

芯材に切欠きを設けた小型座屈拘束ブレース の性能実験

王 澤卿¹・葛 漢彬²・管 東芝³

¹名城大学大学院 理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501）
E-mail: 193433001@ccmailg.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東南大学 講師（元名城大学外国人研究員）（〒211189 中国江蘇省南京市江寧区東南大学路 2 号）
E-mail: gdzh.js@163.com

小型座屈拘束ブレースは、交換が容易で低コストであるため、実際の応用に期待がかかっている。本稿では、芯材に切欠きを有する小型座屈拘束ブレースの性能実験の結果について述べる。芯材の降伏部分の断面が円形ではないため、軸方向荷重を受ける場合、芯材に荷重が偏心して作用することになる。本研究では、偏心量、芯材降伏部分の断面形状およびテフロン（素樹脂製材料）スペーサーの有無をパラメータとし、計 6 本の試験体を製作し、それらの両側漸増変位繰り返し載荷試験を行った。その結果、本新しい小型座屈拘束ブレースが高い耐震性能を持っていることを示した。解析的検討においては、偏心の影響を考慮した簡易的理論モデルを構築し、試験体の平均応力-平均ひずみ履歴曲線の包絡線を推定できることが分かった。

Key Words: Structural fuse, Notch, Eccentricity, Seismic behaviour, Cyclic loading

1. 序論

1995 年の兵庫県南部地震で、橋梁などのインフラ構造物が大きな被害を受けた。この原因で、土木構造物の耐震安全性の向上を目指し、道路橋示方書が改訂された。そして、橋梁の重要部材（主部材）を守るために、地震エネルギーを吸収する部材が開発されている。その後、2004 年新潟県中越地震など多くの地震が発生し、特に 2016 年熊本地震では、震度 5 以上を観測した地震が連続的に複数回発生したので、部材の地震エネルギー吸収性能の向上が必要である¹⁾。

土木構造物の耐震性能向上を目的とした制震構造において地震エネルギーを吸収する部材の 1 つは制震ダンパーである。制震ダンパーは鋼材、アルミニウム合金、形状記憶合金等の金属の塑性変形によって地震エネルギーを吸収・消散させる部材である。多様な部材の降伏形式に従って、制震ダンパーはせん断降伏型、軸降伏型、曲げ降伏型の 3 種類に分けられる。その代表的な例の 1 つは座屈拘束ブレースである（Buckling-Restrained Brace、以降 BRB と呼称）。これまでに BRB に関する様々な研究²⁾⁶⁾から、BRB の特徴は

主に次の 3 つである：(1)安定な履歴曲線、(2)エネルギー吸収能力がよい、(3)変形性能が高い。

しかし、近年の熊本地震および東北地方太平洋沖地震においては、橋梁の中に設置された免震支承の損傷報告が多くあるため、上記の BRB の特徴性能の向上を目指すことに加え、低コストで設置が簡単になることは新しい要件となっている。この目標（損傷を回避するための設計方法など）を目指して、丸棒鋼を芯材に使用し、簡単な交換と低コストの要件を満たすように、小型 BRB の開発を試みる。過去の開発経験から参考すると、芯材が設定されたエネルギー吸収目標を達成できることを保証するために、多くの機械加工が必要である。機械加工で、労力とエネルギーを消費するため、BRB のコストはある程度増加する。

本研究で、芯材に切欠きを設けた棒型芯材を有する小型座屈拘束ブレースを考案している。この BRB は、従来の丸鋼棒から簡単に製作できる。そして、提案された BRB の性能を調査するために、実験的および理論的な検討が行われた。

2. 芯材に切欠きを設けた BRB の概念

(1) 新型 BRB の設計

上記した低コストで量産することができるような要件に対応するため、新型 BRB は、簡単な処理方法で安価な原料から製作する必要がある。図-1 に示すように、提案された新型 BRB は、芯材、テフロン（素樹脂製材料）スペーサーおよび拘束材からなる。普通の低炭素鋼 Q235（日本鋼材 SS400 に相当）で作られた芯材に切欠きが設けられている。この切欠きは、芯材に冷間成形加工技術によって得られ、処理することは 1 回だけで、生産コストは高くない。芯材の断面形状は円の一部であるので、芯材の円心から偏心して荷重が作用することになる。そして、力が集中せずにするため、切欠き部分の両端が滑らかな円弧である。この切欠きの長さも制御して、引張状態でも切欠き部分は拘束材内にあるように設計している。新型 BRB の両端は標準化された加工技術を採用した。このため、標準ナットを直接使用して新型 BRB を構造物に取り付けることができる。

芯材の切欠き部分を補填するために、切欠き部分と同じ形のテフロンスペーサーを用いる。テフロンスペーサーの長さは、芯材が圧縮で自由に变形できるようにするために、切欠き部分よりも少し短い。芯材の变形は、外側の拘束材と内側のテフロンスペーサーによって制御される。拘束材の内径は芯材の直径より 1～2mm 大きく、芯材が面外方向にある程度变形することができる。さらに、潤滑油を使用して、芯材と拘束材の間の摩擦を減らすように工夫した。

