

芯材に H 形鋼を用いた座屈拘束ブレースに関する実験的研究

その 1 座屈拘束ブレースの構成および軸圧縮引張実験の概要

佐々木 康人 佐々木 聡
鈴木 泉 浅野 孝^{*1}
吉井 靖典^{*1} 桂 大輔^{*2}
塩田 博之^{*3}

概 要

座屈拘束ブレースは、鉄骨ブレースの座屈を拘束して圧縮時にも引張時と同等の復元力特性を有する耐震性に優れた部材である。これまでに、さまざまな形状のものが実用化され、建物の耐震部材あるいは制振部材として用いられている。これらの座屈拘束ブレースは既製品として多く存在するが、コスト面での課題がある。そこで、構成が簡易で一般の部材と同様に製作できる座屈拘束ブレース(FIRST ブレース:Fujita Improved and Reinforced Steel Brace)の開発を行った。本報では、座屈拘束ブレースの構成および性能確認のために実施した軸圧縮引張実験の結果について示す。

開発した座屈拘束ブレースは、軸力を負担する H 形鋼の鉄骨芯材、座屈拘束のために周囲に配置された座屈拘束材(鋼管)、ならびに鉄骨芯材と座屈拘束材の間に充填されたモルタルで構成している。軸圧縮引張実験はほぼ実大の試験体を用いて行った。本座屈拘束ブレースは、圧縮時の復元力特性が引張時と同等であり、十分な変形性能を有することを確認した。

Experimental Study on the Buckling Restrained Brace using H-shaped Steel

Part1 : Outline of the Buckling Restrained Brace and results of a Cyclic Axial Loading Test

Abstract

It is well known that buckling restrained braces have the same hysteretic behavior under both compression and tension. Various types of buckling restrained braces have been utilized as seismic resistant members or hysteretic dampers. However, these are typically expensive.

In this study, the buckling restrained brace (FIRST Brace: Fujita Improved and Reinforced Steel Brace) which is mechanically simple and can be manufactured like a general member has been developed. This paper presents the outline of the brace and the results of cyclic axial loading tests.

The brace is composed of a H-shaped steel core on which axial load acts, a steel tube to restrain the buckling of the steel core and mortar with which the space between the steel core and the tube is filled. The cyclic axial loading tests are performed using test specimens in actual use. From the test results, it was verified that the braces have the same hysteretic behavior in both compression and tension, and a large deformation capacity.

キーワード: 座屈拘束ブレース, H 形鋼, 鋼管,
軸圧縮引張実験, 復元力特性

*1 建設本部設計エンジニアリングセンター,

*2 首都圏支社建築技術部, *3 建設本部技術部

§1. はじめに

座屈拘束ブレースは、鉄骨ブレースの圧縮軸力時の座屈を拘束することで、引張軸力時と同等の復元力特性を有する耐震性に優れた部材である。これまでに、さまざまな形状のものが実用化され、建物の耐震部材あるいは制振部材として用いられている¹⁾。

これらの座屈拘束ブレースは既製品として多く存在するが、コスト面での課題がある。そこで、構成が簡易で一般の部材と同様に製作できる座屈拘束ブレース(FIRST ブレース:Fujita Improved and Reinforced Steel Brace)の開発を行った。本報では、座屈拘束ブレースの構成および軸圧縮引張実験の概要について示す。

なお、本座屈拘束ブレースは、一般財団法人 日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得している(GBRC 性能証明 第 12・34 号)。

§2. 座屈拘束ブレースの構成

図 1 に座屈拘束ブレースの構成を示す。軸力を負担する H 形鋼の鉄骨芯材、座屈拘束のために周囲に配置された座屈拘束材(鋼管)ならびに鉄骨芯材と座屈拘束材の間に充填されたモルタルで構成している。鉄骨芯材は中央の塑

