

芯材にH形鋼を用いた座屈拘束ブレースの開発

Development of Buckling Restrained Brace Using H-shaped Steel

山上 聡* 岸本 剛* 舟木秀尊* 遠山裕史**

要 旨

座屈拘束ブレースは、軸力を負担する芯材の周囲を拘束材で覆い、圧縮軸力下での全体座屈を防止したブレース材であり、さまざまな形状のものが実用化されている。既製品も数多く存在するが、コストの高さに加え、建物本体との接合部の設計について課題がある。そこで、芯材に H 形鋼を用いて簡易な構成材から成る座屈拘束ブレースを考案し、接合部を含めた実大実験にて圧縮軸力下においても引張時と同等の性能を有することを確認するとともにその設計法を整備した。

キーワード：座屈拘束ブレース、H 形鋼、離間材、接合部

1. まえがき

座屈拘束ブレースは、ブレースに生じる軸力を負担する芯材を拘束材で覆い、圧縮軸力下での全体座屈を防止することで引張時と同等の圧縮耐力を確保したブレース材であり、主に鉄骨構造の建物に使用されている。

本ブレースが安定した復元力特性を発揮するためには、芯材と拘束材の間にクリアランスを確保する必要がある。これは、芯材に用いる鋼材が、圧縮軸力を受けるときにポアソン効果で膨張し、拘束材内で閉塞するのを防ぐためである。閉塞すると軸力が拘束材に伝達し、耐力が過剰に上昇することになる。また、本ブレースの設計においては接合部の面外回転剛性を考慮する必要があるが、その評価方法は難しい。

そこで、芯材に H 形鋼を用いてクリアランスを簡易な材料で確保した座屈拘束ブレースを設計し、接合部を

含めた構造実験により性能を確認する。

2. ブレース概要

本ブレースの概略図を図-1に示す。軸力を負担する芯材には H 形鋼を、ブレースの全体座屈を拘束するための拘束材には角形鋼管を使用している。また、芯材の局部座屈を防止するために、芯材と拘束材の間には、グラウトを充填している。なお、軽量化のため一部を発泡スチロールに置き換えている。芯材の軸力がグラウトを介して拘束材に伝達することを防止するために、芯材の H 形鋼には離間材（プラスチックダンボール、通称：ブラダン）を巻き、クリアランスを確保している。建物に取りつく接合部は拘束材で覆えないため、断面の大きいビルドHにて局部座屈を防止している。

