

アルミニウム合金製 BRB の低サイクル疲労実験

舟山淳起¹・今瀬史晃¹・王春林²・宇佐美勉³

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 Post Doctoral Fellow, 名城大学大学院理工学研究科 (同上)

³ 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. 緒言

座屈拘束ブレース (以下 *BRB* と称す) は軸降伏型の制震ダンパーであり, 橋梁の耐震性向上策として非常に有効であるとされている。*BRB* は大地震時に芯材部が降伏し塑性変形を繰り返すことで地震エネルギーを吸収, 消散する¹⁾。その際, 数サイクルから十数サイクルの大きな塑性ひずみが発生するため, *BRB* の設計時には低サイクル疲労による損傷を考慮することが必要である²⁾。著者らは, これまで鋼製高機能 *BRB* に関する性能実験および解析^{3,4)}を数多く行い, さらに, 低サイクル疲労特性に関する実験的研究についても発表している^{5,6)}。それに加え, 軽量であることや耐食性が良好である等の特徴を持つアルミニウム合金を素材に用いることで, さらなる *BRB* の高性能化が可能であると考え, 素材に A5083P-O を適用し性能実験, 数値解析の検討を行った⁷⁾。そこでは, 設置場所を選択することによって *BRB* として使用可能であるが, 端部リブ溶接止端部形状, 取り付け方法などに改良の余地があるとの結果を得た。

本研究は, アルミニウム合金 *BRB* の低サイクル疲労特性を求めるとともに, 更なる性能の向上を図ることを目的としている。3種類のアルミニウム合金 *BRB* を15体製作し, 低サイクル疲労実験を行った。実験は3次にわたって実施しており, 1次実験はまず, 文献6)と同様, 材料に A5083P-O を用い, 端部リブ, ブレ止めの取り付けに溶接を用いた供試体である。2次実験では, ひずみ硬化の影響が少ない A6061S-T6 を素材に適用し, さらに端部リブの取り付けに溶接ではなくボルト接合を用いて供試体を製作した。なお, 2次実験の供試体のブレ止めは溶接によって取り付けである。3次実験の供試体は2次実験とほぼ同様であるが, ブレ止めを省略することによって一切溶接を使用せずにブレース材を製作した。それぞれの *BRB* に対して一定および変動ひずみ振幅荷重のもと低サイクル疲労実験を行った。本研究では, 3種類の *BRB* の低サイクル疲労特性について相互比較を行い, それぞれ

について, 実験より得られたひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ と疲労寿命 N_f をもとに Manson-Coffin 則を用いた低サイクル疲労寿命予測式, Miner の線形累積損傷の考え方を適用してランダムなひずみ振幅を受ける *BRB* の累積疲労損傷度算定式を求めた。そして, 従来 *BRB* に対しては累積塑性ひずみ (*CID*) を用いた照査¹⁸⁾が行われているが, 今回, これに代わる新しい照査法についても提案している。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

BRB は, 圧縮時に全体座屈が生じないように, ブレース材にカバー (拘束材) を被せた軸力部材である。拘束材を適切に設計することにより, 圧縮荷重に対しても引張荷重とほぼ同様な挙動が得られ, ブレース材の塑性履歴により非常に高いエネルギー吸収が期待できる¹⁾。

1次実験で使用した供試体は, 図-1 に示すような, 文献6)の *BRB* と同一形状の供試体4体である。ブレース材, 拘束材にはアルミニウム合金の板材を使用し, 合金種は, ブレース材に A5083P-O (0.2%耐力=125MPa) を, 拘束材に A6061S-T6 (0.2%耐力=245MPa) を用いた。A5083P-O は溶接性が良好で, 伸びも大きく (16%以上), 降伏比 ($\sigma_{0.2}/\sigma_u$) が 0.4 と低く, 低降伏点鋼に似た性質であるため制震ダンパーに適している。A6061S-T6 は耐食性に優れ, 代表的な構造用材としても使用されている。ただし, アーク溶接による強度低下という欠点があるため, 継手にはボルトによる機械接合が用いられる⁸⁾。ブレース材は図-2 に示す平型材を, 拘束材は図-3 に示す断面形状を採用している。ブレース材端部は, 補剛のために厚さ 12mm のリブが両面隅肉溶接 (脚長 6mm の MIG 溶接) され十字断面になっている。また, 中央部には長さ 30mm, $\phi 9$ mm のずれ止め用の丸棒2本が片面にスポット溶接されている (図-1)。ずれ止め棒は拘束材に設けられた穴を貫通する長さになっており, 拘束材が軸方向にずれないようにしている。組み立て方法は, まずブレース材にカバー (拘束材) を被せた軸力部材である。拘束材を適切に設計することにより, 圧縮荷重に対しても引張荷重とほぼ同様な挙動が得られ, ブレース材の塑性履歴により非常に高いエネルギー吸収が期待できる¹⁾。

ス材の平行部に拘束材との隙間量分（面外 1mm，面内 2mm）のアンボンド材を接着し，ブレース材を 1 対の拘束材に付けた溝の間に挟み込むように装着し，高力六角ボルトで摩擦接合した（図-1 参照）。

2 次実験では，文献 6）と 1 次実験の結果より得られた以下の知見をもとに供試体の製作方法を変更した。

(1) 素材（A5083P-O）の繰返しひずみ硬化の影響が非常に大きい

(2) 端部リブ溶接止端部から亀裂が発生し破断に至る

これらの知見をもとに，素材に繰返しひずみ硬化の影響が小さい A6061S-T6 を適用し，さらに，低サイクル疲労特性の向上を図るために端部リブの取り付けに溶接を使用せずボルト接合を用いる新しい構造を考案した。

