

アルミニウム座屈拘束ブレースの性能実験

佐藤崇¹・宇佐美勉²

¹学生会員 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（〒468-8502名古屋市天白区塩釜口）

²フェロー会員 D.Sc 工博 名城大学教授 理工学部建設システム工学科（同上）

1. はじめに

近年、制震構造の一つである制震ダンパーの研究は、土木の分野でも多くの研究が行われてきた。名城大学のハイテクリサーチセンターでは現在、制震ダンパーの高機能化、即ち橋梁のライフサイクルに渡って取り替え不要な制震ダンパー（高機能制震ダンパーと称する）の開発を目指した研究^{3),6)}が進行中である。本研究で取り上げる制震ダンパーの一つである座屈拘束ブレース（BRB）は、適用が容易で安価であり、適用実績も近年多くみられる。従来BRBは鋼材で製作されてきたが、本研究では素材にアルミニウム合金を適用しBRBの製作を行った。

アルミニウム合金は鉄鋼材に比べ約1/3の比重であり、強度差を考慮しても1/2の重量である。さらに空気に触れることにより、表面に薄い酸化皮膜を作り、アルミニウム合金表面を保護し腐食を防ぐ^{1),2)}。そのため鉄鋼材に比べ腐食に対する考慮が必要なくなり、メンテナンス費用が削減できる。またアルミニウム合金は形成が容易に出来るため継ぎ手による溶接が不要であり、溶接部の疲労に対する考慮も必要なくなる。以上を考慮すると、アルミニウム合金を鋼材に代わる素材として使用することにより、BRBの高機能化が可能であると考えられる。本研究では従来行ってきた鋼材同様の形状のBRBでアルミニウム座屈拘束ブレースが保有する性能を実験的に確認、検討を行った。

2. 研究概要

(1) 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。要求される性能は次のようである。1) 安定した履歴特性を持ち、高いエネルギー吸収能を持つ、2) 変形能力が大きい、3) 低サイクル疲労強度が大きい、4) 高い耐久性を持つ、5) 製作が容易で安価である、6) 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。現在、開発を進めている高機能制震ダンパーは、1)～5)の要求をすべて満たし、6)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である。座屈拘束ブレース（BRB）においては、大地震3回程度の応答値の上限である、次の限界値を設定して高機能座屈拘束ブレースの目標性能としている^{3),4)}。

a) 限界軸ひずみ $\varepsilon_u=0.03$

b) 限界累積塑性ひずみ $CID)_{lim}=0.7$ (1)

本研究では次節の全体座屈防止条件式を満たすBRBが式(1)の目標値を達成できるかを実験的に検証する。

(2) 全体座屈防止条件式

式(1)の目標性能を満足するには、全体座屈の防止が重要となってくる⁵⁾。全体座屈を防止する照査式として、次式の全体座屈防止条件式が推奨されている。

$$\frac{P_{max}}{P_y} \leq \frac{1}{\frac{P_y}{P_E^R} + \left(\frac{P_y L}{M_y^R} \right) \cdot \frac{a+d+e}{L}} \equiv \nu_F \quad (2)$$

ここで、 ν_F =安全係数、 P_{max} =ブレース材の最大

表-1 材料定数

合金種	E [GPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	$\varepsilon_{0.2}$ [%]	σ_u [MPa]	ε_u [%]	ν
A5083P-O	73.3	122	0.366	307	20.9	0.32

表-2 ブレース材の諸元

供試体名	合金種	L [GPa]	B [mm]	t [mm]	A [mm ²]	λ	P_0 [kN]	δ_0 [mm]
AL25-1	A5083P-O	1362	100	10.8	1080	437	105	1.81
AL25-2		1360	100	10.0	1000	471	97.6	1.81
AL25-3		1363	101	10.0	1010	472	98.6	1.81
AL25-F		1372	100	10.0	1000	475	97.6	1.83
AL20-1		1357	100	10.0	1000	470	97.6	1.81
AL20-2		1367	100	10.1	1010	469	98.6	1.82

