圭二****

ー概要ー

筆者らは、折返し方式でブレースの弾性範囲を広くし、1次設計の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降伏しない“折返しブレース”を考案した。折返しブレースを鉄骨造建物に用いることで、1次設計レベルから柱梁フレーム耐力が有効に発揮されるためブレースの少量配置が可能となり、剛性制御・耐力制御の観点から合理的なブレース構造が実現する。

本報では、折返しブレースの概要と実建物への適用事例を示すとともに、実建物で採用した折返しブレースに対して行った構造実験の結果について示す。

ー技術的な特長ー

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）を一筆書きの要領で折り返し接合して1本のブレース材とすることで、実際の部材長さが見掛け長さ（ L ）の約2.5倍（ $2.5L$ ）となるブレース材である（図1）。部材長さの増大に伴う「軸降伏変位の増大効果」によって $R=1/200 \text{ rad.}$ 程度まで降伏しないという特長があるとともに、「座屈拘束効果」によって引張耐力と同等の圧縮耐力が発揮されるため、種別BAの耐震ブレースとして扱うことができる（図2、図3）。

実建物への適用事例より、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でも、同等性能の純ラーメン構造に比べて総鋼材量を約20%削減でき、製作・建方に特殊性が無く容易に施工可能であることを確認した（写真1）。また、実建物に採用した折返しブレースに対する構造実験の結果、所定の構造性能（軸降伏変位の増大効果、座屈拘束効果）を発揮することを確認した（図4）。

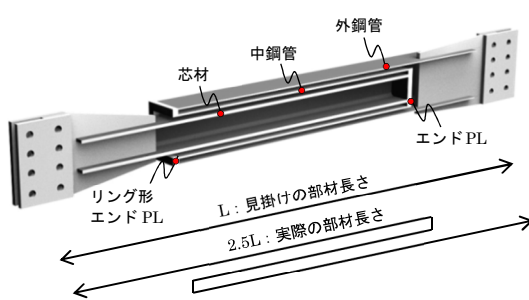


図1 折返しブレースの断面パース

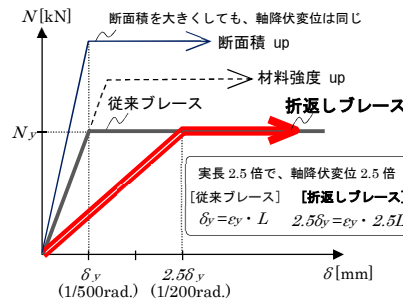


図2 軸降伏変位の増大効果

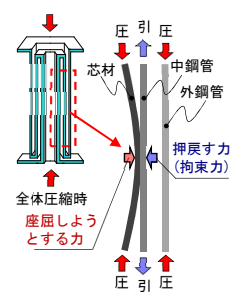


図3 座屈拘束効果



写真1 折返しブレースの建方状況

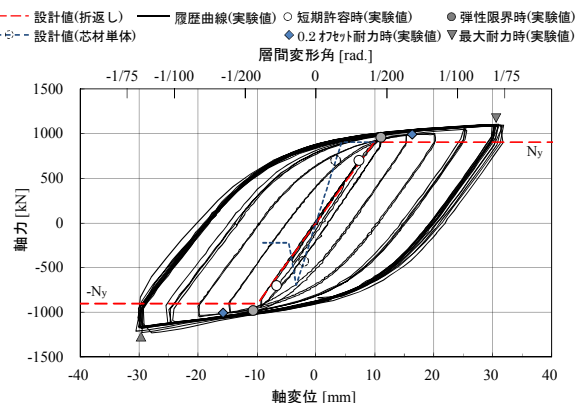


図4 構造実験結果（軸力-軸変位関係）

※本報の内容は、日本建築学会技術報告集（第23巻、第55号、885-890、2017.10）にて発表済みである。

*技術研究所耐震リニューアル研究室 **技術研究所建築研究室 ***東京建築本店設計部 ****日本大学

層間変形角 $1/200$ rad. まで降伏しない“折返しブレース”の適用事例 Application of “Folded Brace” Not Yield at an Inter-Story Drift Angle of Less Than $1/200$ rad.

○波田 雅也* 村井 克綺** 竹内 健一*** 北嶋 圭二****
Masaya HADA Katsuki MURAI Kenichi TAKEUCHI Keiji KITAJIMA

ABSTRACT The authors developed a “twice-turned brace” that would not yield at an inter-story drift angle of less than $1/200$ rad. Using twice-turned braces enables the arrangement of fewer braces and one-sided arrangement of braces. A rational brace structure is thus realized. This paper outlines the twice-turned brace. Also, described an example of application of actual building using twice-turned braces. Furthermore, described the structure experiment of twice-turned braces using an actual building.

