

高機能座屈拘束ブレースの開発研究

Developing High-performance Buckling-restrained Braces

宇佐美 勉*, 佐藤 崇**, 葛西 昭***

Tsutomu Usami, Takashi Sato, Akira Kasai

*D.Sc., 工博, 名城大学教授, 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口)

**名城大学大学院理工学研究科建設システム工学専攻 修士課程 (同上)

***博士 (工学) 名古屋大学講師, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

This paper presents a result of a series of general investigations into the damage control seismic design of steel bridges in which the objective of the performance is to preserve the function even after severe (level 2) earthquakes. To this end, it has been shown that one of the most efficient ways is to install energy dissipation devices in bridges, such as buckling-restrained braces (BRBs) or shear panel dampers (SPDs). In this paper, BRBs are selected. An idea of high-performance BRBs that is expected to withstand major earthquakes three times without being replaced is proposed, and their required demands are clarified. Furthermore a series of performance tests and analyses are carried out to verify the proposals.

Key Words: damage control seismic design, buckling-restrained brace, high-performance, cyclic loading

キーワード: 制震, 座屈拘束ブレース, 高機能, 繰り返し載荷

1. 緒言

政府の中央防災会議は, 平成 17 年 9 月 27 日に「首都直下地震対策大綱」を発表している. この中では, 緊急物資の港湾からの陸揚げや幹線道路の緊急車両の通行を, 地震発生後, ごく短期間で可能にするために岸壁, 橋梁等の耐震化の推進の必要性を指摘している¹⁾. 文献 2), 3) では, 同会議が指摘する「1 日以内に緊急車両の通行機能を確保する橋梁の耐震化」あるいは, 更に一歩進めて「1 日以内に普通車両の通行機能をも確保する橋梁の耐震化」の実現は, 橋梁の制震構造化により実現の可能性が高いことを指摘している. 制震構造とは, 既設橋梁の横構あるいは対傾構などをエネルギー吸収・消散機能を持つブレース材 (座屈拘束ブレース (Buckling restrained brace) で BRB と略称する) に取り替える, あるいは横構, 対傾構の端部にエネルギー吸収機能を持つダンパー (せん断パネルダンパー (Shear panel damper) で SPD と略称する) を付与し, 損傷 (塑性変形) を制震ダンパーに集中させ, 主構造の損傷を軽微なものに制御した構造のことである.

本論文は, 制震構造の要となる制震ダンパーの高機能

化を目指した研究の一環として行った高機能 BRB の開発研究の成果について述べたものである. BRB の性能実験および解析に関しては, 著者らの一連の研究^{6)~12)}, 港大橋の耐震補強に関連して行われた金治らの研究^{13),14)}, 上路アーチ橋の動的応答低減効果を検証するために行った森下らの研究¹⁵⁾, BRB を落橋防止装置に適用した名古屋高速道路公社¹⁶⁾などの研究がある. また, 文献 2), 3) では, 鋼橋のライフサイクルに渡って取り替え不要で, 大地震 3 回に耐えうるような制震ダンパーを高機能制震ダンパーと称し, その開発に必要な研究について概説している. 本論文では, 著者らの過去の研究^{6)~11)}を踏まえ, 新たに行った BRB の性能実験と解析を基に, BRB の高機能化に必要な条件に関する検討を行う.

2. 高機能座屈拘束ブレースの要求性能

土木構造に用いられる制震ダンパーは, 建築構造に比べより厳しい条件, すなわち大型で長期間風雨にさらされた状態で使用されるのが一般である. 従って, 建築構造に用いられる制震ダンパーに要求される性能に加え, 土木構造特有の性能が要求される. それらをまとめると

以下のようになる^{2),3)}。

- a) 安定した履歴特性を持ち、高いエネルギー吸収能を持つ。
- b) 変形能力が大きい。
- c) 低サイクル疲労強度が大きい。
- d) 高い耐久性を持つ。
- e) 製作が容易で安価である。
- f) 取り替えが容易に出来る、あるいは取り替えが不要である。

BRB に対する要求性能 b), c) の照査は次のように行われる^{4),5)}。

変形性能照査

$$\gamma \cdot \varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_u \quad (1)$$

低サイクル疲労照査

$$CID = \gamma \cdot \sum_{i=1}^n |\varepsilon_{pi}| \leq CID)_{lim} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{\max}$ ＝構造物に設置した BRB の平均応答軸ひずみ (BRB の両端部の相対軸変位を変形する部分の長さで除した量) の最大値、 ε_u ＝終局軸ひずみ、 γ ＝部分係数、 CID ＝累積塑性変形^{4),5)}、 ε_{pi} ＝平均応答軸ひずみの塑性成分、 $CID)_{lim}$ ＝累積塑性変形の限界値である。

BRB は一般に、想定する地震動に応じて式 (1)、(2) を満たすように設計すればよいが、高機能 BRB は、限界値としての終局軸ひずみ ε_u および累積塑性変形の限界値 $CID)_{lim}$ の値を大きく取ることにより、高機能性を確保する。性能 a) は、終局軸ひずみ ε_u の範囲内での BRB の繰り返し荷重下における履歴曲線が耐力低下のない紡錘形であれば達成できよう。性能 d) については、鋼材の耐腐食性、アンボンド材の経年劣化 (硬化) が問題となる。性能 e) は、鋼材を使用することにより比較的容易に達成することが出来ると考えられる。

現在、開発を進めている高機能制震ダンパーは、a) ～ e) の要求をすべて満たすと共に、f) の内、橋梁のライフサイクルに渡って取り替えが不要な制震ダンパーを目指している。式 (1)、式 (2) の限界値として、大地震 3 回程度の応答値の上限である、下記の限界値を目標性能とする^{3),11)}。

$$\begin{aligned} \varepsilon_u &= 0.03 \\ CID)_{lim} &= 0.7 \end{aligned} \quad (3)$$

本論文では、式 (3) の軸ひずみの限界値 3% に至るまで変動ひずみ振幅の繰り返し載荷実験を行い、累積塑性変形の限界値 70% を確保出来る BRB を高機能座屈拘束ブレース (高機能 BRB) と称する。