性化部と両端の補強部に分けられ、補強部は鋼板(ウェブカバープレートおよびフランジカバープレート)によって補強している。座屈拘束材内のモルタル充填部には鋼製型枠を用いて空洞を設けており、これにより、充填モルタルの量を少なくできるだけでなく、鉄骨芯材が圧縮変形したときに鉄骨芯材端部の補強部が充填モルタルに干渉することを防止している。また、H 形鋼とモルタルおよび鋼製型枠との接触面にはアンボンド材を貼付しており、鉄骨芯材の軸力が周囲へ伝達することを防止している。アンボンド材にはブチルゴムテープを用いている。空洞を設けているため、アンボンド材が必要な部分が少なくなっている。

鉄骨芯材が曲げ剛性の高い座屈拘束材により拘束されることにより、曲げ座屈を防止し、また、フランジ端部がモルタルを介して座屈拘束材で拘束されることにより、早期の局部座屈を防止している²⁾。

座屈拘束ブレースの製作は、①芯材となる H 形鋼の端部に鋼板を溶接接合、②フランジにアンボンド材を貼付、③鋼製型枠をセット、④芯材を鋼管に挿入して所定の位置に固定、⑤モルタルを充填という手順で行う。鋼製部分は特殊な加工はなく、一般の鉄骨部材と同様、鉄骨工場で製作が可能である。また、モルタルの充填は工場だけでなく、現場で行うこともできる。このように簡易に製作できることも本座屈拘束ブレースの特徴である。