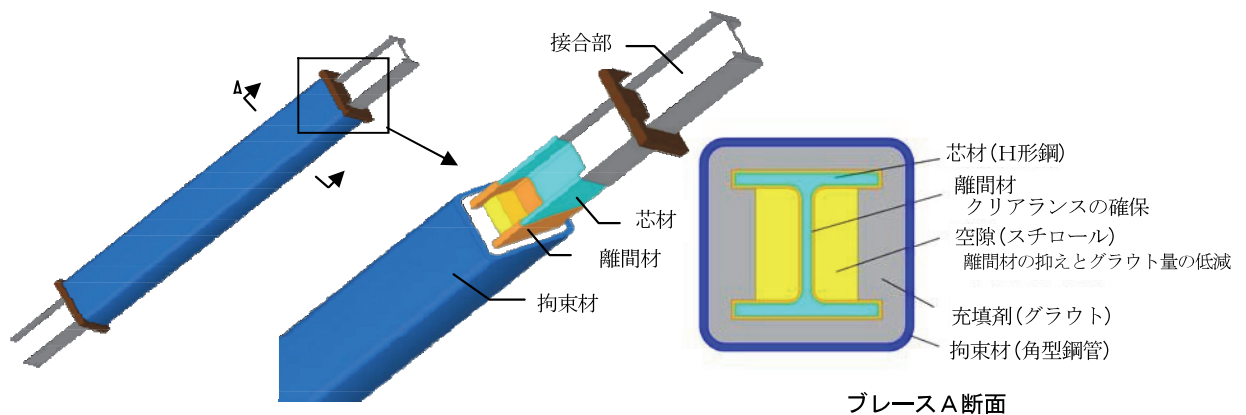


図-1 ブレース概略図

*技術研究所 **西日本支社建築設計部

3. 設計概要

3.1 設計方針

本ブレースの構成概要を図-2に、設計モデルを図-3に示す。構成部材（芯材、拘束材、接合部）の設計は、「鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013」¹⁾、「鋼構造座屈設計指針」²⁾、「鋼構造接合部設計指針」³⁾に準拠し、次の事項を満足することとした。

- i. ブレース芯材が繰り返し弾塑性変形することによる耐力上昇を考慮し、拘束材および接合部を設計する。上昇率は「鋼構造接合部設計指針」に準拠する
- ii. 芯材の座屈を抑え込み、全体座屈を起こさないよう拘束材を設計する。このとき、芯材の初期たわみや拘束材との隙間を考慮した曲げ応力が、拘束材の曲げ耐力以下となるようにする
- iii. 芯材と拘束材の間にクリアランスを確保する。そのため、芯材には芯材幅の1%の厚さの離間材を取り付ける
- iv. ブレースには芯材の塑性化に伴う拘束材端部での

塑性ヒンジ形成を許容する（図-3）

- v. 接合部は、許容圧縮応力度以下となるように設計する。許容圧縮応力度の算定には、ガセットプレートと面外回転剛性 K_{Rg} を考慮した無拘束区間の座屈長さに対する有効細長比を用いる
- vi. ブレースが取りつくガセットプレートは面外補剛等により面外剛性を高める

また、目標性能は、層間変形角 1/50 以上において引張時と同等の圧縮耐力を有することとする。このとき、ガセットプレートを含むブレース全長 (L_0) に対する軸変形は最大 1%となる。

3.2 ガセットプレートの面外回転剛性の設計

接合部の設計に必要なガセットプレートの面外回転剛性は FEM 解析を用いて算定する。解析モデルの設定においては、縮小モデルを用いた加力実験を行い、解析結果と実験結果とを比較し、解析モデルの妥当性を確認した。また、その解析モデルを用いて、面外回転剛性を算定した。