3. 全体座屈防止条件式

土木構造物に用いられる制震ダンパーは建築構造物

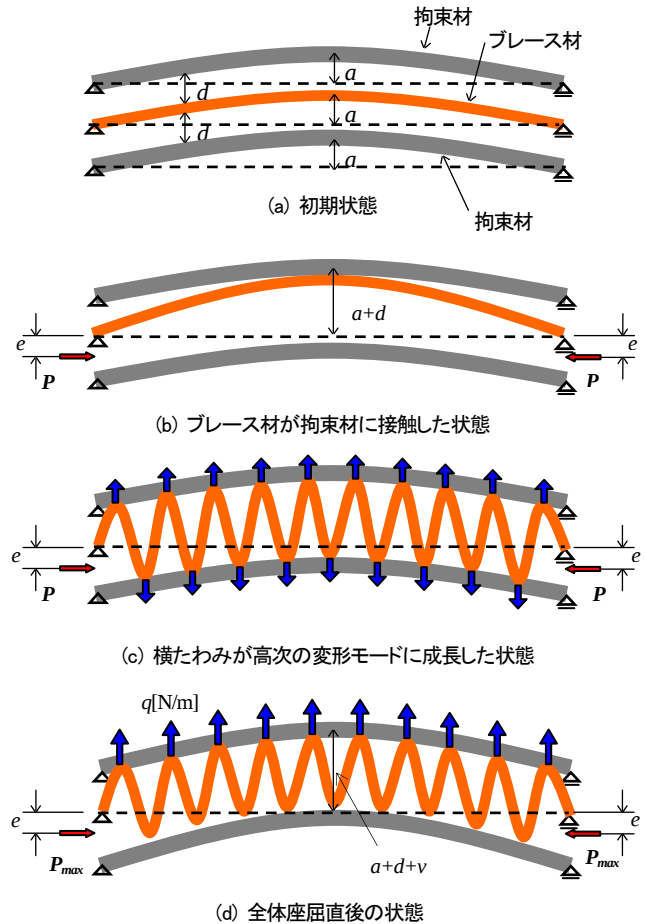


図-1 全体座屈発生メカニズム

のそれに比べ必然的に大型になる。従って、軽量化されたダンパーの開発が望ましいが、BRB の場合は高機能化を確保するために全体座屈防止が必須である⁹⁾。BRB の全体座屈発生のメカニズムおよびその防止の条件については文献 9) で述べたが、ここではその後の知見を基にそれらについて再考する。

まず、BRB の全体座屈発生のメカニズムについて考察する。図-1 (a) ～ (d) は、それぞれ単調増大の偏心圧縮荷重 P を受ける BRB の (a) 初期状態、(b) ブレース材が拘束材に初めて接触した状態、(c) 横たわみが高次の変形モードに成長した状態、(d) 全体座屈発生直後の状態を示したものである。ここで、 d はブレース材と拘束材の間の隙間量 (後述の面外隙間量で、部材全体に渡って一定とする)、 a は部材中央における拘束材とブレース材の初期たわみである。但し、初期たわみは拘束材とブレース材で同一とする。ブレース材は初期状態 (図-1 (a)) から圧縮荷重の増大に伴い拘束材に接触する (図-1 (b))。荷重が更に上昇すると、横たわみは高次の変形モードに成長していき (図-1 (c))、拘束材にはブレース材から接触力が作用し、それが拘束材に作用するフープ応力となる。全体座屈が生ずるまでは、上下の拘束材に作用する

総接触力はバランスされており、拘束材の横たわみは小さい。更に荷重が増大すると、拘束材の剛性が低い場合には、全体座屈が生ずると共に拘束材の横たわみが発生し、接触力が上方の（拘束材の変形方向の）拘束材のみに作用することとなる（図-1(d)）。接触力の大きさ、および部材の長さ方向の分布の算定は複雑であるが、文献8)で示されているように、ブレース材と拘束材の接触点で、拘束材の長手方向にほぼ等しい大きさで作用すると見なされる。軸圧縮力の増大により拘束材の横たわみが更に進み、拘束材中央が降伏した点をBRBの安全側の終局状態とみなす。

全体座屈が生じた直後のBRB中央に発生する曲げモーメントは次式のように表される。

$$M_c = P_{max}(a + d + e + v) \quad (4)$$

ここで、 P_{max} ＝全体座屈が生ずるときの軸圧縮力、 v ＝全体座屈が生じた直後の拘束材の横たわみである。全体座屈が生ずる時点でのブレース材から拘束材に作用する単位長さあたりの接触力 q は等分布と仮定し、 q およびそれによって発生する曲げモーメント M_c は拘束材のみで受け持たれるものと仮定すると次式が成り立つ。

$$v = \frac{5qL^4}{384E^R I^R} = \frac{5M_c L^2}{48E^R I^R} \quad (5)$$

ここで、 $E^R I^R$ ＝拘束材の曲げ剛度である。式(5)の v を式(4)の右辺に代入し、 M_c について解くことにより次式を得る。

$$M_c = \frac{P_{max}(a + d + e)}{1 - \frac{5P_{max}L^2}{48E^R I^R}} \cong \frac{P_{max}(a + d + e)}{1 - 1.03 \frac{P_{max}}{P_E^R}} \quad (6)$$

ここで、 $P_E^R = \pi^2 E^R I^R / L^2$ ＝拘束材のみのオイラー座屈荷重である。上の誘導は、拘束材の強度と剛性がかなり大きく、ブレース材が高次のモードに変形した後に全体座屈が生ずる場合に適切である。ところが、拘束材の強度と剛性が余り大きくない場合は、ブレース材が高次のモードに変形する前に全体座屈が生じてしまう場合も考えられる。極端な場合は、図-1(b)に示したように、ブレース材中央が拘束材に接触した時点で全体座屈を起こす場合も考えられよう。この時は、接触力は等分布ではなく、拘束材中央に働く集中荷重と考える方が適切である。この場合には、上と同様な誘導方法により、式

(6)の最終項の分母の係数1.03が0.82になることが分かる。即ち、接触力を等分布と仮定すれば、安全側の照

査式を得る。式(6)の最終式の分母の係数1.03を1.0とおき、式(6)の外力モーメントが拘束材の降伏モーメント M_y^R を上回らない条件から、次式が得られる。

$$\frac{P_{max}(a + d + e)}{1 - P_{max} / P_E^R} \leq M_y^R \quad (7)$$

式(7)の左辺は P - Δ 効果を考慮した拘束材中央の曲げモーメント（応答値）、右辺は拘束材の降伏曲げ強度（限界値）であって、限界状態を拘束材の初期降伏に設定した式を表す。

