

せん断型座屈拘束ブレースの開発に関する 実験的研究

近藤 加奈¹・葛 漢彬²・賈 良玖³

¹学生会員 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:140448051@ccalumni.meijo-u.ac.jp

²フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:gehanbin@meijo-u.ac.jp

³名城大学 総合研究所 (〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:LJ_JIA@hotmail.com

本研究は、従来の座屈拘束ブレース(BRB)に対し、芯材に塑性変形箇所を複数設置したせん断型座屈拘束ブレース(SBRB)の性能実験を行ったものがある。7体のSBRB供試体の漸増変位繰り返し載荷実験を行うことによって、SBRBの主要パラメータである「せん断パーツの個数」、「引張強度とせん断強度の比」および「空洞の半径」が破壊状況および変形性能に及ぼす影響を検証し、各種パラメータの推奨値を決定した。

Key Words: BRB, shear parts, cumulative energy, cumulative deformation, cumulative plastic ratio

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、橋梁において大規模な損傷により再構築が必要なほどの過度な残留変位が生じた¹⁾。そのため兵庫県南部地震以降既設橋梁の耐震補強に関する検討および工事が数多く進められており²⁾、耐震性能向上策の一つとして制震ダンパーの設置が挙げられる。制震ダンパーは、地震で発生したエネルギーを主構造自体に組み込んだエネルギー吸収機構により吸収・消散させることで主構造の受ける地震エネルギーを最小限にすることが可能である。その一種である履歴ダンパーは、鋼材や鉛材の塑性変形を利用したものであり、必要な減衰力を得ることができメンテナンスも比較的容易である。履歴ダンパーの代表的なものとして座屈拘束ブレース(Buckling Restrained Brace, 以降BRBと呼称)があり、性能確認実験や全体座屈防止式の検討、数値解析による耐震性の評価・要求性能の算出、設置による経済性の検討など、様々な研究が精力的に行われている³⁾⁶⁾。

そして2016年4月に発生した熊本地震では本震のみならず、長時間にわたる数多くの余震により主構造が大地震に耐えきれず、大きな損傷が発生したため、今後、新たな考え方として、橋梁のライフサイクルにわたって

取り換えが不要であるとした高機能制震ダンパーを提案する必要がある。

本研究では、従来のBRBの問題点の1つとして塑性変形箇所が限定され、ストッパー付近にひずみが集中することを踏まえ、新型BRBであるせん断型座屈拘束ブレース(Shear-Type Bucking Restrained Brace, 以降SBRBと呼称)を考案した。

既往の研究では、せん断応力と引張応力が同時に作用する状況下での鋼材の延性破壊実験が行われ、その中で初期時に純せん断が作用する形状(PSシリーズ)は引張・圧縮ともに安定した履歴特性を持つことが確認された⁷⁾。この形状をSBRBの芯材に用い、塑性変形箇所を複数設置し損傷を分散させることで、新型高機能制震ダンパーの開発を試みる。

SBRBの漸増変位繰り返し載荷実験から、破壊状況、荷重-変位履歴特性を比較し、主要パラメータの推奨値を提案する。

2. 実験概要

(1) SBRBの特徴

SBRBの芯材は従来のBRBと異なり、写真-1に示すように塑性変形箇所(以降せん断パーツと呼称)を複数

設置している。この SBRB の特徴を以下に示す。

- ①せん断パーツにせん断力が作用する。
- ②せん断パーツを複数設置することで過度なひずみ集中を防ぐ。
- ③従来の BRB と異なり、座屈が発生しにくいいため、拘束材を薄くすることで軽量化が望める。
- ④拘束材に空洞部分を設定しているため、実験中に供試体の損傷状況を確認できる
- ⑤構造パラメータを調整することで剛性、強度の調整ができる。

(2) 供試体概要

SBRB は、図-1 に示すようにせん断パーツを複数設置した芯材を拘束材とフィラープレートで挟み込み、ボルトで固定する構成となっている。鋼種は SS400 材を使用している。

考案した SBRB は、前述したようにせん断パーツにおいて軸力ではなくせん断力が卓越し破断に至ると予想される。そのため、座屈しにくい特性を生かし、せん断パーツの損傷状況を確認できるように拘束材に空洞を設けた。また、芯材の面外方向および面内方向は 1mm の隙間を空けている。

表-1、表-2 および図-2 に、各供試体の構造パラメータ、芯材の材料試験結果および供試体詳細図をそれぞれ示す。材料試験は拘束材、フィラープレートは塑性化し

ないことから芯材のみ行った。

表-1 の供試体名称は各種構造パラメータに対応している。図-2 に示すように、 N は芯材の塑性変形箇所、すなわちせん断パーツの個数であり、損傷を分散させるため、2, 4, 6 個と変動させた。 U は引張強度 T_y とせん断強度 Q_y の比、すなわち引張強度 T_y をせん断強度 Q_y で除した値であり、軸力が作用する部位も塑性変形させるため、1.0, 1.7, 2.6 と変動させた。 R は空洞の半径の大きさであり、せん断パーツの面積の違いによる変形性能の向上を図るため、10, 15, 20mm と変動させた。