(2) 偏心

考案した新型 BRB には、切欠き部分は 1 つだけで、図-2 に示すように、芯材の断面は O_y 軸に対して対称である。そして、式(1)は偏心量を丸棒断面の半径と切欠きのサイズを表す円弧角度から簡単に求める式である。

$$e = \frac{4R \sin^3 \alpha}{3(2\alpha - \sin 2\alpha)} \quad (1)$$

ここで、 e は丸棒断面の円心 O から芯材断面図心 O_y までの距離であり、 R と α はそれぞれ丸棒断面の半径と切欠き部分に対応する円弧の円弧角度の半分である。 α は式(2)で求められる。

$$\alpha = \arccos \frac{R - d_a}{R} \quad (2)$$

d_a は、図-2 に示すように、切欠き部分の深さである。

3. 実験概要

合計 6 本の試験体を作成し、それらの力学的性能を

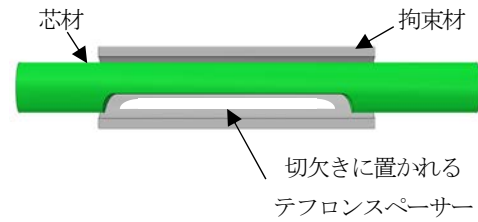


図-1 新型 BRB の概念図

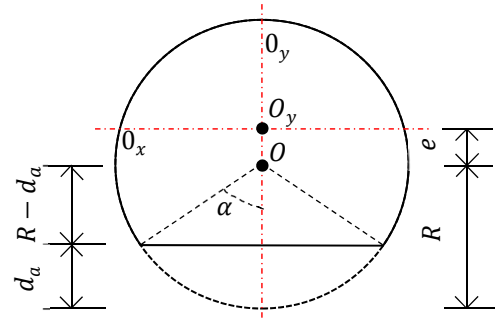


図-2 芯材の断面図

調査するために両側漸増変位繰り返し载荷実験を行う。

(1) 試験体の説明

これらの 6 本の試験体は、芯材の切欠き部分を除いて同じ構造である。図-3(a)に示すように、新型 BRB の芯材は直径 28mm の軟鋼の丸棒を使用して作られている。試験体両端から 70mm までの部分は丸棒元形状を保っている。切欠き部分の形は長さ 200mm の部分と半径 10mm の 2 つの円弧で構成される。そして、切欠き部分の断面形状は偏心量に関係しているため、各試験体によって芯材の断面形状は異なる。表-1 および図-3(b)の中で、各試験体の数字番号の意味は、削除された断面積を原材料の断面積で割り、その結果を整数としたものである。たとえば、「SC50-WT」の「50」は、削除された断面積が原断面積の 50% に等しいことを意味する。芯材の圧縮変形の余地を残すため、テフロンスペーサーが切欠き部より 15mm 短く設計された。同時に、テフロンスペーサーの両端にも半径 10mm の円弧がある。すなわち、テフロンスペーサーの断面積は切欠きの断面積と同じである。すべての拘束材は同じ鋼管から製作されており、長さおよび直径はそれぞれ 245 mm および 42 mm である。この研究は、異なる芯材の挙動に焦点を当て、拘束材の影響を検討していない。したがって、拘束材の厚さは、繰り返し载荷試験で弾性を保つように厚めに 7mm とした。図-3(c)は、拘束材の設計図である。そして、この実験では、SC36-WT と同じサイズで、SC36-WOT というテフロンスペーサーがない試験体も使用する。これはテフロンスペー

ーサーの有無の影響を比較するためである。この「WOT」はテフロンスペーサーを使用しないことを意味する。対照的に、「WT」はテフロンスペーサーを使用することである。

偏心の影響を調べるために、無偏心の試験体 DC36-WT を参照として使用する。DC36-WT の芯材は、部材軸方向に 2 回切断することによって作成され、その断面は 2 軸対称である。この芯材の断面積は、SC36-WT および SC36-WOT と同じである。試験体芯材の断面積と偏心量を表-1 に示す。

(2) 材料特性

芯材に使用される鋼丸棒は、日本鋼材 SS400 に相当する中国製 Q235 材で、降伏強度 235 MPa 以上がある。拘束材の製造に使用された鋼材は、Q345 材(SM490 に相当)である。本実験の前に、実験用鋼の材料特性を得るために 3 本の材料試験片の引張実験が行った。誤操作により 1 本の材料試験片が破損したため、それを除いて、残りの 2 本の結果とそれらの平均値を表-2 に示す。

(3) 実験計測

本研究で、名城大学大型耐震実験室の MTS 試験機を用いて、両側漸増変位繰り返し载荷による実験を行った。すべての試験体は、上端から 70 mm、下端から 80 mm の距離で MTS に設置した。漸増変位繰り返し载荷は、MTS 試験機上部の可動ヘッドを介して加えられた。芯材の相対変位をできるだけ正確に計測するために、芯材の上端から 80mm の位置に固定した挟み板（水平方向）にあて変位計を取り付けた。上端で固定した挟み板の両端に二箇の変位計を設置し、MTS 実験機の下部固定端にも変位計が二箇に設置された。

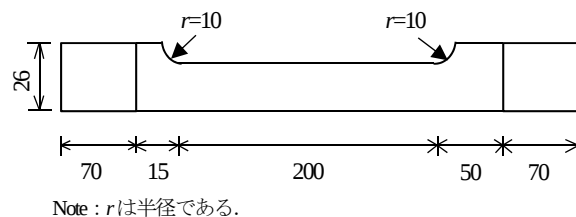
(4) 载荷パターン

载荷パターンについては、提案する新型 BRB が梁と柱の結合部に使用され则认为、ACI 374.1-05⁷⁾に示さ

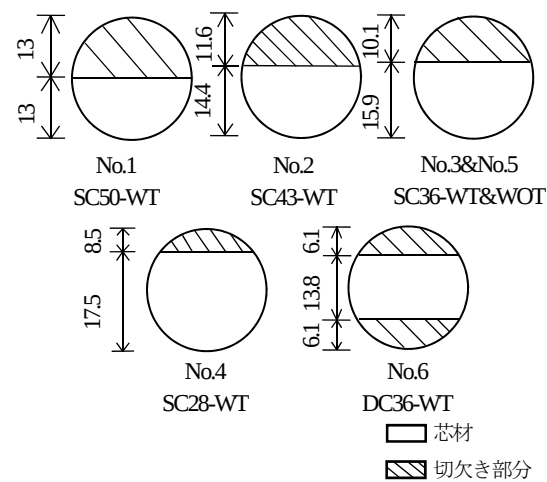
表-1 試験体の概要

No.	試験体	A_y [mm ²]	e [mm]	テフロン の有無
1	SC50-WT	265.5	5.5	○
2	SC43-WT	301.8	4.8	○
3	SC36-WT	340.2	4.3	○
4	SC28-WT	380.1	3.2	○
5	SC36-WOT	340.2	4.3	×
6	DC36-WT	341.2	0	○

