

コンクリートを充填した溝形鋼で座屈拘束した制振ブレースの性能検証実験

古谷祐希^{*1}・エネ ディアナ^{*1}・伊藤隆之^{*2}・牧田敏郎^{*3}

一昨年度の耐震ブレースに引き続き、今年度は制振ブレースの開発を行っている。その一環として、芯材に建築構造用低降伏点鋼材を使用した座屈拘束ブレースの性能検証実験を行った。その結果、本座屈拘束ブレースは、破壊を生じるまで安定したエネルギー吸収性能を示すことがわかった。また芯材に建築構造用圧延鋼材を用いた実験から求めた既往の疲労曲線により、疲労性能を推定できることがわかった。

キーワード：座屈拘束ブレース、低降伏点鋼、疲労性能

1. はじめに

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によって補剛することにより、圧縮域でも引張域と同等の性能を発揮することが出来る部材である。本論では図-1に示すように、コ字形の拘束鋼材にコンクリートを充填した1組の座屈拘束材で芯材を挟み込む形状の座屈拘束ブレースを対象としており、一昨年度の耐震ブレース¹⁾に引き続き、今年度は制振ブレースの開発を目指している。

制振ブレースは、主に高層や超高層建物に使用され、地震時に建物に入力されるエネルギーの大部分を吸収す

ることにより、建物主架構の損傷を抑えることが出来る。このため制振ブレースを使用した建物を設計する際には、使用する制振ブレースが持つエネルギー吸収性能を把握しておく必要がある。エネルギー吸収性能を評価する方法の1つに、制振ブレースの履歴性状と疲労曲線(ひずみ振幅-繰返し回数関係)を用いる方法がある。

また制振ブレースを主架構に先行して降伏させエネルギー吸収を集中させるため、芯材には主架構に使用される鋼材に比べ降伏点が高い建築構造用低降伏点鋼材(以後、LY材)を使用することが多い。

そこで芯材にLY材を使用した座屈拘束ブレースの履歴性状と疲労性能を調べる目的で性能検証実験を行った。本報では、その結果について報告する。

2. 試験体

2.1 試験体計画

表-1に試験体一覧を、図-2に試験体形状を、図-3に試験体断面を示す。試験体は全5体であり、いずれの試験体も芯材の鋼種をLY225材とした。試験体No.1~No.3は形状を同一とし、加力時の最大ひずみ振幅をそれぞれ0.5%、1.0%、3.0%と変化させることで、各ひずみ振幅における破壊までの繰返し回数を調べた。No.4はNo.1から芯材の板厚を厚くすることで幅厚比を7とし、芯材の断面形状が繰返し回数に与える影響を調べた。No.5はNo.1~No.3と形状が同一であるが、2方向地震を想定し、加力時に構面外方向へ強制変形を与えた。

試験体の座屈余裕度 $N_e/(A_c \cdot \sigma_y)$ は、3.0程度となるように設計した。ここで、 A_c は芯材塑性化部(図-2の L_3 の部分)の断面積、 σ_y は材料試験結果に基づく芯材の降伏強度、 N_e はオイラー座屈荷重を示す。

