

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3 疲労性能

小原 泉 佐々木 聡
佐々木 康人 三浦 靖史
大塚 友理

概 要

座屈拘束ブレースは、軸力を伝達する芯材が座屈しないよう座屈拘束材で補剛したブレースであり、圧縮軸力下においても引張軸力下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。既報にて、芯材にH形鋼、座屈拘束材に鋼管を用いたFIRSTブレースの開発について報告している。本報では、芯材に低降伏点鋼(LY225)と従来鋼(SN490)を用いたFIRSTブレースについて、漸増繰返し載荷実験と低サイクル疲労試験を行い履歴特性と疲労性能を確認した。

本ブレースは芯材に低降伏点鋼を用いた場合においても、圧縮軸力時の復元力特性は引張軸力時と同等であり、限界塑性ひずみは芯材の幅厚比を断面積比で重み付けしたパラメータにより評価できることを確認した。本ブレースの疲労性能は鋼構造制振設計指針の疲労性能曲線により安全側に評価できることを確認した。

Experimental study on buckling-restrained brace using H-shaped steel Part 3: Fatigue performance

Abstract

A buckling-restrained brace (BRB) is composed of a restrainer and a core of the brace. The core is covered by the restrainer to prevent it from buckling. Therefore, a BRB has similar mechanical performance under compressive force and tensile force. In the previous studies, we reported on the mechanical performance of FIRST Brace using I-shaped steel.

This study shows the hysteretic behavior of a brace using low-yield-strength steel. According to the cyclic loading test results, the brace has the similar behavior in both compression and tension. The ultimate plastic strain of the brace can be evaluated using the proposed regression equation. In order to evaluate the fatigue performance of the brace, we conducted low-cycle fatigue tests. From the test results, the brace has good performance relative to the fatigue curve of the provision equation in AIJ specification.

キーワード: 座屈拘束ブレース、H形鋼、疲労性能
低降伏点鋼

§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。FIRST ブレースは芯材の H 形鋼、座屈拘束材の鋼管および芯材と座屈拘束材の間に充填されたモルタルで構成されている。既報ではフジタ式座屈拘束ブレース(以下、FIRST ブレース)の耐震性能を報告した¹⁾²⁾。

FIRST ブレースは耐震部材として 2000 本を超える適用実績がある。一方、制振構造用のエネルギー吸収部材として用いるためには、その疲労性能を確認する必要がある。本報では FIRST ブレースについて、芯材に降伏点鋼(LY225)を用いた場合の履歴特性、および低サイクル疲労試験による疲労性能について示す。なお、本技術は一般財団法人 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 改 1)。

§2. 漸増繰返し載荷実験

2.1 実験概要

芯材に降伏点鋼(LY225)を用いた場合の履歴特性を確認するために漸増繰返し載荷実験を行った。実験は骨

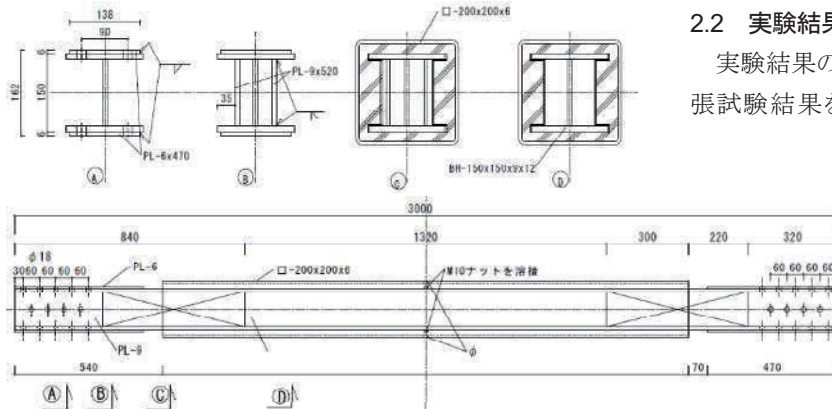


図1 試験体

表1 試験体概要

試験体名	芯材		拘束材 鋼管	塑性化部 長さ	断面積比 $2A_f/A^*$	フランジ幅厚比 b_f/t_f	ウェブ幅厚比 d_w/t_w
	鋼種	断面					
H150-G	SN490B	H-150x150x7x10	□-200x200x6	1300	0.76	7.5	18.6
LY225-G	LY225	BH-150x150x9x12	□-200x200x6	1320	0.76	6.3	14.0

