

角形鋼管で補剛した座屈拘束ブレースに関する実験的研究

小原 泉 佐々木 聡
佐々木 康人 吉田 文久 *1
西 拓馬 *1

概 要

座屈拘束ブレースは、軸力を負担する芯材の周囲に設置した鋼管などの座屈拘束材により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。これまでに芯材にH形鋼を、座屈拘束材に鋼管とモルタルを用いたFIRSTブレース(Fujita Improved and Reinforced Steel Brace)の開発を行い、数多くの実績がある。しかし、適用できるH形鋼の断面が限られていることや、モルタルを充填する工程が必要などの課題があった。これに対し、設計の自由度が高い平鋼の芯材を角形鋼管で補剛する鋼製座屈拘束ブレース(DUAL CORE BRACE)の開発を行った。本稿では、鋼製座屈拘束ブレースの構成および力学性能確認のための漸増繰返し載荷実験、疲労性能確認のための一定振幅繰返し載荷実験の結果について示す。開発した鋼製座屈拘束ブレースは安定した履歴特性を示し、その疲労性能は既往の指針式により評価できることを確認した。

Experimental study on buckling restrained brace using RHS steel tubes

Abstract

A buckling restrained brace is a member that restrains the buckling due to the compressive axial force, achieving superior seismic resistance. The buckling restrained braces comprising of an H-shaped steel core, a steel tube and mortar (FIRST Brace: Fujita Improved and Reinforced Steel Braces), has been developed and utilized in the building structure. However, it has some disadvantages such as that the design of core section is not easy in low axial force.

In this study, the buckling restrained brace using RHS steel tubes (DUAL CORE BRACE) was developed. The brace comprised only steel parts and mortar is not used. This paper details the structure of the brace and the results of cyclic loading tests to verify the seismic performance and constant amplitude tests to verify the fatigue performance. As a result of the test, it was confirmed that the brace has stable restoring force characteristics and superior fatigue performance, and that the fatigue characteristics can be evaluated with the previously provided formula.

キーワード： 座屈拘束ブレース、角形鋼管、
繰返し載荷実験、疲労性能

*1 大和ハウス工業株式会社

§1. はじめに

座屈拘束ブレースは鉄骨ブレースの周囲を鋼管やモルタルなどで覆い、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、さまざまな座屈拘束ブレースが実用化され、建物の耐震部材ならびに制振部材として用いられている¹⁾。当社でも芯材に H 形鋼、拘束材に鋼管を使用した FIRST ブレースを開発し²⁾、数多くの適用実績がある。しかし FIRST ブレースは芯材に H 形鋼を使用するため、軸力が小さい部材での設計の自由度が低く、要求される設計条件に柔軟な対応ができないこと、モルタルを充填材に使用するために、工場や現場でモルタルを充填するプロセス

が必要などの課題があった。そこで、鋼材のみで構成され、幅広い範囲での軸力の設計を柔軟に行うことができる鋼製座屈拘束ブレース(DUAL CORE BRACE)の開発を行った。

本稿では、この鋼製座屈拘束ブレースの構成と疲労性能について示す。なお、本ブレースは耐震部材および制振部材として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 13-21 号改)。

§2. 鋼製座屈拘束ブレースの構成

図 1、2 にブレースの構成と完成図をそれぞれ示す。鋼製座屈拘束ブレースは芯材である平鋼を 2 本の角形鋼管で挟み、芯材の座屈を拘束している。2 本の鋼管は接合板を溶接することで接続している。拘束材の局部座屈を防止する効果を高めるために芯材と角形鋼管の間に鋼管と同幅同長の鋼板を設置することができる(以下、内挿板とする)。また、芯材中央にスリットを設けることにより、任意の軸力の設計が可能となっている。スリットを設けた場合はスリット内にスペーサーを挿入し、芯材強軸方向への座屈を防止する。アンボンド材としてブチルゴムテープを芯材と座屈拘束材の間に挿入する。また、ブレース端部に補強板を設置し、座屈拘束材の補剛効果を高めている。芯材の鋼種は、耐震部材では、従来の 400 N/mm² 級鋼材、490N/mm² 級鋼材のほか、550N/mm² 級鋼材が使用できる。また、制振部材では建築構造用圧延鋼材(SN400B、C、SN490B、C)、建築構造用低降伏点鋼(LY225)が芯材として使用できる。鋼管は STKR400 である。接合部は H 形断面または十字形断面とし、高力ボルト摩擦接合とする。

