2. 大架構を想定した長尺折返し式ブレースの実大加力実験

Full Scale Loading Test of Folded Brace of Long Length for Large Frame

村井克綺* 波田雅也** 竹内健一*** 北嶋圭二****

-概要-

折返し式ブレース(以下折返しブレース)とは、断面の異なる3本の鋼材(芯材・中鋼管・外鋼管) を一筆書きの要領で折返して接合し、1本のブレース材とすることで、実際の部材長さが見付けの部材 長さの約 2.5 倍となるブレース材である。部材長さの増加に伴い、折返しブレースの軸降伏変位は、 通常のブレースの約 2.5 倍に増加する特徴がある。

本報では、階高やスパンの大きな大架構に片掛けで折返しブレースを配置するため、部材長が約 10m と長尺な折返しブレースを製作し、構造性能を確認するために行った加力実験について述べる。

ー技術的な特長ー

折返しブレースは、軸降伏変位の増大効果や座屈拘束効果の構造性能を有しているため、通常のブレース構造よりもより合理的な構造を実現することができる。しかし、芯材の細長比にλ≦150という上限値を設けているため、大きな架構では K型配置に制限されてしまう場合がある。そこで、大架構でも片掛けで折返しブレースを利用するため、芯材の細長比が最大でλ=260となる試験体で加力実験を行い、構造性能を確認した。

加力実験の結果は、圧縮加力時にブレースが座屈することはなく、引張加力時と同等の圧縮耐力を 発揮した。保有水平耐力算定時相当の層間変形角±1/100rad.の大変形下においても、安定した履歴形 状を示した。折返しブレースの軸降伏変位は、芯材単体ブレースと比べて約2倍に増加し、現状適用 範囲外である長尺折返しブレースであっても、設計時に想定した構造性能を確認することができた。



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

大架構を想定した長尺折返し式ブレースの実大加力実験 Full Scale Loading Test of Folded Brace of Long Length for Large Frame 〇村井 克綺* 波田 雅也** 竹内 健一*** 北嶋 圭二**** Katsuki MURAI Masaya HADA Kenichi TAKEUCHI Keiji KITAJIMA

ABSTRACT In the conventional brace structure, the stiffness of the brace becomes extremely larger than that of the column beam frame. Moreover, since the yield deformation of ordinary brace material is small, it yields early at drift angle R=1/500 rad. Therefore, stress is concentrated on the brace material at the primary design level which does not allow yielding of the member, so that the yield strength of the frame cannot be effectively exhibited. Therefore, the authors developed the "folded brace" with large axial yield displacement that does not yield to the drift angle R=1/200 rad. In the folded brace, three steel materials with different diameters are folded back and joined together to form a single brace material in a single stroke writing manner. Since the actual member length is about 2.5 times the finding length, it has the effect of increasing axial yield displacement and the effect of buckling restraint. In this report, we will prepare a long test specimen assuming to adopt "folded brace" in a single hanging on a large frame and describe the full scale loading test conducted to confirm the structural performance.

Keywords: 鉄骨造, ブレース構造, 降伏変位, 座屈拘束, 変形制御, 実大実験 Steel Construction, Brace Structure, Yield Displacement, Buckling Restrained, Deformation Control, Full-Scale Test

1. はじめに

鉄骨造建物では、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、ブレース材を水平抵 抗要素として使用しているブレース構造とする ことで、より少ない鋼材量で耐力や剛性を確保す ることができる。しかし、従来のブレース構造で は、柱梁フレームに比べてブレースの剛性が著し く大きくなってしまう。また、通常のブレース材 では降伏変位が小さく、層間変形角 R=1/500rad 程度の小さな変形で降伏してしまう。そのため、 部材の降伏を許容しない一次設計レベルでは、ブ レースに応力が集中することで、フレームの耐力 が有効に発揮されないのが現状である。

そこで筆者らは、層間変形角 R=1/200rad まで 降伏することのない軸降伏変位の大きい"折返し 式ブレース"(以下、折返しブレース)を開発し た ^{1)~5)}。折返しブレースを採用することで、一次 設計レベルにおいてもフレーム耐力が有効に発 揮され、より合理的なブレース構造が実現できる。

本報では、階高やスパンの大きな大架構に片掛 けで折返しブレースを採用することを想定して、 約 10m と長尺な折返しブレース(以下、長尺折 返しブレース)を製作し、構造性能を確認するた めに実施した実大加力実験について述べる。

2. 長尺折返しブレースの開発主旨

2.1 折返しブレースの概要と特徴

折返しブレースのイメージパースを図1に、軸 カー軸変位関係の概念図を図2に示す。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、径の異なる3本(芯材・中鋼管・外鋼管)の 鋼材を一筆書きの要領で折返して互いに接合し、 1本のブレース材とすることで、実際の部材長さ が見付け長さの約2.5倍となるブレース材である。 この部材長さの増加に比例して、折返しブレース