※断面積比は芯材全断面積Aに対するフランジの断面積 $2A_f$ の比

表2 使用鋼材の力学的性質

部位	材質	板厚	降伏点	引張強さ	降伏比	伸び	試験体名	
		(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)		
芯材	SN490B	フランジ	10.0	350.5	528.3	66.3	38.1	H150-G
		ウェブ	6.5	363.1	531.3	68.3	36.2	
	LY225	フランジ	12.1	233.7	332.8	70.2	56.6	LY225-G
		ウェブ	8.9	241.5	330.7	73.0	54.2	
座屈拘束材	BCR295	5.9	344.7	446.7	77.2	39.4	共通	
補強材	フランジ・ウェブカバーPL	SN490B	9.0	378.3	575	65.8	32.3	H150-G
	フランジカバーPL	SN400B	8.9	334.7	486.5	68.8	40.6	
	ウェブカバーPL	SN400B	5.8	376.9	485.5	77.6	33.3	

組を模した載荷フレームによる架構実験とした。試験体形状を図1に、試験体の概要を表1に示す。試験体数は2体とし、1体はLY225の溶接組立のH形断面材、もう1体はSN490Bの圧延H形鋼とした。試験体は全長3000mmとし、その端部は高力ボルト接合とした。芯材の塑性変形を想定する部分の長さ(以下、塑性化部長さ)は1300mm程度であり、芯材端部は鋼板を溶接して補強した。本試験体では、鋼構造制振設計指針³⁾(以下、制振指針)の全体座屈の拘束条件を満たし、全体座屈が発生しない設計とした。

座屈拘束材はすべてBCR295とし、使用鋼材の力学的性質を表2に示す。引張試験はJIS Z 2241 5号試験片で行った。充填モルタルの圧縮試験結果を表3に示す。モルタルのJロート試験の結果は18.7秒であった。充填モルタルの圧縮強度の発現を確認した材令19日以降に載荷を行った。架構実験の載荷方法は図2に示すように、載荷フレームに45° 方向に試験体を取付け、能力±2000kNのオイルジャッキにより水平方向に繰返し載荷を行った。載荷は降伏軸力に達するまでは荷重制御とし、降伏後は芯材の塑性化部長さを基準とした変位制御とした。載荷サイクルは、芯材の降伏応力の0.5倍、1倍、塑性化部の軸ひずみに対して0.5%、0.75%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%と2回ずつ漸増繰返しを行い、3.5%で試験体が耐力低下するまで繰返し載荷を行った。

2.2 実験結果

実験結果の概要を表4に示す。降伏軸力の計算値は引張試験結果を用いて算出した。また、限界塑性ひずみ

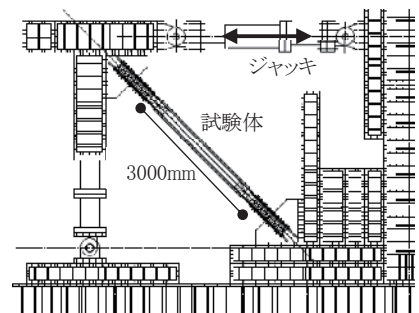


図2 実験装置

表3 モルタルの素材試験結果

材齢	ヤング率 [*] (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	同左時ひずみ (μ)
19日	18892	49.8	4263
28日	18896	53.0	4824

※圧縮強度の1/3応力時の割線剛性
テストピースは全て封かん養生とした

表4 実験結果

試験体名	芯材鋼種	初期剛性		降伏軸力				最大軸力実験値		限界塑性ひずみ	累積塑性変形倍率(変位)	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							
		eK	cK^{**1}	$eN_y(+)$	$eN_y(-)$	cN_y	$eN_{max}(+)$	$eN_{max}(-)$				
(kN/mm)	(kN/mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)						
H150-G	SN490B	448.0	450.9	1475	1473	1370	2001	-2150	6.0	522	局部座屈	
LY225-G	LY225	512.0	524.5	1250	1205	1133	1741	-2052	14.7	1044	局部座屈	