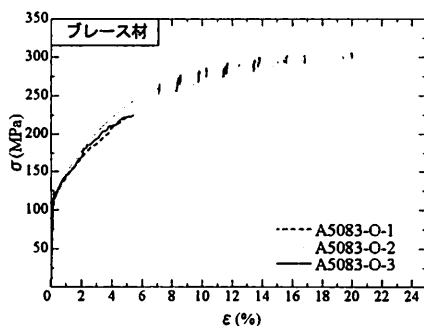


図-1 ブレース材の引張試験結果

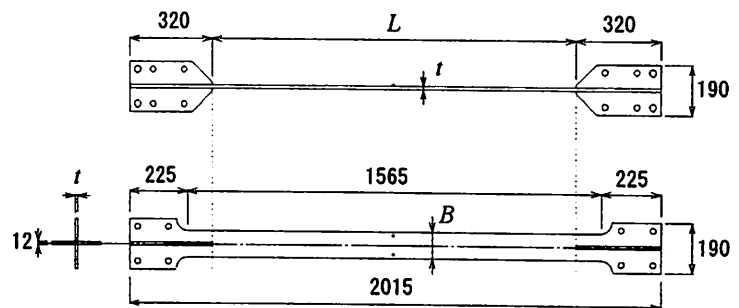


図-1 ブレース材全体図

軸圧縮力, P_y = ブレース材の降伏軸力, P_s^* = 拘束材のオイラー座屈荷重, M_y^R = 拘束材の降伏モーメント, L = ブレース材長, $\alpha = BRB$ の最大初期たわみ, d = ブレース材と拘束材間の面外隙間量 (図-3 でブレース材の上下面), e = ブレース材に作用する軸力の偏心量である. 従来の研究から, 式 (2) の右辺が 3.0 以上であれば全体座屈を生じないと提案されており, 本研究においても $\nu_F > 3.0$ である供試体と, $\nu_F < 3.0$ である供試体の 2 種類の供試体を製作し, 式の妥当性を検討する. 詳しい BRB の全体座屈のメカニズムについては文献 6) を参照していただきたい.

3. 性能実験

(1) 実験供試体

本実験で使用するアルミニウム合金は板材を使用し, 合金種はブレース材に A5083P-O, 拘束材に A6061S-T651 を使用した. A5083P-O は Mg 含有量の多い合金で非熱処理合金としては最も優れた強度をもち, 溶接性も良好である合金である. 一方,

A6061S-T651 は液体処理後残留応力を除去し, さらに人工時効硬化処理したもので, 強度, 耐食性ともに良好で耐力も SS400 鋼に相当し, 代表的な構造用材として使用されている.

(2) ブレース材

ブレース材の製作に用いた A5083P-O と同じ合金材から JIS1 号試験片を 3 本製作し, 引張試験を行い得られた応力-ひずみ関係の結果を図-1 に, 結果から得られた材料定数の平均値を表-1 に示す. E : ヤング係数, $\sigma_{0.2}$: 0.2% の残留ひずみが生じる応力, $\varepsilon_{0.2}$: $\sigma_{0.2}$ におけるひずみ, σ_u : 引張強さ, ε_u : 伸び, ν : ポアソン比である. ブレース材の諸元を表-2 に, ブレース材の全体図を図-4 に示す. ここで L : 部材長, B : 断面幅, t : 断面厚, A : 断面積, λ : 細長比を意味している. また P_0 は比例限応力 σ_0 ($=0.8 \times \sigma_{0.2}$) に断面積 A を掛けた値であり, δ_0 は比例限ひずみ ε_0 ($=\sigma_0/E$) に部材長 L を掛けた値である. ブレース材には平行材を用い, 端部は実験装置に設置するために, 12mm 厚のリブが両端部に溶接してあり十字断面となっている. 溶接は MIG 溶

表-3 拘束材の諸量

供試体名	合金種	E^R [GPa]	$\sigma_{0.2}^R$ [MPa]	b_f [mm]	b [mm]	t_f [mm]	隙間量 [mm]	
							d	d_0
AL25-1	A6061S-T6	71.4	279	200	48.1	25.1	1	2
AL25-2				200	48.0	24.9		
AL25-3				200	48.4	25.1		
AL25-F				200	48.2	25.0		
AL20-1	A6061S-T6	71.6	287	200	48.3	20.0		
AL20-2				200	48.2	20.0		