また文献2)によると、建物斜め方向の地震を想定し

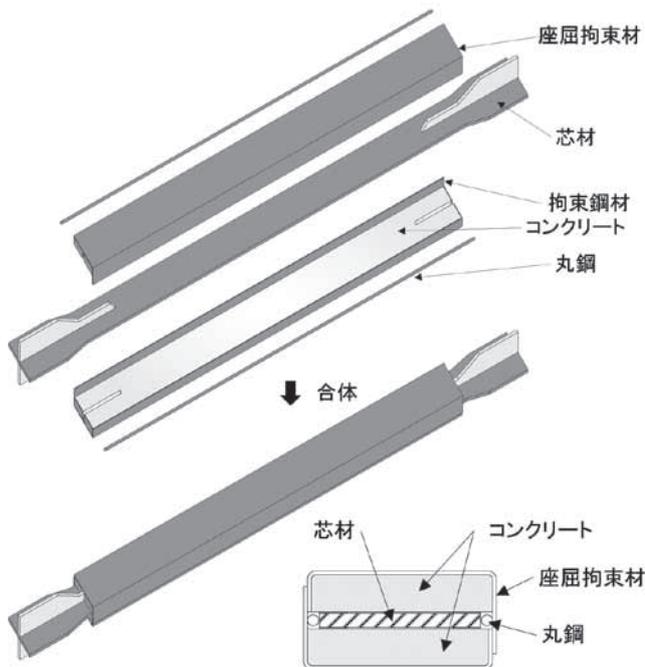
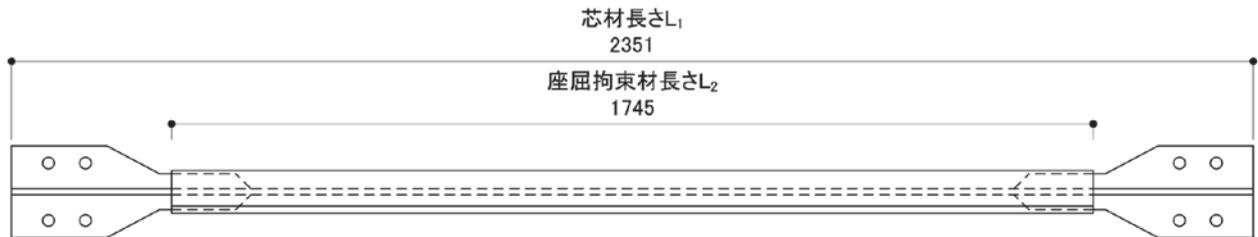


図-1 座屈拘束ブレースの概要

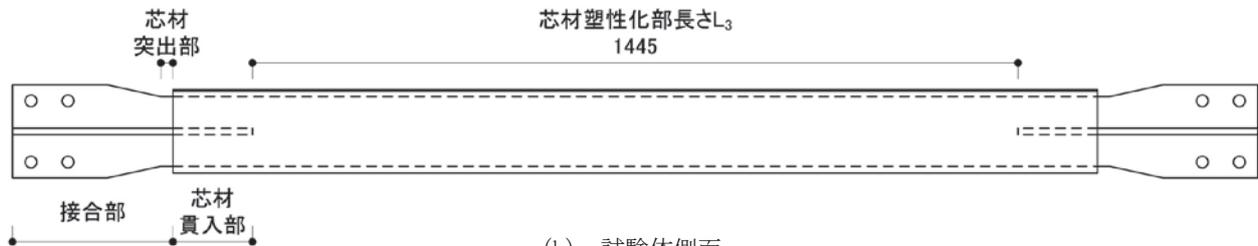
*1 建築研究第一部 *2 構造設計部 *3 技術部

表-1 試験体一覧

試験体	加力形式	芯材			座屈拘束材			オイラー座屈荷重 N_e (kN)	座屈余裕度 $N_e / (A_c \cdot \sigma_y)$		
		鋼種	断面寸法	幅厚比	降伏耐力 $A_c \cdot \sigma_y$ (kN)	鋼種	幅 B_r (mm)			せい H_r (mm)	板厚 t_r (mm)
No.1	一定振幅 (0.5%)	LY225	PL-132×12	11	374	SS400	155.2	99	3.2	1169	3.12
No.2	一定振幅 (1.0%)										
No.3	一定振幅 (3.0%)										
No.4	一定振幅 (2.0%)										
No.5	漸増(構面外変形)										
			PL-133×19	7	615		156.2	120		1867	3.04
			PL-132×12	11	374		155.2	99		1169	3.12