※1 弾性剛性計算値 $cK=A_d A_j E / (L_d A_j + 2L_{e1} A)$, A_d : 芯材断面積, A_j : 補強部断面積, L_d : 塑性化長さ, L_{e1} : 補強部長さ

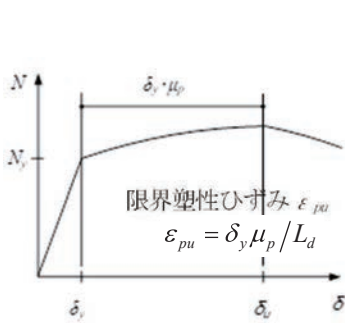
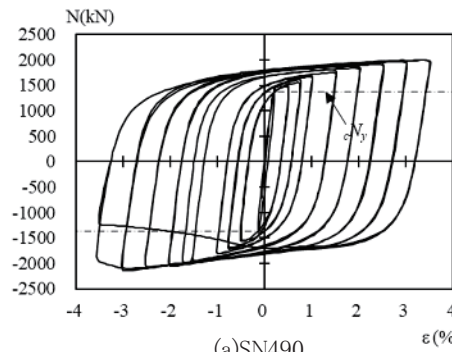
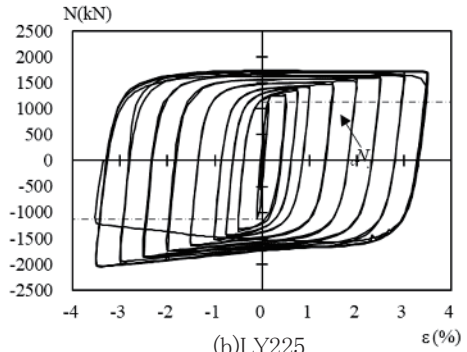


図3 限界塑性ひずみ



(a)SN490



(b)LY225

図4 軸力-軸ひずみ関係

(ϵ_{pu})は、骨格曲線の耐力低下時の軸ひずみを用いて、鋼構造限界状態設計指針・同解説⁴⁾で示される方法(図3)を準用して算定した。なお、表中に示す ϵ_{pu} は引張軸力時と圧縮軸力時の平均値を示している。累積塑性変形倍率(η)は、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り、耐力低下が発生する1つ前のサイクルまでの累積とした。

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軸変形をその長さで除した値である。いずれの試験体も紡錘形の履歴性状を示した。両試験体とも最終破壊モードは局部座屈であった。初期剛性の実験値と弾性剛性計算値は良い対応を示した。降伏軸力の実験値はH150-Gでは概ね良い対応を示している。LY225-Gでは、降伏軸力の実験値が計算値より10%程度大きい。文献5)によると極低降伏点鋼(LY100)の溶接組立のH形断面材では、溶接金属による断面積の増加と母材への熱影響により14%程度の降伏軸力が高くなることが確認されている。LY225-Gにおいても同様の理由により降伏軸力が上昇したと考えられる。試験体H150-Gより試験体LY225-Gの方が、限界塑性ひずみと累積塑性変形倍率は大きい。

文献1)では、(1)式に示すフランジとウェブの幅厚比を断面積比で重み付けしたパラメータ ξ を定義している。図5に限界塑性ひずみ ϵ_{pu} と ξ の関係を示す。図中には文献1)の実験結果と(2)式による回帰曲線を併せて示す。破壊モードが局部座屈となる場合、変形性能は(2)式により評価可能である。両試験体ともに回帰曲線と良い対応を示す。

$$\xi = \sqrt{\left(\frac{2A_f}{A}\right)\left(\frac{b_f}{t_f}\right)^2\left(\frac{\sigma_{fy}}{E}\right) + \left(1 - \frac{2A_f}{A}\right)\left(\frac{b_w}{t_w}\right)^2\left(\frac{\sigma_{wy}}{6E}\right)} \quad (1)$$