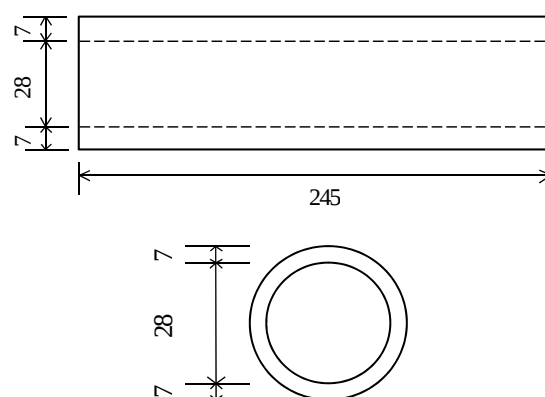
Note : A_y は芯材の断面積, e は偏心量, ○/× はテフロンスペーサーの有無を表す。



(a) 芯材の設計図



(b) 断面寸法



(c) 拘束材の寸法

図-3 試験体の設計図(単位:mm)

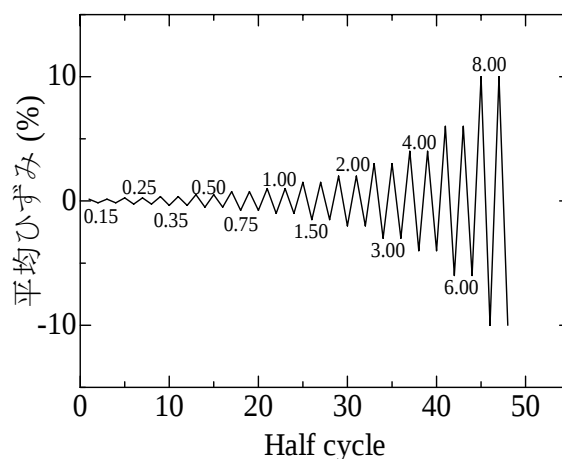


図-4 载荷パターン

れている方法を用いた。図-4 は、芯材の平均ひずみで表される載荷パターンを表したものである。試験中、平均ひずみは $\pm 0.15\%$ から $\pm 8\%$ の範囲であり、各振幅での載荷は 2 回ずつ繰り返された。引張強度が低下した場合、芯材にネッキングが発生していると考えられる。なお、実験は芯材が破断されるまで載荷を継続した。

4. 実験結果

(1) 破壊形態

試験体 SC50-WT の芯材が大きく変形して拘束材内に詰まっているため、試験体 SC50-WT の破壊形態は観察できなかった。残りの 5 本の試験体は切欠き部分で破損したが、拘束材は無傷のままであった。図-5 に示すように、芯材は、明らかな残留座屈変形を示し、ネッキング位置は固定端に近かった。芯材の表面でいくつかの摩擦損傷があった。これは、芯材と拘束材の強い接触によって引き起こされたためである。テフロンスペーサーを使用した SC36-WT の芯材には、わずかな摩擦損傷が観察されたが、テフロンスペーサーなしの SC36-WOT では、より明らかな摩擦損傷が見られた。このことから、テフロンスペーサーの有効性が証明されたと言える。

(2) 平均応力-平均ひずみ履歴曲線

図-6 には、すべての試験体の平均応力と平均ひずみの関係を示している。平均応力は、荷重を芯材の断面積で除したものと計算する。平均ひずみは、実測変位を芯材切欠き部分の長さで割ったもので、式(3)で与えられる。

$$\varepsilon_a = \Delta_n / L \quad (3)$$

ここで、 ε_a は平均ひずみであり、 Δ_n と L はそれぞれ実測変位と芯材切欠き部分の長さを表す。

全体として、すべての試験体は安定した平均応力-平均ひずみ履歴曲線を示している。平均ひずみが $\pm 0.15\% \sim \pm 4\%$ の間に、各載荷の 2 番目の cycle で、試験体の挙動は 1 番目の cycle のときとほぼ同じで、劣化はほとんどなかった。平均ひずみが 6% に達する 1 番目の cycle では、試験体 SC50-WT、SC43-WT および SC28-WT にネッキングが発生した。そのため、引張側に平均応力が低下している。他の試験体は、この cycle での平均応力がまだ低下せず、ネッキングも発生しなかった。

しかし、圧縮する時に曲線は若干不安定であった。圧縮する時に平均応力が約 300 MPa に達すると、曲線がわずかに上昇したが、その後、再び低下した。したがって、芯材が約 300 MPa の平均圧縮応力で拘束材と

表-2 材料特性

試験片	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング率 [GPa]	伸び率 [%]
A	244.0	435.4	213.6	39.4
B	252.6	439.5	212.9	42.7
平均	248.3	437.5	213.3	41.0

Note: ポアソン比=0.3.