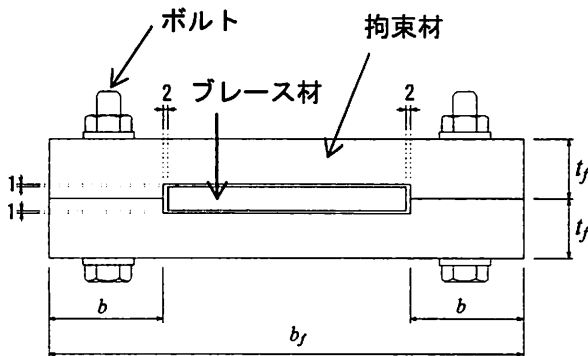


図-3 座屈拘束材断面

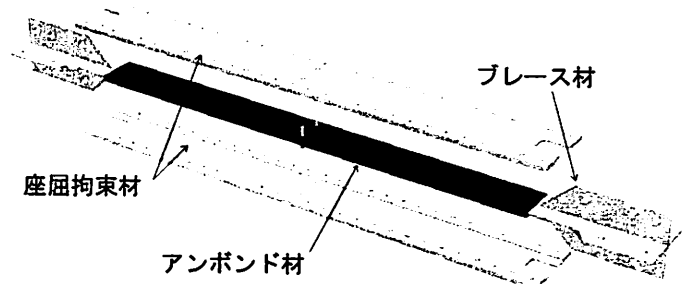


図-5 BRB構成イメージ

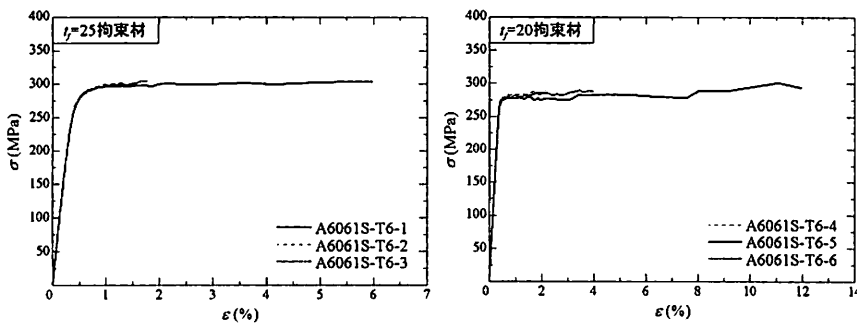


図-4 拘束材の引張試験結果

接で行い、極力平形部材とリブが直角になるよう製作した。部材長 L は十字断面部分を含まない平形断面部分の長さである。

(3) 拘束材

拘束材の諸量を表-3に、断面構成を図-3に示す。またブレース材と同様に引張試験から得られた拘束材板厚 $t_f=25\text{mm}$ と拘束材板厚 $t_f=20\text{mm}$ の拘束材の応力-ひずみ関係を図-4に、結果から得られた材料定数を表-3内に示す。ここで E^R : 拘束材のヤング係数、 $\sigma_{0.2}^R$: 拘束材の0.2%の残留ひずみが生じる応力、 b_f : 拘束材幅、 b : 図-3に示す幅、 t_f : 拘束材板厚、 d : 面内隙間量、 d_0 : 面外隙間量を示す。なお供試体名のALの後の数字は、拘束材板厚を示してある。

またAL25シリーズは安全係数 $\gamma_f > 3.0$ であり全体座屈が生じないであろう供試体であり、AL20シリーズは安全係数 $\gamma_f < 3.0$ であり全体座屈が生じるであろう供試体である。

(4) アンボンド材

アンボンド材には、従来鋼材で使ってきた同様の厚さ1mmのブチルゴムを使用した。アンボンド材には圧縮側でのブレース材と拘束材の摩擦による軸力の上昇を防ぎ、正しい隙間量を確保する役割がある。

(5) 拘束方法

図-5はBRBの構成イメージを示す。組み立て方法は、まずブレース材の平形部に拘束材とブレース材の隙間量分（面外1mm、面内2mm）のアンボンド材を接着し、ブレース材を1対の拘束材で挟み込むように装着し強力六角ボルトで接合した。ボルトは10.9等級M10（保証荷重=48.1kN）を用いて供試体の長さ方向に50mm間隔で片側29本の強力六角ボルトで接合した。