Keywords: 鉄骨造, ブレース構造, 超弾性, 降伏変位, 座屈拘束, 剛性制御, 変位制御, 実大実験
Steel Building, Brace Structure, Super-Elastic, Yield Displacement, Buckling Restrained, Stiffness Control, Drift Control, Full Scale Test

1. はじめに

鉄骨造建物では、主要な水平抵抗要素としてブレースが広く用いられている。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が確保できるため、合理的かつ経済的な設計を志向できる¹⁾。しかし、一般的な鉄骨造において、従来のブレース構造では、柱梁の曲げ・せん断力で水平力に抵抗する柱梁フレームの剛性に比べ、軸力で抵抗するブレースの剛性が極めて大きくなる。また、ブレースの軸降伏変位は小さく、層間変形角 $R=1/500$ rad. 程度の変形で早期に降伏(または座屈)することが避けられない。そのため、部材の降伏を許容しない1次設計レベルではフレームの耐力が十分に発揮されず、水平力の大部分をブレースが負担しなければならない。したがって、従来のブレース構造はブレースを多量に配置する必要があり、建物の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場合は、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ケースが多い。この問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¹⁾。

そこで筆者らは、折返し方式を用いてブレースの弾性範囲を広くし、1次設計の変形制限である $R=1/200$ rad. 程度の変形レベルまで降伏しない“折返しブレース”を考案した^{2)~4)}。折返しブレースを用いることで1次設計レベルからフレーム耐力が有効に発揮されるため、ブレースの少量配置が可能となり、剛性制御・耐力制御の観点から合理的なブレース構造が実現する。

本報では、折返しブレースの概要と実建物への適用事例を示すとともに、実建物で採用した折返しブレースの構造実験について示す。

2. 折返しブレースの概要

2.1 折返しブレースの部材構成

折返しブレースの断面パースを図1に示す。折返しブレースとは、断面が異なる3本の鋼材

*技術研究所 耐震リニューアル研究室

**技術研究所 建築研究室

***東京建築本店 設計部

****日本大学 教授

※本報の内容は、日本建築学会技術報告集(第23巻,第55号,885-890,2017.10)にて発表済みである。

(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互いに接合することにより、実際の部材長さを見掛けの部材長さ(L)の約2.5倍($2.5L$)に長くしたブレースである。

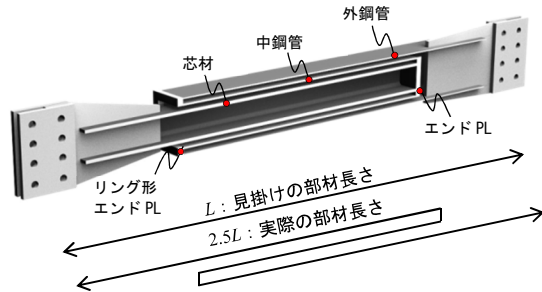


図1 折返しブレースの断面パース

2.2 折返しブレースの構造性能

折返しブレースは、軸降伏変位の増大効果と座屈拘束効果の2つの構造性能を有している。まず、折返しブレースの軸力-軸変位関係の概念図を従来ブレースと比較して図2に示す。従来ブレースの断面積を大きくすると、軸剛性と軸耐力は断面積に比例して大きくなる。しかし、軸降伏変位は降伏ひずみと部材長さの積で決まるため、材料強度を大きくしない限り変化しない。一方、折返しブレースでは、実際の部材長さが見掛けの部材長さ(L)の2.5倍($2.5L$)であるため、軸降伏変位が2.5倍に増大する。すなわち、普通鋼の材料強度でも折返し長さや折返し回数を変えることで軸降伏変位を任意に設定できる。これにより、 $R=1/200\text{rad}$ 程度まで降伏しないブレースが実現する。また、座屈拘束効果の概念図を図3に示す。折返しブレースは、部材全体に圧縮荷重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、隣り合う鋼材の軸力が圧縮と引張で常に反転するため、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⁴⁾。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⁵⁾。

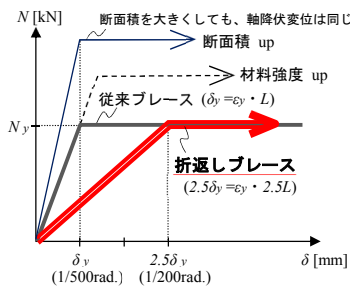


図2 軸力-軸変位関係の概念図

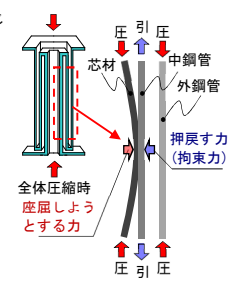


図3 座屈拘束効果の概念図

2.3 折返しブレースの適用効果

鉄骨造建物の層せん断力 Q -層間変形角 R 関係を模擬した構造基本特性の概念図を図4に示す。まず、(a)の従来ブレース構造では、 $R=1/500\text{rad}$ 程度の小さな変形でブレースが降伏するため、部材の降伏を許容しない1次設計レベルにおいて水平力がブレースに集中し、フレーム耐力が十分に発揮されない。一方、(b)の折返しブレース構造では、 $R=1/200\text{rad}$ までブレースが降伏しないため、1次設計レベルでフレームに不足する耐力分のみを、少量のブレース耐力によって効率良く補うことができる。また、折返しブレースの軸剛性は、部材長さに反比例し、従来ブレースの $1/2.5$ 程度と小さいため、平面的に偏心配置してもねじれが生じにくい。すなわち、弾性範囲の広い折返しブレースを採用することにより、従来ブレースでは成し得ないブレース材の少量配置や偏心配置が可能となり、フレーム耐力を有効に発揮させた合理的なブレース構造が実現する。