式(7)を P_{max} について解くと次式で表される軸方向圧縮力で表現した**全体座屈防止条件式**を得る。

$$\frac{P_{max}}{P_y} \leq \frac{1}{\frac{P_y}{P_E^R} + \left(\frac{P_y L}{M_y^R} \right) \cdot \frac{a + d + e}{L}} \quad (8)$$

ここで、 P_y ＝ブレース材の降伏軸力である。全体座屈防止のためには、拘束材は式(8)を満たすように曲げ強度（ $M_y^R / P_y L$ ）と曲げ剛性（ P_E^R / P_y ）を確保しなければならない。式(8)の適用に際しては P_{max} の予測が必要であるが、式(8)の諸量の材料定数に公称値、寸法に設計値、初期たわみ a に $L/1000$ を用い、種々の不確定要因（初期たわみ、隙間量、偏心量などの変動）による式(8)の右辺の低下率 $1.0 / f(U.F.)$ を左辺に移した左辺項の値として3.0が提案されている^{3),9),17)}。すなわち、

$$\frac{P_{max}}{P_y} \cdot f(U.F.) = \frac{P_{max}}{P_y)_{actual}} \cdot \frac{P_y)_{actual}}{P_y)_{nominal}} \cdot f(U.F.) = 3.0 \quad (9)$$

上式で、 $P_{max} / P_y)_{actual}$ ＝最大軸圧縮力/実降伏軸力は1.6程度、 $P_y)_{actual} / P_y)_{nominal}$ ＝実降伏軸力/公称降伏軸力は1.2程度であるので^{6),9)}、 $f(U.F.)$ の値は1.56程度になる。結局、公称値および設計値で計算した式(8)の右辺項を**公称安全係数 ν_F** と置くと、全体座屈を起こさないための条件式は次のように表される。

$$\nu_F \geq 3.0 \quad (10)$$

ここに、

$$\nu_F = \frac{1}{\frac{P_y}{P_E^R} + \left(\frac{P_y L}{M_y^R} \right) \cdot \frac{a + d + e}{L}} \Bigg|_{nominal} \quad (11)$$

以降、混乱のない場合は公称安全係数 ν_F を単に安全係数と称する。

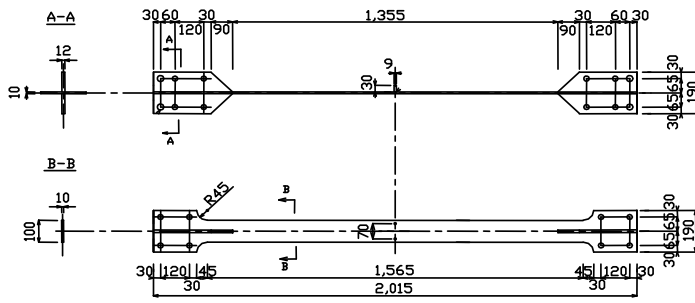


図-2 ブレース材の全体図

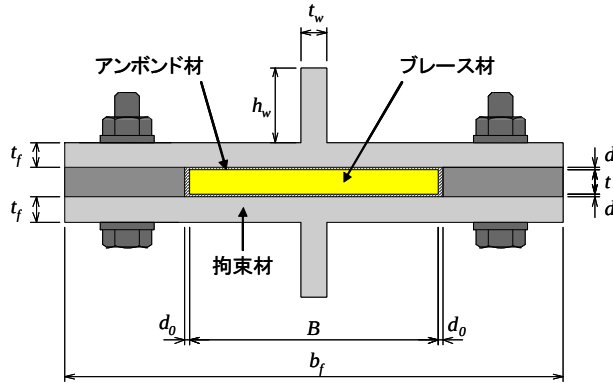
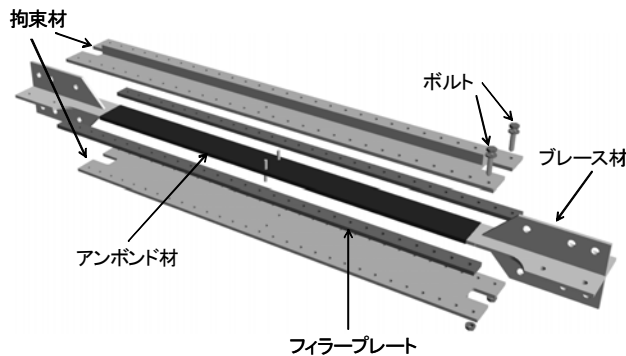


図-3 拘束材断面図



4. 実験概要

本研究では、軽量化した *BRB* として、文献9)と同様、ブレース材に平鋼、拘束材にはT形または平鋼を使用した。本論文の実験では拘束材の形状・寸法、およびブレース材と拘束材との隙間量が異なる供試体5体を用い、正負交番の繰返し載荷実験を行い挙動を調べた。図-2～図-4に *BRB* の形状、表-1～表-3に、文献9)の実験（実験シリーズAと称する）の供試体と合わせて、本論文で新たに行った実験（実験シリーズB）の供試体の諸元、材料定数を示す。供試体の形状および実験装置は、

基本的には、両実験シリーズで同一である。但し、実験シリーズAは高機能 *BRB* の開発を意図して行った実験でないため、必ずしも式(3)の目標性能を保有するわけではない。

4.1 ブレース材

図-2にブレース材の全体図を示し、諸元を表-1に示す。ここで、 L ：平行部の長さ、 B ：平行部の幅、 t ：平行部の厚さ、 A ：平行部の断面積、 λ ：平行部の長さの弱軸に関する細長比である。ブレース材には平鋼を用い、端部は実験装置に設置するために、12mm厚の両側リブが両端部に溶接してある十字断面となっている。

ブレース材は、実験シリーズAではSS400、実験シリーズBではSM400Aを用いた。それぞれの鋼材についてJIS1号試験片を3本製作し、引張試験を行って得られた材料定数の平均値を表-2に示す。表-2において E ：ヤング率、 σ_y ：降伏応力、 ε_y ：降伏ひずみ、 E_{st} ：初期硬化係数、 ε_{st} ：ひずみ硬化開始点のひずみ、 σ_u ：引張強度、 ν ：ポアソン比である。また、これらの材料定数を用いて計算した、ブレース材の降伏軸力 ($P_y = \sigma_y A$)、降伏軸方向変位 ($\delta_y = \varepsilon_y L$) も表-1に併せて示す。