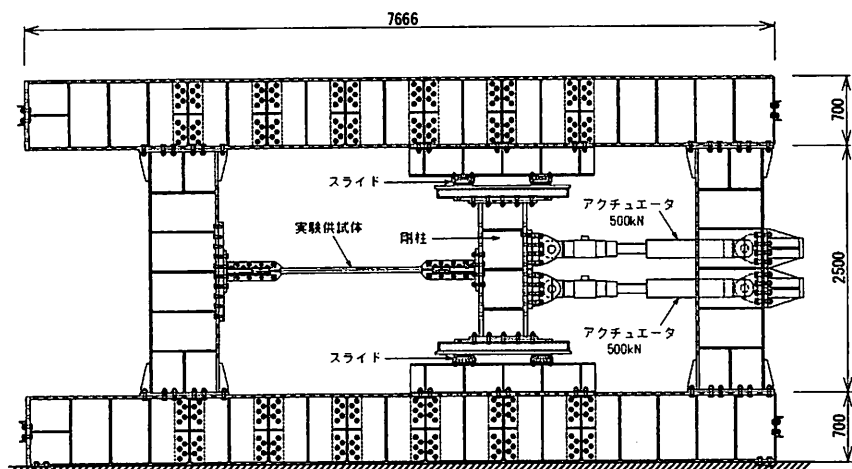


図-6 実験装置図

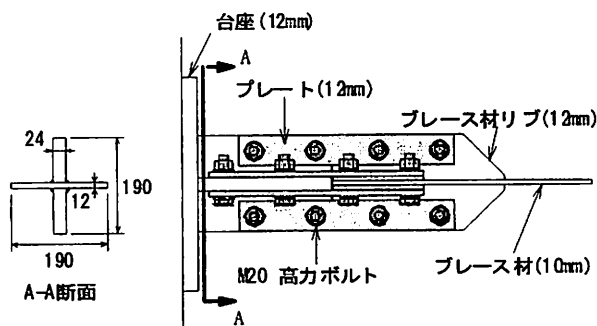


図-7 台座とブレース材接合部

(6) 実験装置

図-6に本実験の実験装置を示す。荷重フレームは梁柱をボルト接合によって剛結した自定式構造のため、実験目的に合わせた組換えにより多様な荷重形式に対応できる。供試体に対して圧縮1000kN、引張500kNの荷重が可能なサーボアクチュエータは、デジタル変位計と32bit CPUを搭載したコントローラによる1/100mmの高精度な変位制御が可能である。図-7に供試体両端部と台座との接合方法を示す。台座、プレート、ボルトは共に鋼材を使用し、台座及び供試体端部が降伏しないよう十分剛で設計してある。垂直に設置された剛柱は、剛柱の上下にスライドが固定されており、水平に可動することによりこの剛柱に剛結されている供試体には、2本のアクチュエータの合計荷重 P が与えられるようになっている。実験供試体の軸方向変位 δ で2本のアクチュエータの合計荷重 P を制御して行った。

(5) 荷重パターン

AL25-2, AL25-3, AL20-1, の荷重パターンは $0.5\delta_0$ から開始し、次に $1\delta_0 \sim 10\delta_0$ までは $1\delta_0$ ずつの変位増分で各振幅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い、 $10\delta_0$ 以降は、終局状態まで $10\delta_0$ で定振幅両側繰り返し荷重を行った。また

表-4 最大初期たわみ

供試体名	最大初期たわみ a [mm]
AL25-1(NO.1)	L/5952
AL25-2(NO.2)	L/2587
AL25-3(NO.4)	L/2646
AL25-F(NO.6)	L/1401
AL20-1(NO.3)	L/1351
AL20-2(NO.5)	L/2702

AL25-3は δ_0 を $\delta_{0.2}$ で計算し、

AL25-2, AL25-3, AL20-1と同様の荷重パターンである。AL20-2は $0.5\delta_0$ から開始し、次に $1\delta_0$ から $2\delta_0$ ずつの変位増分で各振幅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なった。AL25-Fは片側1%ひずみで定振幅両側繰り返し荷重を行った。

4. 性能実験結果

(1) BRBの初期たわみ

供試体を実験装置に設置した後の、BRBの最大初期たわみ a の計測結果を表-4に示す。 L : 部材長[mm]を示す。供試体でばらつきがあるものの $L/1000$ 以内に収まっており、ごく小さい値であることがわかる。

(2) 変形挙動

性能実験から得られた各BRB供試体の荷重-変位関係を図-8に示す。図-8において引張側を正とし、横軸に変位 δ を比例限ひずみ δ_0 で無次元化した値、縦軸に荷重 P を比例限荷重 P_0 で無次元化した値をとった図である。

まずAL20-1の荷重-変位関係を見ると、 $\pm 10\delta/\delta_0$ の4ループ目の圧縮側に向かう途中、 $-2\delta/\delta_0$ 付近でBRBの荷重が急激に低下し実験を終了した。AL20-2も引張側の $+15\delta/\delta_0$ を終了し、圧縮側の $-15\delta/\delta_0$ に向かう途中、 $-6\delta/\delta_0$ 付近で荷重が急激に低下し実験を終了した。これはBRBが全体座屈を起こしたことに伴いBRBの耐力が低下したためである。AL25-1は $\pm 17\delta/\delta_0$ ($\pm 6\delta/\delta_y$) の引張側に向かう途中、 $+5\delta/\delta_0$ ($+2\delta/\delta_y$) 付近で破断し実験を終了した。AL25-2は $\pm 10\delta/\delta_0$ の6ループ目の引張側に向かう途中、 $+5\delta/\delta_0$ 付近で破断し実験を終了した。AL25-3も $\pm 10\delta/\delta_0$ の5ループ目の引張側に向かう途中、 $+6\delta/\delta_0$ 付近で破断し実験を終了した。AL25-Fは15ループ目の引張側に