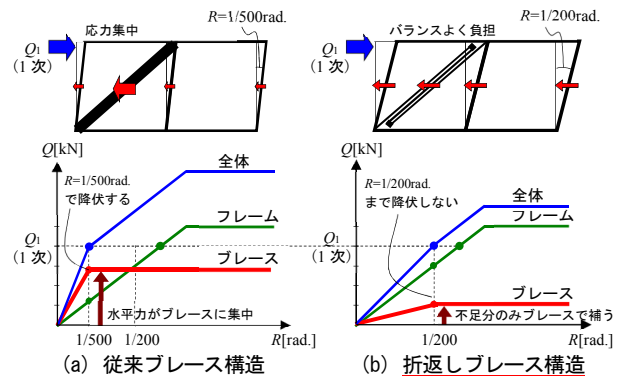


図4 構造基本特性の概念図

3. 実建物への適用事例

本章では、8階建ての鉄骨造事務所ビル新築工事に折返しブレースを適用した事例について示す。

3.1 建物概要と構造計画

建物概要を表1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5に、軸組図を図6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箇所のみの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

表1 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	ブレース付きラーメン構造
基準階階高	3.64m
軒高	31.38m
建築面積	558m ²
延床面積	3,267m ²
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

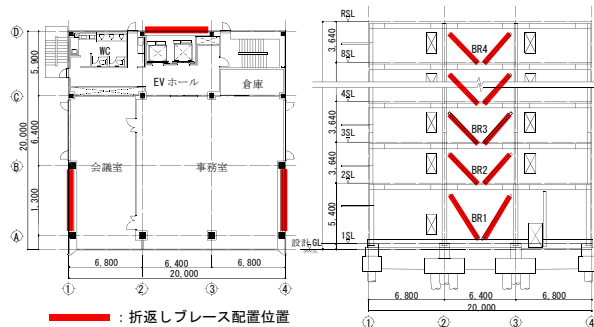


図5 基準階平面図

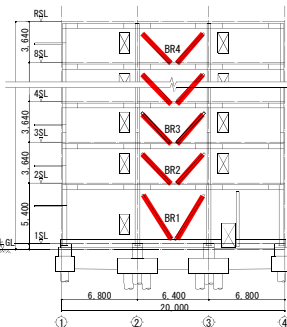


図6 軸組図(D通り)

表2 折返しブレースの諸元(一例)

符号		各鋼材単体												折返しブレース(全体)				
		鋼種	断面形状	断面積 A [mm ²]	※1 見掛け 長さa [mm]	部材 長さ L [mm]	F値 [N/mm ²]	※2 細長比 λ	単体の短期 許容軸力 [kN]		断面 係数 Z ^B [cm ³]	曲げ 耐力 M ^{B_y(0)} [kN・mm]	※3 隙間 ^s [mm]	座屈荷重 の推定値 N _c [kN]	外鋼管 単体の座 屈荷重N _c [kN]	ブレース材の短期 許容軸力 [kN]		座屈拘束 安全率 m=N _c /N _{y1} [kN]
									引張 N _y	圧縮						引張 N _y	圧縮	
BR1	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			
BR2	芯材	SN400B	H-175x175x7.5x11	5,093	3,180	2,685	235	73	1,197	875	—	—	3.0	1,766	—	1,197	1,197	1.32
	中鋼管	BCR295	□-200x200x9	6,598		2,400	295	42	1,946	1,709	399	117,705	3.0	1,576	—			
	外鋼管	—	□-250x250x6	5,763		2,895	295	33	1,700	1,569	454	133,930	—	—	1,635			

※1: 見掛け長さは両端接合部のボルト中心間距離

※2: 座屈長さは見掛け長さとして算出

※3: 鋼板スパーサーを用いて隙間を設計値とする

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。

3.2 折返しブレースの設計

折返しブレースの諸元(一例)を表2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。断面構成は、芯材をH形鋼、中鋼管と外鋼管を角形鋼管とし、耐力が芯材で決定するように中鋼管と外鋼管を設計した。詳細図は後述する図12に示す。軸剛性は式(1)、座屈判定は式(2)を用いた。式(2)により、芯材の全体座屈を拘束する中鋼管、中鋼管の全体座屈を拘束する外鋼管の限界軸力をそれぞれ算定した⁴⁾。なお外鋼管は、外鋼管単体の座屈荷重が式(2)の右边を上回るように設計した(表2)。

$$K = 1 / \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \right) \quad \cdots (1)$$