(3) 実験装置

本実験では、高荷重試験システム（以降 MTS 試験機と呼称）を用いる。MTS 試験機の許容値は、荷重 $\pm 500\text{kN}$ 、ストローク $\pm 75\text{mm}$ となっており、供試体上部を載荷端、下部を固定端とする。圧縮荷重載荷時のリブ付近での座屈防止のため、プレート芯材のつかみ部分を挟み補強した。変位計は、芯材の載荷端および固定端に設置し、ひずみゲージは、図-3 に示すように載荷中の芯材の挙動を検証するため、移動端側の塑性変形部分付近に貼付した。載荷パターンは、1 サイクル毎の漸増繰り返し載荷であり、1 サイクル目を 1.0%（変形可能長 L に対する伸び δ の割合）とし、以降 1 サイクル毎に 1.0% 増加させている。

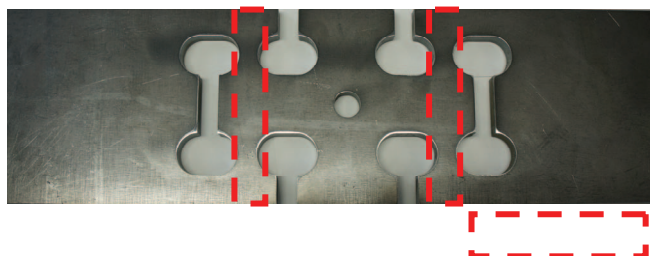


写真-1 SBRB の芯材（せん断パーツが2個の場合）

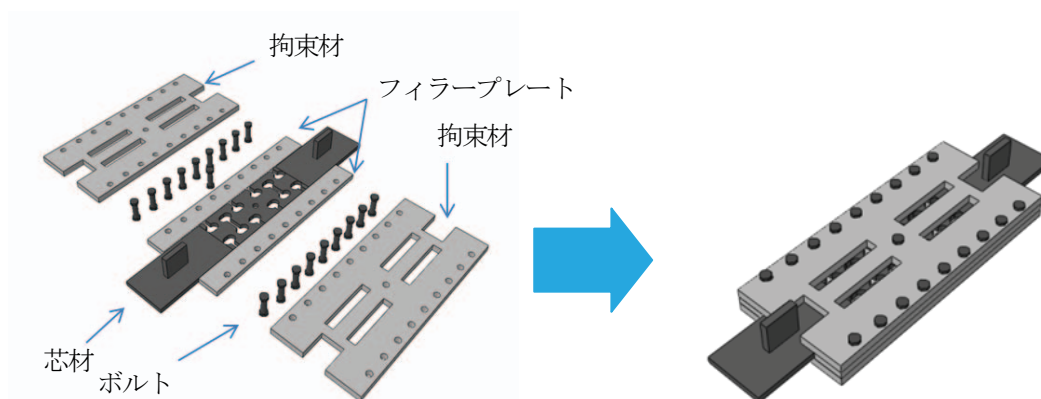


図-1 SBRB 概念図

表-1 各供試体の構造パラメータ

No.	供試体名	N [個]	$U=T_y/Q_y$	R [mm]	L [mm]	W [mm]	W_S [mm]	W_N [mm]	A_S [mm ²]	A_N [mm ²]
1	SBRB-N2U2.6R10	2	2.6	10	170	100	20	30	200	300
2	SBRB-N4U2.6R10	4	2.6	10	250	100		30		300
3	SBRB-N6U2.6R10	6	2.6	10	330	100		30		300
4	SBRB-N4U1.7R10	4	1.7	10	250	80		20		200
5	SBRB-N4U1.0R10	4	1	10	250	64		12		120
6	SBRB-N4U2.6R15	4	2.6	15	310	120		30		300
7	SBRB-N4U2.6R20	4	2.6	20	370	140		30		300

Note : N =せん断パーツ数, U =引張せん断強度比($=T_y/Q_y$), T_y =引張強度($=\sigma_y \cdot A_N$), Q_y =せん断強度($=\sigma_y/\sqrt{3} \cdot A_S$),
 R =空洞の半径, L =変形可能長, W =芯材の幅, W_S =せん断パーツの最小断面幅, W_N =軸力部材の幅,
 A_S =せん断パーツの最小断面積($=W_S \cdot t_c$), A_N =軸力部材の最小断面積($=W_N \cdot t_c$), W_S , W_N は図-2 参照.

表-2 芯材の材料試験結果

鋼材	E_0 [GPa]	σ_y [MPa]	ν	E_s [GPa]	ε_{sy} [%]	σ_u [MPa]	ε_u	δ_e [%]
SS400	203	272.5	0.3	2.5	0.7	421.7	0.23	30.1

Note : E_0 =ヤング率, σ_y =降伏応力, ν =ポアソン比, E_s =ひずみ硬化係数, ε_{sy} =ひずみ硬化開始時のひずみ,
 σ_u =引張強度, ε_u =引張強度時のひずみ, δ_e =伸び率.