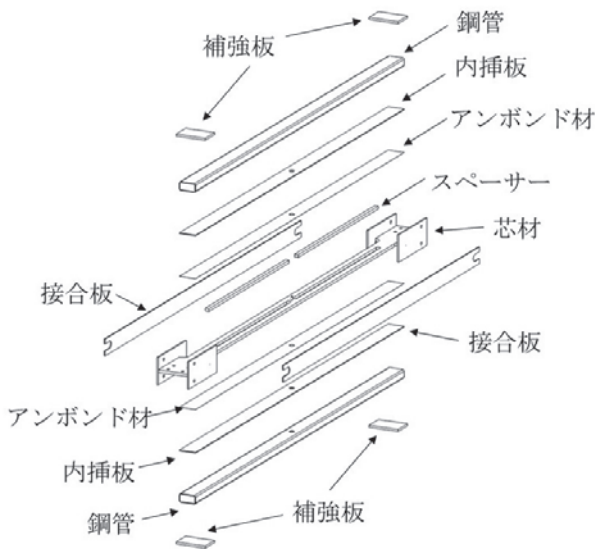


図 1 ブレースの構成

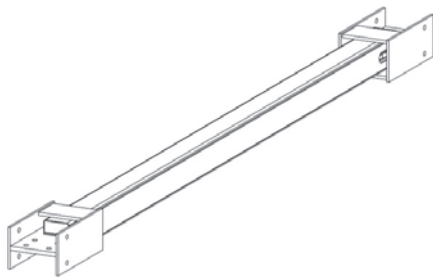


図 2 ブレースの完成図

§3. 漸増繰返し载荷実験

3.1 実験概要

鋼製座屈拘束ブレースの力学的性能および破壊状況を確認するために漸増繰返し载荷実験を行った。表 1 に試験体一覧を、図 3 に試験体形状を示す。パラメータは芯材の鋼種(SN400、SN490、LY225、HBL385-L)、接合板の

表 1 試験体一覧および実験結果

試験体名	試験体諸元									実験結果					
	芯材			鋼管	接合板		内挿板		降伏軸力 N _y kN	最大軸力		限界塑性ひずみ ε _{pu} %	累積塑性変形倍率 η	破壊時 载荷ひずみ	破壊 モード
	板厚	スリット幅	鋼種	板厚	鋼種	板厚	鋼種	引張		圧縮					
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N _{max} (+) kN	N _{max} (-) kN						
F400	16	25	SN400B①	100x50x3.2	6	SS400	-	328	507	650	6.82	719	3.0%	4回目	引張破断
F400-RJ9	16	25	SN400B②	100x50x3.2	9	SS400	-	323	512	663	6.71	853	3.0%	6回目	引張破断
F400-ns	16	0	SN400B①	100x50x3.2	6	SS400	-	442	669	803	7.57	1233	-3.0%	10回目	局部座屈
F225	16	25	LY225	100x50x3.2	6	SS400	-	245	388	530	9.99	681	3.0%	2回目	引張破断
F490	16	25	SN490B	100x50x4.5	9	SS400	-	453	611	767	5.57	885	3.0%	11回目	引張破断
F385-i4	12	30	HBL385B-L	100x50x3.2	9	SS400	4.5	387	489	567	4.93	631	3.0%	9回目	引張破断

板厚、スリットの有無である。試験体の長さは 3000mm とした。芯材の寸法は 16mm×98mm であり、F400-ns 以外は 25 または 30mm のスリットを設けている。拘束材には STKR400 材の鋼管を用い、サイズは 100×50mm、板厚は 3.2~4.5mm である。アンボンド材であるブチルゴムの厚さは 0.5mm とした。鋼材の引張試験による機械的性質を表 2 に示す。