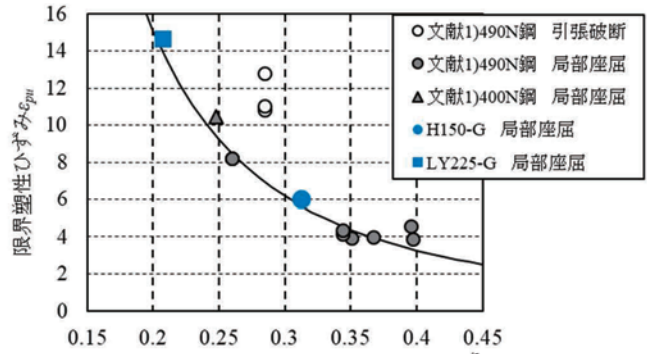


図5 限界塑性ひずみと ξ の関係

$$\epsilon_{pu} = 0.0043\xi^{-2.212} \quad (2)$$

ここで、 σ_{fy} :フランジの降伏点、 σ_{wy} :ウェブの降伏点、E:鋼材の弾性係数である。

§3. 一定振幅繰返し载荷実験

3.1 実験概要

実験は2章と同様の架構実験と、芯材の軸方向に加力する軸圧縮実験の2種類である。表5に試験体を一覧にして示す。試験体数は19体とし、H150シリーズおよびLY225シリーズは2章と同様の試験体である。芯材はH150シリーズ、AH200シリーズが、圧延H形鋼、それ以外は溶接組立H形断面材(以下、併せてH形鋼とする)を用いた。架構実験の試験体は全長3000mm、軸圧縮実験は5090mmとし、その端部は高力ボルト接合とした。塑性化部長さは架構実験が1220~1368mm、軸圧縮実験が2920mmであり、芯材端部は鋼板を溶接して補強した。

表5 試験体一覧

実験種類	試験体名	載荷履歴	N数	芯材		拘束材 鋼管	塑性化部 長さ	断面積比 $2A_f/A$ ※1	フランジ幅厚比 b_f/t_f	ウェブ幅厚比 d_w/t_w	備考
				鋼種	断面						
架構 実験	H150	0.75%	2	SN490B	H-150x150x7x10	□-200x200x6	1300	0.76	7.5	18.6	
		1.5%	2								
		2.5%	2								
	H200	1.5%	1	SN490B	BH-150x150x6x9	□-200x200x6	1270	0.77	8.3	22.0	
	H200-CL※2	1.5%	1	SN490B	BH-150x150x6x9	□-200x200x6	1270	0.77	8.3	22.0	※2
	H250	1.5%	1	SN490B	BH-156x160x6x9	□-200x200x6	1220	0.78	8.9	23.0	
	LY225	0.75%	2	LY225	BH-150x150x9x12	□-200x200x6	1320	0.76	6.3	14.0	
		1.5%	2								
		2.5%	2								
SAR	1.5%	1	SN490B	BH-150x150x9x9	□-200x200x6	1300	0.69	8.3	14.7		
ASP	1.5%	1	SN490B	BH-150x120x6x9	□-200x200x6	1368	0.73	6.7	22.0		
軸圧縮 実験	AH200	1.5%	1	SN490B	H-200x200x8x12	□-300x300x9	2920	0.76	8.3	22.0	
		2.5%	1								

※1 断面積比は芯材全断面積Aに対するフランジの断面積 $2A_f$ の比

※2 H200-CLはフランジ内側の空きを4.5mmとした。他の試験体は2.5mmである。

表6 使用鋼材の力学的性質

部位		材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	試験体名
芯材	フランジ	SN490B	12.1	415.3	567.3	73.2	39.5	
	ウェブ		7.7	450.2	585.9	76.8	33.0	
	フランジ		8.9	385.1	578.7	66.5	34.6	H200,H250,SAR, ASP
	ウェブ		6.0	413.3	584.7	70.7	31.2	
座屈拘束材		BCR295	9.0	401.4	475.1	84.5	34.2	軸圧縮実験
補強材	フランジ・ウェブカバーPL	SN490B	9.0	378.3	575.0	65.8	32.3	H200,H250,SAR, ASP
	フランジ・ウェブカバーPL		5.9	425.2	601.1	70.7	30.5	