図-4 にも示すように，端部リブの取り付けに溶接を使用せずブレース材を製作している。なお，2 次実験供試体のズレ止めは 1 次実験同様にスポット溶接で取り付けている（図-1 参照）。ブレース材，拘束材の製作には，共に合金種 A6061S-T6 を用いた。ブレース材は図-2 に示す平型材（端部リブを除く）を，拘束材の断面形状は 1 次実験と同様の形状（図-3）を採用している。ブレース材の端部リブとして，既製品である 100x100x10x320 のアングルを図-4 のように加工し利用した。供試体の組み立て方法は，ブレース材の端部に加工したアングル材を 4 つ組み合わせたものをボルト接合し，1 次実験と同様に，ブレース材平行部にはアンボンド材を巻き付け，拘束材で挟み込むように装着し高力ボルトで接合した（図-4 参照）。

3 次実験の供試体は 2 次実験とほぼ同様であるが，ズレ止め溶接止端部からの亀裂発生を回避するために，ズレ止めを省略している。よって，この供試体のブレース材は溶接を一切使用していない状態で製作している。

低サイクル疲労実験では，低サイクル疲労による破断までの繰返し回数を知る必要があるため，全体座屈が低サイクル疲労に先行して生じてはならない。全体座屈防止条件は既に著者らによって提案³⁾⁴⁾されており，それによれば全体座屈防止条件の安全係数 γ_f が 3.0 以上であれば全体座屈は起こらない。本実験供試体の安全係数 γ_f は 5.41（1 次実験），または 3.53（2 次，3 次実験）であり，全体座屈に対して安全であると言える。

本実験供試体のブレース材，拘束材の製作に用いたアルミニウム合金（A5083P-O，A6061S-T6）の板材から JIS 1 号引張試験片をそれぞれ 3 本採取し，材料定数を求めた。表-1 にブレース材の材料定数の平均値，表-2 にブレース材の諸元，表-3 に拘束材の材料定数の平均値，および諸量を示す。

表-4 に示すように，実験供試体は全部で 15 体あり，1 次実験 4 体，2 次実験 5 体，3 次実験 6 体である。供試体名の最初の A508，A606 はブレース材に使用したアルミニウムの合金種を表している。2 番目の記号は端部リブ，

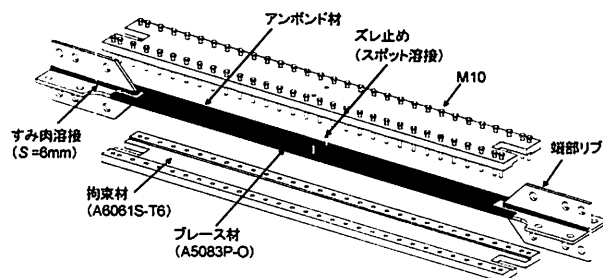


図-1 1 次実験供試体の構成イメージ

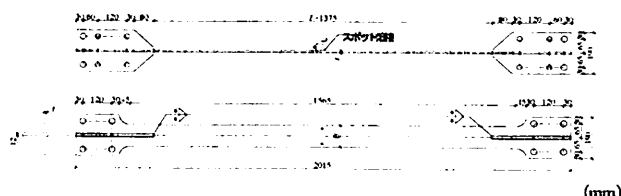


図-2 1 次実験ブレース材

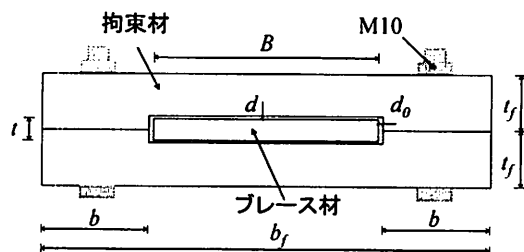


図-3 拘束材断面図

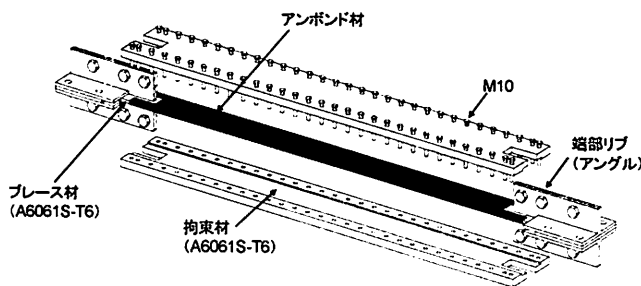


図-4 2 次，3 次実験供試体

およびズレ止めの取り付け状態を表し，RS は端部リブ（Ribs），ズレ止め（Stoppers）が溶接によって取り付けであることを表している。WS，NS はズレ止めの有り（With stoppers），無し（No stoppers）を表している。最後の数値，記号は载荷条件を表し，数値は一定ひずみ振幅量（%）と対応し，記号 R1，R2 は変動ひずみ振幅载荷を表す。

(2) 実験装置

実験装置には，文献 5）6）と同様，名城大学の「高度制震実験・解析研究センター（ARCSEC）」に設置された実験装置を用いて行った。载荷装置，計測装置等については文献 5）6）を参照されたい。