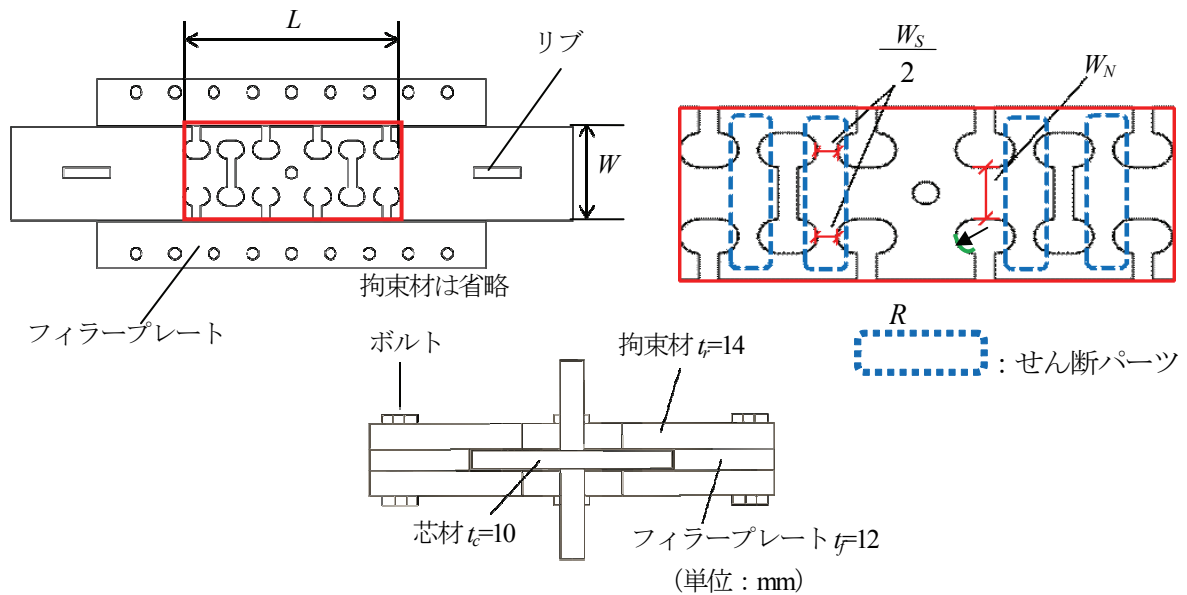


図-2 供試体詳細図

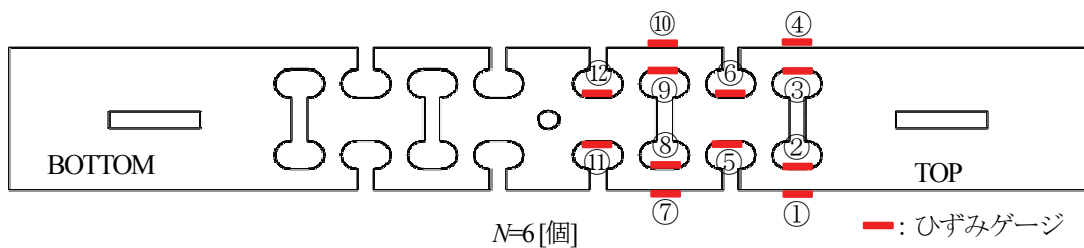


図-3 ひずみゲージ設置箇所

3. 実験結果

(1) 変形性能および低サイクル疲労照査

各供試体の変形性能を比較するために、累積エネルギー吸収量（以降 E_n と呼称）を用いる。 E_n は、荷重－変位曲線の描く面積として算出している。また、低サイクル疲労照査のために累積塑性変形（以降 CID と呼称）、累積塑性率（以降 u_{eq} と呼称）を用いる。 CID は、各 Half cycle の塑性ひずみの絶対値の総和であり、 u_{eq} は、各 Half cycle 数の最大変位を降伏変位で除したものの絶対値の総和である。

次に、二次剛性を求めるためにエネルギー吸収量、降伏荷重および降伏変位を求める必要がある。二次剛性は、図-4 に示すように、骨格曲線を抽出しエネルギー吸収量が等価になるようにバイリニアモデルを作成した。エネルギー吸収量は式(1)で与えられる。

$$E = \frac{1}{2} \Delta_y H_y + \frac{1}{2} (\Delta_m - \Delta_y) (H_m + H_y) \quad (1)$$