(a) 試験体見下げ



(b) 試験体側面

図-2 試験体形状

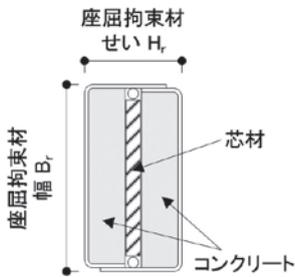


図-3 試験体断面

表-2 コンクリート圧縮強度

試験体	コンクリート圧縮強度 σ_B (N/mm ²)
No.1	53.8
No.2	54.1
No.3	54.9
No.4	55.8
No.5	56.4

表-3 鋼材の材料試験結果

鋼種	使用箇所	板厚 (mm)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)
LY225	芯材	12	236	332
		19	243	322
SS400	座屈拘束材	3.2	379	468

た状態、すなわち構面外方向への変形が生じたままブレースが軸力を受けると、芯材突出部や芯材貫入部（図-2参照）で破壊（構面外座屈）が生じることが指摘されている。そこで本実験においても、構面外方向に強制変形を与えた状態で加力を行い、芯材突出部と芯材貫入部への影響を調べた。その際、スチフナによる構面外方向への補強がない低剛性²⁾のガセットプレートを採用することで、芯材突出部や芯材貫入部で破壊させる計画とした。

2.2 使用材料

表-2に拘束鋼材に充填したコンクリートの圧縮強度、表-3に鋼材の材料試験結果を示す。

3. 実験方法

3.1 加力方法

図-4と写真-1に加力装置を示す。ブレースの設置角度は、床面に対して45度とし、芯材の弱軸方向が加力装置の面外方向となるようにセットした。構面外方向への強制変形を与えた試験体No.5では、他の試験体と同様の手順で加力装置にセットした後、下端側のガセットプレートを加力装置の面外方向に25mm（層間変形角の1/100相当）移動させた。

加力は芯材塑性化部の平均軸ひずみ ϵ （芯材塑性化部の軸変位を芯材塑性化部の長さで除した値）によって制御し、芯材が引張られる方向を正加力、圧縮される方向を負加力と定義した。表-4に加力サイクルを示す。試

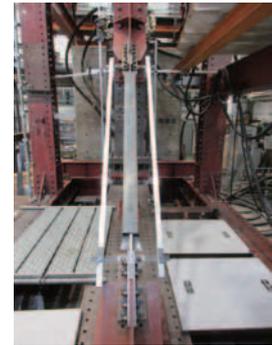
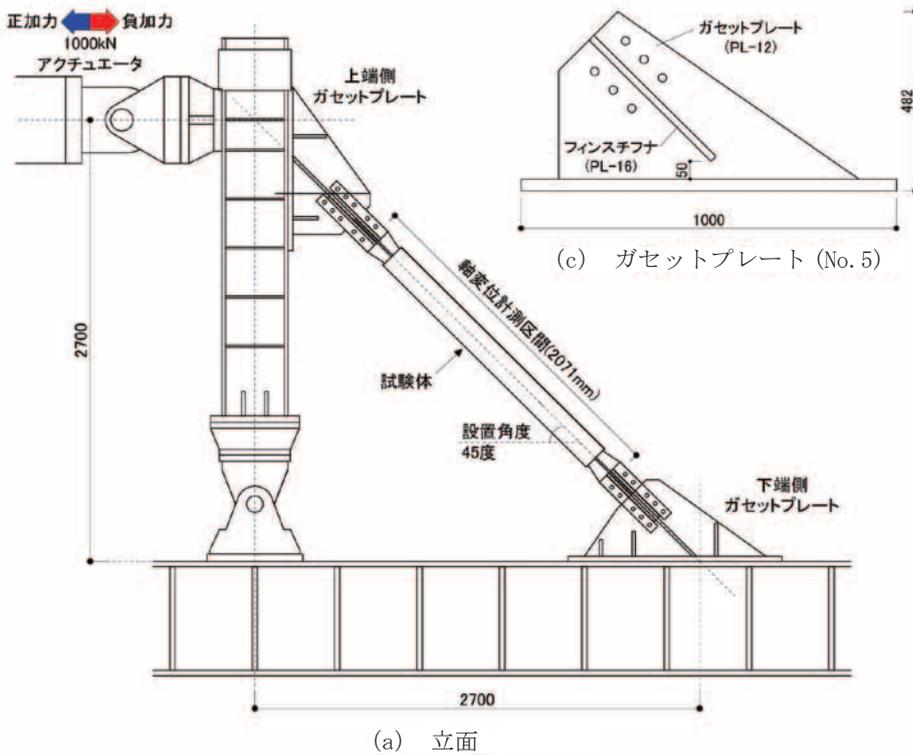