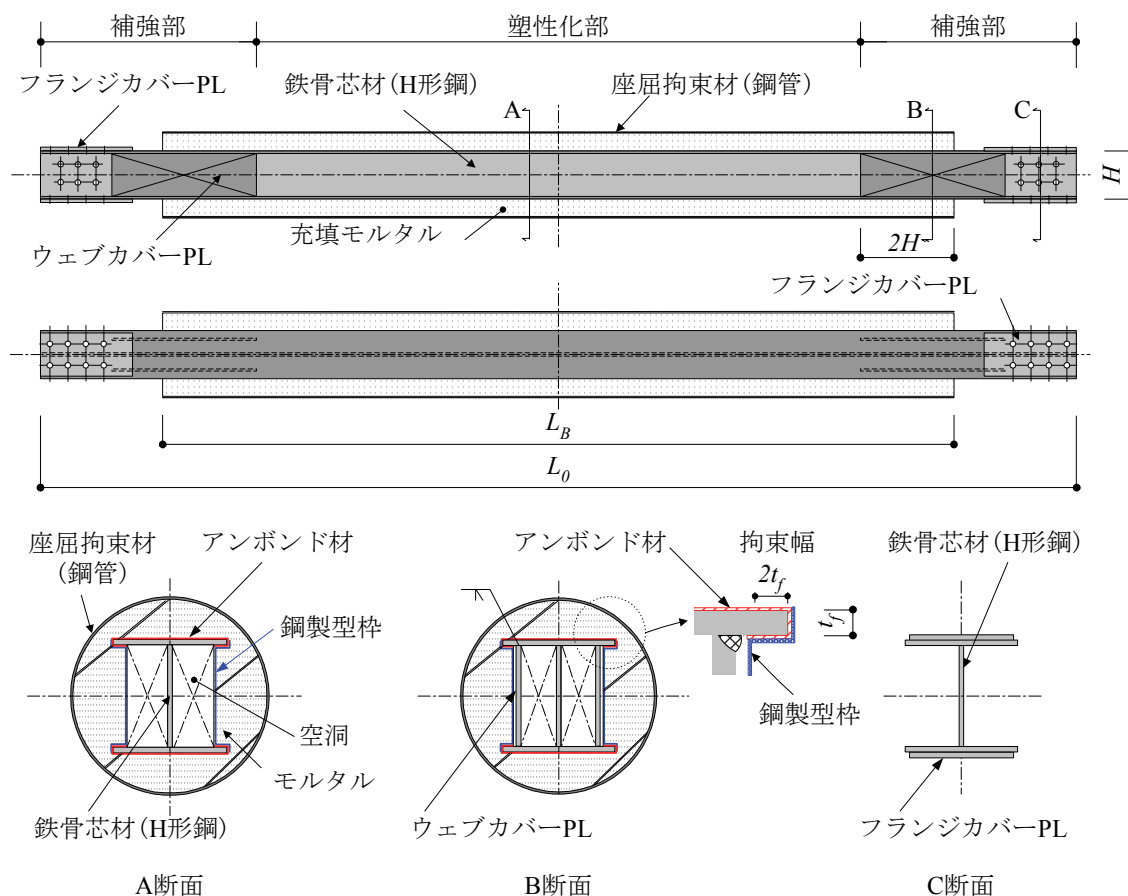


図 1 座屈拘束ブレースの構成

表 1 試験体の一覧

No.	全長 L_0 (mm)	鉄骨芯材					座屈拘束材		補強板 ウェブ カバー PL 板厚 (mm)
		断面	鋼種	幅厚比		フランジ 断面積比	断面	長さ L_B (mm)	
				フランジ	ウェブ				
				b_f/t_f	d_w/t_w				
1	5170	H-200×200×8×12	SN490B	8.3	22.0	0.760	ϕ 318.5×6.0	3960	9.0
2		BH-200×200×12×16	SM490A	6.3	14.0	0.742	ϕ 318.5×7.9	3970	12.0
3		H-250×250×9×14	SN400B	8.9	24.7	0.768	ϕ 406.4×6.4	3880	9.0
4	4370	H-150×150×7×10	SN490B	7.5	18.6	0.770	ϕ 267.4×9.3	4090	9.0
5			SN490B	7.5	18.6	0.764			6.0

*1: A_f : 片側フランジの断面積, A : 全断面積

§ 3. 軸圧縮引張実験

表 2 鋼材の機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	部位
SN490B	10.0	431	570	40.6	No.4,5 フランジ
	7.0	424	575	32.0	No.4,5 ウェブ
	12.0	440	559	42.2	No.1 フランジ
	8.0	470	592	33.6	No.1 ウェブ
SM490A	16.0	370	543	44.6	No.2 フランジ
	12.0	388	554	42.4	No.2 ウェブ
	12.0	372	543	41.7	No.2 ウェブカバー PL
	9.0	357	543	38.1	No.1 ウェブカバー PL
	9.0	399	576	42.4	No.4 ウェブカバー PL
	6.0	410	585	31.4	No.5 ウェブカバー PL
SN400B	14.0	305	468	43.1	No.3 フランジ
	9.0	334	489	37.0	No.3 ウェブ
	9.0	296	448	44.1	No.3 ウェブカバー PL

3.1 実験概要

座屈拘束ブレースの構造性能を確認するため、軸圧縮引張実験を行った。試験体の一覧を表 1 に示す。

試験体はほぼ実大のブレースを想定した 5 体とした。全長は 5170 mm および 4370mm とし、鉄骨芯材の塑性変形を想定する部分の長さは 2710mm～3160mm とした。

また、ウェブカバープレートの鋼管内の長さは鉄骨芯材 H 形鋼のせいの 2 倍とし、H 形鋼のフランジ端部の拘束幅はフランジ板厚の 2 倍としている(図 1 参照)。

鉄骨芯材は No.1、3、4、5 が圧延 H 形鋼、No.2 は溶接組立の H 形鋼を用いた。芯材の鋼種は No.1、4、5 が SN490B、No.2 が SM490A、No.3 が SN400B である。座屈拘束材は STK400 とした。

主な実験因子は①鉄骨芯材の幅厚比、②鉄骨芯材の鋼種、③ウェブカバープレートの板厚である。

鉄骨芯材の鋼材の機械的性質を表 2 に示す。なお、実験時のモルタルの圧縮強度は 58.9～66.5N/mm² であった。

載荷方法は、図 2 に示すように、2 基の油圧ジャッキを平行に設置した加力フレームに試験体を取り付け、試験体両

端の回転および軸直交方向の変位を拘束した状態で繰返し荷重を載荷する形式とした。

載荷スケジュールは降伏荷重に達するまでは荷重制御とし、降伏後は、図 3 に示すように、塑性化部の軸ひずみを 0.5% ずつ漸増させた振幅を 2 回ずつ、耐力が低下するまで繰り返した。なお、試験体 No.2 では、ひずみが 2% に達した後は 2% の一定振幅の繰返し載荷とした。