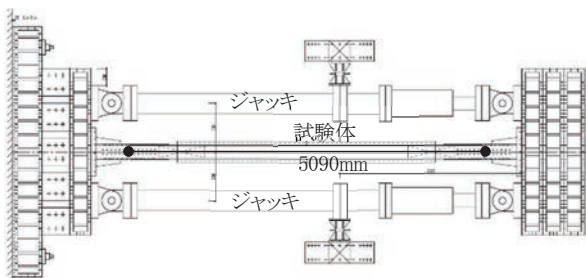
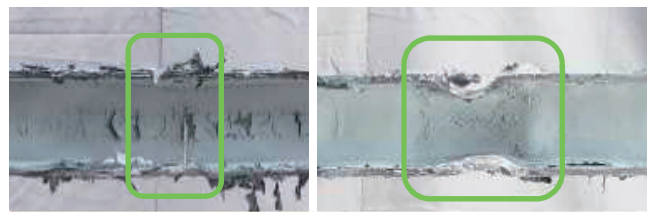


図6 試験装置図(軸圧縮実験)



(a) H150-e1.5 (引張破断) (b) LY225-e2.5 (局部座屈)

図7 破壊状況

表7 試験結果一覧

実験種類	試験体名	芯材鋼種	初期剛性			降伏軸力			最大軸力実験値		累積塑性 変形倍率 η	繰返し数 N_f	破壊モード
			実験値 eK	計算値 cK ※1	eK/cK	実験値 eN_y	計算値 cN_y	eN_y/cN_y	引張 $eN_{max}(+)$	圧縮 $eN_{max}(-)$			
			(kN/mm)	(kN/mm)		(kN)	(kN)		(kN)	(kN)			
架構 実験	H150-e0.75-1	SN490B	450.0	451.4	1.00	1490	1371	1.09	1659	-1736	2018	153	引張破断
	H150-e0.75-2		456.0	453.8	1.00	1475	1378	1.07	1596	-1667	2880	216	引張破断
	H150-e1.5-1		450.0	453.8	0.99	1455	1378	1.06	1775	-1924	1702	55	引張破断
	H150-e1.5-2		454.0	454.0	1.00	1460	1379	1.06	1763	-1919	1358	43	引張破断
	H150-e2.5-1		456.0	453.9	1.00	1475	1379	1.07	1892	-2033	615	13	局部座屈
	H150-e2.5-2		454.0	453.8	1.00	1480	1378	1.07	1944	-2147	508	10	局部座屈
	H200-e1.5	406.0	398.7	1.02	1380	1354	1.02	1645	-1783	775	29	引張破断	
	H200-CL-e1.5	404.0	399.8	1.01	1370	1357	1.01	1642	-1778	808	30	引張破断	
	H250-e1.5	426.0	427.8	1.00	1460	1435	1.02	1729	-1860	980	37	引張破断	
	LY225-e0.75-1	522.4	524.0	1.00	1260	1127	1.12	1415	-1463	4044	189	引張破断	
	LY225-e0.75-2	520.0	525.4	0.99	1280	1135	1.13	1457	-1517	5329	245	引張破断	
	LY225-e1.5-1	522.0	522.4	1.00	1280	1129	1.13	1571	-1693	2846	61	引張破断	
	LY225-e1.5-2	520.0	521.5	1.00	1260	1127	1.12	1611	-1714	2205	47	引張破断	
	LY225-e2.5-1	521.7	526.0	0.99	1260	1127	1.12	1680	-1893	1469	19	局部座屈	
	LY225-e2.5-2	520.0	520.8	1.00	1260	1126	1.12	1671	-1929	1699	21	引張破断	
SAR-e1.5	434.0	432.1	1.00	1490	1479	1.01	1801	-1956	711	26	引張破断		
ASP-e1.5	324.0	323.2	1.00	1143	1161	0.98	1421	-1540	804	30	引張破断		
軸圧縮 実験	AH200-e1.5	SN490B	350.0	360.0	0.97	2740	2688	1.02	3114	-3240	1102	47	局部座屈
	AH200-e2.5	352.0	360.0	0.98	2785	2687	1.04	3358	-3435	247	6	局部座屈	