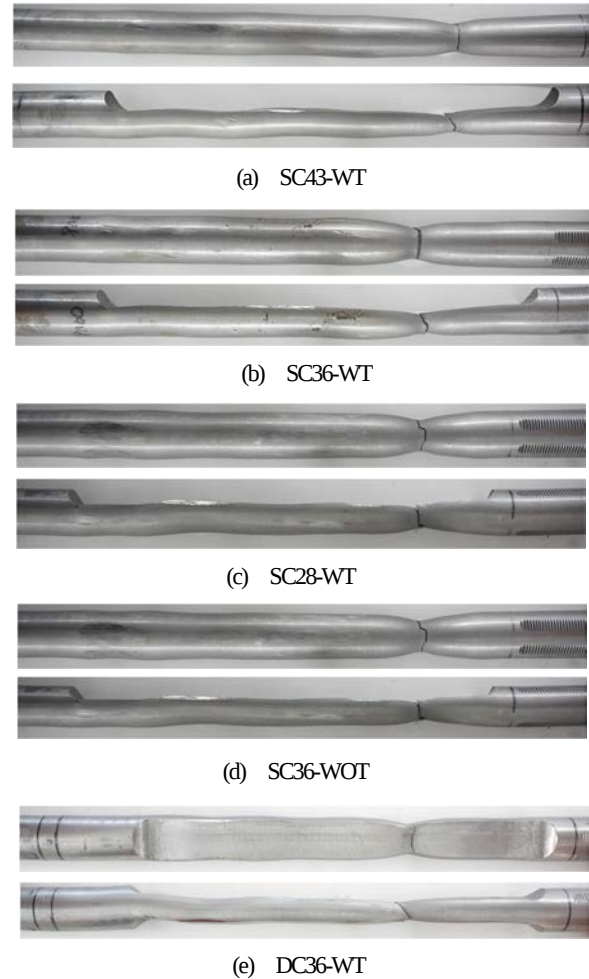
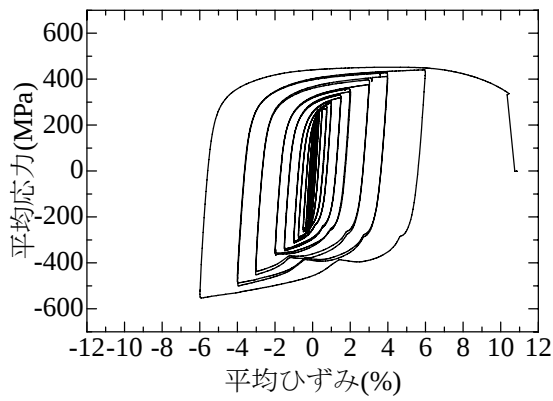


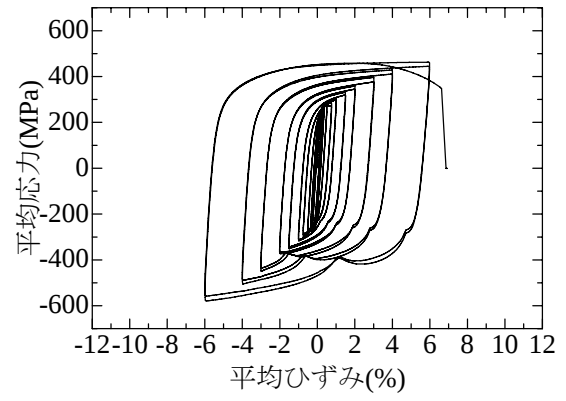
図-5 試験体の破壊形態

接触し始めると推測できる。試験体 SC50-WT、SC43-WT、SC36-WT および SC28-WT の圧縮側曲線の傾きは、平均圧縮応力が約 400 MPa で負になり、その後大幅に増加した。これは、芯材の座屈モードの変化があったことを示している。テフロンスペーサーを使用した試験体と比較して、圧縮する時に試験体 SC36-WOT は最も不安定の曲線を示し、芯材が拘束材と接触することが判明された。偏心がない試験体 DC36-WT の場合、平均応力-平均ひずみ履歴曲線が最も滑らかである。

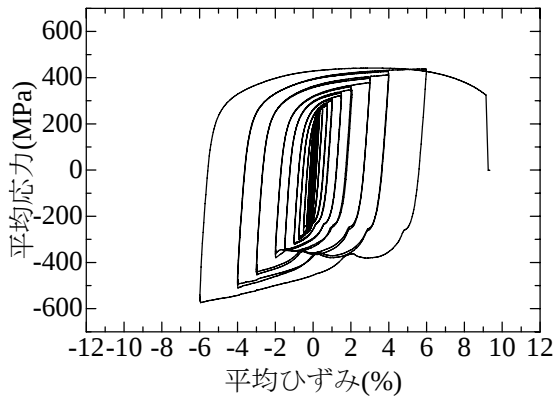
したがって、偏心により、平均応力-平均ひずみ履歴曲線が不安定になり、滑らかでなくなると結論付けることができる。