3.2 実験結果

図 4 に軸力(N)－軸ひずみ(ε)関係を示す。軸ひずみは塑性化部の平均軸変位を塑性化部長さで除した平均軸ひずみである。軸力は引張を正、圧縮を負としている。同図中に引張試験の降伏点から求めた降伏軸力の計算値(σ_N)も

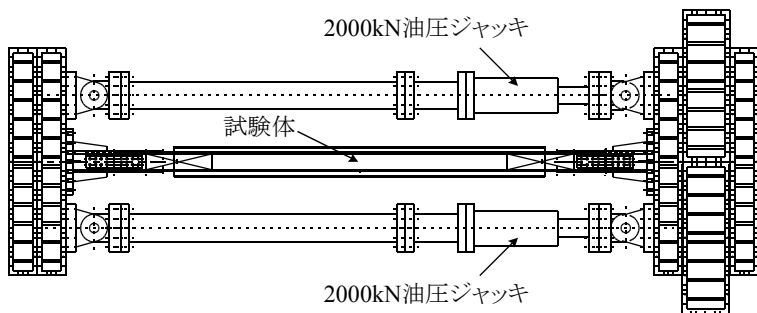


図 2 載荷装置

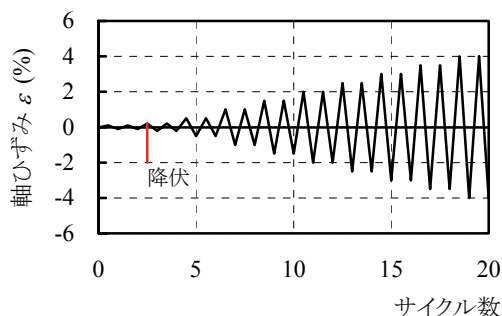


図 3 載荷スケジュール

併せて示す。

漸増载荷の試験体 No.1、3、4、5 は、いずれも圧縮軸力時の耐力低下により、载荷を終了した。一定振幅载荷の試験体 No.2 は軸ひずみ 2% の振幅を 12 回繰り返した時点で耐力低下は生じていなかったが、载荷を終了した。

いずれの試験体も安定した紡錘形の復元力特性を示している。振幅が大きくなるに従い、塑性変形に伴うひずみ硬化による耐力上昇が見られる。同一振幅での圧縮軸力が引張軸力よりもやや大きくなっている。これは、摩擦の影響と見られ、既往の研究 3) においても実験的に確認されている。

試験体 No.4 に対し、鋼種が同じでフランジおよびウェブの幅厚比が相対的に大きい No.1 では、やや早めのサイクルで圧縮軸力時の耐力低下が生じている。ウェブカバプレート板の板厚が異なる試験体 No.4 と No.5 では履歴曲線に大きな違いはない。

実験終了後に試験体を解体し、鉄骨芯材の状況を観察した。鉄骨芯材の最終変形状況例を写真 1 に示す。No.2 を除く試験体の最終破壊モードは局部座屈であった。フランジおよびウェブの局部座屈は、塑性化部の全長にわたって

発生しており、耐力低下につながる局部座屈変形の増大は補強部近傍で発生していた。

図 5 に軸力-軸ひずみ関係から求めた骨格曲線を示す。いずれの試験体も降伏後の剛性が引張側より圧縮側のほうが高い傾向がある。これは、圧縮時には、軸力が座屈拘束材に伝わっている影響である。最大耐力までの軸ひずみは鉄骨芯材の幅厚比が小さく、降伏点が低いほうが大きい。

実験結果の一覧を表 3 に示す。降伏軸力の実験値は図 6 に示す General Yield Point 法により求めた。最大軸力の計算値 (cN_y) は参考として引張強さから求めた。また、限界塑性ひずみ (ε_{pu}) は、骨格曲線の圧縮側では耐力低下時、引張側では最大荷重時の変位から算定した。表中の値は引張側と圧縮側の平均値を示している。累積塑性変形倍率 (η) は耐力低下までの履歴吸収エネルギーを降伏軸力の計算値と降伏変位の積で除した値の累積値である (図 7)。