表-1 ブレース材の材量定数

実験 時期	合金種	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_0 (MPa)	$\varepsilon_{0.2}$ (%)	ε_0 (%)	σ_u (MPa)	ε_u (%)	ν
1次	A5083P-O	72.4	132	106	0.381	0.146	316	19.9	0.31
2次	A6061S-T6	67.5	278.5	250.7	0.613	0.371	301	9.7	0.32
3次	A6061S-T6	72.1	273.8	246.5	0.58	0.342	301	7.82	0.33

Note: E =ヤング率, $\sigma_{0.2}$ =0.2%耐力, σ_0 =比例限度力 (A5083P-Oは $0.8\sigma_{0.2}$, A6061S-T6は $0.9\sigma_{0.2}$),

$\varepsilon_{0.2}$ =0.2%耐力におけるひずみ, ε_0 =比例限度力におけるひずみ, σ_u =引張強度, ε_u =伸び,

ν =ポアソン比

表-2 ブレース材諸元

実験 時期	合金種	L (mm)	B (mm)	t (mm)	A (mm ²)	λ	P_0 (kN)	δ_0 (mm)
1次	A5083P-O	1375	100.0	10.1	1010.0	472	107.1	2.01
2次	A6061S-T6	1375	100.4	10.1	1017.1	470	255.0	5.10
3次	A6061S-T6	1375	100.5	10.3	1032.1	463	254.4	4.70

Note: L =平行部の長さ, B =板幅, t =板厚, A =断面積, λ =細長比, P_0 =比例限度荷重,

δ_0 =比例限度荷重における変位

表-3 拘束材諸量

実験 時期	合金種	E^R (GPa)	$\sigma_{0.2}^R$ (MPa)	b_f (mm)	b (mm)	t_f (mm)	隙間量 (mm)	
							面外 d	面内 d_0
1次	A6061S-T6	71.4	279	200	48.2	25.0	1	2
2次		67.5	279	200	48.0	25.0		
3次		72.1	274	200	48.0	25.0		

Note: E^R =拘束材のヤング率, $\sigma_{0.2}^R$ =拘束材の0.2%耐力, b_f , b , t_f , d , d_0 は図-3参照

(3) 載荷パターン

低サイクル疲労実験は、一定ひずみ振幅で12体、変動ひずみ振幅で3体行った(表-4参照)。一定ひずみ振幅実験では、6種類の異なるひずみ振幅で引張・圧縮対称の両振り載荷を行った。本論文では、全ひずみ範囲を図-5に示すように $\Delta\varepsilon$ とし、ひずみ振幅は全ひずみ範囲の半分($\Delta\varepsilon/2$)としている。全ての載荷はブレース材に引張ひずみが生ずる方向から行った。

一定ひずみ振幅実験の供試体は、例としてA508-RS-I.0の場合、ひずみ振幅 $0.5\varepsilon_0$, ε_0 の一定ひずみ振幅載荷をそれぞれ1サイクルずつ行った後、ブレース材平行部に生ずる平均ひずみ(ブレース材の軸方向変位をブレース材平行部 L (=1375mm)で除した量)が1%の状態を両振り一定ひずみ振幅載荷を行った。軸引張荷重 P が最大荷重から10%以上低下(終局状態)したサイクル数を低サイクル疲労寿命とし、実験をそれまで繰り返した。他の一定ひずみ振幅実験も同様である。

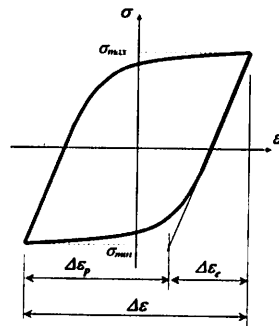


図-5 ひずみ範囲
($\Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon_p$, $\Delta\varepsilon_c$) の定義

変動ひずみ振幅実験の供試体 A606-WS-R1, A606-NS-R1 は、ひずみ振幅を 1, 2, 2.5%と増加させ、A606-NS-R2 は、逆にひずみ振幅を 2.5, 2, 1%と減少させて実験を行った。繰返し回数(n_f)は、それぞれの振幅に対して、R1は5回($\Delta\varepsilon/2=1\%$)、10回($\Delta\varepsilon/2=2\%$)と繰返した後、最終ひずみ振幅(2.5%)載荷で、軸引張荷重がピークから10%以上低下した時点まで繰返すパターンとした。R2は、2回($\Delta\varepsilon/2=2.5\%$)、10回($\Delta\varepsilon/2=2\%$)と繰返した後、最終ひずみ振幅(1.0%)載荷を終局状態まで繰返すパターンとした。

3. 実験結果

(1) 平均応力-平均ひずみ関係

図-6, 8, 10に実験より得られた平均応力 σ -平均ひずみ ε 関係を実験シリーズごとに2例ずつ示す。引張側を正とし、縦軸は軸方向荷重 P をブレース材平行部の断面積 A で割った平均応力 σ [MPa]、横軸は軸方向変位 δ をブレース材平行部の L (=1375mm)で割った平均ひずみ ε [%]である。なお、全ての供試体において、低サイクル疲労破壊が生ずる前にBRBの全体座屈は生じなかった。

1 次実験の履歴曲線 (図-6) において, 文献 6) と同様に, 繰り返しひずみ硬化の影響が非常に大きく, 载荷を繰り返すごとに素材の引張強度に漸近している. A508-RS-0.5 は, 99 回目の引張側のループ途中で急激に荷重が低下したため実験を終了した. 同様に, A508-RS-1.0 は 19 回目のループ, A508-RS-1.5 は 4 回目のループ, A508-RS-2.0 は 3 回目のループの引張側で急激に荷重が低下したため実験を終了した.