ここで、

K: ブレース全体の軸剛性 K₁: 芯材の軸剛性 K₂: 中鋼管の軸剛性 K₃: 外鋼管の軸剛性

$$N_c = M_{y(0)}^B / \left(s + a + \frac{M_{y(0)}^B}{N_y^B} \right) \geq \alpha \cdot N_{y1} \quad \cdots (2)$$

ここで、

N_c: 全体座屈を拘束できる限界軸力 M_{y(0)}^B: 拘束材の降伏モーメント(N=0) s: 隙間

N_y^B: 拘束材の軸降伏耐力 a: 元撓み(=L/1000) α: 安全率(=1.3) N_{y1}: 芯材の軸降伏耐力

3.3 建物の耐震性能(X方向の荷重増分解析結果)

3.3.1 水平力分担率、偏心配置の影響

X方向加力時の1次設計時(C₀=0.2)および保有水平耐力算定時(1/100rad.)のフレームと折返しブレースの水平力分担率を表3に示す。従来ブレース構造では、ブレース降伏時の層間変形角が小さく、1次設計時のブレース水平力分担率が大き

くなるため、ブレースの少量配置が困難であり、またブレース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、折返しブレース構造では、軸降伏変位の増大効果により1次設計レベルの層間変形角でブレースが降伏しないため、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。また、1次設計時と保有水平耐力算定時でブレースの負担割合に大きな差は生じていない。重心位置、A通り節点、D通り(ブレース配置)節点の3点について、1次設計時($C_0=0.2$)および保有水平耐力算定時($R=1/100\text{rad.}$)における各階の層間変形角を図7に示す。X方向はブレースを偏心配置しているにも拘らず、1次設計時には3点の変位差が殆ど無く、ねじれが生じていない。また、保有水平耐力算定時には変位差がやや大きくなるが、その差は10%程度であり、偏心配置の影響は小さいといえる。

表3 水平力分担率

階	1次設計時 ($C_0=0.2$)		保有水平耐力 算定時($R=1/100$)	
	フレーム [%]	折返し ブレース [%]	フレーム [%]	折返し ブレース [%]
8F	83.0	17.0	82.4	17.6
7F	80.2	19.8	80.4	19.6
6F	79.2	20.8	78.0	22.0
5F	80.0	20.0	78.7	21.3
4F	76.0	24.0	74.8	25.2
3F	75.7	24.3	76.7	23.3
2F	67.8	32.2	71.8	28.2
1F	72.7	27.3	76.9	23.1

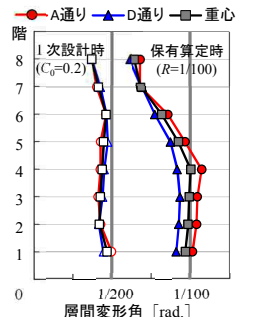


図7 通り毎の層間変形角

3.3.2 保有水平耐力、層せん断力-層間変形角関係

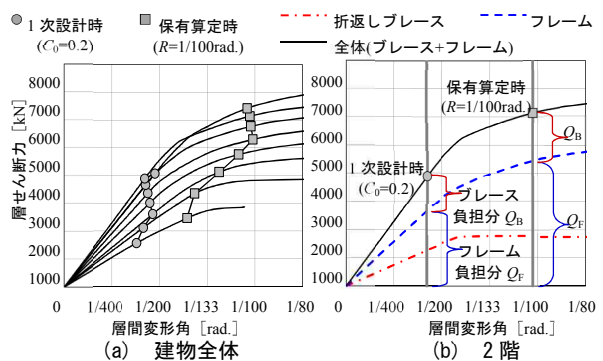
X方向正加力時の保有水平耐力を表4に示す。折返しブレースは靱性能に優れる種別BAのブレースであるため、 D_s は下限の0.25に、また、偏心配置してもねじれが殆ど生じていないため、 F_{es} は1.0になり、必要保有水平耐力が最小限に抑えられている。増分解析結果の層せん断力 Q -層間変形角関係 R を図8に示す。(a)は建物全体を示し、(b)は2層部分のフレームと折返しブレースの負担せん断力を分離して示している。折返しブレース降伏時の層間変形角は $R=1/200\text{rad.}$ 程度