写真-1 加力装置

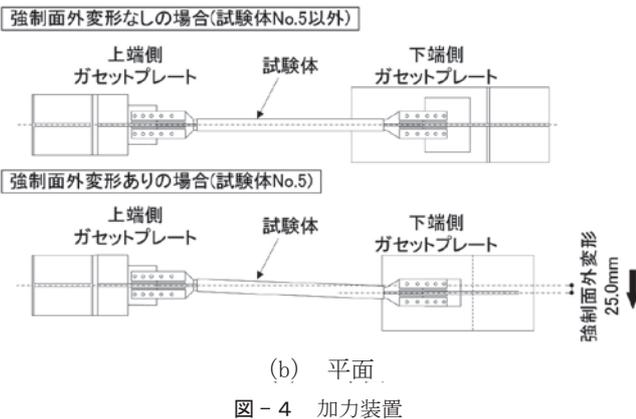


図-4 加力装置

表-4 加力サイクル

No.1		No.2		No.3		No.4	
ϵ	Cycle	ϵ	Cycle	ϵ	Cycle	ϵ	Cycle
$\epsilon_y/3$	± 1						
0.50 %	破壊まで	1.0 %	破壊まで	1.0 %	± 1	1.0 %	± 1
		3.0 %	破壊まで	2.0 %	破壊まで		

No.5						
ϵ	$\epsilon_y/3$	$2\epsilon_y/3$	0.25 %	0.50 %	0.75 %	1.0 %
Cycle	± 1	± 1	± 1	± 2	± 2	± 2

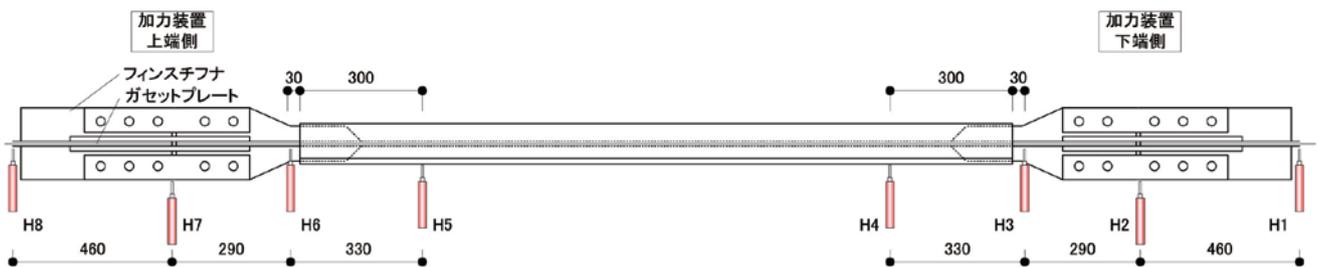


図-5 構面外変位の計測 (No.5 見下げ)

験体 No. 1 ~ No. 4 は、 ϵ が所定の振幅より小さい範囲から加力をはじめ、その後所定の振幅において、引張破断、または耐力が最大耐力の 80% に低下するまで繰返し加力を行った。No. 5 は $\epsilon = \epsilon_y/3, 2\epsilon_y/3, 0.25\%, 0.50\%, 0.75\%, 1.0\%$ と漸増させた。ここで、 ϵ_y は材料試験結果に基づく芯材の降伏ひずみである。