ここで E はエネルギー吸収量、 Δ_y は降伏変位、 H_y は降伏荷重、 Δ_m は終局変位、 H_m は終局荷重である。式(1)を変形すると、降伏変位 Δ_y は式(2)で与えられる。

$$\Delta_y = \frac{2E_n - \Delta_m H_m}{\Delta_m K_1 - H_m} \quad (2)$$

一次剛性 K_1 は実験から得られた値を用いる。式(2)と一次剛性 K_1 から、降伏荷重 H_y は式(3)で与えられる。

$$H_y = K_1 \Delta_y \quad (3)$$

二次剛性 K_2 は降伏点から終局点までの傾きであるから、式(4)で与えられる。

$$K_2 = \frac{H_m - H_y}{\Delta_m - \Delta_y} \quad (4)$$

なお、累積塑性率は式(5)で与えられる。

$$u_{eq} = \frac{\sum_i \left| \Delta_i - \frac{P_i}{K_1} \right|}{\Delta_y} \quad (5)$$

Δ_i は 1 Half cycle 以降の変位、 P_i は 1 Half cycle 以降の荷重で

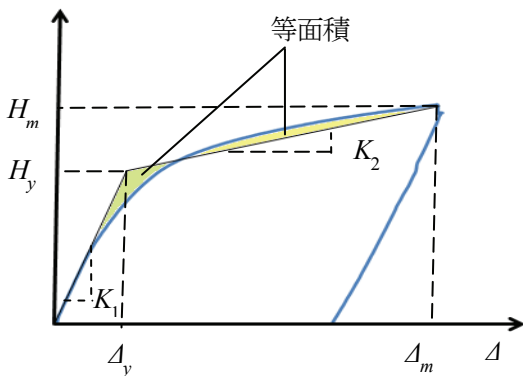


図-4 骨格曲線と二次剛性概念図

ある。

(2) 構造パラメータごとの影響

本研究では、各構造パラメータを変動させた供試体の載荷実験を行い、破壊状況や荷重－変位曲線を比較し、各種パラメータによる推奨値と影響を検討する。

a) セン断パーツの個数 N の影響

従来の BRB は、ひずみが集中しストッパー付近でネッキングが発生すると塑性変形が限定される。対して SBRB ではせん断パーツを複数個設けることにより、損傷を分散させることで変形性能の向上を目的としている。

本検討では、SBRB の主要パラメータであるせん断パーツ N の値のみを変更させた供試体 No.1, 2, 3 を用いて比較を行い、 N の値による影響を調べる。各供試体の荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較を図-5 に、各応答値の比較を表-3 に、実験終了後の各供試体の芯材の様子を写真-2 に示す。なお、平均ひずみは変位を変形可能長 L で除したものである。

図-5 より No.2, No.3 供試体は、引張・圧縮側で荷重が上昇していることが確認できる。これは、載荷中に写真-2 に示すように塑性変形箇所の一部で曲げ変形が生じ、フィラーと芯材が接触したためである。設計時には曲げ変形の発生は考慮しておらず、軸力のみ作用すると考えていた。曲げ変形が発生した理由として、板厚一定により軸剛性が低くなることで曲げ変形箇所の断面積が小さくなるため、曲げ剛性が低くなり曲げ変形を生じやすくなるからであると考えられる。しかし、表-3 に示す破断時の Half cycle 数を見ると、損傷がさらに分散され、No.1 に比べて変形性能が向上していると考えられる。

表-3 より一次剛性は No.1 供試体が No.2, No.3 供試体に比べ 2 倍以上高い。これは No.1 供試体はせん断パーツが 2 個と少なく、曲げ変形が生じず、せん断パーツにひずみが集中したため、ひずみ硬化により高くなったと考えられる。また、No.2, No.3 供試体の二次剛性については No.1 供試体よりも大幅に減少した。二次剛性が大きい場合、エネルギー吸収量は大きくなるが、周辺部材に損傷が生じる可能性があるため、小さい方がよいと考えている。よって、せん断パーツを 2 個から 4, 6 個と複数設置することにより、変形性能が向上することがわかった。

No.2 供試体は高機能 BRB の目標性能である $(CID)_{\text{min}}=70\%$ を満たすことができた。しかし、せん断パーツが 6 個の No.3 供試体は、 $CID=68.8\%$ 、 $u_{eq}=294.8$ となり、若干ではあるが、No.2 供試体の $CID=80.3\%$ 、 $u_{eq}=323.6$ より小さくなっている。よって、損傷を分散させるためのせん断パーツの個数には限界値があると考えられる。