2 次実験の履歴曲線 (図-8) は, 1 次実験で顕著にみられた繰り返しひずみ硬化の影響はほとんどなく, 早期に定常状態に移行していることがわかる. 一定ひずみ振幅载荷で実験を行った A606-WS-1.0 は, 99 回目の引張側のループ途中で荷重が急激に低下したため実験を終了した. 同様に, A606-WS-2.0 は 16 回目のループ, A606-WS-2.5 は 4 回目のループ, A606-WS-3.0 は 2 回目のループの引張側で荷重が急激に低下したため実験を終了した. 変動ひずみ振幅で実験を行った A606-WS-R1 は, ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 1.0\%$ で 5 サイクル行った後, $\Delta\epsilon/2 = 2.0\%$ で载荷を行っていたところ 7 サイクル目で急激な荷重低下が生じ, 最終ひずみ振幅载荷に達する以前に実験を終了した.

3 次実験 (図-10) は, 2 次実験と同様に繰り返しひずみ硬化の影響は小さく安定した履歴曲線を描いていることがわかる. 一定ひずみ振幅载荷で実験を行った A606-NS-1.0 は, 246 回目の引張側のループ途中で荷重が急激に低下したため実験を終了した. 同様に, A606-NS-2.0 は 18 回目のループ, A606-NS-2.5 は 5 回目のループ, A606-NS-3.0 は 2 回目のループの引張側で荷重が急激に低下したため実験を終了した. 変動ひずみ振幅载荷で実験を行った A606-NS-R1 は, ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 1.0\%$ で 5 サイクル, $\Delta\epsilon/2 = 2.0\%$ で 10 サイクル行った後, 最終ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 2.5\%$ の 2 サイクル目で急激な荷重低下を生じ実験を終了した. A606-NS-R2 は, ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 2.5\%$ で 2 サイクル, $\Delta\epsilon/2 = 2.0\%$ で 10 サイクル行った後, 最終ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 1.0\%$ で 100 サイクル行ったところで, 文献 1) 3) 9) で提案されている目標性能 $CID_{lim} = 0.7$ を十分に満足していると判断したため载荷を終了した. よってブレース材に亀裂などの損傷はなく, 荷重低下は生じなかった.

全供試体の履歴曲線について, 圧縮側で荷重の増加がみられるが, これは, ブレース材が高次モードで変形する際に拘束材との間に摩擦が発生するためである^{2)~6)}.

(2) 終局状態

写真-1~3 にブレース材の損傷状況を実験シリーズごとに 2 例ずつ, 図-7, 9, 11 に破断箇所をまとめたものを示す.