3.2 計測方法

芯材の第一ボルト（上端側と下端側で芯材塑性化部に

最も近いボルト）間における軸変位 δ をレーザ変位計により測定した。 δ の計測区間のうち、芯材塑性化部以外の区間は弾性変形していると仮定し、芯材塑性化部の平均軸ひずみ ϵ を式 (1) によって求めた。

$$\epsilon = \frac{\delta - \delta_e}{L_3} \quad (1)$$

ここで、 δ_e は芯材弾性部（芯材塑性化部以外の部分）の変形量 (mm)、 L_3 は芯材塑性化部の長さ (mm) である。

図-5 に示すように、構面外への強制変形を与えた試

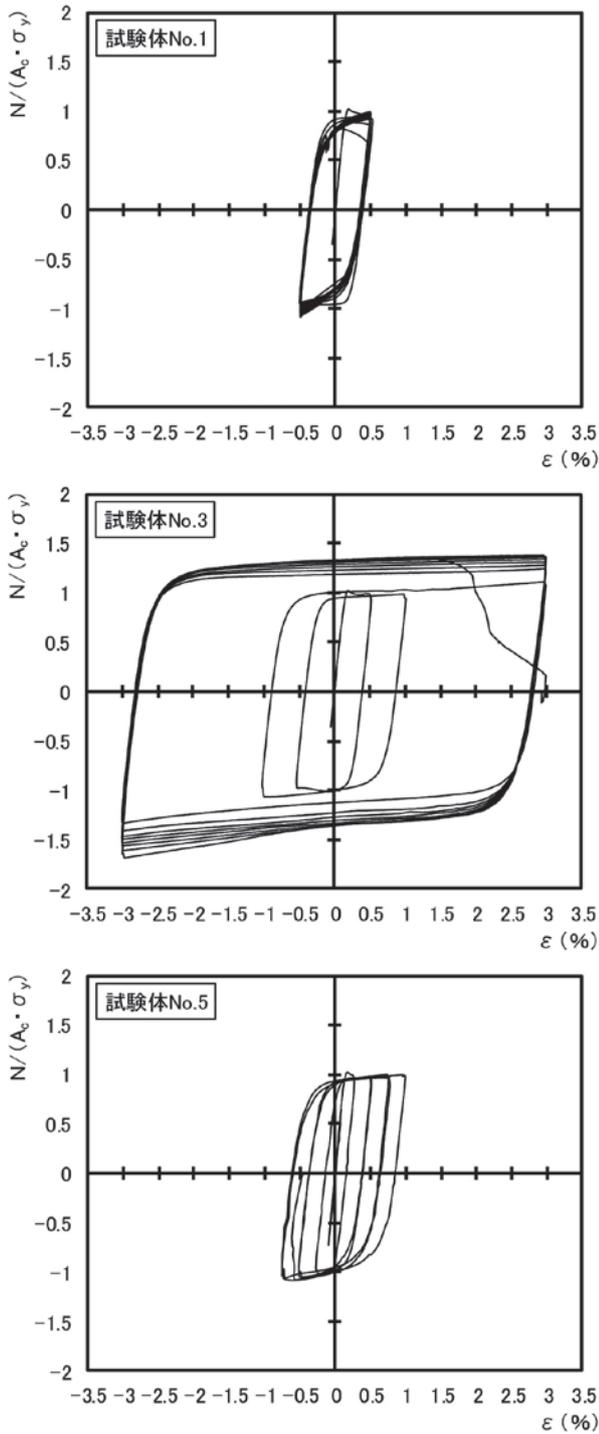
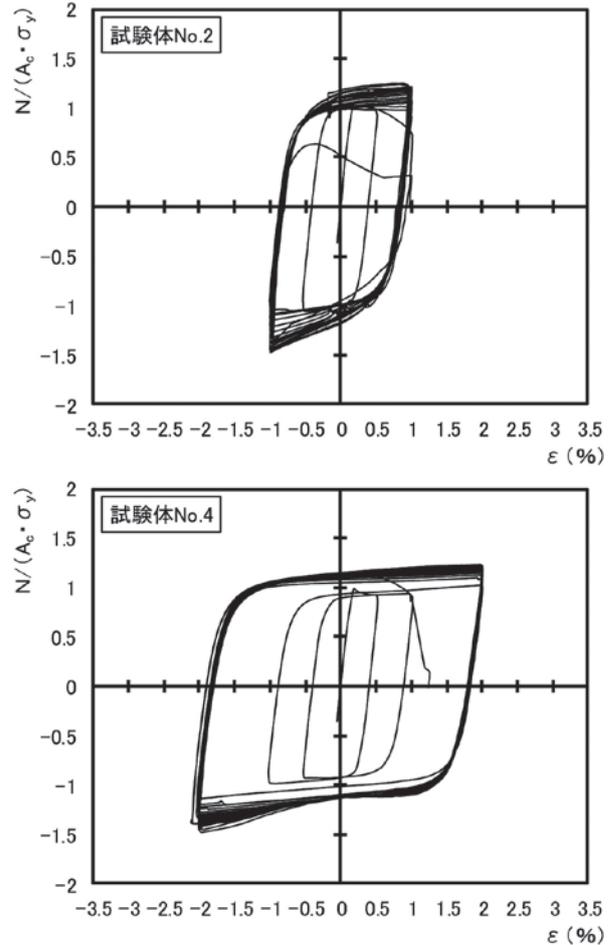