*技術研究所 建築研究室

^{**}技術研究所 耐震リニューアル研究室

^{***}東京建築本店 設計部

^{****}日本大学 教授

[※]本研究は、日本大学理工学部海洋建築学科との共同研究の一環で行われている。

の軸降伏変位は約2.5倍に増大する。また、軸剛 性が小さくなることによって、層間変形角 R=1/200rad 程度まで降伏しないという特長があ る。そのため、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 現できる。また、折返しブレースが圧縮荷重を受 けると、芯材は圧縮材、中鋼管は引張材、外鋼管 は圧縮材として作用する。この時、芯材(圧縮材) が全体座屈しようとする力を中鋼管(引張材)が 拘束する座屈拘束効果を有するため、引張耐力と 同等の圧縮耐力を発揮する³⁾⁻⁶⁾。この座屈拘束効 果によって、降伏後も安定した履歴性能が確保さ れ、部材種別 BA の耐震ブレースとして第三者機 関の構造性能評価(ERI-K12009)を取得している。



2.2 長尺折返しブレースの開発主旨

現状では、折返しブレースの芯材細長比λの適 用範囲にλ≦150という上限値を設けており、階 高やスパンの大きな架構では K 形配置に限定さ れる。しかし、長尺折返しブレースを用いること で、大きな階高やスパンでも片掛け配置が可能と なり、ブレース配置の自由度がさらに向上する。 また、片掛けとすることで K 型配置に比べブレー ス本数が半減し、接合部数も削減できるため、1 構面当りのブレース耐力が同じでも鋼材加工費 や施工費の削減が期待できる。一方、長尺折返し ブレースは約 10m と長尺であると共に、芯材細 長比えが現状の上限値を大きく超えるため、構造 性能(軸降伏変位増大、座屈拘束効果)が確保され るかが懸念される。既往の実験 ^{2),3)}では、 λ =176 ~533の縮小実験や λ =89の実大実験から折返し ブレースの構造性能を確認しているが、 λ =150 を超える長尺折返しブレースの実大実験は行っ ていない。また、長尺のため製作精度も懸念事項 に挙げられる。そこで、長尺折返しブレースを製 作し、構造性能を確認するために実大加力実験を 行った。

3. 実大加力実験に用いる長尺折返しブレース

断面形状を図4および図5に、試験体諸元を表 1に示す。長尺折返しブレース試験体は、芯材に H 形鋼 (H-150×150×7.0×10、SN400B) を使用 した(a)H 形鋼タイプと、冷間成形角形鋼管(□ -150×150×6.0、BCR295)を使用した(b)角形鋼 管タイプの2タイプとする。中鋼管(□-175×175 ×9.0、BCR295)および外鋼管(□-250×250×9.0、 BCR295)は両タイプ共通とする。いずれも軸降伏 耐力は芯材断面で決まっており、短期許容耐力も 同程度である。また、見付け長さ 9.8m も両タイ プ共通とし、芯材細長比は(a)H 形鋼タイプが λ=260、(b)角形鋼管タイプが λ=168 と共に大 きく、単材では圧縮耐力を殆ど負担できずに弾性 座屈してしまうプロポーションである。なお、本 試験体では、座屈拘束効果を確保するため、各鋼 材間の隙間が 3.0mm(片側 1.5mm)以下となるよ うに鋼製スペーサーを配置している。

4. 長尺折返しブレースの製作状況

長尺折返しブレースの製作手順を図6に、製作 状況写真を写真1に示す。折返しブレースは、芯 材、中鋼管、外鋼管の3本の鋼材を、エンドプレ ートおよびリング形エンドプレートを介して一 筆書きの要領で折返して接合する。まず、芯材に エンドプレートを、中鋼管にリング形エンドプレ ートをそれぞれ突合せ溶接する。このとき、首折 れ座屈4を防止するためのカバープレートも、芯 材の先端部(完成後に露出する部分)に溶接して おく。次に、芯材を中鋼管に挿入して中鋼管とエ ンドプレートを突合せ溶接し、さらに、中鋼管を 外鋼管に挿入して外鋼管とリング形エンドプレ ートを突合せ溶接することで、3本の鋼材がひと つなぎに接合される。本試験体は、長尺のため初 期不整や自重によるたわみで鋼材が強く接触し やすい可能性があったが、写真1(iii)のように人 力によって無理なく挿入できることが確認でき た。最後に両端のガセットプレートを溶接して完 成となる。なお、突合せ溶接部は、組立て後に見





え隠れとなるため、写真1(ii)のように組立て前 に超音波探傷検査を行っている。以上より、部材 長さ 10m の長尺折返しブレースが、特殊な技術 を用いることなく容易に製作することができた。