図-7 は 1 次実験のブレース材破断箇所を示しており, 全ての供試体において可動端側 (右側) の端部リブ溶接

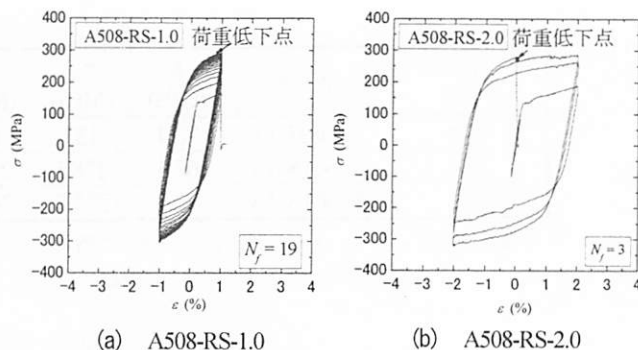


図-6 1 次実験, 平均応力-平均ひずみ関係

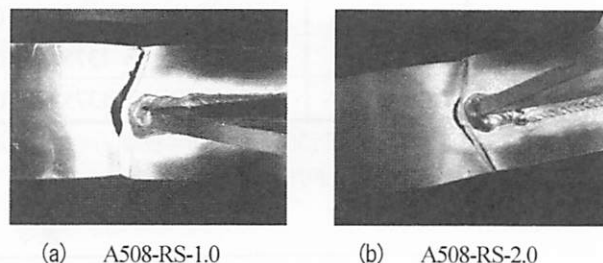


写真-1 1 次実験損傷状況

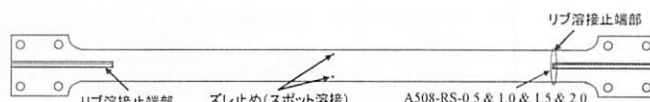


図-7 1 次実験破断箇所

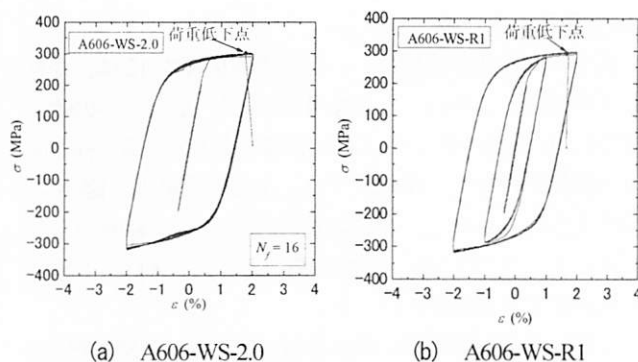


図-8 2 次実験 平均応力-平均ひずみ関係

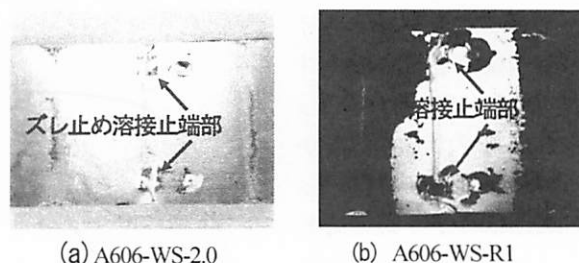


写真-2 2 次実験損傷状況

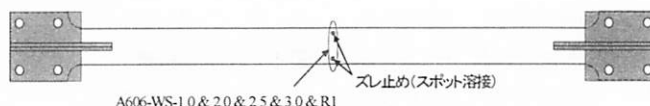


図-9 2 次実験破断箇所

止端部から発生した亀裂が進展して破断している。これは、繰り返しひずみ硬化の影響が顕著に現れ、溶接止端部の応力集中箇所の低サイクル疲労に起因するものと考えられる。写真-1のように、全ての供試体の破断形状は類似したものとなった。

図-9は2次実験のブレース材破断箇所を示しており、全ての供試体においてブレース材中央部にあるズレ止めスポット溶接止端部から破断が生じている。これは、端部リブの取り付けに溶接を使用しなかったことにより、この部分の応力集中が回避されたため、ズレ止めスポット溶接止端部の応力集中が顕著になり、この部分から破断が生じたと考えられる。(写真-2)

図-11は3次実験のブレース材破断箇所を示しており、全ての供試体でブレース材中央部付近、あるいは、中央部からやや固定端側(左側)で破断している。これらの供試体は溶接を一切使用していないため、1次、2次実験のような溶接止端部からの破断ではなく、ブレース材が拘束材との隙間内で面外方向に高次のモードで変形し、繰り返し曲げ引張りを受けることによって低サイクル疲労を起こして破断したと考えられる。(写真-3)

(3) ひずみ振幅-疲労寿命関係

実験結果は、まとめて表-4に示してある。ここで、 $\Delta\epsilon$ =全ひずみ範囲の平均、 N_f =疲労寿命、 n_f =変動ひずみ振幅実験における各振幅の繰り返し回数、 CID =累積塑性ひずみ(疲労寿命に至るまでの塑性ひずみの絶対値の総和)である。ひずみ範囲の定義は図-5に示してある。但し、ブレース材と拘束材の摩擦による圧縮側の荷重増分のため、塑性ひずみ範囲は、図-5に示す定義からは正確に求めることが出来ない。そこで、図-6, 8, 10から分かるように、定常状態で応力が零の点のひずみは摩擦力の影響を受けないので、零応力点に対応する正負のひずみの差の平均値から塑性ひずみ範囲を求めた。一定ひずみ振幅実験における疲労寿命 N_f は、最初の載荷部分の引張降伏ひずみを零ひずみとし、以降引張ひずみの零点を起点として繰り返し数をカウントした。低サイクル疲労が生じたループについては、零引張ひずみ点から低サイクル疲労発生点までのひずみ量を1ループのひずみ量で除した値の小数点以下を四捨五入して疲労寿命を算定した。その結果、全供試体の最終ループはすべて1.0として疲労寿命にカウントされることになる。

表-4において、1次実験と2次実験で比較を行うと、2次実験のA606-WS-1.0, A606-WS-2.0は、1次実験のA508-RS-1.0, A508-RS-2.0と比べて低サイクル疲労寿命が約5倍程度伸びている。素材に違いがあるため一概に比較できないが、これは、1次実験における端部リブ溶接止端部の応力集中が低サイクル疲労に与える影響が非常に大きかったと考えられ、低サイクル疲労特性の向上に