図-6 $N/(A_c \cdot \sigma_y) - \epsilon$ 関係



(a) 引張破断 (No. 3)

(b) 引張破断 (No. 1)

(c) 構面外座屈 (No. 5)

写真-2 破壊状況

験体 No. 5 では芯材貫入部と接合部での変位を測定し、座屈拘束材端部の構面外変位を求めた。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

写真-2に芯材の破壊状況を示す。一定振幅で加力した試験体 No.1～No.4 は、いずれも正加力時に芯材が引張破断し、耐力が低下した。引張破断を生じた際の繰返し回数は、

No.1 ($\epsilon = 0.5\%$) が 531 回目、No.2 ($\epsilon = 1.0\%$) が 128 回目、No.3 ($\epsilon = 3.0\%$) が 9 回目、No.4 ($\epsilon = 2.0\%$) が 23 回目であった。また No.2～No.4 は負加力中に、芯材の強軸方向に座屈拘束材がはらみ出した。加力後に芯材を取り出したところ、No.1 は芯材塑性化部の端部で破断していた。No.2～No.4 は芯材塑性化部の中央部で破断しており、芯材の強軸方向への変形も確認できた。

構面外方向への強制変形を与えた No.5 は、 $\epsilon = 1.0\%$ の 1 回目負加力時に構面外座屈を生じ、耐力が低下した。

表-5 構面外座屈に対する計算値

a_r mm	N_{cr}^B kN	N_{cr}^r kN	M_p^r kNm	M_0^r kNm	N_{lim} kN
12.8	1026	122	5.1	0.2	369