4.2 拘束材

図-3に *BRB* の断面を示し、拘束材の諸元を表-3に示す。ここで、 b_f ：フランジ幅、 t_f ：フランジ厚、 h_w ：ウェブ高さ、 t_w ：ウェブ厚、 σ_y^R ：降伏応力、 E^R ：ヤング率、 d ：面外隙間量、 d_0 ：面内隙間量である。

ここで、隙間量の面外および面内とは、それぞれ拘束材フランジに直交方向および平行方向であることを示す。実験で使用した拘束材の材質はブレース材の材質と同じであり、T形断面およびウェブ部分のない平鋼断面を使用した。T形断面はウェブとフランジを溶接集成してある。後で述べるように、供試体(A1)、(A2)、(B1)、(B2)は安全係数 $\nu_F < 3.0$ 、供試体(A3)、(A4)、(B3)～(B5)は $\nu_F > 3.0$ であり、前者は全体座屈が生ずる、後者は生じない、と予測される供試体である。

4.3 アンボンド材

アンボンド材はブレース材と拘束材を縁切りし、ブレース材がスムーズに軸方向に伸び縮み出来るようにする材料である。本実験では、1mm厚のテープ状のブチルゴムをブレース材に接着してアンボンド処理を行った。

表-1 ブレース材の諸元

供試体	鋼種	L [mm]	B [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	P_y [kN]	δ_y [mm]	摘要
(A1)F10W0-d1-6	SS400	1355	100	10.2	1020	462	285	1.81	実験シリーズ A [文献 9 の実験]
(A2)F12W0-d1-2			100	9.81	981	479	268	1.77	
(A3)F14W0-d2-2			99.8	10.2	1018	459	285	1.81	
(A4)F14W31-d2-			101	10.3	1040	454	292	1.81	
(B1)W0-d1-1	SM400 A	1355	100	10.3	1030	454	280	1.73	実験シリーズ B [本論文の実験]
(B2)W20-d1-1			100	10.4	1040	450	283	1.73	
(B3)W30-d1-1A			100	10.3	1030	454	280	1.73	
(B4)W40-d1-4			100	10.4	1040	450	283	1.73	
(B5)W40-d1-6			100	10.4	1040	450	283	1.73	

Note: L =平行部の長さ, b = 平行部の幅, t = 平行部の厚さ, A =平行部の断面積, $\lambda=L/r$ (r =平行部の断面の弱軸に関する断面 2 次半径, P_y =降伏軸力, δ_y = 降伏軸方向変位.

表-2 ブレース材の材料定数

供試体	E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [GPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ν	摘要
(A1),(A3),(A4)	210	279	0.133	4.19	1.58	428	0.287	実験シリーズ A
(A2)	209	273	0.133	3.70	1.73	422	0.288	
(B1)~(B5)	212	272	0.128	3.26	1.51	429	0.307	実験シリーズ B

Note: E =ヤング率, σ_y =降伏応力, ε_y =降伏ひずみ, E_{st} =初期硬化係数, ε_{st} =硬化開始ひずみ, σ_u =引張強度, ν =ポアソン比.

表-3 拘束材の諸量

供試体	b_f [mm]	t_f [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]	σ_y^R [MPa]	E^R [GPa]	隙間量 [mm]		摘要
							面外 d	面内 d_0	
(A1)F10W0-d1-6	200	10.2	0	0	279	210	1	6	実験シリーズ A [文献 9 の実験]
(A2)F12W0-d1-2	200	12.3	0	0			1	2	
(A3)F14W0-d2-2	201	13.7	0	0			2	2	
(A4)F14W31-d2-2	201	13.7	33	9.1			2	2	
(B1)W0-d1-1	200	10.3	0	0	272	212	1	1	実験シリーズ B [本論文の実験]
(B2)W20-d1-1	200	10.4	19.7	10.4			1	1	
(B3)W30-d1-1A	200	10.3	29.9	10.4			1	1	
(B4)W40-d1-4	200	10.3	39.8	10.3			1	4	
(B5)W40-d1-6	200	10.3	39.6	10.3			1	6	

Note: b_f , t_f , h_w , t_w については図-3 参照. σ_y^R =降伏応力, E^R =ヤング率.

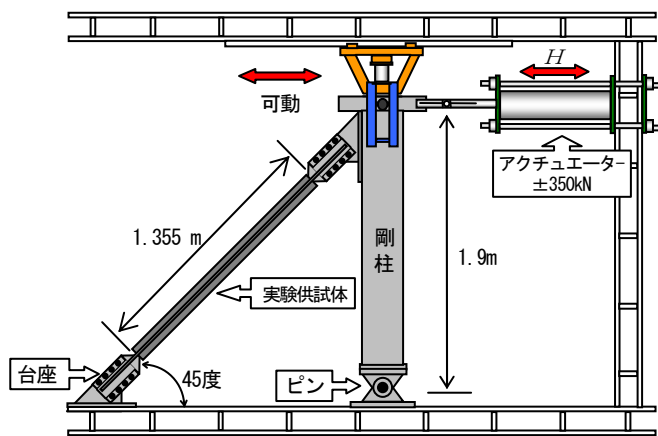


図-5 実験装置概略図

4.4 BRBの組み立て方法

図-4にBRBの構成図を示す。組み立て方法は、まずブレース材にアンボンド材を接着し、フィラープレートと共に拘束材でブレース材を両側から挟み込むように装着し、高力ボルトで接合した。フィラープレートはSM400を使用し、10.9等級M10ボルト（保証荷重＝48.1kN）を用いて供試体長さ方向に50mm間隔で片側29本のボルトで接合した。

4.5 実験装置

両実験シリーズで用いられた実験装置の概略図を図-5に示す。詳細については、文献8）、9）を参照された。実験供試体は、拘束材のフランジ面が水平方向になるように設置され、ピン支持の剛柱と台座の間に45度の角度で高力ボルトにより剛結されている。供試体端部は、ブレース材に極力偏心軸力が作用しないように製作されている。実験シリーズBでは、供試体を組み立てて実験装置に設置する前に、供試体のフランジ面に直角方向の初期たわみを計測し、たわみの方向が実験装置の下側になるように設置した。実験では、水平荷重を容量±350kNのアクチュエーターにより加え、供試体に軸方向の変位を与えた。アクチュエーターによる水平方向荷重により、実験供試体には軸方向荷重 $P = \sqrt{2} H$ （ H ：水平荷重）、軸方向変位 $\delta_h / \sqrt{2}$ （ δ_h ：水平変位）が与えられるようになっている。