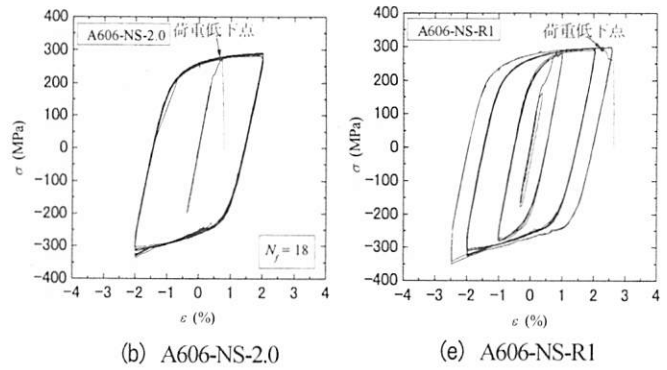


図-10 3次実験 平均応力-平均ひずみ関係

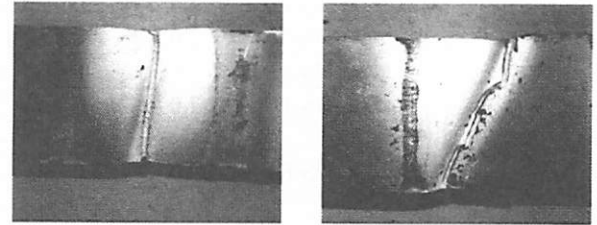


写真-3 3次実験損傷状況

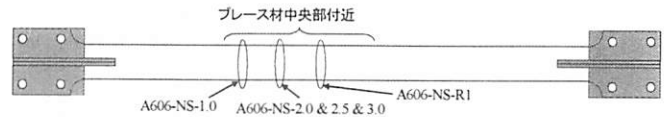


図-11 3次実験破断箇所

関して、端部リブを取り付けるための溶接の使用を回避することは非常に効果的であったと言える。同じように、 CID に関しても約4倍程度と同様に高い値となっている。

次に、2次実験と3次実験で比較を行うと、ひずみ振幅が小さいA606-NS-1.0は、A606-WS-1.0と比べて低サイクル疲労寿命が約2.5倍と大きく伸びている。この程度のひずみ振幅では、ブレース材がほぼ一様なひずみで軸方向に変形するため、溶接を使用した場合の応力集中の影響が顕著になる。よって、ズレ止めを溶接によって取り付けた2次実験の供試体に対して、溶接を一切使用していない3次実験の供試体は溶接部の応力集中が回避され、小さいひずみ振幅($\Delta\epsilon/2 = 1.0\%$)において低サイクル疲労寿命が大きく伸びたと言える。ひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2 = 2.0, 2.5\%$ の供試体でも、低サイクル疲労寿命が約1.2倍程度伸びている。しかし、ひずみ振幅が大きくなるに従い、ブレース材が面外方向に高次モードで変形することによる低サイクル疲労に及ぼす影響が相対的に大きくなるために、溶接を回避することによる効果は小さくなり、ひずみ振幅が最大の $\Delta\epsilon/2 = 3.0\%$ では改善がほとんどみられなかった。

CID に関しては、1次実験のA508-RS-0.5, 2次実験のA606-WS-1.0, A606-WS-2.0, 3次実験のA606-NS-1.0, A606-NS-2.0で、高機能BRBの目標性能 $CID_{lim}=0.7$ を満

表-4 実験結果

実験 時期	供試体	$\Delta\varepsilon/2$ (%)	$\Delta\varepsilon$ (%)	N_f	n_i	CID (%)	D	破断箇所	载荷 パターン
1 次実験	A508-RS-0.5	0.5	1.0	99	—	78.3	1.377	端部リブ 溶接止端部	一定 ひずみ振幅
	A508-RS-1.0	1.0	2.0	19	—	49.3	1.718		
	A508-RS-1.5	1.5	3.0	4	—	20.1	1.098		
	A508-RS-2.0	2.0	4.0	3	—	19.8	1.558		
2 次実験	A606-WS-1.0	1.0	2.0	99	—	193.6	1.107	ズレ止め スポット 溶接止端部	一定 ひずみ振幅
	A606-WS-2.0	2.0	4.0	16	—	90.9	2.057		
	A606-WS-2.5	2.5	5.0	4	—	29.1	1.049		
	A606-WS-3.0	3.0	6.0	2	—	21.8	1.010		
	A606-WS-R1	1.0	2.0	—	5	51.9	0.958		変動 ひずみ振幅
		2.0	4.0	—	7				
3 次実験	A606-NS-1.0	1.0	2.0	246	—	476.6	1.256	ブレース材 中央部付近	一定 ひずみ振幅
	A606-NS-2.0	2.0	4.0	18	—	102.2	1.792		
	A606-NS-2.5	2.5	5.0	5	—	36.9	1.292		
	A606-NS-3.0	3.0	6.0	2	—	21.6	1.110		
	A606-NS-R1	1.0	2.0	—	5	82.3	1.654		変動 ひずみ振幅
		2.0	4.0	—	10				
		2.5	5.0	—	2				
	A606-NS-R2	2.5	5.0	—	2	>265	>2.03	—	
		2.0	4.0	—	10				
		1.0	2.0	—	100				

Note: $\Delta\varepsilon/2$ =ひずみ振幅, $\Delta\varepsilon$ =全ひずみ範囲, N_f =破断までの繰返し回数,
 n_i =各ひずみ範囲での繰返し回数, CID=累積塑性ひずみ, D =累積疲労損傷度 (式 9)

たしていることがわかる。特に2次, 3次実験の供試体では大幅に値を超えている。これは、過度に安全側となっているように思われるが、大地震発生後に、本震と同等規模の余震が頻発することを想定すると、余剰耐震性能の担保として非常に重要となると考えられる。

4. 低サイクル疲労特性

(1) 低サイクル疲労寿命曲線

文献2), 5) では, BRB の低サイクル疲労寿命予測式として, 塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ と疲労寿命 N_f の間に成り立つ Manson-Coffin 則¹⁰⁾に, 次の仮定を採用している。

- 1) Manson-Coffin 則は低サイクル疲労亀裂発生位置における局所的なひずみに対して提案されたものだが, BRB の平均ひずみに対しても適用できるものとする。
- 2) 塑性ひずみ範囲の代わりに全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ を用いることが出来ると仮定する。

Manson-Coffin 則にこのような近似を行った低サイクル疲労寿命予測式は次のように表される。

$$\Delta\varepsilon = \bar{C} \cdot (N_f)^{-k} \quad (1)$$

ここで, $\Delta\varepsilon$ は全ひずみ範囲 (図-5), $\bar{C}, k$ は実験から定められる材料定数である。本論文では, 上記と同様の仮定をし, 式 (1) を用いて実験結果を整理する。