これらのことを踏まえると、No.2 供試体のせん断パーツの個数 $N=4$ が望ましい結果となった。しかし、本

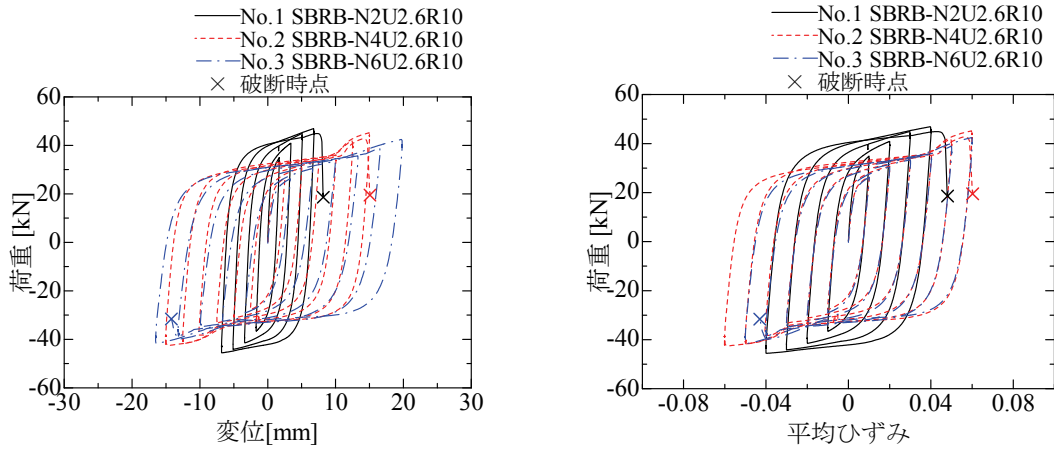


図-5 N の違いにおける荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較

表-3 N の違いにおける各応答値

No.	一次剛性 [N/mm]	二次剛性 [N/mm]	E_n [kJ]	CID [%]	u_{eq}	破断時の Half cycle 数
1	80654	11205	2.52	39.0	165.8	9
2	37000	4278	6.23	80.3	323.6	13
3	31000	3311	6.92	68.8	294.8	12

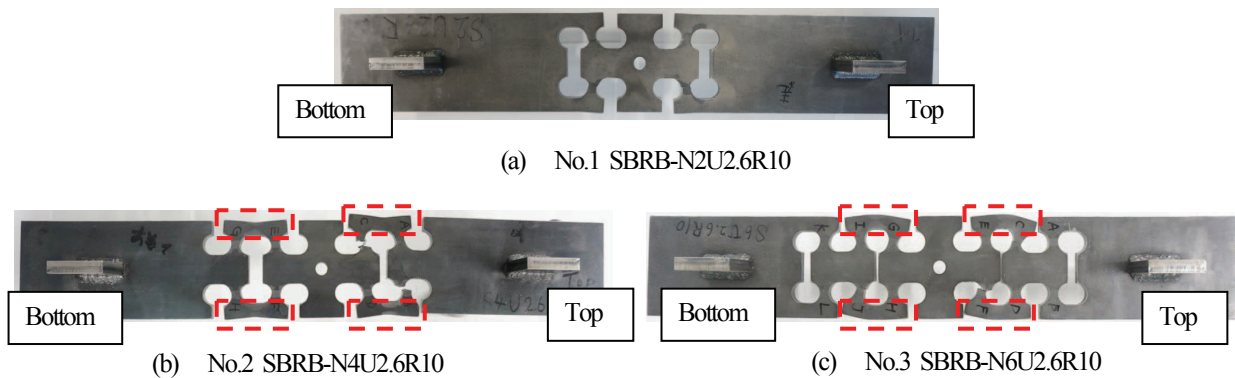


写真-2 実験終了後の芯材の様子 : 曲げ変形箇所

研究ではせん断パーツの個数 N は 3 パターンしか用意していなかったためせん断パーツの個数 N は 4 個以上にするのが妥当といえるが、その限界値については今後更なる検討が必要である。

b) 引張強度 T_y とせん断強度 Q_y の比 U の影響

従来の BRB では軸力が作用し破断に至る。SBRB では、主にせん断パーツにせん断力が作用するため、圧縮時に芯材は座屈しにくい。しかし、軸力が作用する部位も塑性変形が生じれば更なる変形性能が望めると考える。

本検討では、SBRB の主要なパラメータである引張強度 T_y をせん断強度 Q_y で除した強度比 U の値のみを変動させた供試体 No.2, 4, 5 を用いて比較を行い、 U の値による影響を明らかにする。なお、本研究では、せん断強度 Q_y は固定し、引張強度 T_y を変化させることで強度

比 U を調整している。荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較を図-6 に、各応答値の比較を表-4 に、実験終了後の各供試体の芯材の様子を写真-3 に示す。

図-6 より、No.4, No.5 供試体は強度比が低くなるにつれて荷重が低くなっている。これは、No.2 より強度比が低いため、写真-3 に示すように曲げ変形が顕著に表れたことによるものと考えられる。

また、軸力に対する芯材の挙動を検証するため、 $\varepsilon_{local}/\varepsilon_y$ －平均ひずみ関係の比較を図-7 に示す。縦軸はひずみゲージより得られた値を材料試験により得られた降伏ひずみ ε_y で無次元化している。図-7 より、軸力が作用する部位では、 $U=2.6$ である No.2 供試体では最大で降伏ひずみの 0.5 倍程度、 $U=1.7$ である No.4 供試体では最大で降伏ひずみの 3 倍程度、強度比 U が最も低い $U=1.0$