4.6 荷重パターン

供試体（A1）～（A4）、（B1）、（B3）、（B4）の荷重パターンは $0.5\delta_y$ から開始し、次に $1\delta_y \sim 6\delta_y$ までは $1\delta_y$ ずつ、 $6\delta_y \sim 12\delta_y$ までは $2\delta_y$ ずつ、 $12\delta_y$ からは $3\delta_y$ ずつの変位増分で、実験シリーズAでは $21\delta_y$ （軸ひずみで約2.8%）、実験シリーズBでは $24\delta_y$ （ひずみで約3%）を

目標性能（最終変形量）として、各振幅1回ずつの両側繰り返し変動ひずみ振幅の漸増荷重を行った。なお実験装置の容量制限および拘束材とブレース材のリブ部分が接触してしまう関係上、供試体（B3）、（B4）は $24\delta_y$ までの荷重後は、 $18\delta_y$ で数回の両側繰り返し漸増荷重を行った。供試体（B2）、（B5）の荷重パターンは $0.5\delta_y$ から開始し、次に $1\delta_y \sim 6\delta_y$ までは $1\delta_y$ ずつ、 $6\delta_y$ からは $2\delta_y$ ずつの変位増分で、各振幅1回ずつの両側繰り返し漸増荷重を行った。この場合の目標性能は $24\delta_y$ （軸ひずみで約3%）である。

実験シリーズBでは、目標性能として式（3）を満たすように荷重プログラムを決めたが、実験シリーズAでは、変形性能として $20\delta_y$ を確保するものの、累積塑性変形の目標値を考慮することなく荷重プログラムを決定した。

表-4 初期たわみの計測結果

供試体	部材長/最大初期たわみ： $L/v_0)_{max}$		
	ブレース材のみ	BRB組み立て後	
		実験装置に設置前	実験装置に設置後
(B1)W0-d1-1	913	3,000	1,480
(B2)W20-d1-1	555	1,150	2,140
(B3)W30-d1-1A	555	1,980	1,930
(B4)W40-d1-4	639	2,418	3,209
(B5)W40-d1-6	425	1,930	1,060

5. 実験結果

5.1 初期たわみ

実験シリーズBでは、すべての供試体の初期たわみを、ブレース材のみの状態、および実験装置に設置前・後の3段階で計測した。計測した初期たわみの各供試体での最大値 $v_0)_{max}$ を表-4に示す。実験では設置前のBRBの初期たわみの大きい側の面を荷重装置の下方になるように設置したので、設置後のBRBはすべて荷重装置の面内に下方にたわんでいることになる。表-4より、BRB組み立て前のブレース材のみの状態での初期たわみは、溶接によるそり等の影響で $L/1000$ を越えているが、比較的剛な拘束材を用いて組み立てることにより、初期変形が小さくなっており、供試体組み立て後の初期たわみの値はすべて $L/1000$ 以内に収まっていることが分かる。

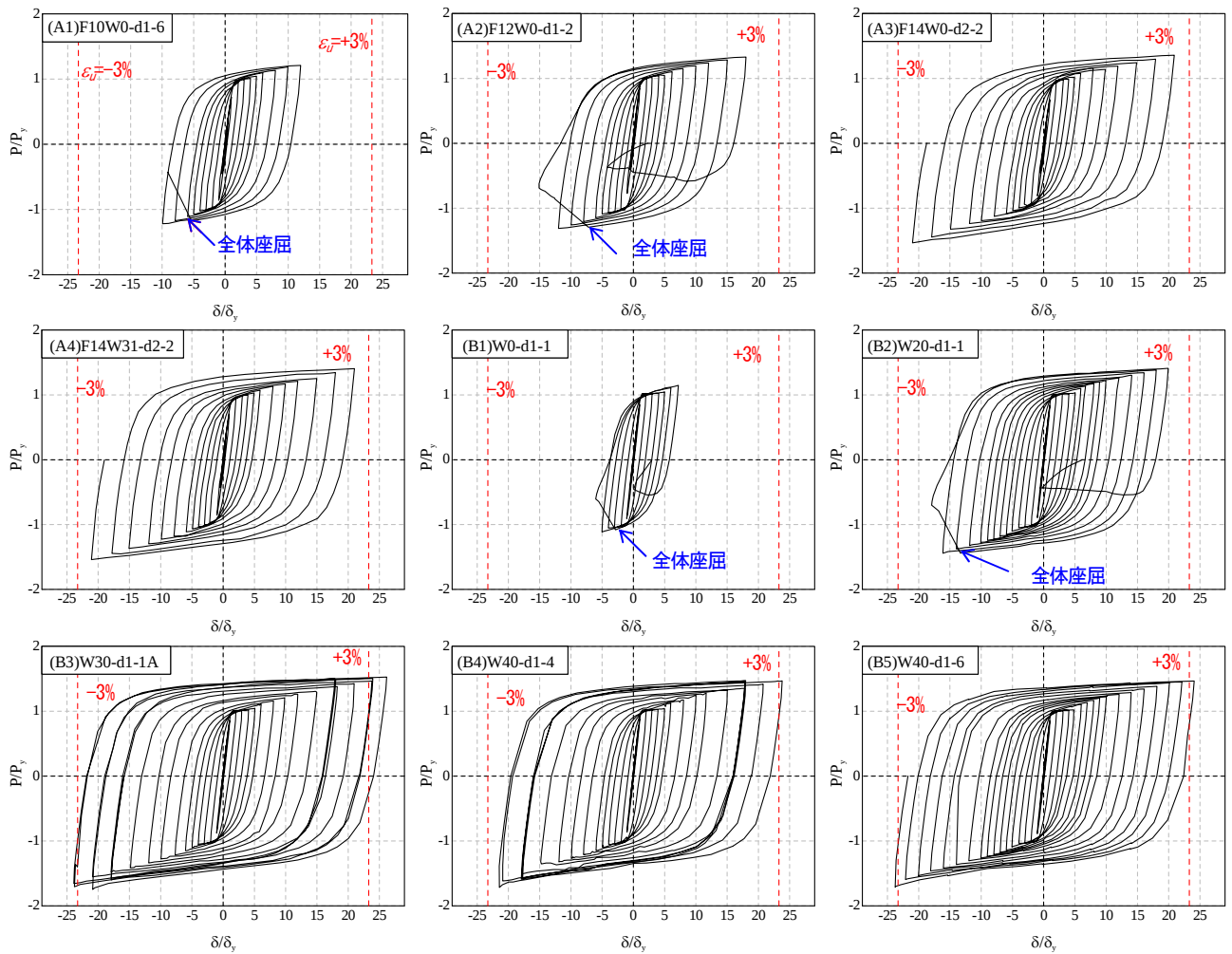


図-6 軸方向荷重-変位関係（実験）

5.2 軸方向荷重—変位関係

図-6 に、全供試体の軸方向荷重 P —軸方向変位 δ 関係を示す。引張側を正とし、縦軸、横軸はそれぞれ降伏軸力 P_y 、降伏軸方向変位 δ_y で無次元化してある。軸方向荷重 P はアクチュエーターの水平荷重 H から $P = \sqrt{2} H$ により求め、軸方向変位はダイヤルゲージで測定したブレース材平行部の相対軸方向変位である。