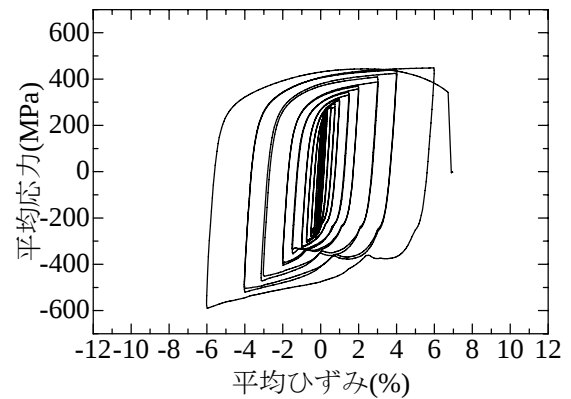
(a) SC28-WT



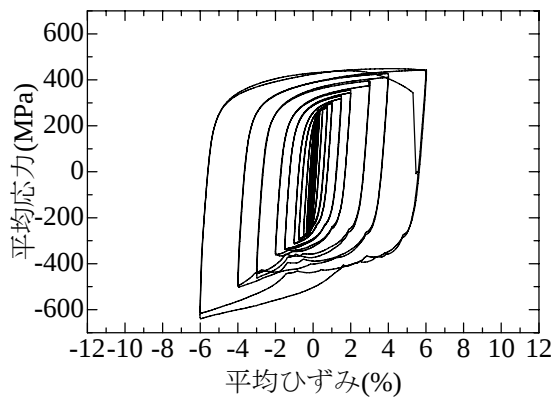
(b) SC36-WT



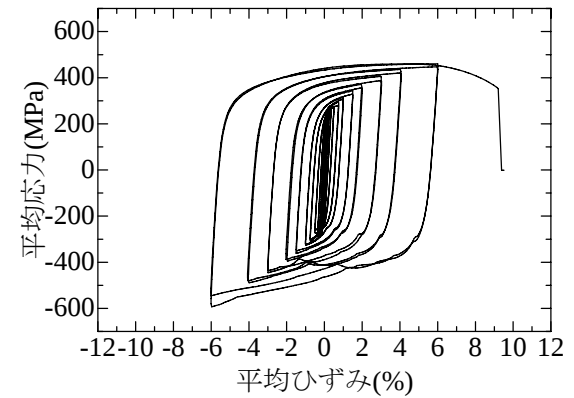
(c) SC43-WT



(d) SC50-WT



(e) SC36-WOT



(f) DC36-WT

図-6 試験体の平均応力-平均ひずみ履歴曲線

(3) 包絡線

ここで、平均応力-平均ひずみ履歴曲線の包絡線を示すことにより、新型 BRB の静的挙動を考察する。図-7 からは、各試験体の包絡線が弾性域と降伏域で構成され、降伏域では、平均ひずみの増大に伴って応力がゆっくりと増大する。この図から、偏心が新型 BRB の挙動に影響を与えないことが一目瞭然である。しかし、圧縮側の曲線に差が 2%以上の平均ひずみから出ている。平均ひずみが大きくなるにつれて、非偏心試験体の圧縮強度は全試験体の中で最も低くなる。よって、

偏心は圧縮強度を高めると結論付けることができる。テフロンスペーサーなしの試験体 SC36-WOT では、圧縮側の同じ平均ひずみの平均応力は SC36-WT のそれより大きくなる。これは、テフロンスペーサーの重要な役割を果たしていることを示唆している。

(4) 強度係数

本新型 BRB は、芯材と拘束材の接触により、同じ値の平均ひずみでは、平均引張応力と平均圧縮応力が異なる。そこで、この差を評価するために強度係数 β を用いる。 β は各載荷の最初の cycle に最大平均圧縮応力

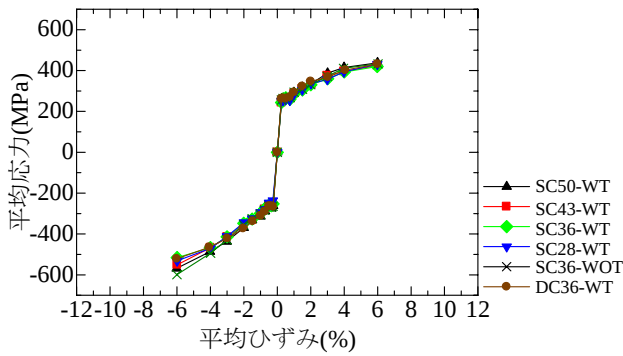


図-7 試験体の包絡線

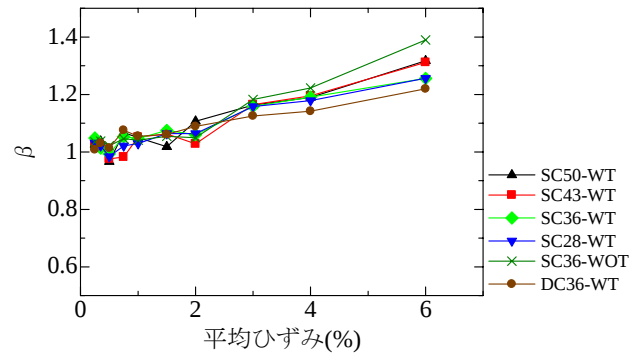


図-8 試験体の強度係数 β

と最大平均引張応力の比率として定義される。 β と平均ひずみの関係を図-8に示す。全体として、平均ひずみが増大すると、 β は増大する。試験体 SC36-WOTを除いて、6%の平均ひずみ時の β は AISC 341-10⁹⁾で規定された限界値 1.3 より小さくなっている。この結果は、提案された新型 BRB の引張強度と圧縮強度の差が実務において許容できることを意味する。図-8に示すように、平均ひずみが 2%になると、試験体 SC43-WT の β 値は全試験体の中で最も小さくなるが、試験体 SC50-WT の β 値は最も大きくなる。6%の平均ひずみで、試験体 SC50-WT と SC43-WT の β 値は、試験体 SC36-WT と SC28-WT のそれよりも大幅に大きくなる。

したがって、以下の結論を導き出すことができる。偏心とテフロンスペーサーは、芯材と拘束材の接触に影響を与える。特に、比較的大きな偏心量が、芯材と拘束材のより強い接触を引き起こすことがある。

(5) 累積塑性変形能力

本研究では、累積ダクティリティ μ_c と累積塑性変形(CID)を使用して、試験体の累積塑性変形能力を検討した。これら定義式は次のようである。

$$\mu_c = \sum \frac{\varepsilon_{u,i}}{\varepsilon_y} \quad (4)$$

$$CID = \sum (\varepsilon_{u,i} - \varepsilon_y) \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon_{u,i}$ は*i*番目の載荷 cycle での最大平均ひずみであり、 ε_y は降伏時の平均ひずみである。実験データから得られた ε_y の値を表-3に示す。