3.2 荷重装置

荷重装置を図 4 に示す。実験は柱脚及び上梁端にピンを設けたフレームに試験体を 45 度方向に設置し、梁端を油圧ジャッキにより水平方向に加力する方式とした。荷重柱下部はピン支持とし、油圧ジャッキ(1500kN)により正負繰返し荷重を行った。試験体はガセットプレートを通じて加力装置に取付けた。荷重は芯材塑性化部の軸ひずみで制御した。なお芯材に引張力の生じる方向を正とした。荷重履歴を図 5 に示す。漸増繰返し後、最大耐力の 95%以下に耐力が低下するまで、芯材の軸ひずみ 3%で繰返し荷重を行った。

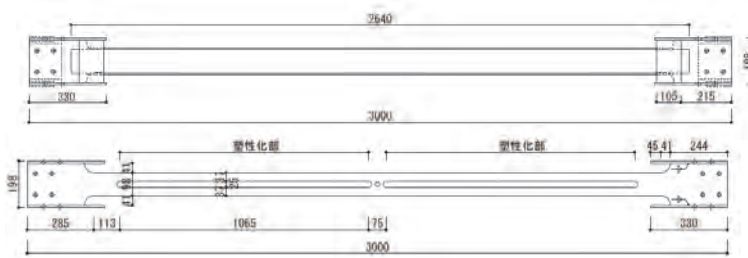


図 3 試験体形状 (F400)

表 2 使用鋼材の機械的性質

部位	寸法	鋼種	板厚	降伏点	引張強さ	降伏比	破断伸び
			(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
芯材	PL-16	LY225	16.0	212	308	69	42
	PL-16	SN400B①	16.0	276	437	63	29
	PL-16	SN400B②	16.0	276	427	65	31
	PL-16	SN490B	16.0	376	539	70	27
	PL-12	HBL385B-L	12.0	447	582	77	23
鋼管	□-100x50x3.2	STKR400①	3.2	435	485	90	26
	□-100x50x3.2	STKR400②	3.2	371	419	89	37
	□-100x50x4.5	STKR400	4.5	436	505	86	30
内挿板	PL-3.2	SS400	3.2	397	465	85	22
	PL-4.5	SS400	4.5	337	464	73	25

3.3 実験結果

実験結果概要を表 1 に示す。最終の破壊モードは、座屈拘束材の局部座屈により耐力低下したものを局部座屈、芯材の引張破断により耐力低下したものを引張破断と分類した。限界塑性ひずみは、図 6 に示す方法で算定した骨格曲線における、最大耐力時の変位から算定した値であり、表中の値は引張側と圧縮側の最小値を示している。また、累積塑性変形倍率(η)は耐力が最大耐力の 95%以下に低下した時点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であり、引張側と圧縮側の合

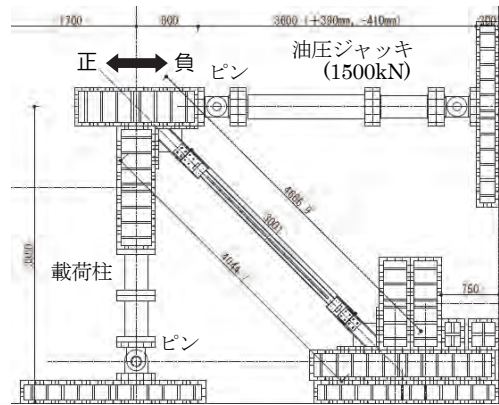


図 4 荷重装置図

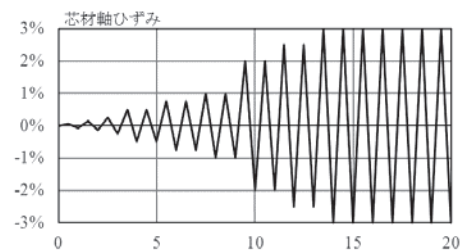


図 5 荷重履歴

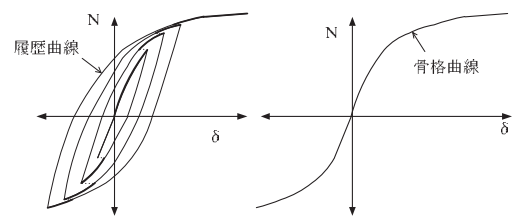


図 6 骨格曲線



(a)F400(引張破断)



(b)F400-ns(局部座屈)