限界塑性ひずみは、漸増载荷の試験体では、3.9~4.6% となった。これは、座屈拘束ブレースの鋼種を SN490B、取付角度を 45°、塑性化部長さをブレース全長の半分と仮定して骨組の層間変形角に換算すると、概ね 1/25~1/21 となる。また、同試験体での累積塑性変形倍率は 286~476 で

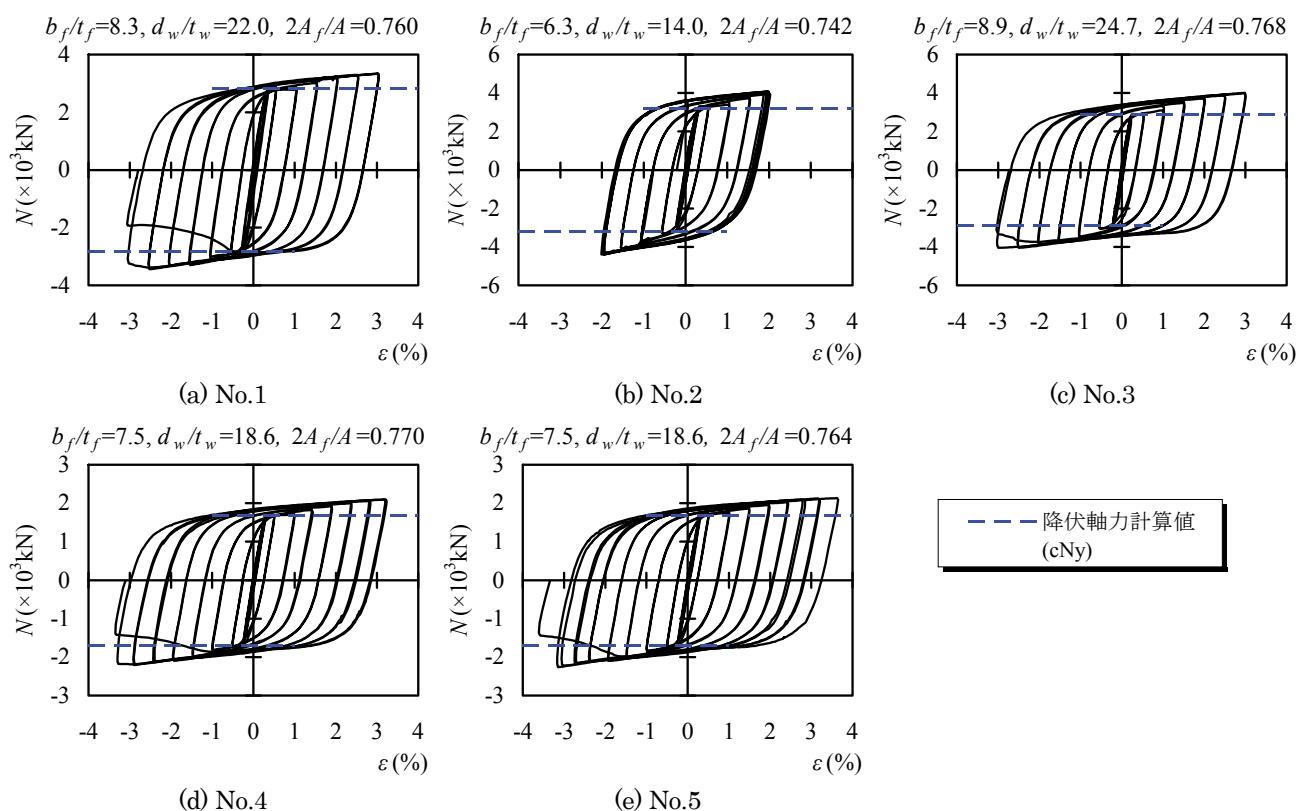


図 4 軸力-軸ひずみ関係

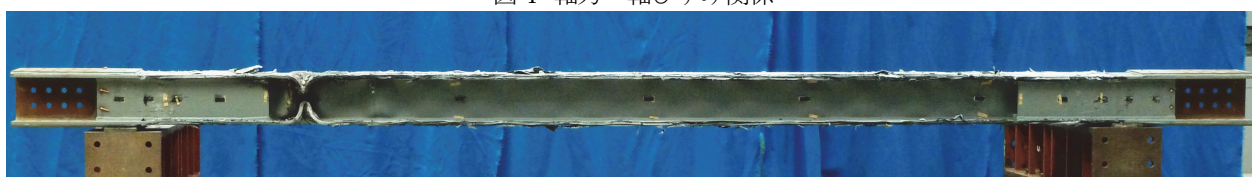


写真 1 実験後の状況 (試験体 No.1)