表-4 の一定ひずみ振幅载荷より得られた結果の $\Delta\varepsilon$ と

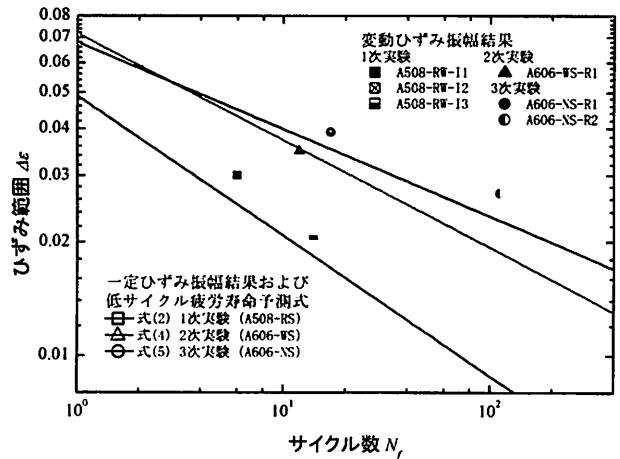


図-12 低サイクル疲労寿命曲線 (提案式)

N_f の関係から, 材料定数 $\bar{C}$ および k を求める。実験シリーズ別に, 最小二乗法により材料定数 $\bar{C}$ および k の下界相当値をそれぞれ算出する。

1 次実験 (合金種: A5083P-O, 端部リブ: 溶接, ズレ止め: スポット溶接)

$$\Delta\varepsilon = 0.049 \cdot (N_f)^{-0.371} \quad (2)$$

図-12 に一定ひずみ振幅実験結果と式 (2) を示す。さらに, 図中には, 次式で求めた等価ひずみ振幅 ε_{eq} ¹⁰⁾ を用いて文献6) の変動ひずみ振幅結果を整理した結果も示す。

$$\varepsilon_{eq} = \left(\frac{\sum \Delta\varepsilon_i^{1/k} \cdot n_i}{\sum n_i} \right)^k \quad (3)$$

これらの図から, 疲労寿命曲線の下界値である式 (2) は,

全ての実験結果が曲線の上側に位置しており、安全側の式となっていることがわかる。

2 次実験 (合金種: A6061S-T6, 端部リブ: ボルト接合, ズレ止め: スポット溶接)

$$\Delta \varepsilon = 0.072 \cdot (N_f)^{-0.285} \quad (4)$$

こちらについても、図-12 に実験結果、式 (4) を示す。さらに参考として変動ひずみ振幅載荷の結果から、等価ひずみ振幅 ε_{eq} を算出しプロットした。

3 次実験 (合金種: A6061S-T6, 端部リブ: ボルト接合, ズレ止め: 無し)

$$\Delta \varepsilon = 0.068 \cdot (N_f)^{-0.232} \quad (5)$$

図-12 に一定ひずみ振幅実験結果、式 (5) を示し、さらに参考として変動ひずみ振幅載荷の結果から、等価ひずみ振幅 ε_{eq} を算出しプロットした。本実験の提案式の材料定数を表-5 にまとめている。

(2) ランダム載荷による累積疲労損傷度 (Miner の線形累積損傷度)

Miner 則¹⁰⁾は Manson-Coffin 則を使用した低サイクル疲労寿命予測手法の 1 つであり、線形累積損傷則とも呼ばれる。あるひずみ範囲での破断までの繰返し数を N_f とすると、一回の繰返しによる損傷は $1/N_f$ となり、多数のひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_i$ ($i=1 \sim nc$, nc =全サイクル数) による損傷は、Miner 則によると、各振幅のひずみによる損傷の線形的な和となる。従って、累積疲労損傷度 D は、式 (1) を用いると次式で表すことができる。

$$D = \sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{N_f} = C \cdot \sum_{i=1}^{nc} (\Delta \varepsilon_i)^m \quad (6)$$

ここで、 $m = 1/k$, $C = \bar{C}^{-m}$ である。式 (6) の D が 1.0 に達すれば、理論上、低サイクル疲労破壊が生ずることとなる。すなわち、低サイクル疲労照査は次のように行われる。

$$\gamma \cdot D < 1.0 \quad \text{であれば安全} \quad (7)$$

ここに、 γ は部分係数である。

計測されるひずみデータは一定ひずみ範囲ではないため、レインフロー法¹⁰⁾などのカウント法でひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_i$ とそのひずみ範囲での繰返し数 n_i を計算する必要がある。なお、 nc は n_i の総和である。

式 (6) に、4.(1) で求めた下界相当式 (2), (4), (5) より求めた m , C を代入すると次式となる。

1 次実験 (合金種: A5083P-O, 端部リブ: 溶接, ズレ止め: スポット溶接)

$$D_{1次実験} = 2.3 \times 10^3 \sum n_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)^{2.692} \quad (8)$$

表-5 低サイクル疲労予測式の材料定数

実験 時期	合金種	$\bar{C}$ (式 (1))	k (式 (1))	M (式 (9))	C (式 (9))
1 次	A5083P-O	0.056	0.371	2.692	2.3×10^3
2 次	A6061S-T6	0.072	0.248	3.511	1.0×10^4
3 次	A6061S-T6	0.070	0.214	4.319	1.1×10^4

2 次実験 (合金種: A6061S-T6, 端部リブ: ボルト接合, ズレ止め: スポット溶接)

$$D_{2次実験} = 1.0 \times 10^4 \sum n_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)^{2.511} \quad (9)$$

3 次実験 (合金種: A6061S-T6, 端部リブ: ボルト接合, ズレ止め: 無し)

$$D_{3次実験} = 1.1 \times 10^4 \sum n_i \cdot (\Delta \varepsilon_i)^{2.119} \quad (10)$$