表-3は、 ε_y 、 μ_c 、CID と最大ダクティリティ μ_{max} をまとめたものである。最大ダクティリティ μ_{max} は、試験が終了する前の最大平均ひずみと降伏時の平均ひずみとの比として定義される。試験体 SC50-WTを除いて、各試験体の降伏時の平均ひずみは、偏心量の増大に伴って増大している。そして、偏心がない試験体 DC36-WT の降伏時の平均ひずみは最も低下した。全体として、すべての試験体の μ_c 値は AISC 341-10⁹⁾で要求

表-3 各試験体の延性に関するパラメータ

試験体	$\varepsilon_y(\%)$	μ_{max}	μ_c	CID(%)
SC50-WT	0.192	35.1	408.5	70.6
SC43-WT	0.245	37.2	328.3	70.7
SC36-WT	0.238	27.9	353.8	68.6
SC28-WT	0.201	51.9	406.6	73.7
SC36-WOT	0.214	28.2	387.0	68.2
DC36-WT	0.186	49.5	467.5	73.5

された限界値 200 よりも高い値に達した。試験体 SC36-WT および試験体 SC36-WOT の CID は 70% よりわずかに低いが、他の試験体の CID は 70% を超えている。したがって、新型 BRB は高い耐震性能を持つことが判定される⁹⁾。

5. 簡易推定モデル

(1) モデルの概述

圧縮荷重が増加し、降伏した部分のオイラー座屈荷重を超えると、拘束材の拘束効果により、芯材の降伏した部分が高次モードで座屈する可能性がある。前述したように、圧縮軸力と偏心によって生じたモーメントを受ける芯材の降伏した部分は、完全に降伏していることを前提にいくつかの座屈半波セグメントで構成されている。新型 BRB の圧縮強度を理論的に評価するために、座屈半波セグメントは、かかるモーメントが降伏した部分と拘束材の接触点での軸力と偏心によって発生するものだけからなると仮定する。図-9 は芯材降伏した部分の理想化仮想モデルである。

本研究では、計算の複雑さを減らすために、後述の BRB 全体の圧縮強度を計算するときに芯材の降伏した部分と拘束材の摩擦が考慮されるが、本簡易モデルでは考慮しない。理想化されたセグメントのモーメントの平衡に関する微分方程式は、式(6)で与えられる。この式は微小変位理論に基づいている。

$$E_{eff} I_{ox} y^{IV} + Py'' = 0 \quad (6)$$

ここで、 E_{eff} は有効弾性係数、 P は理想化されたセグ

メントの圧縮強度、 I_{0x} は芯材曲げ方向の断面 2 次モーメントである。

有効弾性係数 E_{eff} は、式(7)のように表される。

$$E_{eff} = 2EE_t / (E + E_t) \quad (7)$$

この式で、 E は材料のヤング率であり、 E_t は接線係数である。この接線係数 E_t は繰り返し载荷実験に対応する経験モデルに基づいて推定できる¹⁰⁾。

理想化されたセグメントの境界条件を考慮すると、その端部で発生する接触力は、式(8)のように表すことができる。

$$Q = (2e - s_2 - s_1)P / l_w \quad (8)$$

ここで、 s_1 と s_2 はそれぞれ芯材と拘束材の上ギップと下ギップである。そして、 l_w は単一座屈半波セグメントの長さ、式(9)を使用して推定できる¹⁰⁾。

$$l_w = K\pi \sqrt{\frac{E_{eff} I_{0x}}{P}} \quad (9)$$

K は座屈長係数である。本研究で、芯材と拘束材の接触は点接触であるため、 K の値は 1.403 となる¹¹⁾。

芯材の圧縮強度を推定するときは、芯材と拘束材の摩擦を考慮する必要があるが、鋼製部材(芯材と拘束材)とテフロンスペーサーとの摩擦は 0 として仮定する。そして、圧縮応力の理論値 σ_n は、式(10)で計算できる。

$$\sigma_n = (P + \mu \sum Q) / A_y \quad (10)$$

μ は芯材と拘束材の摩擦係数であり、 A_y は芯材の降伏部分の断面積である。理想化された座屈半波の数は、芯材の拘束された部分の長さに基づいて推定する。

(2) 座屈半波セグメントの圧縮強度

図-7 に示したように、各試験体の引張側の包絡線はほぼ同じ曲線になっている。そして、繰り返し载荷における鋼材の硬化特性を考慮して、式(11)に示すように、引張側の包絡線に基づく回帰分析によって推定できる。

$$\sigma_s = -42741\bar{\varepsilon}^2 + 5776.1\bar{\varepsilon} + f_y - 13.13 \quad (11)$$

ここで、 σ_s は、繰り返し载荷の影響を考慮した引張側平均応力である。 $\bar{\varepsilon}$ は軸変形による平均ひずみ振幅であり、 f_y は降伏応力である。

芯材の変形は軸変形と座屈後の曲げ変形からなるため、圧縮時の芯材の縮みは式(12)で計算できる。

$$\Delta \approx \bar{\varepsilon}L + \sum (l_0 - l_w) \quad (12)$$

ここで、 Δ は圧縮中の芯材の縮み、 L は芯材降伏した部分の長さ、 l_0 は単一座屈半波セグメントの弧長である。そして、式(12)から、 $\bar{\varepsilon}$ は式(13)に示すように求められる。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta}{L} - \sum (l_0 - l_w) = \varepsilon_n - \sum (l_0 - l_w) \quad (13)$$