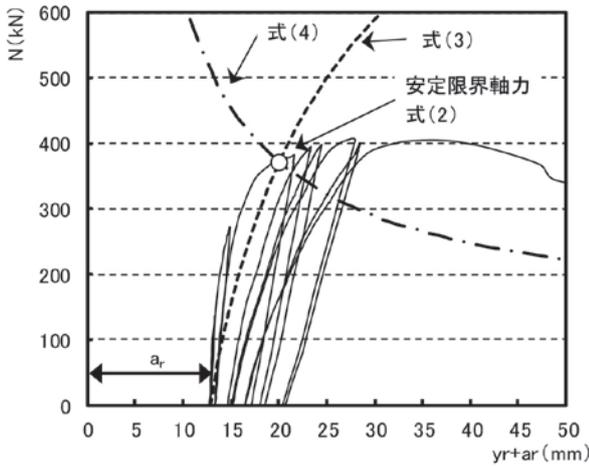


図-7 N - y_r+a_r 関係

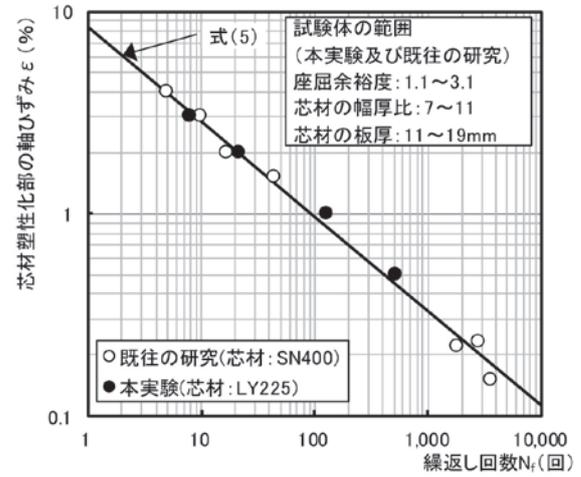


図-8 ϵ - N_f 関係

4.2 履歴性状

図-6 にブレース軸力に対する降伏軸力の比 $N/(A_c \cdot \sigma_y)$ - 芯材塑性化部の平均軸ひずみ ϵ 関係を示す。ここで、 N はアクチュエーター荷重の $\sqrt{2}$ 倍とした。

いずれの試験体も破壊するまで安定した履歴性状を示した。試験体 No.2 ~ No.4 は加力中に、芯材の強軸方向に座屈拘束材がはらみ出したが、耐力低下は生じなかった。No.3 は $\epsilon = 3.0\%$ において、引張時の軸力に対する降伏軸力の比が 1.39、圧縮時の軸力に対する降伏軸力の比が 1.68 であった。文献3) にはひずみ硬化による鋼材の応力上昇率を求める式が示されている。これに基づき $\epsilon = 3.0\%$ の応力上昇率を求めると 1.48 となり、引張時の実験結果はこの値以下であった。また引張時に比べ圧縮時の軸力が大きいことから、引張軸力に対する圧縮軸力の上昇率を考慮して設計を行う必要があると考えられる。

4.3 構面外座屈に対する検討

座屈拘束ブレースは、構面外変形を受けた状態で繰返し軸力を受けると、安定した履歴性状を発揮する前に、接合部を含めた座屈拘束ブレース全体が構面外座屈を生じることが指摘されている。文献2) では、構面外座屈を生じさせないための条件として、式(2)で求めた安定限界軸力 N_{lim} をブレース最大軸力(ひずみ硬化による耐力上昇や引張耐力に対する圧縮耐力の増大を考慮して降伏軸力を割増した値)より大きくすることを推奨している。 N_{lim} は初期不整を考慮したブレース軸力と構面外変形との関係を表す式(3)と崩壊メカニズム耐力である式(4)の交点から求まる。

$$N_{lim} = \frac{(M_p^r + M_0^r)/a_r + N_{cr}^r}{(M_p^r + M_0^r)/(a_r \cdot N_{cr}^B) + 1} \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{y_r}{y_r + a_r} \cdot N_{cr}^B \quad (3)$$

$$N_2 = N_{cr}^r + \frac{M_p^r - M_0^r}{y_r + a_r} \quad (4)$$

ここで、 y_r は構面外変形の増分 (mm)、 a_r は芯材の元たわみ、加力部偏芯量に加え、芯材と座屈拘束材のクリアランスによって芯材に生じると考えられる初期不整 (mm)、 N_{cr}^B は接合部を含む座屈拘束ブレースの弾性座屈荷重 (N)、 N_{cr}^r は $M_p^r = 0$ のときの接合部座屈荷重 (N)、 M_p^r は座屈拘束材端部の終局曲げ耐力 (Nmm)、 N_{lim} は安定限界軸力 (N) である。