図 7 破壊状況

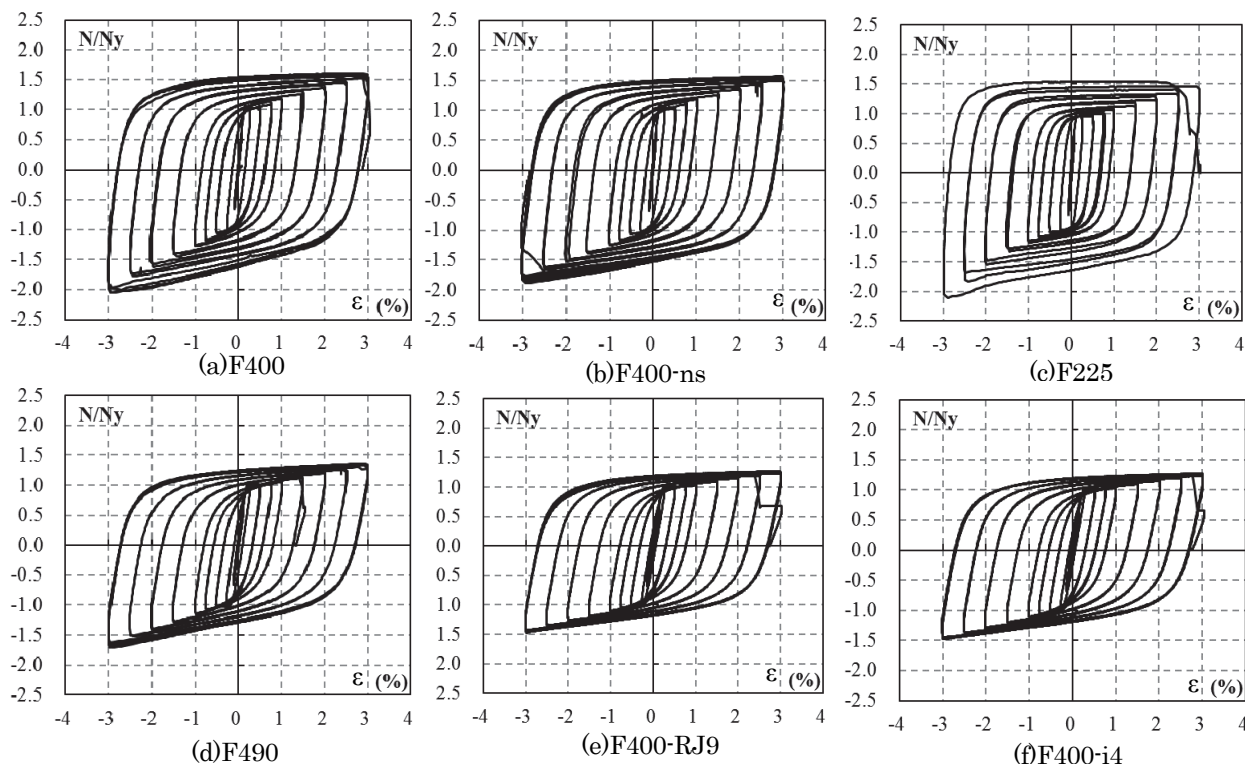


図 8 荷重-ひずみ関係

計を示す。図 7 に試験体の破壊状況の写真を示す。

図 8 に荷重-ひずみ関係を示す。縦軸は芯材軸力を材料引張試験結果による降伏軸力 N_y で無次元化した値(正側が引張、負側が圧縮)であり、横軸は芯材の塑性化部の平均軸変位をその長さで除した軸ひずみ ϵ である。

各試験体ともに安定した紡錘形の履歴特性を示した。破壊状況は F400-ns を除き、引張破断となった。F400-ns では芯材弱軸方向の力により鋼管が局部座屈した。各試験体ともに限界塑性ひずみ ϵ_{pu} が 4.5~10%、累積塑性変形倍率 η が 630~1200 と十分な変形性能を示した。

接合板の板厚を厚くした F400-RJ9 では累積塑性変形倍率が F400 より増大している。また、F490 では芯材強軸方向の局部座屈に対する拘束材の余裕度が F400, F225 より大きく、累積塑性変形倍率も大きい。これより強軸方向の拘束条件が変形性能に影響を与えることが確認できた。また、芯材の鋼種の異なる F225, F385-i4 は F400 と同等の累積塑性変形倍率を示した。