a. 実験概要

接合部におけるガセットプレートの縮小試験体を用い、

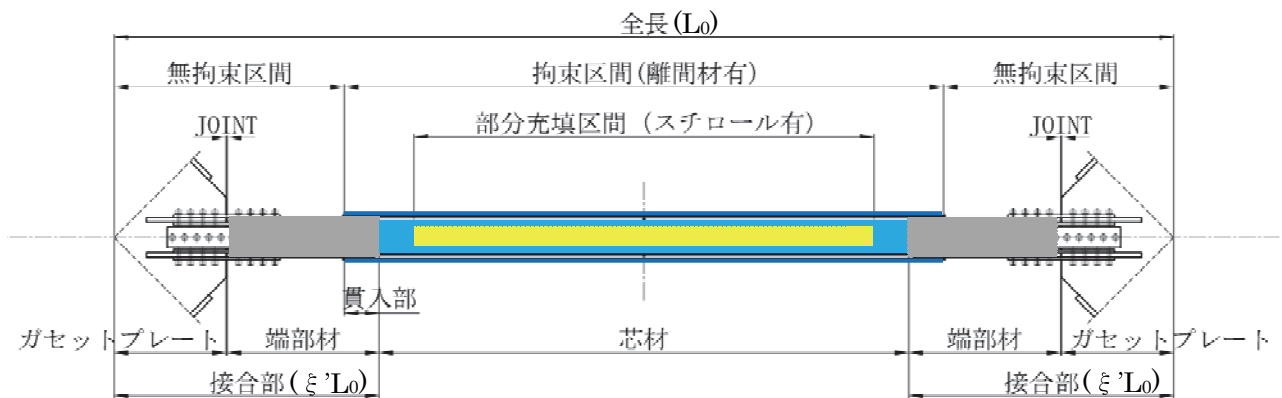


図-2 ブレース構成概要

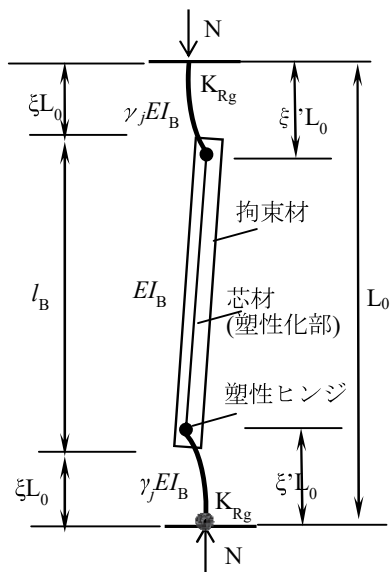


図-3 設計モデル

表-1 接合部試験体一覧

試験体	形状	ガセットプレート厚	補強スチフナ
No.1	高剛性	16 mm	有
No.2	高剛性	12 mm	有
No.3	低剛性	12 mm	無

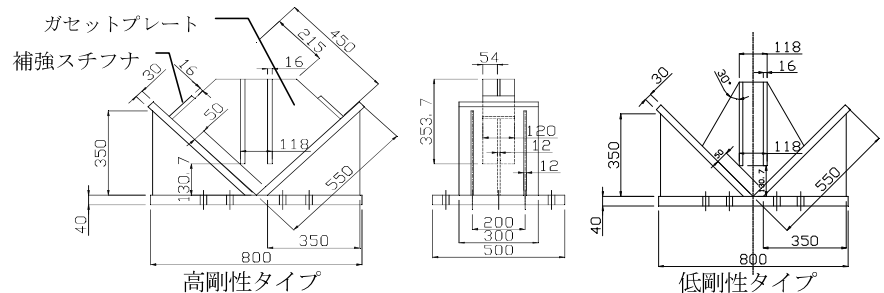


図-4 接合部試験体概要

面外曲げ試験にて回転剛性を把握した。接合部の試験体一覧を表-1に試験体概要を図-4に示す。試験体は、H型断面のブレースを取り付けるガセットプレート部分の剛性の程度により高剛性タイプと低剛性タイプの2種類とした。高剛性タイプでは、補強スチフナを設けると共にガセットプレートの厚さを変えている。ガセットプレートは、面外補剛により面外剛性が高められた柱梁接合部に取り付けた状態とした。使用材料は溶接性を考慮しSM490とした。