ここで、 ε_n は公称圧縮ひずみである。

拘束材の存在により、座屈した芯材が変形する空間は小さくなるため、理想化された座屈半波セグメントの形状は、2 つの組み合わせられた円弧として考えられる。次に、円弧の幾何学的特性に従って、式(14)に示すように、単一座屈半波セグメントの弧長 l_0 を簡単に推定できる。

$$l_0 = \frac{l_w^2 + 4s_1^2}{8s_1} \arccos\left(\frac{l_w^2 - 4s_1^2}{l_w^2 + 4s_1^2}\right) + \frac{l_w^2 + 4s_2^2}{8s_2} \arccos\left(\frac{l_w^2 - 4s_2^2}{l_w^2 + 4s_2^2}\right) \quad (14)$$

ポアソン効果により、鋼材の断面は圧縮を受けるとわずかに膨張する。圧縮ひずみが鋼材の弾性限界を超えた場合、ポアソン比は 0.5 と仮定される¹²⁾。ポアソン効果を考慮して、芯材の降伏した部分の断面特性は実際の状況に応じて更新する必要がある。断面寸法と断面性質の関係に基づいて、降伏した芯材の断面積と断面 2 次モーメントは式(15)と式(16)で推定できる。

$$A_{yi} = A_y(1 + 0.5\bar{\varepsilon})^2 \approx A_y(1 + \bar{\varepsilon}) \quad (15)$$

$$I_{0i} = I_{0x}(1 + 0.5\bar{\varepsilon})^4 \approx I_{0x}(1 + 2\bar{\varepsilon}) \quad (16)$$

この A_{yi} と I_{0i} はそれぞれ降伏した芯材の断面の面積と断面 2 次モーメントである。上記の式に基づいて、理想化されたセグメントの圧縮強度は、式(17)で評価できる。

$$P = \sigma_s A_{yi} \quad (17)$$

(3) まとめ

上記の式において、 $\bar{\varepsilon}$ 、 l_w および P は関連性が高いと判断できる。ここで、反復法と近似理論を利用して、公称圧縮応力 σ_n を推定する。図-10 では試験体 SC50-WT, SC43-WT, SC36-WT および SC28-WT の理論結果と実験結果が比較されている。引張強度の理論結果は、式(11)に基づいて決定された。また、平均ひずみが 0.25%になる前の試験体の挙動は、ほぼ線形であると見なされる。