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されている。

表4 必要保有水平耐力と保有水平耐力の比較

階	Q_{ud} [kN]	D_s	F_{es}	Q_{un} [kN]	Q_u [kN]	Q_u/Q_{un}
8F	7,815	0.25	1.00	1,954	2,421	1.24
7F	10,602	0.25	1.00	2,651	3,284	1.24
6F	13,051	0.25	1.00	3,263	4,043	1.24
5F	15,060	0.25	1.00	3,765	4,665	1.24
4F	16,795	0.25	1.00	4,199	5,203	1.24
3F	18,288	0.25	1.00	4,572	5,665	1.24
2F	19,446	0.25	1.00	4,862	6,024	1.24
1F	20,345	0.25	1.00	5,086	6,302	1.24

Q_{ud} : $C_0=1.0$ 時の水平力 D_s : 構造特性係数 F_{es} : 形状特性を表す数値
 Q_{un} : 必要保有水平耐力 Q_u : 保有水平耐力


 図8 層せん断力 Q -層間変形角 R 関係

3.4 使用鋼材量の検討

折返しブレースの有効性を確認するために、同等の保有水平耐力を有する純ラーメン構造を設計し、建物全体の鋼材量の比較を行った。総鋼材量の比較を図9に示す。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20%程度低減している。すなわち、純ラーメン構造ではフレームの曲げ・せん断力のみ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では、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ことで、柱梁断面を小さく抑えることがで

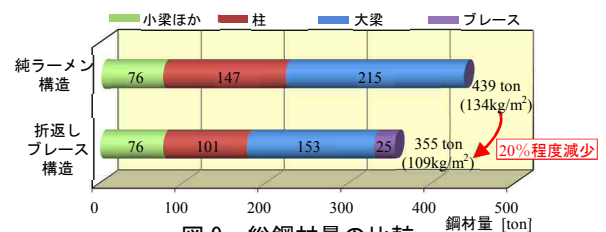
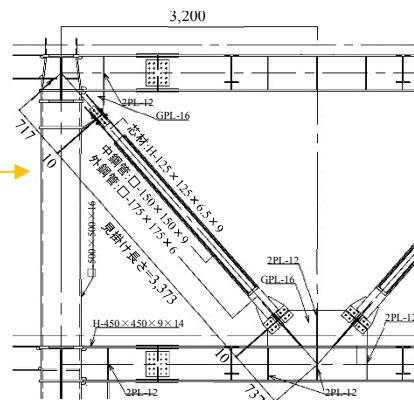


図9 総鋼材量の比較

き、純ラーメン構造に比べて総鋼材量を低減できることが確認できた。

3.5 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、製作には特殊な技術が必要とせず、JASS6[®]等の標準的な仕様に準じて管理できる。なお、座屈拘束の観点から鋼材相互の隙間を両側の累加で3mm以下と小さく設計しているが、写真2のように芯材を中鋼管に挿入し、さらに中鋼管を外鋼管に挿入する手順で、無理なくスムーズに製作できることを確認した。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。

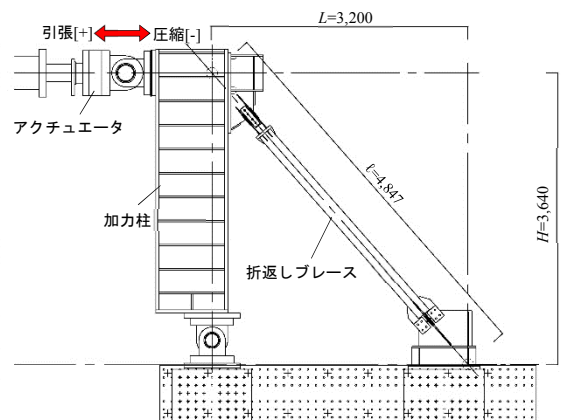


4. 実建物に採用する折返しブレースの構造実験

本章では、前章で述べた実建物に採用する折返しブレースに対して行った構造実験について示す。

4.1 試験体および加力装置

実建物の骨組写真を写真4に、骨組の詳細を図10に、加力装置を図11に示す。また、試験体形状を図12に、試験体の諸元を表5に示す。試験体は、3章で述べた8階建て鉄骨造ビルの5階で使用する折返しブレースであり、従来ブレースに対して軸降伏変位が約2.3倍増大する設計となっている。芯材にはH形鋼、中鋼管と外鋼管には角形鋼管を使用し、短期許容軸力(701kN)は芯材の断面で決定される。また、降伏強度が規格値(F値)より1.3倍程度大きいことを考慮し、短期許容軸力に対して全体座屈耐力の安全率を1.48、高力ボルト摩擦接合の短期許容耐力(すべり耐力)の安全率を1.58確保している。芯材の細長比は108であり、芯材単体(従来ブレース)では種別BCに相当する。鋼材相互の隙間には、鋼製スペーサーを設けている⁴⁾。芯材の露出部分は、首折れ座屈をしないように、カバープレートにより補強している⁸⁾。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 θ および取付け部材(ガセットプレート)は実建物を再現し、脚部のピンを軸に回転する加力柱を介して、柱頂部に取付けたアクチュエータによって試験体に軸力を作用させる。