ここでは、実験シリーズ B の供試体の挙動を説明する。(B1) の履歴曲線を見ると、引張側の $\delta/\delta_y = +6$ まで荷重し終え圧縮側の $\delta/\delta_y = -6$ をめざし荷重している途中、 $\delta/\delta_y = -3$ 付近で荷重が急激に低下した。その後 $\delta/\delta_y = -6$ まで荷重し、引張側の $\delta/\delta_y = +7$ まで荷重した後、圧縮側に荷重している途中で荷重が上がらなくなり変位がゼロの位置で除荷した。これは $\delta/\delta_y = -3$ 付近で BRB が全体座屈を起こし、耐力が低下したためである。同様に (B2) の履歴曲線を見ると、引張側の $\delta/\delta_y = +18$ まで荷重し終え

圧縮側の $\delta/\delta_y = -18$ をめざし荷重している途中、 $\delta/\delta_y = -14$ 付近で荷重が急激に低下した。その後 $\delta/\delta_y = -18$ まで荷重し、引張側の $\delta/\delta_y = +18$ まで荷重した後、圧縮側に荷重している途中で荷重が上がらなくなり変位がゼロの位置で除荷した。これも $\delta/\delta_y = -14$ 付近で BRB が全体座屈を起こし、耐力が低下したからである。写真-1 は全体座屈を起こした直後の BRB (B1 供試体) であり、初期たわみの方向（下方）に全体座屈が生じている。一方、(B3) ～ (B5) 供試体は、全載荷ループで全体座屈は起こらず、安定した履歴曲線が得られている。

文献 9) には、BRB の変形挙動の数値解析手法が示されている。このモデルを使用して解析した全体座屈を起こした供試体 (B2) および起こさなかった供試体 (B5) の軸方向荷重—変位関係の実験値との比較を附録 1 に示す。

表-5 実験結果のまとめ

供試体	$\frac{P_E^R}{P_y} \Bigg _{nominal}$	$\frac{M_y^R}{P_y L} \Bigg _{nominal}$	V_F	全体座屈発生？	累積塑性軸ひずみ [%]	最大軸ひずみ [%]	適要
(A1)F10W0-d1-6	2.43	0.0239	2.06	YES	17	1.6	実験シリーズ A [文献9の実験]
(A2)F12W0-d1-2	3.51	0.0307	2.93	YES	31	1.97	
(A3)F14W0-d2-2	5.60	0.0420	4.21	NO	>44	>2.79	
(A4)F14W31-d2-2	9.82	0.0286	5.31	NO	>44	>2.81	
(B1)W0-d1-1	2.43	0.0239	2.06	YES	5	0.78	実験シリーズ B [本論文の実験]
(B2)W20-d1-1	3.76	0.0164	2.69	YES	22	2.31	
(B3)W30-d1-1A	5.34	0.0183	3.54	NO	>81	>3.08	
(B4)W40-d1-4	7.79	0.0219	4.81	NO	>74	>3.07	
(B5)W40-d1-6	7.79	0.0219	4.81	NO	>73	>3.06	

注) 公称安全係数 V_F は、材料定数の公称値および寸法の設計値を用い、 $a=L/1000$, $d=1\text{mm}$, $e=0.0$ として式 (11) より計算した値。



写真-1 BRB の全体座屈 (B2) W20-d1-1)



実験前のブレース材

(B3)W30-d1-1A ($d_0=1\text{mm}$)(B4)W40-d1-4 ($d_0=4\text{mm}$)(B5)W40-d1-6 ($d_0=6\text{mm}$)

写真-2 面内隙間量の影響

5.3 面内隙間量 d_0 の影響

実験シリーズ B では、拘束材フランジ面内の隙間量 d_0 を変えた供試体 (B3, B4, B5) を実験したので、その影響を考察してみる。写真-2 は、実験終了後に拘束材を外し、アンボンド材を削り取ったブレース材の変形状況を示したものである。供試体 (B3) の面内方向隙間量 d_0 は 1mm, (B4) は 4mm, (B5) は 6mm である。面内隙間量 d_0 が大きくなるにつれ、ブレース材が面内に大きく蛇行変形することが分かる。これはブレース材の面外方向変形が隙間量 $d=1\text{mm}$ で拘束されているため、ブレース材の変形が進むにつれて面内方向へと変形が逃げる状態になったと考えられる。面内隙間量の異なる各供試体の

変位－荷重関係を示す図-6 および後述の表-5 から、蛇行変形による変位－荷重関係や累積塑性変形への影響はほとんど無いことが分かる。しかし、極端な蛇行変形が起きることにより、引張側において亀裂が発生する、あるいは過度の座屈変形による耐力低下が懸念される⁸⁾ため、蛇行変形は極力抑える必要がある。そのため面内隙間量 d_0 は、顕著な蛇行変形が見られない供試体の 1～2mm 程度にするのが良いと思われる。