5. 実験概要

5.1 加力装置

加力装置図を図 7 に示す。加力装置は、階高 6.3m、スパン 9.0m、ブレース節点間長さ 11.0m のS造架構に片掛けで配置することを想定してい る。下端ピンの加力柱を介して、頂部に取付けた アクチュエータによってブレース材に斜めから軸 力を作用させる。ブレース材と架構との接合方法 は両端とも高力ボルト摩擦接合とし、ブレース見 付け長さ(ボルト中心間距離)は9.8m である。

5.2 計測項目

ブレース軸力 N および層間変形角 R の算出方 法の概念図を図8に示す。計測項目は、頂部水平 荷重 P、ブレース軸変位δおよび軸ひずみとする。 ブレース軸力 N および層間変形角 R は、取付け 角度 θ を用いて図 8 の要領で算出する。軸ひずみ は、材軸方向5箇所(図5中①~⑤)において、芯 材・中鋼管・外鋼管各々で計測する。



					<u> </u>
	-	-	-	-]
a b		芯材長さ=8,994	.		
340 126		中鋼管長さ=8,868			126
		外鋼管長さ=8,994			340
		見付け長さ=9,800			

(b)角形鋼管タイプ

図 5 試験体断面図(b-b⁻) 表1 試験体諸元

														材	料特性					
試験体		鋼種	断面形状 H−h×b×t _w ×t _f □−h×b×t	断面積 A [mm ²]	※1 見付け 長さ a [mm]	部材 長さ L [mm]	細長比	※2 限界 細長比	単体0 許容軸 引張	D短期 I力[kN] 圧縮	降伏点 σ _y [N/mm ²]	引張強さ σ . [N/mm ²]	降伏比 σ _y ∕σ "	各鋼材 降伏 ō _y	折返し 変位 [mm]	ブレース 層間 変形角 R [rad]	※3 降伏 ひずみ [µ]			
(a)芯材 H形鋼 タイプ 芯材単体		芯材	SN400B	H-150 × 150 × 7.0 × 10	3,947		9040	260	120	928	82	299.8	451.0	0.66	13.2			1463		
	中鋼管	DODAGE	□-175×175×9.0	5,698	0.000	8840	147	107	1681	371	397.9	461.2	0.86	17.2	28.4	1/182	1941			
	10 1	外鋼管	BCK295	□-250 × 250 × 9.0	8,398	9800	9600	9800	9040	101	107	2477	1151	376.9	463.2	0.81	16.6		1	1839
	芯材単体に	ガレース	SN400B	H-150 × 150 × 7.0 × 10	3,947	1	9190	260	120	928	82	299.8	451.0	0.66	13.4	13.4	1/384	1463		
(b)芯材 角形鋼管 タイプ 芯材単	「日本に」「芯材	芯材	BCR295	□-150×150×6.0	3,332	9800	8994	168	107	983	165	413.1	473.3	0.87	18.1			2015		
	長尺折返し	中鋼管		□-175×175×9.0	5,698		9800	8868	147	107	1681	371	391.1	445.5	0.88	16.9	35.8	1/144	1908	
	1	外鋼管		□-250 × 250 × 9.0	8,398			8994	101	107	2477	1151	358.6	443.7	0.81	15.7			1749	
	芯材単体に	ガレース	BCR295	$\Box -150 \times 150 \times 6.0$	3 3 3 2	1	9120	168	107	983	165	413.1	473.3	0.87	18.4	18.4	1/281	2015		

※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定している ※3 降伏ひずみは降伏点をヤング係数で除す



図6 折返しブレースの製作手順

5.3 加力サイクル

加力サイクルを図 9 に示す。加力は引張側を正 とし、初めに短期許容軸力まで荷重制御で加力し た。その後、層間変形角 R=1/172, 1/115, 1/86, 1/69, 1/57, 1/49rad に相当する変位制御にて、 各 2 サイクルずつ正負交番で加力を行った。

6. 実験結果

6.1 軸力-軸変位関係

軸力ー軸変位関係を図10に、弾性限界時、終局 時の荷重・変位一覧を表2に示す。

(a) H形鋼タイプ

芯材単体ブレースでは、圧縮側で早期に全体座 屈が発生し、圧縮耐力を殆ど負担できない典型的 な引張ブレースの挙動を示した。一方、長尺折返 しブレースでは、圧縮側においても全体座屈を生 じることなく、引張側と同等の圧縮耐力を発揮し た。層間変形角R=1/57rad相当の大変形において も、安定した紡錘形の履歴形状を示した。その後、