である No.5 供試体においても最大で降伏ひずみの 10 倍程度のひずみしか生じなかった。さらに、表-4 から、No.2 供試体に比べ、No.4、No.5 供試体の一次剛性は大幅に減少し、強度比が小さくなるほど一次剛性が低下することがわかる。これらより、軸力が作用する部位はそれほど塑性変形しないことが考えられる。

表-4 より、No.4、No.5 供試体の CID の値は大きく変わらなかったが、 E_m には差が見られた。これは、No.5 供

試体は軸剛性が最も低いため、荷重－変位曲線の描く総面積が小さくなったと考える。また、 u_{eq} では大きな差が見られなかったが、破断時の Half cycle 数を比較すると強度比が小さくなるほど早く破断に至る。これらのことを踏まえると、強度比が小さいと変形性能を低下させてしまうため、No.2 供試体の引張せん断強度比 $U=2.6$ 以上が望ましい結果となった。しかし、本研究では曲げ変形を想定して設計を行っていない。今回の結果より曲げ

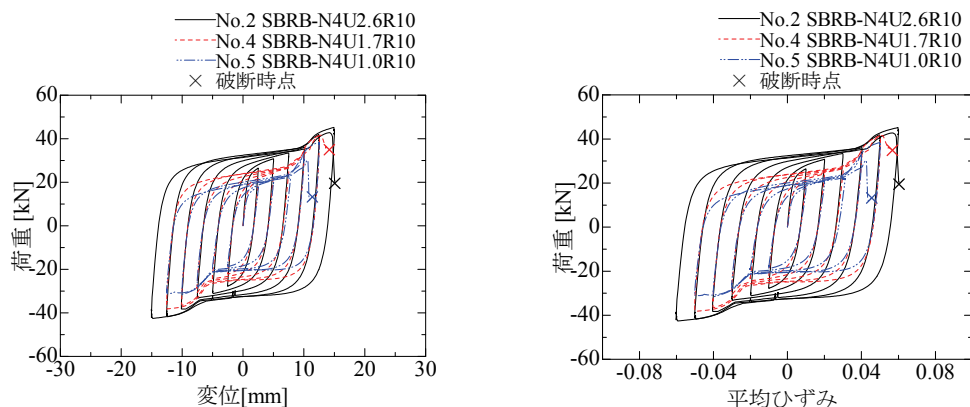


図-6 U の違いにおける荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較

表-4 U の違いにおける各応答値

No.	一次剛性 [N/mm]	二次剛性 [N/mm]	E_m [kJ]	CID [%]	u_{eq}	破断時の Half cycle 数
2	37000	4278	6.23	80.3	323.6	13
4	30000	3923	3.52	57.6	334.7	11
5	24500	3381	2.43	58.5	340.0	11