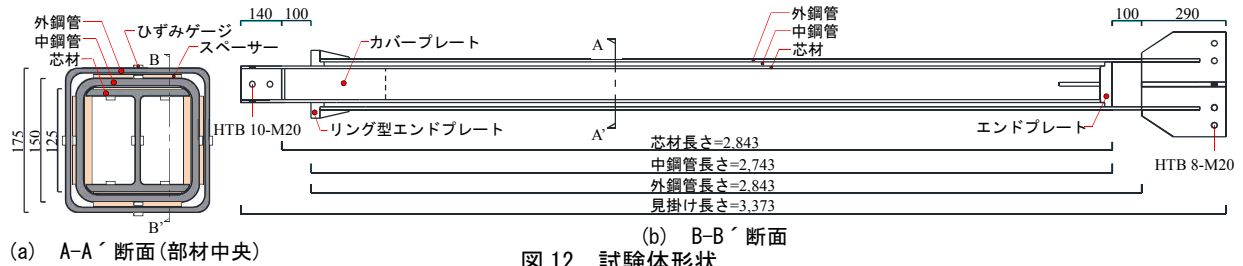


図 12 試験体形状

表 5 試験体の諸元

		各鋼材単体								部材全体						
		断面形状 H-A×B×t _o ×t _r □-A×B×t _o ×t _r	F値	※2 降伏点	断面積	部材 長さ	軸剛性	短期許容 軸力	軸降伏 耐力	軸剛性	短期許容到達時			軸降伏時		
											短期許容 軸力N _a	軸変位	層間 変形角	軸降伏 耐力N _y	軸変位	層間 変形角
折返し ブレース	芯材	H-125×125×6.5×9.0	235	303	2,982	2,843	215	701	903	91	701	7.68	1/313	903	9.91	1/243
	中鋼管	□-150×150×9.0	295	416	4,798	2,743	359	1,415	1,996							
	外鋼管	□-175×175×6.0	295	348	3,932	2,843	284	1,160	1,368							
(従来ブレース)※1		H-125×125×6.5×9.0	235	303	2,982	2,943	208	701	903	208	701	3.37	1/712	903	4.35	1/553

※1: 従来ブレースは、折返しブレースと同一の芯材を単体で用いたブレースであり、比較のため参考値として示す

※2: 降伏点は材料試験結果

4.2 加力計画

加力サイクルを図 13 に、実験状況を写真 5 に示す。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) 軸剛性が前章で示した式(2)で算定できる、iii) 短期許容応力度設計において圧縮耐力と引張耐力を同値にできる、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、層間変形角 $R=1/100\text{rad.}$ 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する。計測項目は、頂部水平荷重 P 、ブレース軸変位 δ 、および各鋼材の軸ひずみ(図 12(a))とし、ブレース軸力 N および層間変形角 R は、写真 5(a) 中に示す要領で幾何学的に算出する。なお、部材が線形性を失う時の変位として 0.03% オフセツ

ト耐力到達時を弾性限界時と定義し、弾性限界時の軸変位を弾性限軸変位 δ_{el} とする⁹⁾。

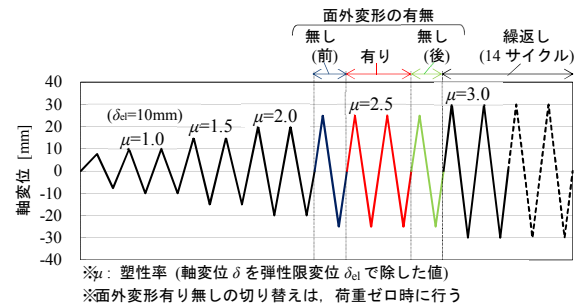
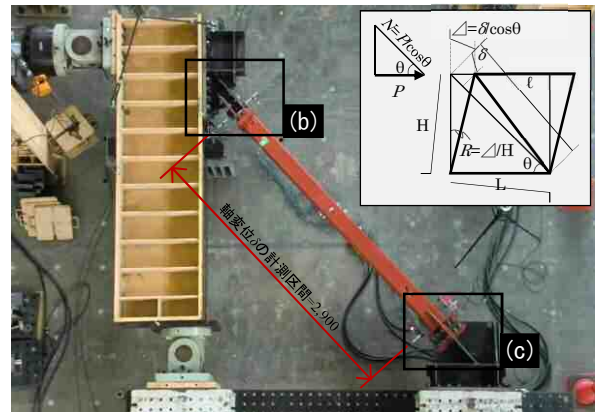