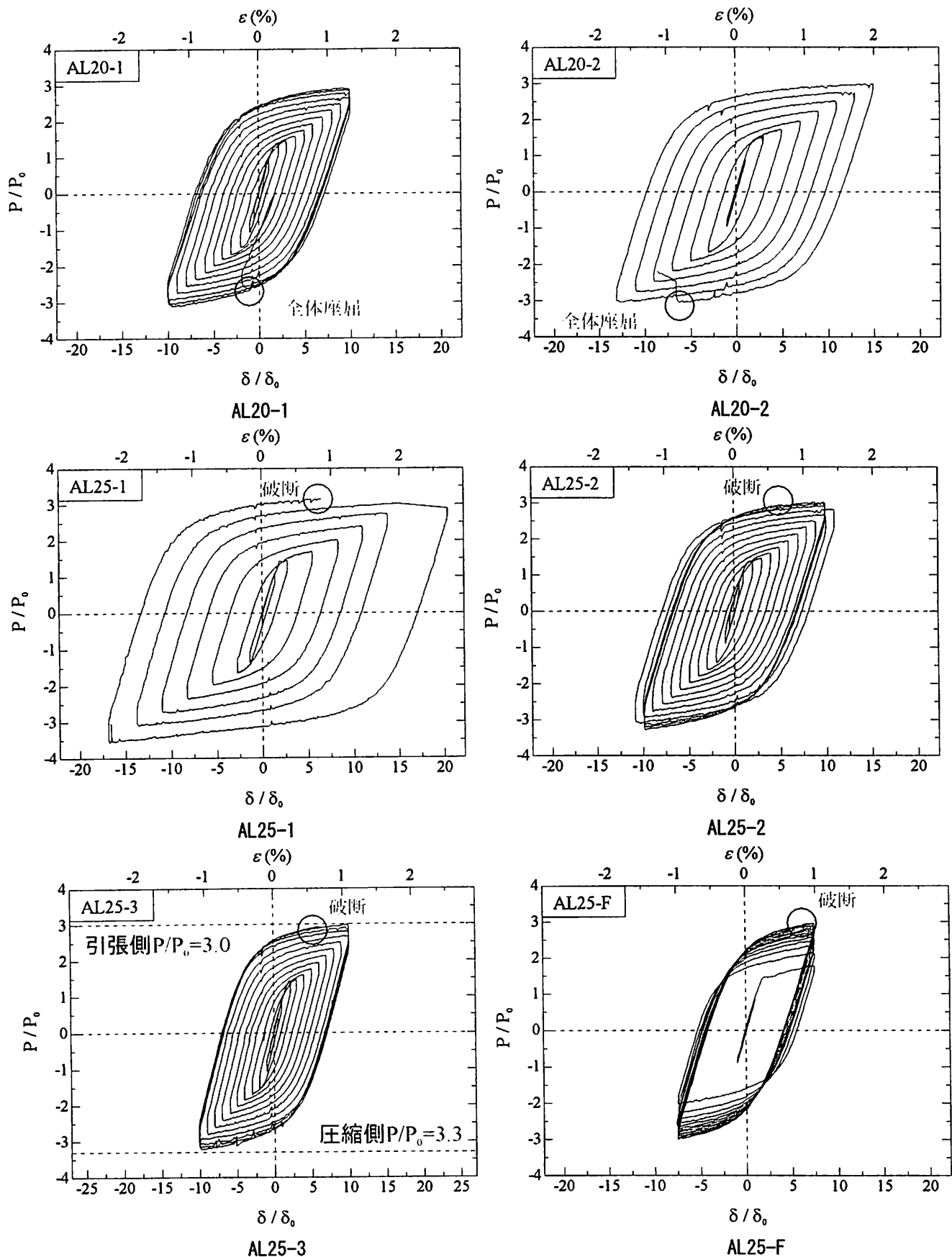


図-8 荷重-変位関係

向かう途中、0.9%付近で破断し実験を終了した。またAL25シリーズのすべての供試体は引張側の $P/P_0=3$ 付近で破断した。全ての供試体において破断、もし

くは全体座屈に到るまでは安定した紡錘形の履歴曲線が得られている。

(3) 終局状態

写真-1はAL20シリーズの終局状態である。BRBが全体座屈を起こすことにより、下側に大きくたわんでしまっている。写真-2は全体座屈を生じなかったAL25シリーズの破断状況である。破断したすべての供試体において、端部のリブが溶接してある部分から破断した。これは繰り返しひずみ硬化の影響が顕著に現れたため、引張試験結果より $P_u / P_0 = 3.15$ であることから、引張強度近くに達し溶接部が応力集中箇所になり破断したと考えられる。