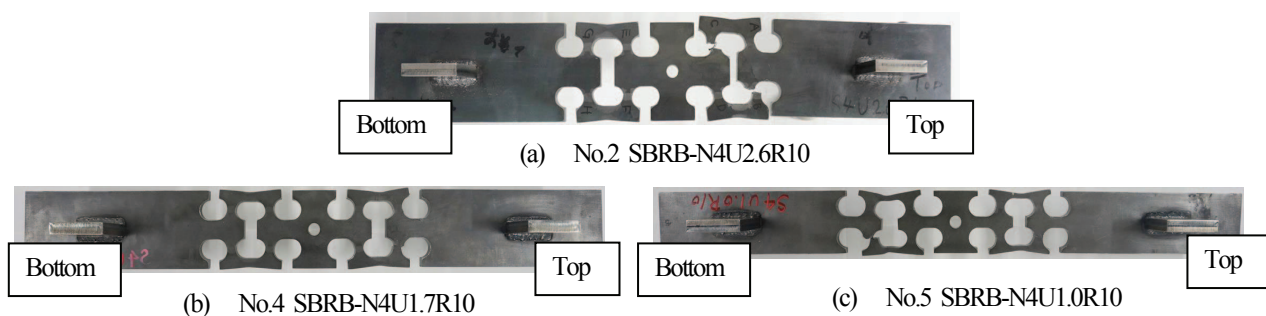


写真-3 実験終了後の芯材の様子

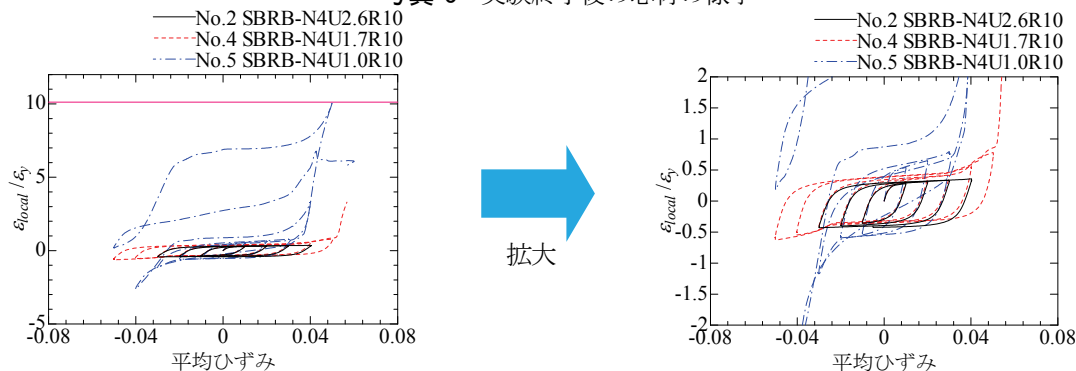


図-7 $\varepsilon_{local}/\varepsilon_y$ －平均ひずみ関係の比較

強度が低下することで性能に影響を及ぼすことが明らかとなったため、これらを考慮した上で設計を見直し、再検討する必要がある。

c) 空洞の半径 R の影響

SBRB では、せん断部分を複数箇所設置することでひずみを分散させ、破断に至る。ひずみが集中するせん断部分の面積を大きくすれば、ひずみが局所的に集中することをより防ぐことができ、変形性能の向上を望めると考える。

本検討では、SBRB の主要パラメータである空洞の半径 R の値のみを変動させた供試体 No.2, 6, 7 を用いて比較を行い、 R の値における影響を調べる。荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較を図-8 に、各応答値の比較を表-5 に、実験終了後の各供試体の芯材の様子を写真-4 に示す。

図-8 より、No.7 供試体では圧縮側で荷重が急激に上昇している。これは、表-5 からわかるように半径が大きくなるにつれて一次剛性が低くなるため、せん断変形ではなく、曲げ変形が卓越し剛性が低くなり変形しや

すくなったからである。写真-4 に示す芯材の空洞部分が接触を起こしたためこのような荷重の急激な上昇を示したのだと考えられる。また、グラフには表れなかったが、No.6 供試体でも空洞部分の接触を起こしていることを載荷実験中に確認した。

表-5 より、破断時の Half cycle は半径が R が最も大きい No.7 供試体がすべての供試体の中で一番遅い結果となった。これは、せん断部分の面積が大きいためひずみがより分散されたためと考えられる。また、CID は高機能 BRB の目標性能である $CID_{lim}=70\%$ を全て満たすことができた。No.2 供試体の u_{eq} は最も大きかった。No.2, 6 供試体の E_n 、CID および u_{eq} には大きな差は見られず、No.7 供試体の E_n と CID の値は No.2 供試体よりも良い結果となった。No.7 供試体の空洞部分の接触を踏まえると、No.2 供試体の空洞の半径 $R=10$ が望ましい結果となった。しかし、今回の結果より半径が大きくなると u_{eq} および剛性が低下するため、これについても今後は設計を見直し更なる検討が必要である。

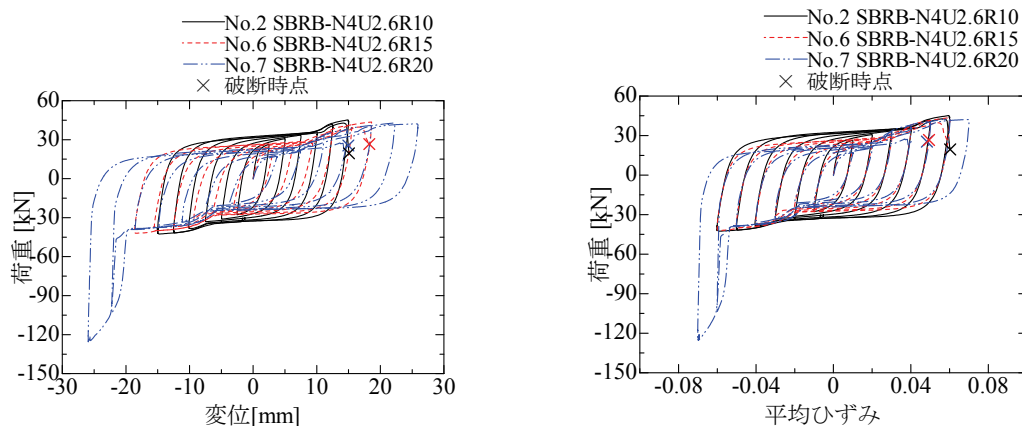


図-8 R の違いにおける荷重－変位曲線と荷重－平均ひずみ曲線の比較

表-5 R の違いにおける各応答値

No.	一次剛性 [kN/mm]	二次剛性 [kN/mm]	E_n [kJ]	CID[%]	u_{eq}	破断時の Half cycle 数
2	37000	4278	6.23	80.3	323.6	13
6	22000	3097	6.51	80.0	310.1	13
7	15854	2635	7.31	92.9	199.2	15