設計において主架構の最大層間変形角を 1/75 程度とした場合、座屈拘束ブレースの軸ひずみは最大で 1.5%程度であるため、各試験体の荷重軸ひずみ 1.5%時の降伏軸力実験値に対する耐力上昇率 N/N_y を表 3 に示す。一般の座屈拘束ブレースと同様に、引張時より圧縮時の耐力上昇率の方が大きい。スリットのない F400-ns は他の芯材が SN400 の試験体と比較し、やや耐力上昇率が低い。スリットがある場合、スリット部において芯材とスペーサー間にもクリ

表 3 耐力上昇率

	1.5%ひずみ時		破壊モード
	引張	圧縮	
F400	1.26	1.40	破断
F400-RJ9	1.27	1.45	破断
F400-ns	1.25	1.37	局部座屈
F225	1.13	1.27	破断
F490	1.12	1.27	破断
F385-i4	1.10	1.21	破断

アランスが生じるため、局部座屈が生じやすくなり、拘束材に伝わる軸力が増加する。そのため耐力上昇率がやや大きくなったと考えられる。

§ 4. 一定振幅繰返し荷重実験

4.1 実験概要

制振部材として、鋼製座屈拘束ブレースの疲労性能を確認するために一定振幅繰返し荷重実験を行った。実験装置は 3 章の漸増繰返し荷重実験と同様である。実験のパラメータは鋼種 (SN400, LY225, SN490)、荷重ひずみ振幅 (0.75%、1.5%、3%)、スリットの有無である。試験体一覧を表 4 に示す。試験体の形状および使用材料は 3.1 の漸増繰返し荷重実験と同様であり、試験体数 (N) は各条件に対し 1~2 とした。荷重は弾性範囲での剛性確認後、芯材の引張破断あるいは圧縮時の耐力低下を確認するまで、所定の

表 4 試験体一覧および実験結果

	試験体名	荷重ひずみ振幅 (%)	降伏軸力 N_y (kN)	最大軸力				繰返し回数 (回)	破壊モード	累積塑性変形倍率 η (倍)
				引張		圧縮				
				$N_{max}(+)$ (kN)	$N_{max}/N_y(+)$	$N_{max}(-)$ (kN)	$N_{max}/N_y(-)$			
F400	F400-0.75-2	0.75	327	379	1.16	406	1.24	212	破断	3794
	F400-0.75-3	0.75	332	382	1.15	409	1.23	162	破断	2909
	F400-1.5-1	1.5	341	459	1.35	491	1.44	51	破断	2009
	F400-1.5-2	1.5	331	439	1.33	495	1.50	49	破断	1930
	F400-3-1	3.0	327	503	1.54	649	1.98	5	局部座屈(強軸)	443
F400-3-2	3.0	326	515	1.58	707	2.17	6	局部座屈(強軸)	527	
F225	F225-0.75-1	0.75	252	296	1.17	322	1.28	154	破断	3803
	F225-0.75-2	0.75	251	312	1.24	356	1.42	254	破断	6273
	F225-1.5-1	1.5	240	347	1.45	433	1.80	24	破断	1265
	F225-1.5-2	1.5	240	348	1.45	433	1.80	22	破断	1159
	F225-3-1	3.0	246	402	1.63	553	2.25	5	局部座屈(強軸)	528
F225-3-2	3.0	244	425	1.74	591	2.42	5	破断	534	
F490	F490-0.75-1	0.75	457	473	1.04	488	1.07	301	破断	3703
	F490-0.75-2	0.75	467	476	1.02	496	1.06	270	破断	3324
	F490-1.5-1	1.5	470	545	1.16	622	1.32	67	破断	1843
	F490-1.5-2	1.5	463	540	1.17	604	1.30	66	破断	1813
	F490-3-1	3.0	464	617	1.33	766	1.65	11	破断	643
F490-3-2	3.0	464	613	1.32	804	1.73	11	破断	643	
F400-ns	F400ns-1.5	1.5	437	594	1.36	638	1.46	63	破断	2498
	F400ns-3	3.0	425	664	1.56	802	1.89	10	局部座屈(弱軸)	863