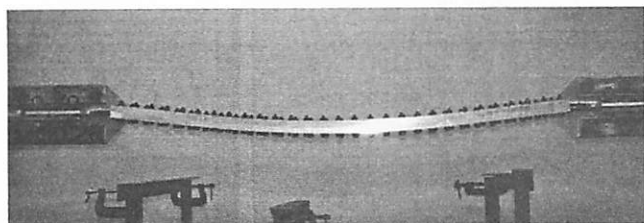


写真-1 AL20-2の全体座屈

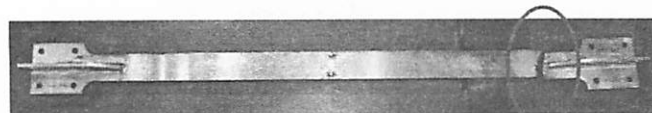


写真-2 AL25-3の破断状態

(4) BRBの面外変形

本研究ではBRBの面外たわみ v を計測した。面外たわみの計測点BRBは中央点から両端部側に200mm, 400mmの計5点の位置で計測した。ここでは全体座屈発生時を図-8の荷重-変位関係で荷重が低下し始めた時点と定めている。また全体座屈発生直後は、荷重が急激に低下し終わり、軸方向変位を得るために荷重を加えるまでの時点である。図-9は拘束材厚が $t_f=25\text{mm}$ と $t_f=20\text{mm}$ のBRBの面外たわみの変形状況である。 $t_f=25\text{mm}$ の供試体の面外たわみは変位幅が大きくなるにも関わらず、5mm以内の小さな面外たわみであるのに対して $t_f=20\text{mm}$ の供試体は変位幅が大きくなるにつれ面外たわみは増大し、 $-15\delta_0$ に向

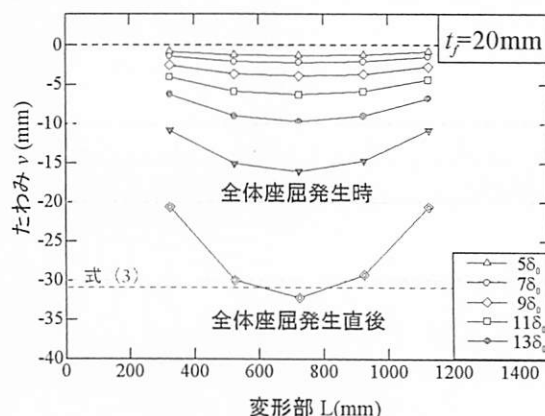
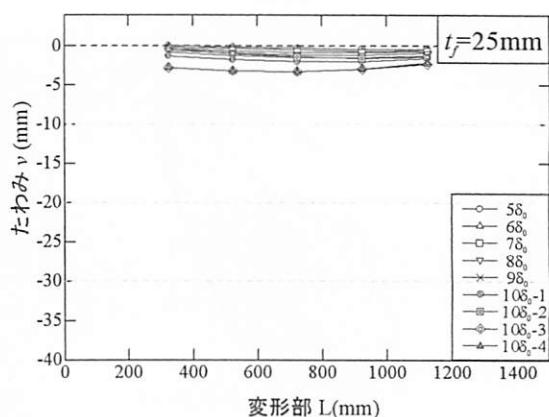


図-9 面外たわみの進行状況

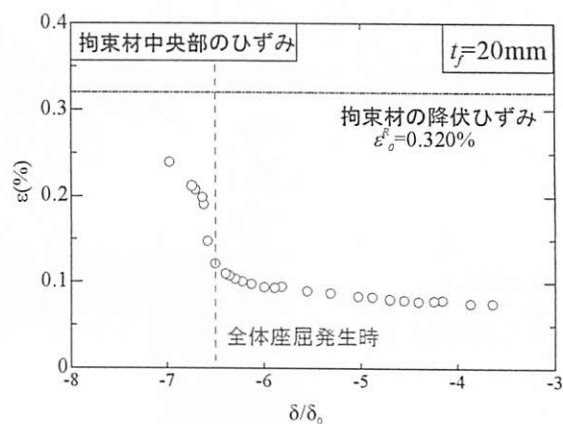


図-10 拘束材中央部のひずみ

かう途中全体座屈が発生すると共に急激に面外たわみは増大した。 $t_f=25\text{mm}$ の供試体に対して、 $t_f=20\text{mm}$ の供試体は拘束材の剛性及び強度が低いため、載荷の初期の段階から面外変形が進行している。一方、拘束材中央部でのひずみを計測した結果を図-10に示す。全体座屈を生じた直後急激にひずみが増加し、拘束材の降伏ひずみに近くなっている。