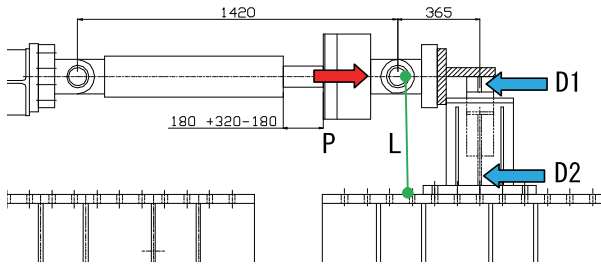


図-5 接合部の加力装置と計測概要

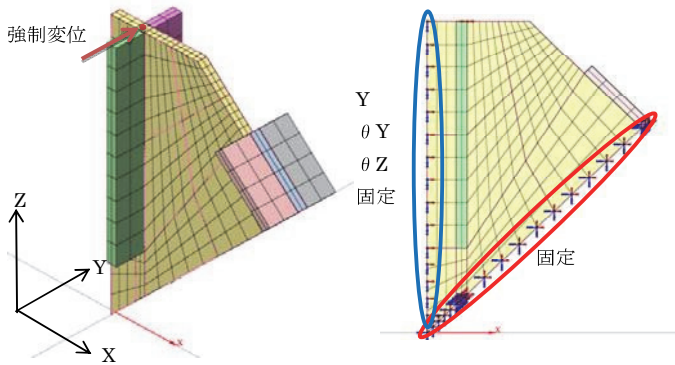


図-6 解析モデル

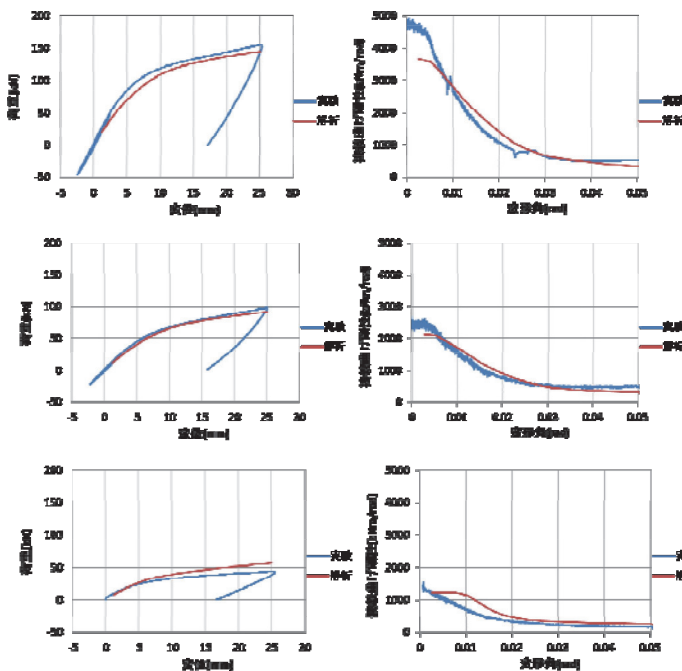


図-7 実験と解析結果の比較

加力装置と計測概要を図-5に示す。加力は試験体頂部を水平ジャッキを用いて片押しで行う。この時の荷重と変形角を計測し、その値を用いて面外回転剛性を式(1)によって計算する。

$$K_{Rg} = \frac{P \times L}{(D1 - D2) / L} \quad (1)$$

ここで、P：荷重(N)、L：加力位置(mm)、D1,D2：面外変位(mm)を示す。

b. FEM解析

解析モデルを図-6に示す。解析モデルは、左右の対称性を考慮した3次元立体モデルとする。材料特性は、材料試験結果を用い、ヤング係数：208100N/mm²、ポアソン比：0.3、降伏応力：370N/mm²とし、降伏条件には Von Mises の弾塑性モデルを適用した。実験と同様に加力点に強制変位を与え、加力点の反力と変位から面外回転剛性を算出する。

c. 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果の比較を図-7に示す。実験結果と解析結果は良く一致し、面外回転剛性は FEM で評価できることを確認した。この結果より、端部材(弾性部)の設計におけるガセットプレートの面外回転剛性は FEM により求めた。また、回転剛性には、弾性変形時の値を採用することとする。

d. 回転剛性のパラメータ解析

試設計により仮定したガセットプレートの基本形状を用い、パラメータ解析により面外回転剛性を評価する。基本形状を図-8に示す。ブレースのフランジ間に対し、

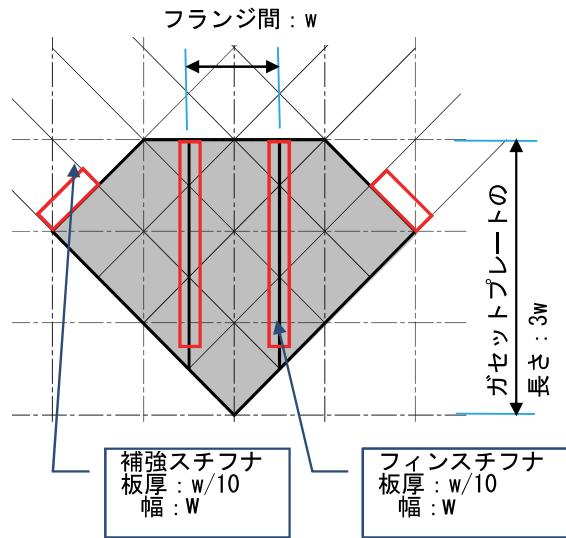


図-8 ガセットプレートの基本形状

表-2 面外回転剛性解析結果一覧(kNm)