5.4 変形性能と累積塑性ひずみ

表-5 は式 (11) より算定された安全係数、実験より得られた最大軸ひずみ、累積塑性軸ひずみを全供試体につ

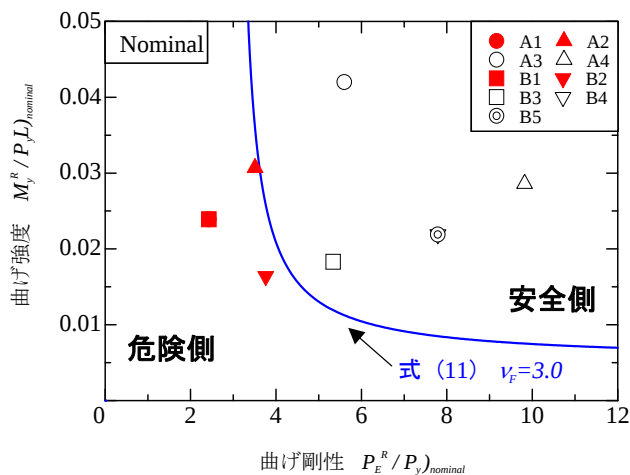


図-6 実験供試体の曲げ強度—曲げ剛性と全体座屈防止条件式

いて示したものである。安全係数については、BRBの諸元、材料定数は公称値を用い、偏心量 e 、最大初期たわみ a については $e=0.0$ 、 $a=L/1000$ で全供試体統一してある。最大軸ひずみは载荷軸ひずみ $(=\delta/L)$ の最大値、累積塑性軸ひずみは各ループでの塑性軸ひずみの絶対値の総和より求めた⁴⁾。但し、供試体(B4)については、圧縮側の载荷の際、拘束材とブレース材のリブ部分が接触してしまい、21 δ までしか载荷出来なかったため、引張り側の最大ひずみを採用した。他の供試体はリブを削ることにより24 δ までの载荷を可能にした。

表-5より、安全係数 v_f が3.0以上である供試体(表中の着色部)は全体座屈を発生せず、3.0以下の供試体は全体座屈を生じたことが分かる。また、全体座屈が生じなかった供試体の内、実験シリーズBの(B3)、(B4)、(B5)は、いずれも式(3)の目標性能を満たしていることがわかる。但し、実験シリーズAで全体座屈が生じなかった供試体(A3)、(A4)は、最大軸ひずみ、累積塑性軸ひずみ共、目標値に達する前に実験を終了したので、目標性能を保有するかどうかは不明である。

図-7は、縦軸に拘束材の曲げ強度の公称値 $M_y^R / P_y L$ nominal、横軸に曲げ剛性の公称値 P_E^R / P_y nominalをとり、各供試体の値をプロットしたものである。また、曲線は、設計値として $v_f=3.0$ 、 $e=0.0$ 、 $a=L/1000$ 、 $d=1.0\text{mm}$ とにおいて式(11)を描いたものである。曲線の上方が全体座屈に対して安全側、下方が危険側の領域となる。塗りつぶした点は、全体座屈を生じた供試体、塗りつぶさない点は全体座屈を生じなかった供試体の強度と剛性をプロットしたものである。但し、供試体(A3)、(A4)は目標性能に達するまで実験が行われていないため参考値である。この図より、全体座屈が生じない、すなわ

ち安全係数 $v_f \geq 3.0$ のBRBは所要の目標性能を保有し、安全係数 $v_f < 3.0$ のBRBは目標性能を保有しないことが明確に分かる。

以上の議論は、設計時の便を考え、安全係数は公称値および設計値を用いて算定した。参考までに、実験時に知り得た情報を元に算定した安全係数(実安全係数)の値を付録2に示す。

6. 結言

本論文では、高機能制震ダンパーの開発研究の一環として座屈拘束ブレース(BRB)を取り上げ、過去に著者らによって行われた実験および解析⁹⁾に加え、本研究で新たに行なった性能実験および数値解析を基に高機能座屈拘束ブレース(高機能BRB)に要求される性能の検討を行った。以下に本研究のまとめと結論を述べる。

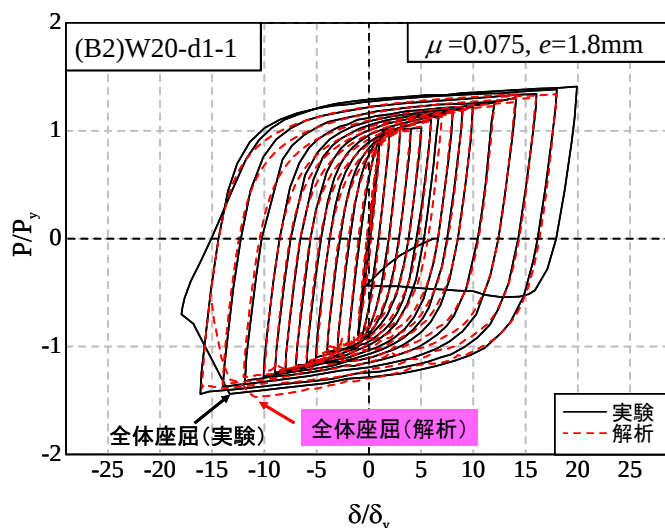
- 1) 高機能BRBの要求性能を2.でまとめ、式(3)を目標性能とする高機能BRBの開発研究の結果について述べた。
- 2) 高機能BRBが目標性能を発揮するためには、全体座屈防止が主要な要件であることを示し、そのための条件として、公称安全係数 $v_f \geq 3.0$ であることを提案した(式(10)、(11))。
- 3) $v_f \geq 3.0$ を満たす供試体、および満たさない供試体をそれぞれ2体ずつ製作して繰り返し载荷の性能実験および数値解析を行った。その結果、 $v_f < 3.0$ の供試体は全体座屈が起きることにより耐力が低下し、目標性能を確保することが出来なかった。一方、 $v_f \geq 3.0$ の供試体は全体座屈を起こすことなく目標性能を満足することがわかった。
- 4) 以上より、高機能BRBの目標性能を確保するためには全体座屈の防止が重要であり、そのために、材料定数は公称値、寸法は設計値、初期たわみは $a=L/1000$ を用いて算定した公称安全係数 $v_f \geq 3.0$ の確保は主要な指標になりうることが分かった。

謝辞

本研究は、文部科学省の科学研究費(基盤研究(B)、研究代表者 宇佐美 勉)、並びに平成19年度文部科学省私学助成ハイテクリサーチセンター整備事業で名城大学に設置された「高度制震実験・解析研究センター(プロジェクトリーダー 宇佐美 勉)」の助成を受けて実施された。高機能制震ダンパーの開発研究は、同センターの主要な研究課題として現在も続行中である。