あり、既往の文献 4)、5)での試設計と応答解析に基づく必要塑性変形倍率($\eta=150$)のほぼ2倍以上に相当する。

図8に試験体 No.1 のピーク時の軸ひずみ分布を示す。弾性時の軸ひずみ分布は引張、圧縮ともに一様となっており、座屈拘束材に大きな軸力が伝達されていないことが確

認できる。大変形時には、引張では中央部の引張ひずみが端部より大きく、圧縮では端部の圧縮ひずみが中央部よりも大きくなる傾向が見られる。

図9は試験体 No.1 の断面の平均軸ひずみの履歴からバイリニア型の履歴モデルを仮定して応力の履歴を算定し、

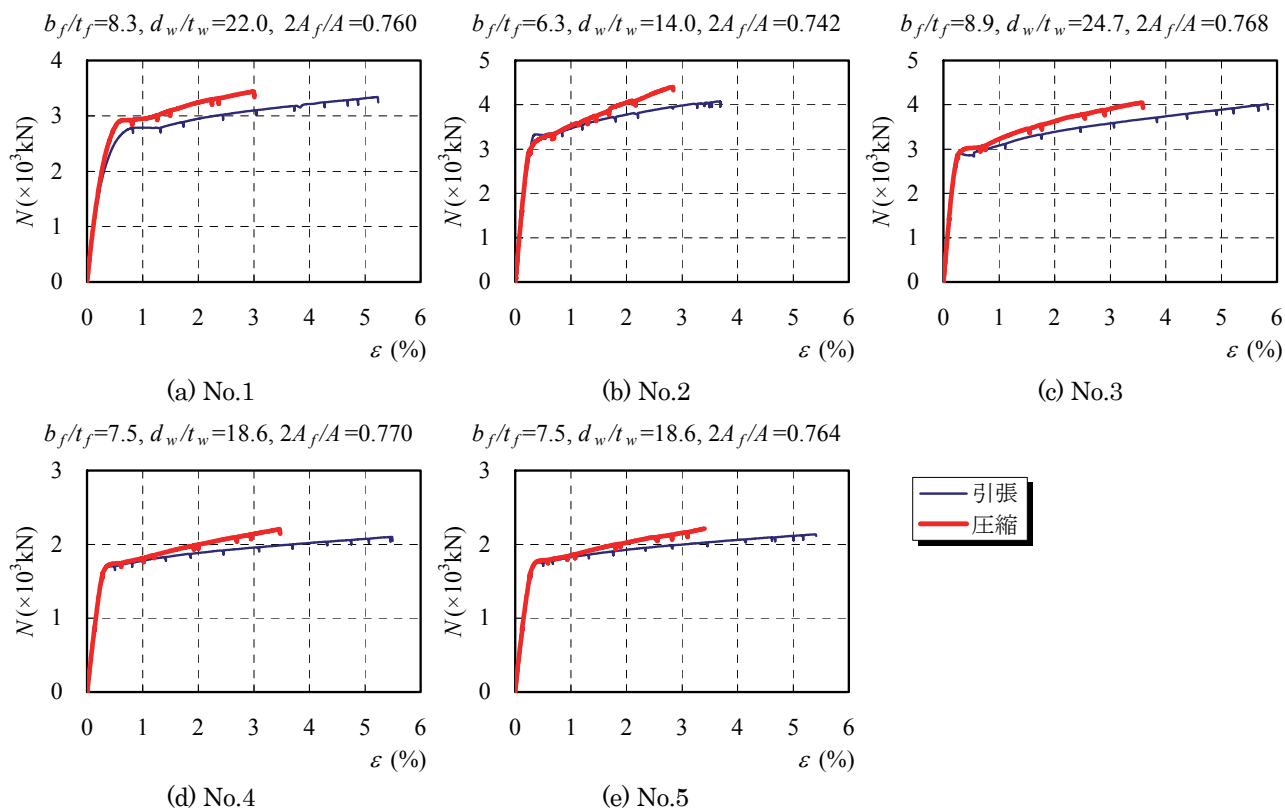


図5 骨格曲線

表3 主要な実験結果の一覧

No.	降伏軸力			最大軸力			限界塑性 ひずみ*3 ε_{pu} (%)	累積塑性 変形倍率 *4 η	破壊 モード
	実験値		計算値	実験値		計算値			
	引張	圧縮		引張	圧縮				
	eN_{yp} (kN)	eN_{yn} (kN)		cN_y (kN)*1	eN_{mp} (kN)				
1	2915	2785	2830	3341	3442	3591	3.9	286	局部座屈
2	3325	3123	3189	4076	4400	4650	3.1	565	破壊せず*5
3	2897	2847	2870	4014	4050	4359	4.6	514	局部座屈
4	1725	1688	1694	2101	2206	2254	4.2	399	局部座屈
5	1733	1735	1695	2136	2266	2255	4.4	476	局部座屈

*1: $cN_y = 2A_f \sigma_{fy} + (A - 2A_f) \sigma_{wy}$ (σ_{fy} : 芯材フランジ降伏点, σ_{wy} : 芯材ウェブ降伏点)

*2: $cN_u = 2A_f \sigma_{fu} + (A - 2A_f) \sigma_{wu}$ (σ_{fu} : 芯材フランジ引張強さ, σ_{wu} : 芯材ウェブ引張強さ)