図 13 加力サイクル



(a) 実験状況全景

(b) 芯材接合部

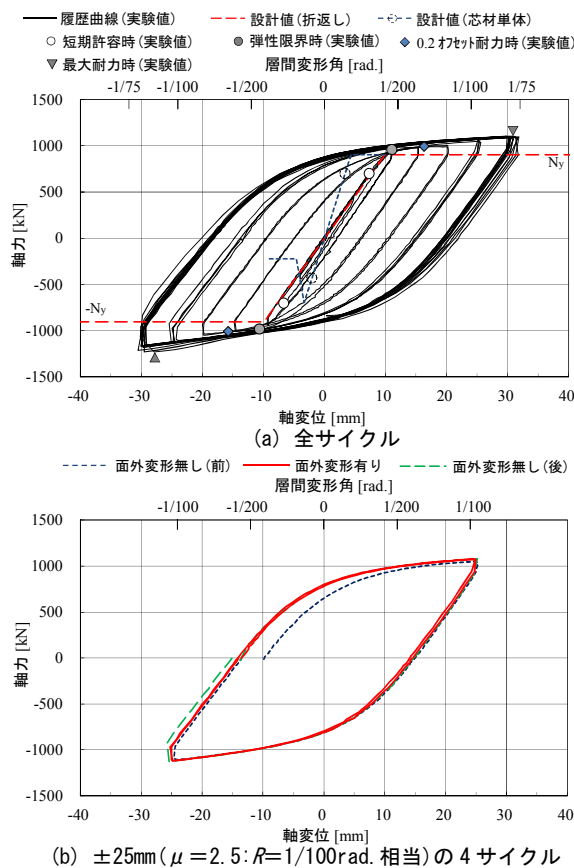
(c) 外鋼管接合部

写真 5 実験状況

4.3 実験結果

4.3.1 軸力-軸変位関係(履歴曲線)

実験で得られた軸力-軸変位関係(履歴曲線)を図14に、荷重一覧を表6に示す。図14(a)は全サイクルの実験結果であり、図14(b)は軸変位 $\pm 25\text{mm}$ ($\mu=2.5$: $R=1/100\text{rad}$.相当)加力時の面外変形有り・無しの4サイクルの実験結果を抽出したものである。また、図14(a)中には、折返しブレースおよび芯材単体(従来ブレース)の骨格曲線の設計値を合わせて示している。なお、図中の N_y は表5中の軸降伏耐力である。まず図14(a)と表6より、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、短期許容軸力 N_a の1.4倍程度で弾性限界時および0.2%オフセット耐力を迎えた。また、軸変位 $\pm 30\text{mm}$ (μ



(b) $\pm 25\text{mm}$ ($\mu=2.5$: $R=1/100\text{rad}$.相当)の4サイクル

図14 軸力-軸変位関係(履歴曲線)

表6 荷重一覧

	短期 許容軸力 N_a [kN]	弾性限界時 (0.03%オフセット耐力) N_{el} [kN]	0.2%オフセット耐力 $N_{0.2}$ [kN]	最大耐力 N_{max} [kN]
引張	701	960 (1.37)	990 (1.41)	1104 (1.58)
圧縮	-701	-980 (1.40)	-1009 (1.44)	-1230 (1.76)
引張/圧縮	-	98%	98%	90%

$=3.0$: $R=1/75\text{rad}$.相当)の大変形を多数回繰り返しても安定した紡錘形の履歴形状を示した。図14(b)より、面外変形有り(実線)・無し(破線)の履歴形状に有意差は見られず、折返しブレースは $R=1/100\text{rad}$.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。

4.3.2 軸力-軸変位関係(包絡曲線)

実験で得られた軸力-軸変位関係(包絡曲線)を図15に示す。また、軸剛性を表7に、軸変位および層間変形角を表8に示す。まず図15と表7より、折返しブレース軸剛性の実験値は、引張・圧縮ともに設計値と良く一致していることがわかる。また図15と表8より、折返しブレースの短期許容軸力到達時の軸変位は、従来ブレースに比べて約2.3倍に増大していること、折返しブレースは $R=1/230\text{rad}$.程度まで弾性挙動していることがわかる。以上より、折返しブレース試験体は前述の構造性能 i)~iv)を十分に満足しているといえる。

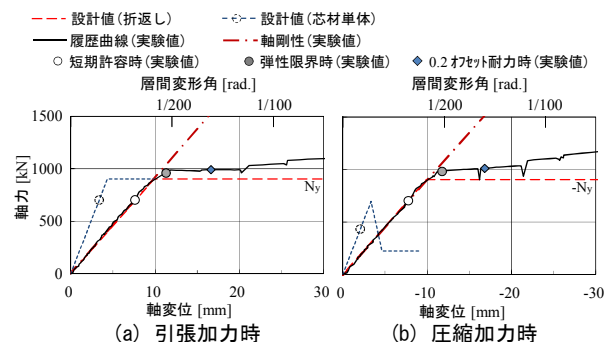


図15 軸力-軸変位関係(包絡曲線)