R=1/49rad相当の加力サ イクルにおいて、圧縮側で 急激に荷重上昇し始めた ことにより、外鋼管に全体 座屈が発生して終局に至 った。







図7 加力装置図



図 9 加力サイクル

表2 弾性限界時、終局時の荷重・変位一覧

		弾性	艮界時	終局時			
		荷重[kN]	<u>変位[mm]</u>	荷重[kN]	<u>変位[mm]</u>		
(a)H形鋼	折返し	1284	29.9	-2236	-85.8		
タイプ	単体	1207	13.3	-452	-5.5		
(b)角形鋼管	折返し	1223	28.6	-1213	-18.3		
タイプ	単体	1160	15.2	-681	-0.6		



(b)角形鋼管タイプ

芯材単体ブレースでは、H 形鋼タイプと同様に全体座屈 が発生し、圧縮耐力を殆ど期 待できない典型的な引張ブレ ースの挙動を示した。しかし、 終局状態は H 形鋼管タイプ とは異なり、角形鋼管タイプ では、R=1/57rad のサイクル の引張側で中央部が破断する ことで実験を終了した。一方、 長尺折返しブレースでは、圧 縮側においても全体座屈を生 じることなく、引張側と同等 の圧縮耐力を発揮した。層間 変形角 R=1/69rad まで安定 した紡錘形の履歴形状を示し たが、その後、R=1/57rad サ イクルの圧縮側で荷重低下が 生じ、終局に至った。



図 11 包絡曲線(引張側)

軸降伏変位の増大効果を確認するため、芯材単 体ブレースと長尺折返しブレースの引張加力時 の包絡曲線を重ねて図 11 に示す。(a) H 形鋼タイ プの長尺折返しブレースでは、弾性限界時の軸変 位が芯材単体ブレースに比べて約2.2倍に増大し、 層間変形角軸 R=1/188rad まで弾性挙動を示した。 また、(b)角形鋼管タイプも同様に、長尺折返し ブレースの弾性限界時の軸変位が芯材単体ブレ ースに比べて約 1.9 倍に増大し、R=1/196rad ま で弾性挙動を示した。

6.3 各部材の最終状況

試験体の解体状況写真を写真2に示す。 折返し ブレースの芯材および中鋼管は外鋼管によって 覆われているため、実験後に試験体を解体して各 部材の損傷状態を確認した。

外鋼管においては、中央部分にて全体座屈が進

展したことによって発生した局部座屈が確認で きた。芯材では、首折れ座屈を防止するために取 り付けられているカバープレートの近傍(図 5 の ①箇所付近)において局部座屈が発生していた。 この芯材の局部座屈は、(a)H 形鋼タイプおよび (b)角形鋼管タイプ両方において確認できており、 折返しブレースの終局状態に起因していると考 えられる。中鋼管については、スペーサーの接触 痕および芯材局部座屈箇所との大きな接触痕が 確認された。



i)外鋼管中央部 ii)芯材カバープレート近傍 写真2 試験体状況写真

7. まとめ

以上、本研究では、部材長 10m の長尺折返しブ レースを製作し、加力実験を行った。得られた知 見を以下に示す。

- ・長尺折返しブレースは、座屈拘束効果によって
 全体座屈を生じることなく、引張側と同等の圧
 縮耐力を発揮した。
- ・長尺折返しブレースは、芯材単体ブレースに比 べて軸降伏変位が約2倍に増大し、層間変形角 R=1/200radまで弾性挙動を示した。
- ・実験後に試験体を解体した結果、H 形鋼タイプ と角形鋼管タイプともに同じ箇所(カバープレ ート補強部近傍)で芯材に局部座屈が生じてい た。

【参考文献】

 1) 波田ほか: 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), AIJ 大会, C-1, pp.975-976, 2010.9

2) 波田ほか: 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 2), AIJ 大会, C-1,

pp.861-862, 2011.8

3) 波田ほか: 折返しブレースの構造特性に関する 実験的研究(その1~2), AIJ 大会, C-1, pp.747-750, 2012.9

4) 波田ほか:折返しブレースの構造特性に関する
 実験的研究(その 3~5), AIJ 大会, C-1,
 pp.1287-1292, 2013.8

5) 波田ほか: 折返しブレースの構造特性に関する 実験的研究(その6), AIJ大会, C-1, pp.1051-1052, 2014.9

6) 波田ほか: 折返しブレースの構造特性に関する 実験的研究(その7), AIJ大会, C-1, pp.1077-1078, 2015.9

7) 波田ほか: 細長比 533 の極細丸鋼を芯材に用い た折返しブレースの実験的研究, AIJ 大会, C-1, pp.1054-1055, 2014.9

8) 竹内ほか:座屈拘束ブレースの安定条件,座屈 に関する設計上の諸問題, AIJ 大会パネルディス カッション資料, pp.56-67, 2011.8