フランジ幅 W (mm)	ガセットプレートの厚さ(mm)			
	19	25	32	40
200	10509	19685	34250	55656
300	14757	26668	46384	76868
400	19643	34027	57772	95028

ガセットプレートの長さは3倍とし、フィンスチフナと補強スチフナの厚さはフランジ間の1/10、幅はフランジ間と同じとする。この形状でガセットプレートの厚さとフランジ間をパラメータとしたFEM解析を行い、面外回転剛性を評価したものを表-2に示す。これらを基に近似式を作成し、一般的な回転剛性を評価し接合部の設計に反映した。

4. 実験概要

本工法による座屈拘束ブレースが、ブレース全長(L₀)に対し1%程度の軸変形まで圧縮耐力の低下、ブレース本体の座屈、接合部での面外座屈が起きないことを実大実験によって確認する。

4.1 試験体概要

試験体一覧を表-3に、代表的な試験体 No.2 の形状を図-9に示す。

試験体は全部で8体である。No.2 は本ブレースの標

準形状とした基準試験体であり、芯材に H-200×200×8×12 (材質 SN400) を使い、接合部を含めたブレース長さ (L₀) が 6.1m の実大モデルである。離間材の厚さは芯材幅の1%に相当する2mmとし、端部材の拘束材への貫入長は芯材幅の1倍の200mm、ブレース長さ (L₀) に対する貫入長を含めた接合部材長比ξ'は0.25、全長 (L₀) に対する芯材弱軸側の細長比は122とした。

No.1 は、No.2 と芯材の幅厚比、ブレースの細長比、接合部材長比が同じで、耐力がその約1/2の縮小試験体であり、縮小試験体としての性能を確認する。No.3 は、ブレースが建物内において層間変形角1/100の面外変形を受けた状態を考慮し、強制的に面外変形を50mm与えて加力する試験体である。No.4 は、施工誤差を考慮し、芯材の弱軸を接合部に対し5mm偏芯した試験体である。No.5 は、形状はNo.2と同じで芯材の材質をSN490とし、耐力上昇に合わせて接合部を補強した。No.6 は、接合部材長比ξ'が実適用される最大で0.3の

表-3 試験体一覧

No	芯材				拘束材		接合部	全長 L ₀ (cm)	細長比	接合部材長比 ξ'	実験因子				
	サイズ	材質	耐力 (kN)	幅厚比 フランジ ウェブ		サイズ	材質					サイズ 材質: SM490			
1	BH-150×150×6×9	SN400	821	8.33	22.00	□-200-6	STKR 400	BH-174×180×19×22	460	121	0.25	No.2の縮小 同幅厚比、ξ'			
2	H-200×200×8×12		1493			□-250-6		BH-230×225×25×28				610	122	基準試験体	
3															面外変形
4															施工誤差
5			SN490			2065								BH-225×230×32×30	
6	H-250×250×9×14	SN400	2149	8.93	24.67	□-300-6	STKR 400	BH-270×270×28×32	460	73	0.30	最大ξ'			
7	BH-200×200×6×9		1102	11.11	30.33	□-250-6		BH-230×220×22×22				610	120	0.25	最大幅厚比
8	H-150×150×7×10		932	7.50	18.57	□-200-6		BH-170×170×22×22				660	175	0.17	最大細長比