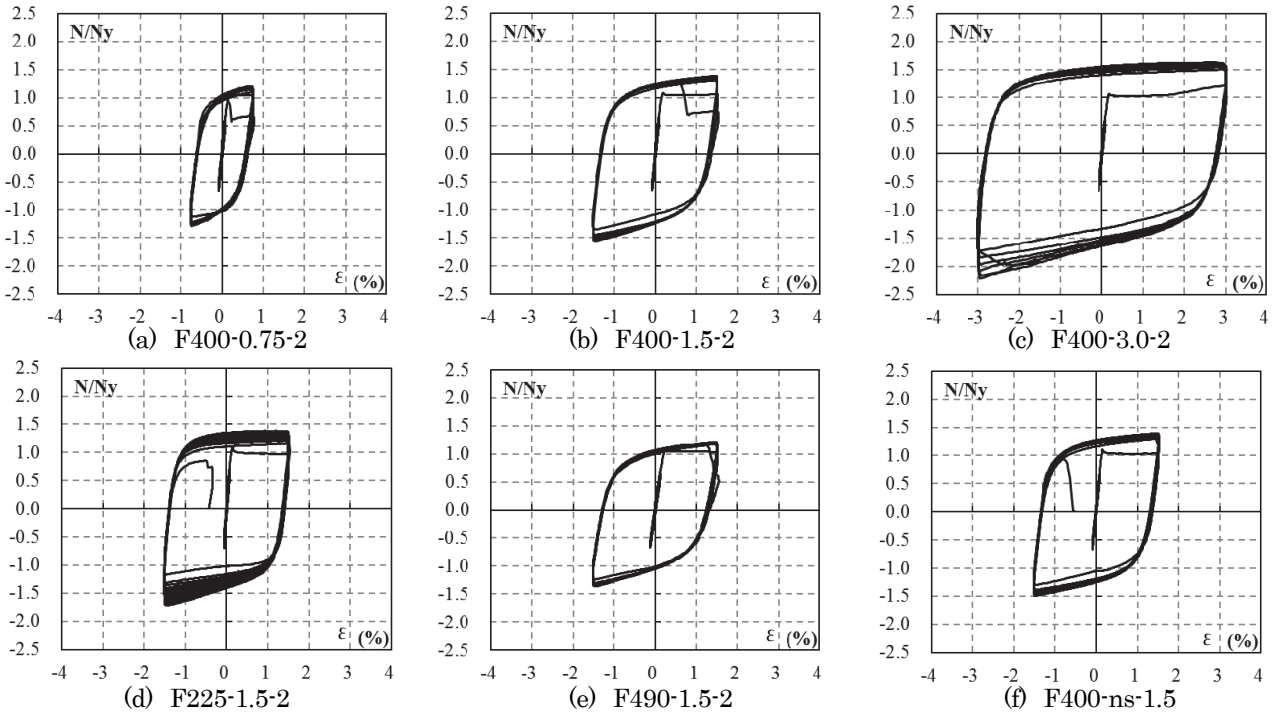
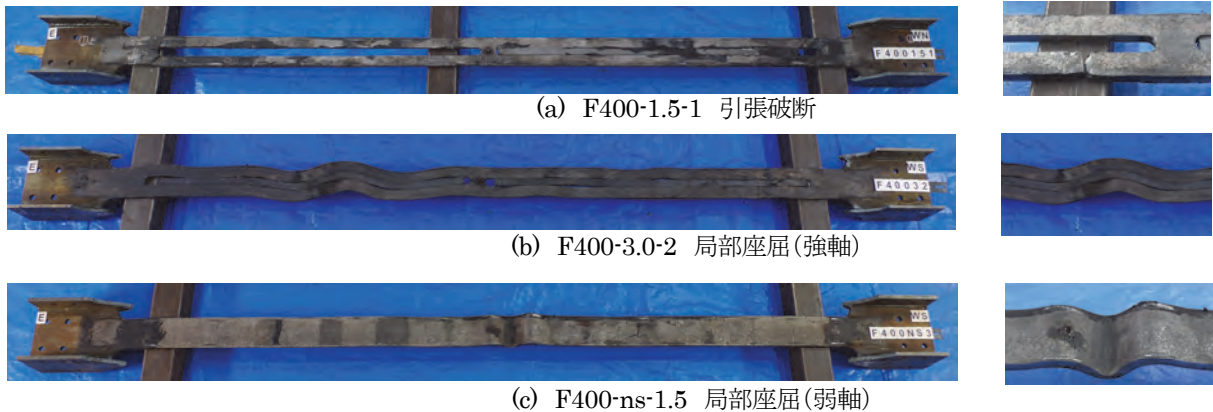