※1 弾性剛性計算値 $cK = A_d A_j E / (L_d A_j + 2L_{el} A)$, A_d : 芯材断面積, A_j : 補強部断面積, L_d : 塑性化長さ, L_{el} : 補強部長さ

本試験体では制振指針³⁾による全体座屈の拘束条件を満足し、全体座屈が発生しない設計とした。座屈拘束材はすべてBCR295とした。主な実験因子は、①芯材の鋼種、②载荷振幅(片ひずみ振幅0.75%、1.5%、2.5%)、③フランジ内側と鋼製型枠とのあき e_f ¹⁾(H200-CL:4.5mm、それ以外2.5mm)、④芯材の幅厚比、⑤全断面積に対するフランジの断面積の比である。

使用鋼材の力学的性質を表6に示す。H150シリーズ、LY225シリーズ、架構実験の座屈拘束材および充填モルタルについては2章と同様である。軸圧縮実験の载荷方法は図6に示すように、能力±2000kNの2本のオイルジャッキを平行に設置した载荷フレームに試験体を取り付け、水平方向に繰返し载荷を行った。試験体芯材の弱軸が上下方向となるよう試験体を载荷フレームに取り付けた。载荷は降伏軸力に達するまでは荷重制御とし、降伏後は芯材の塑性化部長さによる変位制御とした。载荷サイクルは、降伏軸力の2/3倍のサイクルの载荷後、軸ひずみ一定振幅载荷

を行った。

3.2 実験結果

実験結果の概要を表7に示す。降伏軸力および各変形性能の算出は2章と同様の方法による。初期剛性の実験値は引張側にて求めた。2章と同様に芯材鋼種をLY225とした試験体では、降伏軸力の実験値が計算値より12%程度大きい。芯材鋼種をSN490とした試験体では降伏軸力の実験値は計算値と概ね良い対応を示している。

試験体の破壊状況の例を図7に示す。载荷振幅が比較的小さい試験体の破壊モードは引張破断であった。载荷振幅が2.5%の一部の試験体および軸圧縮実験の試験体では、芯材の局部座屈により耐力が低下した。

図8に軸力(N)-軸ひずみ(ϵ)関係を示す。また、同図中に降伏軸力の計算値 N_y 、耐力低下までの载荷の繰返し数 N_f も併せて示す。いずれの試験体も N - ϵ 関係は、耐力低下が生じるまでは安定した紡錘形の履歴性状を示している。図9に繰返し数と最大・最小軸力の推移を示す。H150