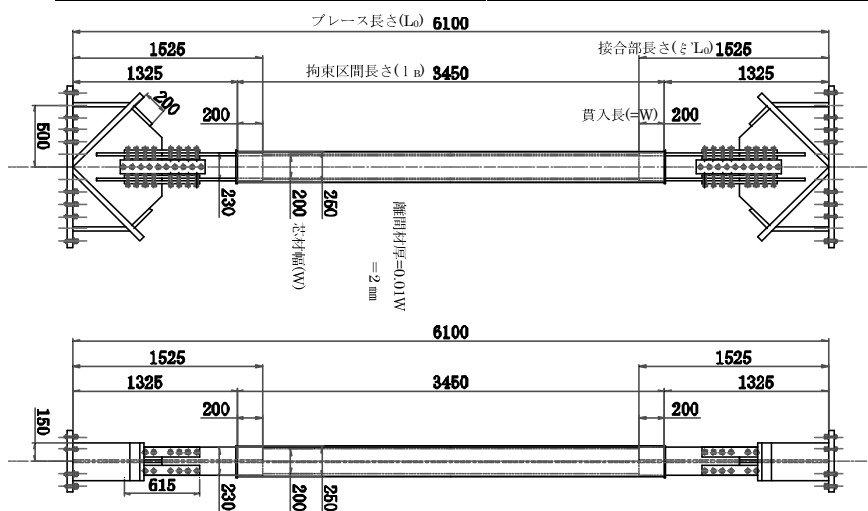


図-9 試験体形状 (No. 2)

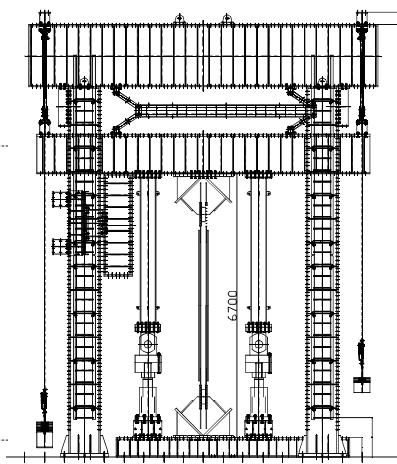


図-10 加力装置

場合、No.7 は、芯材の幅厚比が実適用される最大でフランジは11.11、ウェブは30.33の場合、No.8 は、(L₀)に対する芯材弱軸側の細長比が実適用される最大で175の場合である。

試験体に用いた材料試験結果を表-4に示す。芯材のH形鋼では、フランジとウェブの両方を試験した。試験の結果、芯材のSN400B鋼の降伏応力は基準強度235N/mm²に対し、286.4~340.7N/mm²と1.22~1.45倍、SN490B鋼の降伏応力は基準強度325N/mm²に対し、

405.4~436.6N/mm²と1.25~1.34倍であった。

4.2 载荷方法

加力装置を図-10に示す。加力はブレースの長さ方向を鉛直にセットした状態で正負交番载荷試験を行う。载荷は、弾性範囲で1サイクル行った後、接合部を含めたブレース全長(L₀)に対し軸変形0.25%ピッチで各変位2サイクルづつ耐力の低下がみられるまで行った。

4.3 実験結果

加力実験において、耐力低下を起こす前の最終履歴軸

表-4 材料試験結果

部位	鋼種	形状	厚さ mm	降伏応力 N/mm ²	ヤング係数 ×10 ³ N/mm ²	引張強さ N/mm ²	破断伸び %
芯材	SN400B	H150	10	293.9	195.1	447.9	43.5
			7	340.7	197.1	459.8	35.9
		H200	12	298.4	203.9	441.9	43.9
			8	339.4	195.8	469.0	37.6
	SN490B	H200	14	286.4	191.1	438.4	47.4
			9	338.9	195.8	462.9	38.2
拘束材	STKR400	□200	6	412.4	173.7	538.0	31.0
		□250	6	398.6	201.0	482.5	33.8
		□300	6	378.2	198.0	477.1	34.7

注：芯材の性質は 上段：フランジ、下段：ウェブを示す。

表-5 実験の最終履歴軸歪

試験体	最終履歴
No.1	軸歪 1.75% 1サイクル
No.2	軸歪 1.25% 2サイクル
No.3	軸歪 1.25% 2サイクル
No.4	軸歪 1.25% 2サイクル
No.5	軸歪 1.25% 1サイクル
No.6	軸歪 1.25% 2サイクル
No.7	軸歪 1.00% 2サイクル
No.8	軸歪 1.50% 1サイクル