付録1 BRBの変形挙動の実験と解析の比較

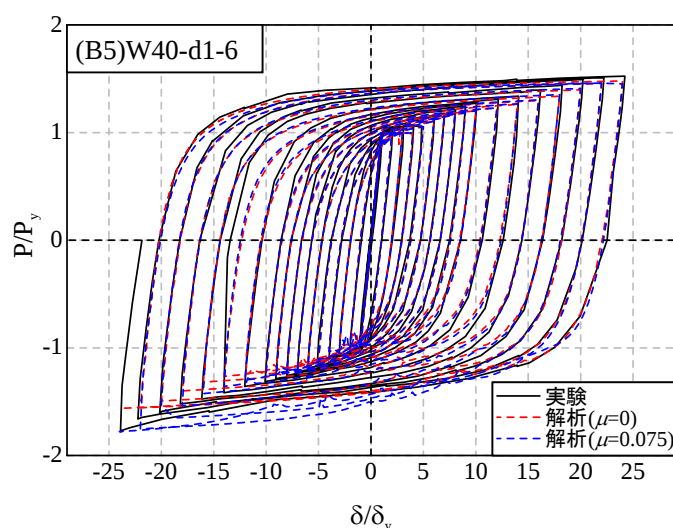
著者らが開発した文献9)の手法を用いて解析した全体座屈を起こした供試体(B2)および起こさなかった供試体(B5)の軸方向荷重—変位関係の実験値との比較を、それぞれ図-A1 (a), (b)に示す。いずれの場合も、ブレース材と拘束材が接触した後の摩擦の影響を取り入れるため、静摩擦係数 $\mu=0.075$ も考慮し、全体座屈が生ずる場合(図-A1 (a))には軸方向荷重の微小な偏心量として $e=1.8\text{ mm}$ を与えた。実験と解析には細部においては多少の差が見られるものの、両者は概ねよく一致していることが分かる。



(a) 全体座屈が生ずる場合 (B2 供試体)

付録2 実安全係数

材料定数、寸法、初期たわみの実測値を用いて算定した実安全係数 $\nu_F)_{actual}$ の値を表-A1に示す。初期たわみについては実験シリーズAについては文献9)に記載の値、実験シリーズBについては表-4の値を用いた。また、実測が困難であった隙間量については表-3の設計値、偏心量は $e=0.0$ を用いた。表-5と表-A1の比較から分かるように、実験シリーズBについては公称安全係数と実安全係数は大きく異なるところはない。しかし、実験シリーズAについてはかなり異なるものもある。これは、初期たわみの実測値(供試体(A1)～(A3))は $L/333$ 、供試体(A4)は $L/500$ が設計値 $L/1000$ とかなり相違していたことに起因する。式(10)の判定条件には、初期たわみ、偏心量などの設計値からの変動も考慮するため、安全係数を3.0と大きく設定してあるが、初期たわみは $L/1000$ 程度以下に制限するのが望ましい。



(b) 全体座屈が生じない場合 (B5 供試体)

図-A1 軸方向荷重—変位関係の実験と解析の比較

表-A1 実安全係数 $\nu_F)_{actual}$ の値

供試体	$\frac{P_E^R}{P_y} \Bigg)_{actual}$	$\frac{M_y^R}{P_y L} \Bigg)_{actual}$	$\nu_F)_{actual}$
(A1)F10W0-d1-6	2.17	0.0243	1.62
(A2)F12W0-d1-2	3.28	0.0328	2.38
(A3)F14W0-d2-2	4.59	0.0403	3.04
(A4)F14W31-d2-2	7.97	0.0265	3.90
(B1)W0-d1-1	2.36	0.0250	2.08
(B2)W20-d1-1	3.58	0.0173	2.86
(B3)W30-d1-1A	5.02	0.0190	3.77
(B4)W40-d1-4	7.16	0.0223	4.65
(B5)W40-d1-6	7.10	0.0222	4.62

参考文献

- 1) 中央防災会議：首都直下地震対策大綱，
<http://www.bousai.go.jp/chubou/15/siryo1.pdf>，
2005.9.
- 2) 宇佐美勉：鋼橋の制震構造化，一日以内に緊急車両の通行機能を確保する鋼橋の耐震化を目指して，構造工学フロンティア論文集，名古屋大学，pp.147-178，2006.9.
- 3) 宇佐美勉：(特別講演) 高機能制震ダンパーの研究開発，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，

- 土木学会, pp. 11-22,, 2007.2.
- 4) 宇佐美勉編著, 日本鋼構造協会編: 鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 技報堂出版, 2006.9.
 - 5) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編], 丸善, 2008.1.
 - 6) 渡辺直起, 加藤基規, 宇佐美勉, 葛西 昭: 座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 地震工学論文集, 土木学会, 2003.12.
 - 7) 河村洋行, 宇佐美勉, 葛西 昭, 藤田将之: 軽量化した座屈拘束ブレースの性能実験, 第 7 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, 土木学会, pp.169-176, 2004.1.
 - 8) 宇佐美勉, 加藤基規, 葛西 昭, 河村洋行: 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, 土木学会, Vol.50A, pp.527-538,, 2004.3.
 - 9) 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, 土木学会, Vol.52A, pp.37-48, 2006.3.
 - 10) 千田耕大, 藤田将之, 葛西 昭, 宇佐美勉, 渡辺直起: 鋼種の異なる座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, pp.339-347, 2006.3.
 - 11) 葛 漢彬, 日沖堅治, 宇佐美勉: 鋼アーチ橋に設置した座屈拘束ブレースの応答値, 地震工学論文集, 土木学会, 2005.8.
 - 12) 佐藤 崇, 宇佐美勉, 葛西 昭: 高機能座屈拘束ブレースの性能実験, 第 11 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, 土木学会, pp.51-58, 2008.1.
 - 13) 金治英貞, 浜田信彦, 石橋照久, 尼子元久, 渡邊英一: 長大橋レトロフィット用座屈拘束ブレースの構造提案と弾塑性挙動, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, , pp.859-870, 2005.3.
 - 14) 金治英貞, 鈴木直人, 香川敬生, 渡邊英一: (技術展望) 長大トラス橋の耐震性能向上化における設計入力地震動と損傷制御構造, 土木学会論文集, No.787/I-71, pp.1-19, 2005.4.
 - 15) 森下邦宏, 井上幸一, 川島一彦, 阿比留久徳, 平井潤, 本田 誠: ダンパーブレースを組み込んだ上路アーチ橋部分構造の動的地震応答実験, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.277-290, 2004.
 - 16) 前野裕文, 片桐英喜, 葛西 昭, 長山秀昭, 今井 誠: 座屈拘束ブレースを用いた橋梁上部構造の耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.871-878, 2005.3.
 - 17) 宇佐美勉: 文献 9) に対する討議の回答, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, 2007.3.

(2008 年 9 月 18 日受付)