表-5 に構面外方向に強制変形を与えた状態で加力した試験体 No.5 の計算値を、図-7 に No.5 のブレース軸力 N - 構面外変形 y_r+a_r 関係を示す。構面外変形の増分 y_r は、座屈拘束材端部の構面外変位である。

軸力が安定限界軸力近傍のときに構面外変形が大きくなり始めた。加力サイクルが進むにつれ構面外変形が徐々に大きくなり、最終的に構面外座屈を生じた。

4.4 疲労性能

図-8 に芯材塑性化部の平均軸ひずみ ϵ - 繰返し回数 N_f 関係を示す。図中に既往の研究⁴⁾ から得られた疲労曲線である式(5)を示す。疲労性能は座屈拘束形式や芯材形状に大きな影響を受けることから、本実験と同様に

座屈拘束材を分割して製作された試験体を対象とした式(5)で評価を行った。

$$\varepsilon = 8.3047N_f^{-0.467} \quad (5)$$

また図中には既往の研究⁴⁾の結果も併せてプロットした。プロットした試験体は、座屈余裕度 $N_e/(A_c \cdot \sigma_y)$ は1.1～3.0、芯材の幅厚比は7～11であり、芯材に建築構造用圧延鋼材（以下、SN材）が使用されている。

図-8によると、式(5)は本実験の試験体と良い対応を示しており、芯材にLY材を用いた場合でも有効であると考えられる。また座屈余裕度や芯材の幅厚比が異なる場合でも、図中に示した範囲であれば式(5)を用いて疲労性能を推定することが出来ると考えられる。

5. まとめ

芯材にLY材を使用した座屈拘束ブレースの履歴性状と疲労性能を調べる目的で性能検証実験を行った結果、以下の知見を得た。

一定振幅で加力した試験体は、いずれも引張破断を生じるまで安定した履歴性状を示した。2方向地震を想定し、加力時に構面外方向へ強制変形を与えた試験体は、首折れ座屈を生じたが、文献2)の計算値と良い対応を示した。

また芯材にLY材を使用した場合にも、芯材にSN材を使用した場合を対象とした既往の疲労曲線により疲労性能を推定することが出来ると考えられる。

謝辞

本研究は、神奈川大学岩田衛名誉教授との共同研究によるものである。実験に協力いただいた藤田正則教授、村井正敏氏、佐藤宏貴氏、学生諸氏においてはここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 古谷祐希, 田畑卓, 伊藤隆之, 牧田敏郎: コンクリートを充填した溝形鋼で補剛した座屈拘束ブレースの性能検証実験, 安藤ハザマ研究年報, Vol. 4, 2016. 2
- 2) 竹内徹, 小崎均, 松井良太: 拘束材端部の曲げモーメント伝達能力を考慮した座屈拘束ブレースの構面外機構安定性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第691号, pp1621-1630, 2013. 9
- 3) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針, 2014. 11
- 4) 小谷野一尚, 中込忠男, 緑川光正, 岩田衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの疲労性能の研究, 日本建築学会構造系論文集, 第736号, pp921-928, 2017. 6

Tests on Damping Braces by Concrete Filled Channel Steel

Yuuki KOYA, Diana ENE, Takayuki ITO and Toshiro MAKITA

The paper presents a follow-up to last year's research project on the Buckling-restrained Brace (BRB), focusing on its damping capacity. As part of the development, we tested BRB with low-yield steel as the core material. The results verified that all the specimens exhibited stable hysteretic behavior up until fracture. In addition, the low-cycle fatigue curve obtained in previous studies for construction structural rolled steel can also be adopted to estimate the behavior of BRBs whose core material is low-yield steel.