表7 軸剛性一覧

	折返しブレース軸剛性※[kN/mm]		
	引張	圧縮	平均
実験値	92	90	91
設計値	91		
実験/設計	100.9%	98.7%	99.8%

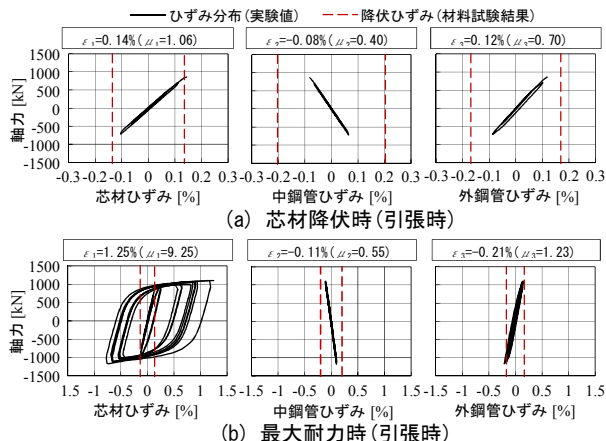
※:軸剛性は、芯材ひずみ250~500 μ の区間で評価

表8 軸変位および層間変形角一覧

表 5 軸変位時の層間変形角の比較							
	折返しブレース(実験値)				芯材単体(設計値)		折返し(実験)
	短期許容時		弾性限界時		短期許容時		単体(設計)
	軸変位	層間変形角	軸変位	層間変形角	軸変位	層間変形角	短期許容時軸変位比
	[mm]	[rad.]	[mm]	[rad.]	[mm]	[rad.]	
引張	7.6	1/316	10.4	1/230	3.4	1/712	2.3
圧縮	-7.8	-1/309	-10.9	-1/221	-2.1	-1/1161	3.8

4.3.3 各鋼材のひずみ分布

各鋼材の部材中央で計測したひずみ分布を図16に示す。図16(a)は芯材降伏時、図16(b)は最大耐力時である。また、図中には各鋼材の降伏ひずみも合わせて示している。図16より、折返しブレースは、設計時に想定通り芯材が軸降伏し、その後、芯材が大きく塑性化しても中・外鋼管は概ね弾性を保持していることがわかる。



※1: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ は、芯材降伏時または最大耐力時における芯材・中鋼管・外鋼管の最大ひずみ
 ※2: μ_1, μ_2, μ_3 は、最大ひずみを降伏ひずみで除した各鋼材の塑性率

図16 各鋼材(芯材, 中鋼管, 外鋼管)のひずみ分布

4.3.4 各鋼材の損傷状況

加力終了後の試験体内部(芯材)の損傷状態を写真6に示す。写真6より、既往の実験⁴⁾と同様に、カバープレート補強部と無補強部の境界において芯材に局部座屈が発生していることが確認できる。しかし、本実験では局部座屈による耐力低下は見られなかった。なお、外鋼管の内側にエンドプレートとの接触痕が見られたものの、中鋼管および外鋼管は、概ね健全な状態を保持していた。



写真6 加力終了後の損傷状況

5. まとめ

以上、折返しブレースの概要と実建物への適用事例について示し、さらには実建物で採用した折返しブレースの構造実験について示した。本報のまとめを以下に示す。

- 1) 折返しブレースは、3本の鋼材を一筆書きの要領で折り返して接合させ、実際の部材長さを見掛けの約2.5倍に長くすることで軸降伏変位が増大し、層間変形角1/200rad程度まで降伏しない。
- 2) 実建物への適用事例より、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場合でも、折返しブレースを用いれば合理的なブレース構造が実現でき、総鋼材量を20%削減できた。また、製作や建方に特殊性が無く、容易に施工できた。
- 3) 実建物に採用した折返しブレースに対して構造実験を行った結果、設計時に想定した通りの構造性能(4.2節で定義)を有することが確認できた。

【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) 横内基, 北嶋圭二, 上田英明: 超弾性要素部材を組込んだ次世代制震構造システムの研究開発(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.827-828, 2008.9
- 3) 波田雅也, 柳川雅嘉, 竹内健一, 北嶋圭二: 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, pp.975-976, 2010.9, pp.861-862, 2011.8
- 4) 波田雅也, 竹内健一, 北嶋圭二, 中西三和, 安達洋, 木竜雅康, 新井佑一郎: 折返しブレースの構造特性に関する実験的研究(その1~その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.747-750, 2012.9, pp.1287-1292, 2013.8, pp.1052-1053, 2014.9, pp.1077-1078, 2015.9
- 5) 日本建築センター: 建築新技術レポート, pp.26, 2010.6
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 JASS6, 2007.2
- 7) 竹内徹, 小崎均: 座屈拘束ブレースの面外安定条件, 座屈に関する設計上の諸問題, 日本建築学会大会パネルディスカッション資料, pp.56-67, 2011.8
- 8) 織田博孝, 宇佐美勉: 既設H形ブレース材の制震ダンパー化に関する基礎的研究, 構造工学論文集, pp.499-510, 2010.3
- 9) 機械工学会: 機械工学便覧, A4, pp.137-138, 1989.9