*3: 骨格曲線の耐力低下時(圧縮側), 最大荷重時(引張側)の塑性ひずみ

*4: 履歴吸収エネルギーを降伏軸力と降伏変位の積で除した値の累積値

*5: 明確な耐力低下が見られないまま載荷終了

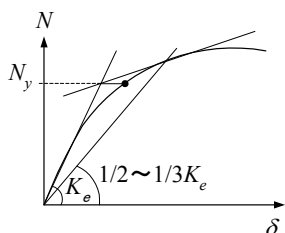


図6 General Yield Point 法

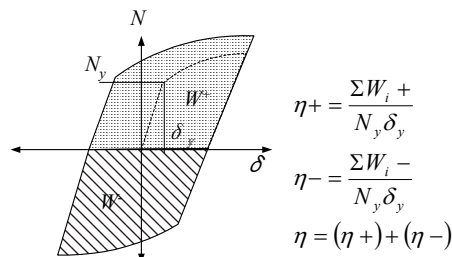


図7 累積塑性変形倍率

軸力分布として示したものである。大変形時には、軸ひずみはシフトするものの軸力は軸方向にほぼ一様となっている。

図 10 にウェブカバープレートの板厚が異なる試験体 No.4 と No.5 の補強部の軸力と芯材弱軸まわりの曲率の関係を示す。図には塑性化部の降伏荷重(cN_y)および補強部の降伏曲率(ϕ_y)も併せて示す。軸力の増加に伴い、No.4 では A' 断面、No.5 では A', E' 断面で、曲率が降伏曲率を上回るようになる。前述のように、軸力-軸ひずみ関係に両者の違いはなく、板厚の影響は見られない。また、補強部の曲げ降伏による変形性能への顕著な影響も見られない。

§4. まとめ

芯材に H 形鋼を用いた座屈拘束ブレースの構成および軸圧縮引張実験の概要について示した。実験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 軸力-軸ひずみ関係は安定した紡錘形の復元力特性を示す。
- 2) 大変形時には圧縮軸力が引張軸力よりもやや大きくなる。
- 3) 鉄骨芯材の幅厚比が大きいと耐力低下が早期に生じる。
- 4) 弾性時の軸ひずみ分布はほぼ一様であり、座屈拘束材に軸力は伝達されていない。大変形時には軸ひずみはシフトするものの軸力は軸方向にほぼ一様となる。
- 5) 補強部が曲げ降伏を生じても軸力-軸ひずみ関係に顕著な影響は見られない。