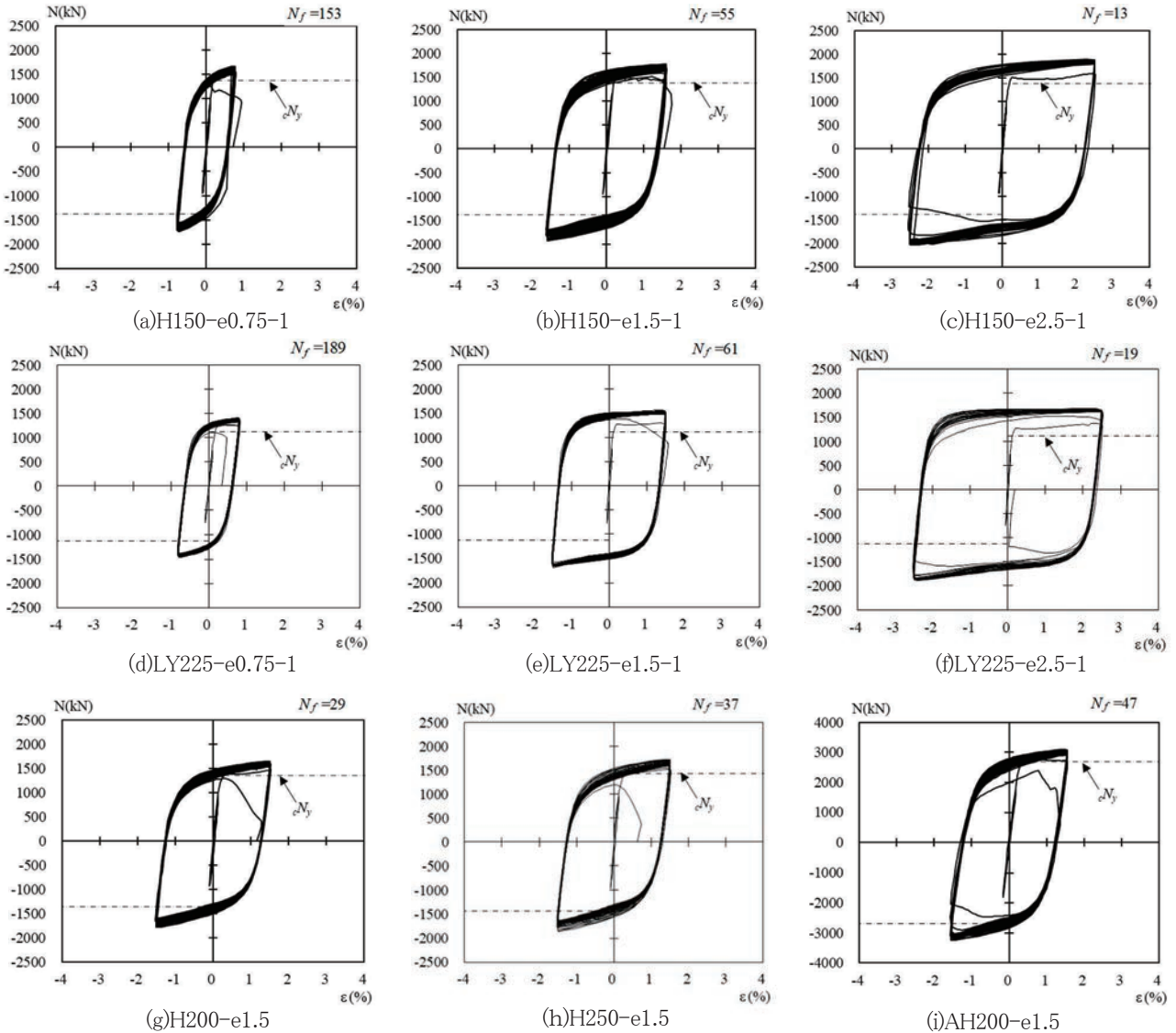


図8 軸力-軸ひずみ関係

シリーズの試験体では軸力の最大・最小値は1~5サイクル目で最大・最小値となり、その後ゆるやかに低下していくが、LY225シリーズでは繰返し数の半分程度で最大・最小値となり、その後低下した。