全体座屈防止条件式では、拘束材の降伏曲げモーメント M_y^R が外力モーメントを上回る事によって、全体座屈が発生するとされている。全体座屈が生じ

表-5 安全係数と実験結果のまとめ

供試体名	安全係数 ν_F	最大軸ひずみ $\varepsilon_{max} [\%]$	累積塑性ひずみ $CID [\%]$	全体座屈
AL25-1	4.91	2.25	25	なし
AL25-2	4.91	1.45	34	なし
AL25-3	4.91	1.34	30	なし
AL25-F	4.91	1.00	33	なし
AL20-1	2.54	1.34	28	あり
AL20-2	2.54	1.75	22	あり

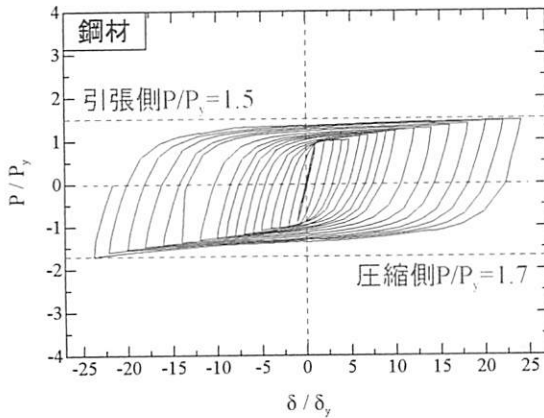


図-11 鋼材でのBRBの荷重－変位関係

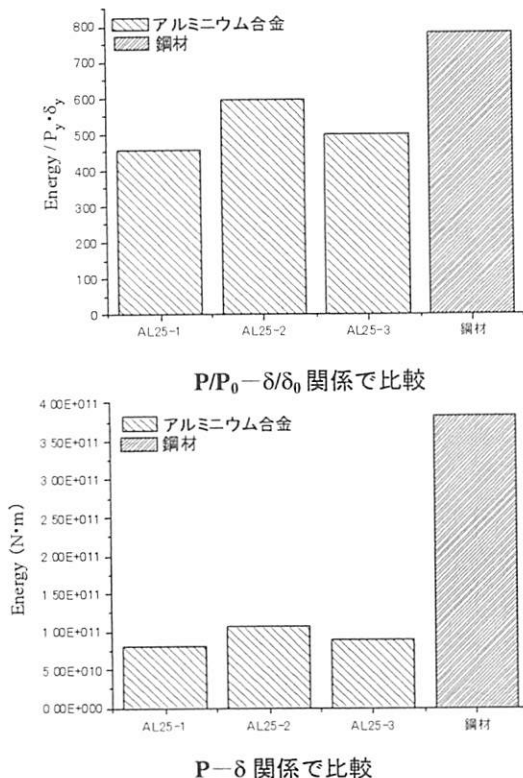


図-12 累積エネルギー吸収量

る時点でのブレース材から拘束材に作用する単位長あたりの接触力 q (N/m) は等分布荷重と仮定し、

接触力 q およびそれによって発生する曲げモーメントは拘束材のみで受け持たれるものと仮定すると、全体座屈発生時の拘束材の横たわみ v は次式となる。

$$v = \frac{5qL^4}{384E^R I^R} = \frac{5M_y^R L^2}{48E^R I^R} \quad (3)$$

この式にブレース材、拘束材の諸量を代入すると、全体座屈発生時の面外たわみ v は31mmとなる。これは実験でのBRBの面外たわみと非常に近い値となる。

(5) 変形性能と累積塑性ひずみ

表-5は式(2)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 ε_{max} 、及び累積塑性ひずみ CID をまとめた表である。

まず安全率が3.0以上である供試体は全体座屈を生じず、式(2)はアルミニウム座屈拘束ブレースにおいても適切であると考えられる。最大軸ひずみは荷重パターンによってはより大きな値を得ることができるが、アルミニウム合金の特徴としてひずみ振幅が大きいとひずみ硬化が顕著に現れることから、途中から定振幅荷重により累積塑性ひずみを増加させたため、最大軸ひずみにはばらつきがある。一方、累積塑性ひずみは最大軸ひずみとの関係があるが、全体座屈を生じなかった供試体は約30%～34%の累積塑性ひずみを得ることができると考えられる。また全体座屈を生じた供試体は、全体座屈を生じなかった供試体に比べ低い値となった。変形性能、累積塑性ひずみともに目標値である $\varepsilon_u=0.03$ 、 $CID_{lim}=0.7$ には達することができなかったが、(3)終局状態で述べたように破断した供試体は全て溶接部から破断していることから、溶接部の応力集中の緩和、端部形状の変更などでこれらの値はより向上すると考えられる。

(6) 鋼材との比較

従来より行ってきた鋼材でのBRBの荷重－変位関係（無次元化）⁶⁾を図-11に示す。まず、ひずみ硬化の影響を比較してみると、鋼材は降伏荷重 P_y に比べ引張側で約1.5倍、圧縮側で1.7倍上昇している。一方、アルミニウム合金の場合、比例限荷重 P_0 に比べ引張側で約3.0倍、圧縮側で3.3倍上昇している。また弾性域の変化は、鋼材は繰り返し回数が進むに