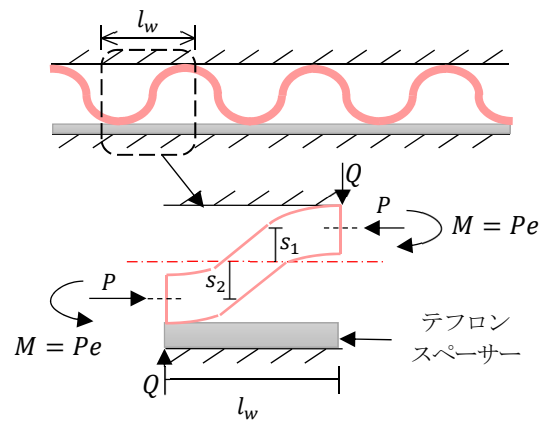


図-9 芯材降伏した部分の理想化仮想モデル

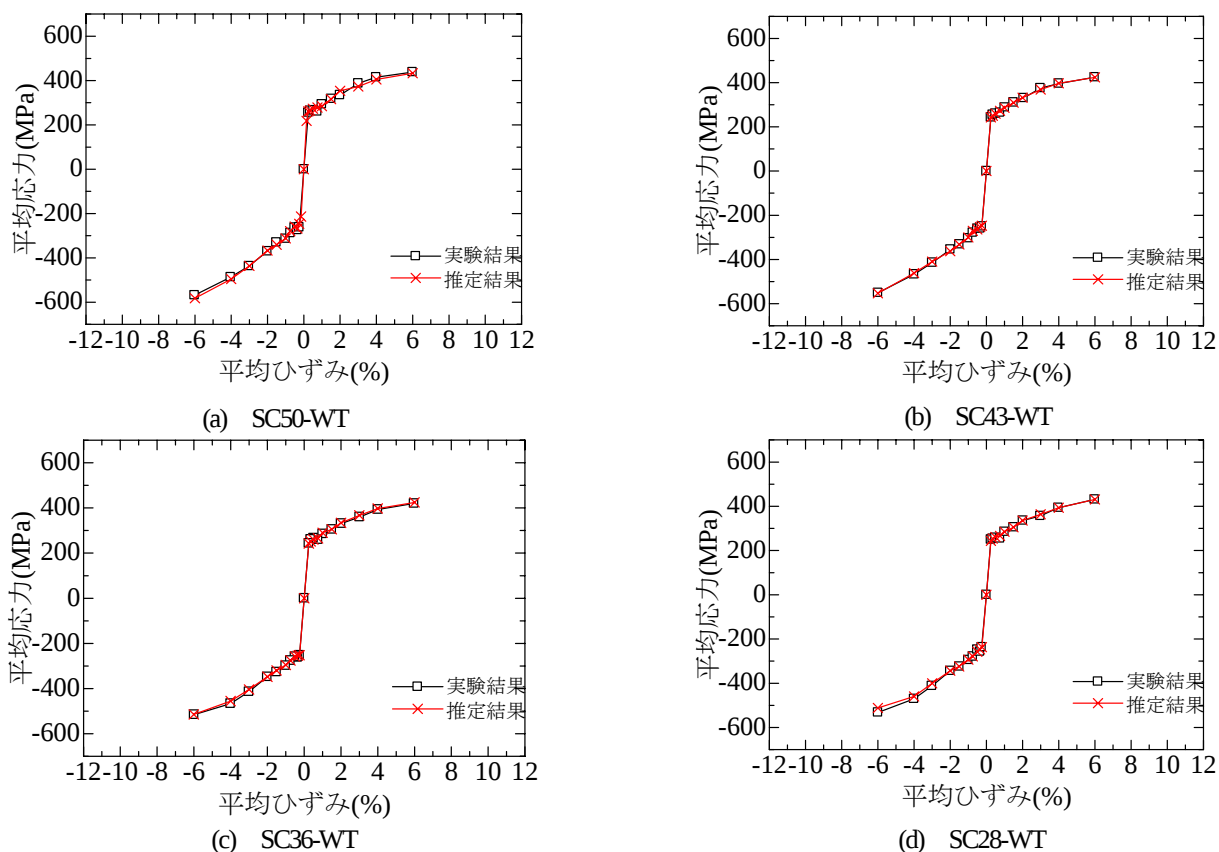


図-10 簡易モデルと実験からの包絡線の比較図

図-10 に示すように、各試験体の理論的推定結果は、特に試験体 SC43-WT および試験体 SC36-WT の場合、実験結果に非常に一致している。そのため、この簡易モデルは、本研究で提案された新型 BRB の力学性能を概ね模擬できる。試験体 SC50-WT の理論結果と実験結果の最大誤差は 5.0% であるといつてよい。これは、圧縮平均ひずみが 6% のときである。偏心量が最も小さい試験体 SC28-WT の場合、圧縮平均ひずみが 4% と 6% になるとき、約 7.8% の誤差が見られた。これらの誤差が発生する可能性があるのは、簡易モデルの仮定が、偏心量が小さい試験体の実際の状況にあまり近くないためである。よって、偏心量が小さい場合、さらに改善を行う必要がある。

6. 結論

本論文では、芯材に切欠きを設けた小型座屈拘束ブレースの実験結果について述べた。この新型 BRB は、切欠きを設けた芯材、テフロンスペーサーおよび拘束材からなっている。本新型 BRB の芯材は、従来の丸鋼を使用して簡単に製作されたものできる。次に、この種の BRB の性能を調べるために、6 本の試験体に対して両側漸増変位繰り返し載荷試験を実施し、本新型

BRB の挙動を明らかにした。そして、簡易的な理論モデルを構築し、この種の BRB の平均応力-平均ひずみ特性の推定を試みた。本研究の結果に基づいて、次の結論を導き出すことができる。

- 1) 芯材の断面は円の一部であるため、偏心があり、軸力が加わったときにモーメントが発生する。
- 2) 繰り返し載荷試験では、試験体の破断した部分は芯材切欠き部分に位置する。また、安定した平均応力-平均ひずみ履歴曲線と十分な延性を示した。
- 3) 試験体の平均応力-平均ひずみ履歴曲線で、圧縮側の曲線がわずかな変動を示す。これは、テフロンスペーサーと偏心が影響したためである。
- 4) 芯材と拘束材の接触による本新型 BRB の圧縮強度の増大量は、偏心の影響を受けた結果である。
- 5) 簡易モデルから推定された平均応力-平均ひずみ関係は実験結果とよく一致しているので、このモデルを使用して本新型 BRB の包絡線を推定できる。

参考文献

- 1) 鋼・合成構造標準示方書(耐震設計編), 2018.
- 2) 金治英貞, 尾立圭巳, 鈴木直人, 井上一朗, 藤野陽三: 座屈拘束ブレースを有する既設長大橋フレーム構造における制震性能評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp.137-148, 2011.
- 3) 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.
- 4) 宇佐美勉, 佐藤崇, 葛西昭: 高機能座屈拘束ブレースの開発研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.719-729, 2009.
 - 5) 萩野谷学, 田口孝, 長尾直治, 神谷隆: スリット孔を有する座屈拘束ブレースの力学特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 15 巻, 第 57 号, pp.35-43, 2008.
 - 6) 猪飼豊樹, 丸山陸也, 賈良玖, 葛漢彬: 魚骨型座屈拘束ブレース (FB-BRB) の開発に関するパイロット研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.I_321-I_333, 2017.
 - 7) ACI374.1—05, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.
 - 8) AISC341—10, Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 2010.
 - 9) 宇佐美勉: 高機能制震ダンパーの開発研究, 第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2007.
 - 10) M. Dehghani, R. Tremblay, An analytical model for estimating restrainer design forces in bolted buckling-restrained braces, J. Constr. Steel Res, 138, 2017, 608-620.
 - 11) F. Genna, G. Bregoli, Small amplitude elastic buckling of a beam under monotonic axial loading, with frictionless contact against movable rigid surfaces, J. Mech. Mater. Struct. 9(4) (2014) 441-463
 - 12) J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge university press, 1994.

PERFORMANCE EXPERIMENT OF MINIATURE BUCKLING-RESTRAINED BRACES WITH NOTCH IN CORE MEMBER

Zeqing WANG, Hanbin GE, Dongzhi GUAN

Miniature buckling-restrained braces are easy to replace and low cost, so they are expected to be used in actual applications. This paper presents results of performance experiments of miniature buckling-restrained braces with notch in the core member. Since the cross section of the yielding part of the core member is part of cycle, the load acts eccentrically on the core member when an axial load is applied. In this study, considering the three parameters: eccentricity, cross-sectional shape of core member yielding part and whether Teflon spacer (base resin material) is included, a total of 6 test specimens were manufactured and their cyclic loading experiments were performed. As a result, it was shown that this novel type of buckling-restrained brace has high seismic performance. In the analytical study, it was found that a simple theoretical model considering the effect of eccentricity can be constructed to estimate the envelope of the average stress-average strain curve of the specimens.