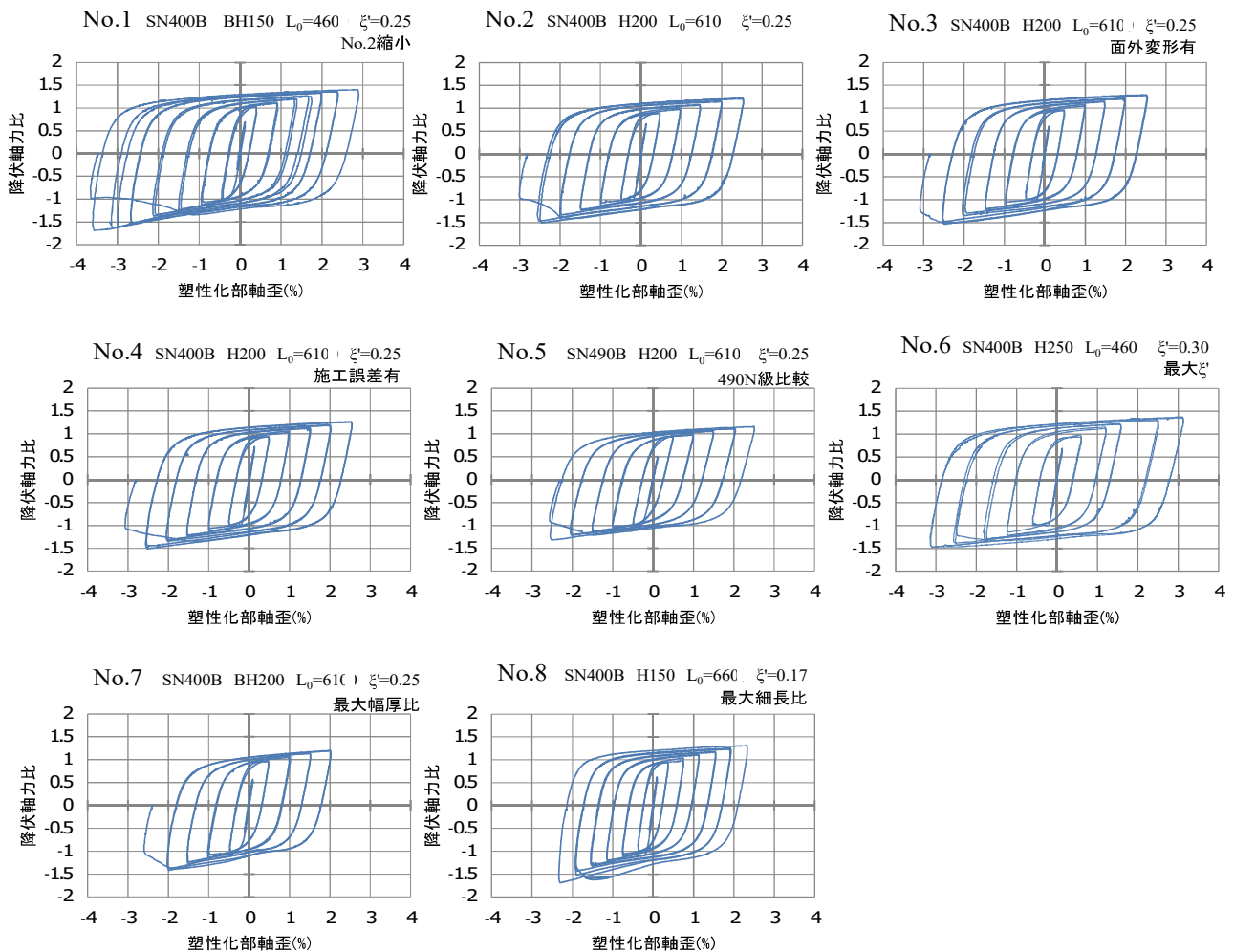


図-11 実験結果

歪の一覧を表-5に示す。いずれの試験体も目標変位（試験体全長の軸歪で 1%）以上まで耐力低下はみられず、安定した履歴を確保できた。また、どの試験体も全体座屈は起きず、拘束材端部に塑性ヒンジを形成し耐力低下に至った。