つれ弾性域はほぼ変わらないかもしくは若干減少していくが、アルミニウム合金は繰り返し回数が進むにつれ弾性域は大きく増大していくことが分かる。これらは文献7)で行った素材実験と同様の結果が確認できる。

図-12は著者等が鋼材で行ってきた性能実験⁶⁾で、累積塑性ひずみが70%を満たした供試体と、本実験で全体座屈を生じなかった供試体の3体の累積エネルギー吸収量を表した図である。アルミニウム合金での累積塑性ひずみCIDは鋼材に比べ1/2倍程度にあるのに対し、無次元化した累積エネルギー吸収量は1/1.5倍程度と塑性ひずみが少ない分ひずみ硬化の影響による荷重の上昇で、累積エネルギー吸収量(図-8の $P/P_0-\delta/\delta_0$ 関係での履歴曲線に囲まれた面積)は累積塑性ひずみほど大きな差はない。一方、無次元化を行わなかった荷重-変位関係($P-\delta$ 関係)から得られた累積エネルギー吸収量は比例応力が小さい分、荷重は小さくなり1/4.2倍程度とこちらは大きく違いが出た。

5. まとめ

本研究では、高機能制震ダンパーの開発を目的とした研究の一つとして座屈拘束ブレースを取り上げ、従来使用されていた鋼材に代わりアルミニウム合金を素材に使用し、アルミニウム座屈拘束ブレースが保持する性能及び挙動を実験的に検討した。

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

1) 高機能座屈拘束ブレースの要求性能

高機能座屈ブレースの要求性能を満足するための目標値を $\varepsilon_u=3\%$ 、 $CID)_{lim}=70\%$ と設定し、6体の供試体をアルミニウム合金で製作し性能実験を実施した。

2) 性能実験の結果

安全係数 $\gamma_F>3$ を満たさない供試体(AL20シリーズ)は全体座屈が生じることにより耐力及びエネルギー吸収能が急激に低下し、BRBの機能を保持できなくなった。また $\gamma_F>3$ を満たす供試体(AL25シリーズ)は、全体座屈を生じることは無かったが、繰り返しひずみ硬化の影響が大きく、引張強度に達してしまい破断した。またBRBの面外変形は $t_f=25\text{mm}$ の供試体に対して $t_f=20\text{mm}$ の供試体は拘束材の剛性及び強度が低いため、載荷の初期の段階から面外変形が進行し、拘束材中央部のひずみが降伏ひずみに近づくことで全体座屈が発生したと考えられる。

3) 要求性能

全体座屈を生じた供試体と破断した供試体では大きな性能の差は見られず、共に高機能座屈拘束ブレースの目標性能に達することができなかったが、破断した供試体は溶接部の形状の改良などを施せば、より性能は向上すると考えられる。

4) 鋼材との比較

BRBが保持するエネルギー吸収能力は、累積塑性ひずみで比較をすると鋼材に比べ約1/2倍の性能であるが、エネルギー吸収量を無次元化して比較を行うと、鋼材に比べ約1/1.5倍の性能であり、要求性能同様にBRBに改良を施せば鋼材に近いエネルギー吸収能力を得られると考えられる。

謝辞：アルミニウム合金については大阪大学大学院大倉一郎准教授をはじめ、アルミニウム橋研究会(会長：倉西 茂 東北大学名誉教授)の委員の方々から貴重なご教示を得た。

本研究は、文部科学省の科学研究費(萌芽研究、研究代表者：宇佐美 勉)、ならびに平成 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(代表者：宇佐美 勉)」の助成を受けて実施されたものである。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。

参考文献

- 1) 大倉一郎、萩澤亘保、花崎昌幸：アルミニウム構造学入門、東洋書店、2006。
- 2) Mazzolani, F.M.: Aluminium Alloy Structures, 2nd edition, E & FN SPON, pp59-64, 1995.
- 3) 宇佐美勉：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、2007.2.
- 4) 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、土木学会地震工学論文集、2005.8
- 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、土木学会構造工学論文集 Vol.52A, pp37-48, 2006.3
- 6) 宇佐美勉、佐藤崇、葛西昭：高機能座屈拘束ブレースの研究開発、土木学会構造工学論文集 Vol.55A に掲載予定、2009.3
- 7) 倉田正志、佐藤崇、宇佐美勉、葛西昭、萩澤亘保：降伏棚を有する鋼材の繰り返し弾塑性モデル、土木学会論文集に投稿中