芯材のフランジ内側のあきの実験因子については、条件が同等の試験体と比較して、繰返し数、破壊モードに差はみられなかった。全断面積に対するフランジの断面積の

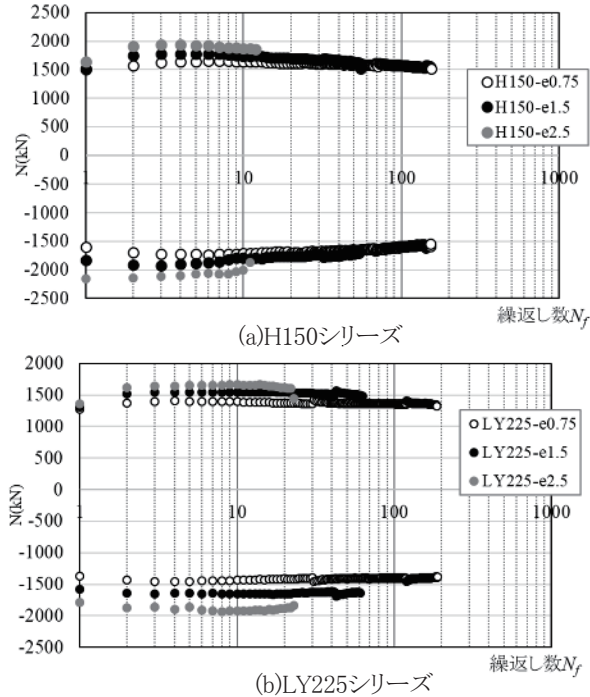


図9 繰返し数に対する最大・最小軸力

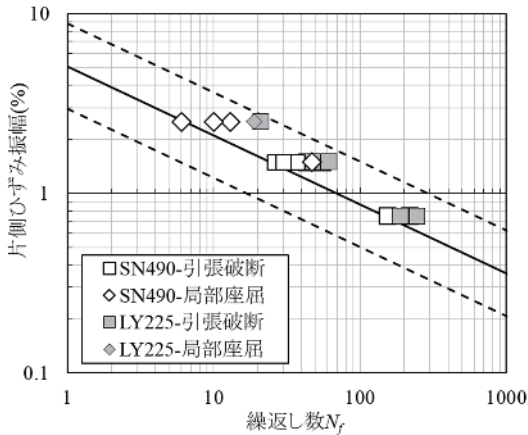


図10 疲労性能

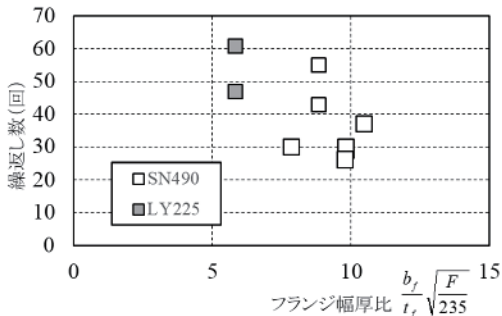


図11 疲労性能

比が小さい試験体では、大きい試験体に比べ、繰返し数が少ない傾向がみられた。

3.3 疲労性能

図10に疲労性能を示す。図中の実線は座屈拘束ブレースの疲労性能曲線で制振指針³⁾により(3)式で示される。

$$\varepsilon_a = 5.108 \left(N_f / 2 \right)^{-0.385} \quad (3)$$

ここで、 ε_a は片ひずみ振幅(%), N_f は繰返し半サイクル数である。破線は制振指針で疲労性能曲線の上下限值とされる $\sqrt{3}$ 倍および $1/\sqrt{3}$ 倍となる曲線である。実験結果は概ね疲労性能曲線と同様の傾向を示した。LY225の試験体ではSN490の試験体に比べ疲労性能が高い傾向がみられた。図11にフランジ幅厚比と繰返し数の関係を示す。フランジ幅厚比が大きいほど、繰返し数は低下する傾向にある。

§4. まとめ

フジタ式座屈拘束ブレースの漸増繰返し载荷試験および疲労試験を行い、その力学的挙動および疲労性能について検討した。検討により得られた知見を以下に示す。

- 1) LY225を芯材に用いた場合においても、本ブレースの圧縮軸力と引張軸力は同等であり、必要な変形性能を有する。
- 2) LY225においても、SN材と同様に芯材の幅厚比を断面積比で重み付けしたパラメータ ξ の回帰式で限界塑性ひずみを予測できる。
- 3) 本ブレースの疲労性能は鋼構造制振設計指針の疲労性能曲線と同様の傾向を示し、指針式より概ね安全側で評価可能である。

参考文献

- 1) 吉井、鈴木、佐々木ほか: 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(北海道)、構造III、pp.1269-1274、2013.9
- 2) 大塚、佐々木ほか: 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4、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造III、2019.9
- 3) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針、2014.11
- 4) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説、2010.2
- 5) 吉岡保雄、山根正寛、中浜修: 極低降伏点鋼の強度に及ぼす溶接の影響、溶接学会全国大会講演概要、2009.11

ひとこと

おかげさまで、FIRSTブレースは各地で使用され、多くの実績があります。制振用にブラッシュアップした本技術を活用していきたいと思ひます。



小原 泉