各試験体の実験結果を図-11に示す。本図では、縦軸に圧縮降伏軸力比、横軸に塑性化部軸歪をとっている。軸力比は、軸歪 0.25%における 1 サイクル目の圧縮降伏軸力に対する比としている。なお、軸歪は塑性変形を起こしている芯材の歪とし、接合部を含んでない。したがって、接合部材長比 $\lambda' = 0.25$ の試験体に軸歪 1%を与えたときは、塑性化部での軸歪は 2%となっている。

各履歴を比較すると、各試験体とも圧縮側は引張側と同等の耐力を有しており、最大軸歪は異なるものの、どの試験体も安定した履歴を示している。このことから、実験因子による構造性能への影響は少ないと考える。

実験後に試験体 No.2、3 を解体し、取り出した芯材の状況を写真-1に示す。芯材は全長にわたって伸縮しており、最終的には芯材の端部で降伏ヒンジが発生し、耐力低下に繋がったことを確認できた。

5. あとがき

芯材に H 形鋼を用い、簡易な離間材を使用した座屈拘束ブレースについて接合部を含めて構造実験により性能を確認した結果、本設計法により、軸歪 1%以上において引張と同等の圧縮耐力を確保でき、最終的には全体座屈を起こさず想定した個所にヒンジを形成することを確認できた。

今後は、BA ブレースとしての認定を取得し、実物件への適用を広めていきたい。

【参考文献】

- 1) 「鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013」、日本建築学会、pp.19-38、2013.
- 2) 「鋼構造座屈設計指針」、日本建築学会、pp.74-82、2009.11
- 3) 「鋼構造接合部設計指針」、日本建築学会、pp.259-290、2012.03

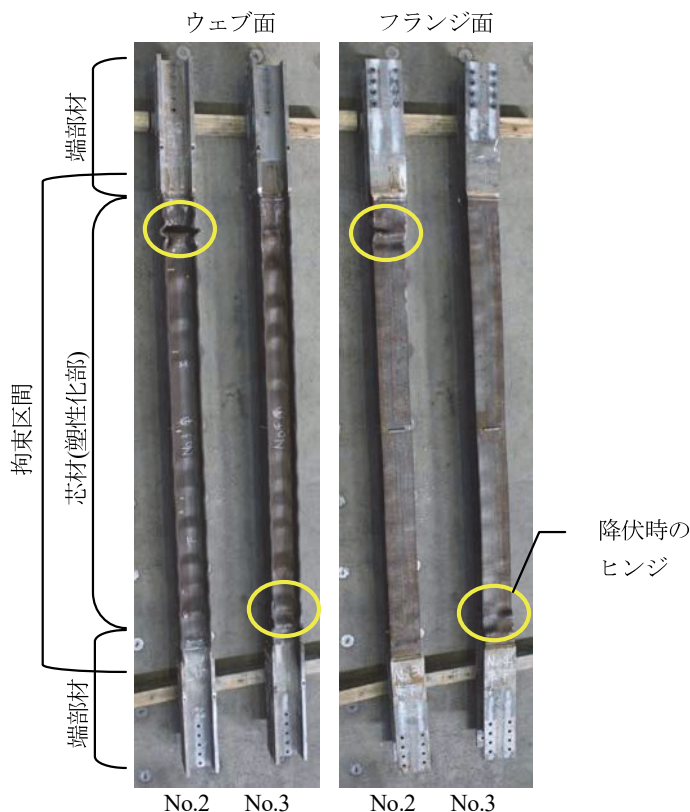


写真-1 解体後の芯材の状況