参考文献

- 1) 日本建築学会:鋼構造座屈設計指針, 2009 年
- 2) 鈴木泉, 佐々木聡, 佐々木康人, 増田圭司:局部座屈補剛した H 形鋼の短柱圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012 年 9 月
- 3) 緑川光正, 佐々木大輔, 麻里哲広, 村井正敏, 岩田衛:鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究クリアランスの圧縮耐力への影響と圧縮耐力に応じた座屈モード数の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 653 号, 2010 年 7 月
- 4) 下川弘海, 森野捷輔, 川口淳, 伊藤茂樹, 加村久哉, 小島修:鋼管補剛平鋼ブレースの動的挙動に関する研究, 第 2 回制震(振)シンポジウム, 2000 年 11 月

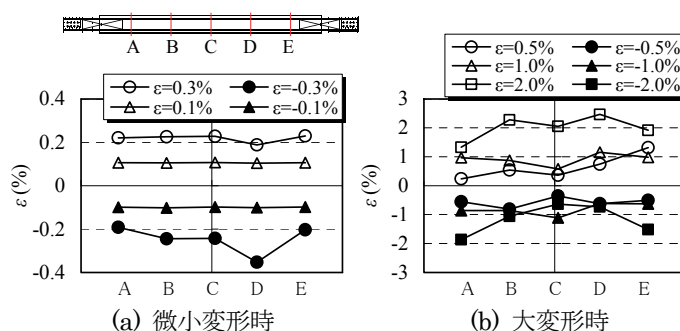


図 8 軸ひずみ分布(試験体 No.1)

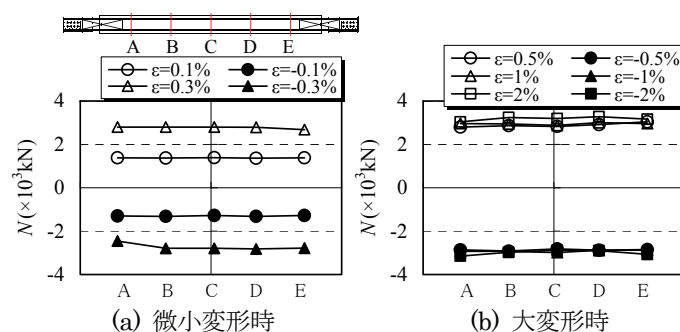


図 9 軸力分布(試験体 No.1)

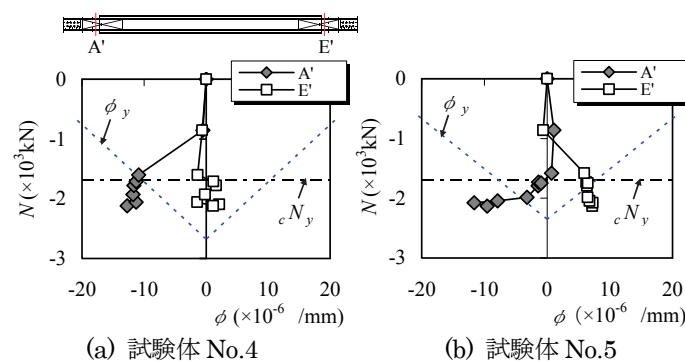


図 10 軸力と曲率の関係

- 5) 加村久哉, 小川厚治, 長谷川隆, 福田浩司, 上村健二:履歴ダンパー付ラーメン構造の地震応答, 鋼構造年次論文報告集, 第4巻, 1996 年 11 月
- 6) 吉井靖典, 佐々木聡, 鈴木泉, 佐々木康人, 桂大輔, 塩田博之:芯材に H 形鋼を用いた座屈拘束ブレースに関する実験的研究その 1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013 年 8 月

ひとこと

この座屈拘束ブレースは既に数件の物件で実施しています。技術開発から実施まで関係各位と連携して進められたことで効果的に実施できたと思います。今後の技術開発も連携のもと進めていきたいと思っています。



佐々木 康人