図 9 荷重-ひずみ関係



(c) F400-ns-1.5 局部座屈(弱軸)

図 10 芯材破壊状況

ひずみ振幅で载荷を行った。最大耐力の 95%以下に耐力が低下する前の回までを繰返し回数とする。

4.2 実験結果

実験結果概要を表 4 に、各試験体の荷重・ひずみ関係を図 9 に示す。各試験体ともに安定した紡錘形の履歴特性を示した。破壊モードは大半が芯材の引張破断であったが、ひずみ振幅 3%で载荷した F400、F225 など一部の試験体で、局部座屈により耐力が低下した。図 10 に試験体写真を示す。加力終了後に試験体を解体し芯材の状況を観察した。引張破断はブレース中央付近または芯材の端部での発生が多く、局部座屈はブレースの端部より 1/3 程度の位置のスリット部の中央付近で多く発生した。また、塑性化部全長にわたって面外変形が生じていた。载荷軸ひずみが大きいほど、降伏軸力実験値に対する耐力上昇率(N/N_y)は高くなり、破壊モードが局部座屈による破壊となる傾向がある。

4.3 疲労性能

図 11 に実験結果と(1)式に示す制振指針¹⁾による座屈拘束ブレースの疲労性能曲線を示す。

$$\varepsilon_a = 5.108(N_f/2)^{-0.385} \quad (1)$$

ここで、 ε_a は片ひずみ振幅(%), N_f は繰返しサイクル数(回)である。図中の点線は制振指針による疲労性能曲線の上限及び下限とされる(1)式の $\sqrt{3}$ 倍および $1/\sqrt{3}$ 倍となる曲線である。実験結果は制振指針の疲労曲線と同様の傾向を示した。F400、F225よりF490の方が高い疲労性能を示した。これは漸増繰返し载荷実験と同様に、F490では芯材強軸方向の局部座屈に対する拘束材の余裕度が、F400、F225より大きかったためと考えられる。本座屈拘束ブレースでは破壊モードにかかわらず、制振指針の疲労性能曲線を満足することができた。

§5. まとめ

平鋼の芯材を鋼管で補剛した座屈拘束ブレースについて漸増繰返し载荷実験および一定振幅繰返し载荷実験を行い、その力学的特性および疲労性能、破壊状況について確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 本ブレースの軸力-軸ひずみ関係は安定した紡錘形の復元力特性を示す。
- 2) 本ブレースの疲労性能は鋼構造制振設計指針の疲労曲線と同様の結果を示し、概ね指針式より安全側に評価可能であることを確認した。

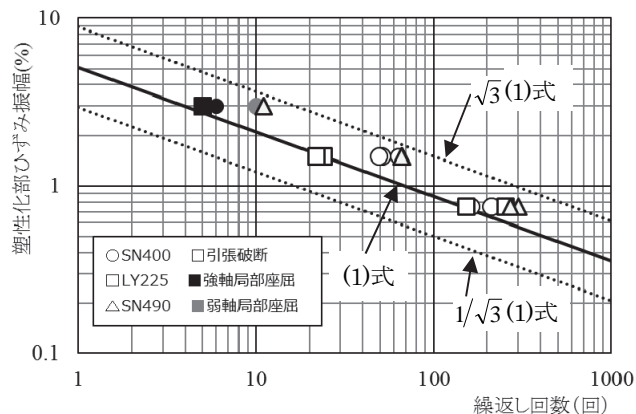


図 11 塑性化部ひずみ振幅と繰返し回数の関係

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針, 2014 年
- 2) 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、日本建築学会学術講演梗概集、2013 年 8 月



小原 泉

ひとこと

今回のブレースの開発は大和ハウス工業様との共同研究で行いましたがいろいろと勉強になることが多く、刺激になりました。