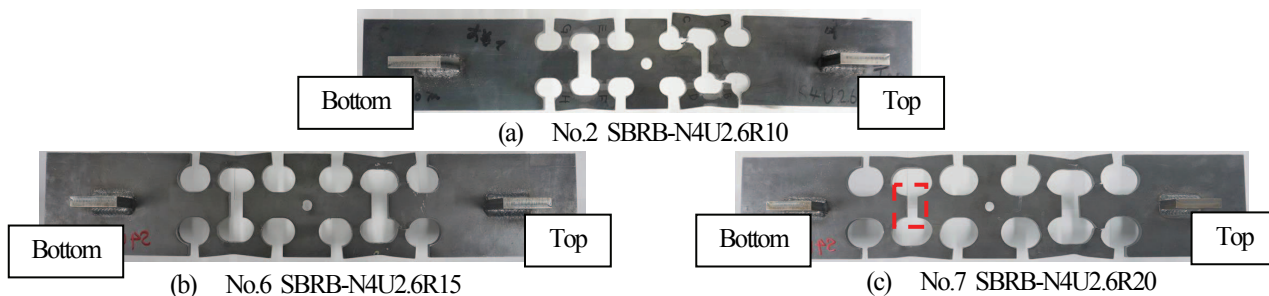


写真-4 実験終了後の芯材の様子

□: 空洞部分の接触

4. おわりに

(1) 結論

本研究では、従来の BRB より変形性能の向上のために、既往の研究において引張・圧縮ともに安定した履歴特性を持つことが確認された PS シリーズの形状を BRB の芯材に適用することで変形能力向上の可能性を操った。本実験では、せん断パーツの個数、引張強度とせん断強度の比および空洞の半径の違いが変形性能に及ぼす影響を検討した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) 実験载荷中、芯材の一部で曲げ変形が発生し、その結果フィラーと芯材が接触することで荷重の急激な上昇が見られた。
- 2) せん断パーツの個数が増えることで変形性能を向上させることができるが、増えすぎても曲げ変形が発生するため、剛性が低くなり変形がしやすく早く破断するため変形性能に影響を及ぼすことがわかった。
- 3) 引張・せん断強度の比について、せん断強度を一定にして引張強度を変動させたが、軸力が作用する部位がほとんど塑性変形しなかった。また、塑性変形した場合、圧縮時に座屈する可能性があるため、全体座屈を防止するため拘束材を厚くする必要がある。強度比を低くすると変形性能を低下させてしまうことがわかった。
- 4) 半径の大きさが大きくなるにつれて剛性が低くなるため、芯材が変形しやすく空洞部分が接触を起こすことが確認できた。
- 5) 実験結果を踏まえると、本実験では、No.2 供試体の $N=4$, $U=2.6$, $R=10$ が検討した範囲内において最も良い結果となることがわかった。

(2) 今後の課題

本研究によって、SBRB の各種パラメータの変動による影響、利点・欠点を確認することができた。以下に今後検討すべき内容をまとめる。

- 1) 設計時にフィラーと芯材の接触、即ち曲げ変形を想定していなかったためそれらを考慮した上で設計を見直す必要がある。
- 2) 空洞部分を接触しないように設計した時の SBRB の変形性能を検討する。
- 3) せん断強度を変動させた場合、変形性能に及ぼす影響を検証する。

参考文献

- 1) 家浩和：極限地震動に対する要求性能と設計法のあり方—耐震設計から先端技術を応用した免震、制震設計へ—、土木学会論文集，土木学会，No.623/VI-43，pp.1-8，1999.
- 2) 四条利久磨，森下邦広，川島一彦，浦辻和幸，田中昭人：ダンパーブレースによる新王渡橋(仮称)の耐震性向上，土木学会第 58 回年次学術講演会，I-033，pp.65-66，2003.
- 3) 小池洋平，谷中聡久，宇佐美勉，葛漢彬，尾下里治，佐合大，鶴野禎史：高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.372-381，2008.
- 4) 宇佐美勉，佐藤崇：座屈拘束ブレースの低サイクル疲労実験と照査法，構造工学論文集，Vol.56A，pp.486-498，2010.
- 5) 宇佐美勉，渡辺直起，河村洋行，葛西 昭，織田博孝：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの全体座屈，構造工学論文集，Vol.52A，pp.37-48，2006.
- 6) 宇佐美勉，加藤基規，葛西 昭：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能，構造工学論文集，Vol.50A，pp.527-538，2004.
- 7) Jia, L.J., Ikai, T., Shinohara, K. and Ge, H.B.: Ductile Crack Initiation and Propagation of Structural Steels under Cyclic Combined Shear and Normal Stress Loading, *Construction and Building Materials*, Vol.112, No.1, pp.69-83, 2016.

(2017.9.1 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF SHEAR-TYPE BUCKLING RESTRAINED BRACES

Kana KONDO, Hanbin GE and Liang-Jiu JIA

In a previous study, ductile fracture experiments of structural steels under combined shear and tensile stresses were conducted, among which the PS-series specimens had stable performance. To improve the deformability of conventional buckling restrained braces (BRBs), a new type of shear-type buckling restrained brace (SBRB) was proposed and tested. Based on the experimental results, the influences of the parameters, including the number of plastic deformation parts (shear parts), the ratio of tensile strength to shear strength and the radius of the cavity on the behavior of the SBRB were investigated.