上式を用いて算定した全ての供試体の累積疲労損傷度 D の値を表-4 に示す。A606-WS-R1 は多少危険側となっているが、その他は全て $D \geq 1.0$ となっており安全側の提案式であることがわかる。

従来、高機能 BRB の低サイクル疲労照査には CID が用いられているが、本研究の 3 次実験を例にとった場合、大きいひずみ振幅 ($\Delta \varepsilon / 2 = 2.5\%$, 3.0%) の供試体では性能を満たしていないことになり、反対に、小さいひずみ振幅 ($\Delta \varepsilon / 2 = 1.0\%$, 2.0%) の供試体では過度に安全側となる。(表-4 参照) そこで、4.(2) で求めた累積疲労損傷度算定式 D を用いることによって、BRB の低サイクル疲労性能を正確に評価することができ、そして、以下の性能を満足する。

- (1) 変形性能: $\varepsilon_u \geq 0.03$,
- (2) 低サイクル疲労性能: 低サイクル疲労を起こさない,

5. 結言

アルミニウム合金で製作した 3 種類の座屈拘束ブレース (BRB) に対して低サイクル疲労実験を行った。本実験は 3 度にわたって実験を行い、1 次実験は合金種 A5083P-O を適用し、端部リブおよびズレ止めを溶接した供試体で一定ひずみ振幅載荷を 4 体行い、2 次実験は合金種 A6061S-T6 を適用し、端部リブをボルト接合、ズレ止めを溶接した供試体で一定ひずみ振幅載荷を 4 体、変動ひずみ振幅載荷を 1 体行い、3 次実験は合金種 A6061S-T6 を適用し、端部リブをボルト接合、ズレ止めを省略した供試体で一定ひずみ振幅載荷 4 体、変動ひずみ振幅載荷 2 体で実験を行った。それぞれの低サイクル疲労特性を求め相互比較を行うとともに、一定ひずみ振幅実験結果をもとに、Manson - Coffin 則を用いて低サイクル疲労寿命 N_f と全ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ の関係式を求め、それぞれの実験シリーズに対する予測式を提案した。そして、BRB に対する従来の累積塑性ひずみ (CID) を用いた照査法に代わ

る、累積疲労損傷度算定式 D を用いた新しい照査法を提案した。

本研究によって得られた結論をまとめると以下のようになる。

- 1) 1 次実験の全ての供試体（合金種：A5083，端部リブおよびズレ止め溶接あり）で、文献 6）と同様に繰返しひずみ効果の影響が大きく、載荷を繰返すごとに母材の引張強度に漸近し、端部リブ溶接止端部の低サイクル疲労により破断した。
- 2) 素材に A6061S-T6 を適用した 2 次、3 次実験の供試体は、早期に定常状態に移行し非常に安定した履歴曲線を描いた。端部リブの取り付けに溶接を使用せずボルト接合を用いることによって、端部リブ溶接止端部からの亀裂発生を回避することができ、1 次実験と比べて低サイクル疲労特性が大幅に向上した。2 次実験は 1 次実験と比較して約 5 倍程度疲労寿命が延びた。
- 3) 2 次実験の全供試体でブレース材中央部のズレ止めスポット溶接止端部から破断が生じた。端部リブの取り付け構造を改良したことによって、ズレ止め溶接止端部の応力集中が相対的に顕著になったためと考えられる。
- 4) 2 次、3 次実験の小さいひずみ振幅 ($\Delta\varepsilon/2=1.0, 2.0\%$) において、高機能 BRB の目標性能である $CID_{lim}=0.7$ を大きく超える値を得た。これは、大地震発生後に、本震と同等程度の余震が頻発することを想定すると、余剰耐震性能の担保として非常に重要となる。
- 5) 3 次実験供試体においてズレ止めを省略し、溶接の使用を回避したことによって、2 次実験と比較して、小さいひずみ振幅 ($\Delta\varepsilon = 1.0\%$) で大幅に低サイクル疲労特性が向上した。その他の供試体においても向上は見られるが、ひずみ振幅が大きくなるに従って、ズレ止めを省略し溶接の使用を回避した効果に対して、ブレース材が面外方向に高次モードで変形し、繰返し曲げ引張りを受けることによる低サイクル疲労の影響が大きくなるために、向上効果は小さくなり、大きいひずみ振幅 ($\Delta\varepsilon/2=3.0\%$) ではほとんど改善はみられなかった。
- 6) 3 次実験の一定ひずみ振幅載荷の供試体において、比較的大きいひずみ振幅 ($\Delta\varepsilon/2=2.5, 3.0\%$) では高機能 BRB の目標性能を満たしていないが、変動ひずみ振幅載荷の実験結果からは高機能 BRB の目標性能に近い性能を有していると言える。

7) 累積塑性ひずみ (CID) を用いた従来の照査法では目標性能を満たさない供試体でも、累積疲労損傷度算定式 D を用いることによって正確な評価が可能となる。そして、目標性能（変形性能： $\varepsilon_H=3.0\%$ ，低サイクル疲労性能：低サイクル疲労を起こさない）を満足する。

6. 謝辞：本研究は、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）」、科学技術振興機構のプロジェクト「橋梁構造物の大地震被害予測技術の高度化と制震技術の開発（代表者：宇佐美 勉）」および名城大学「平成 23 年度大学院生研究助成制度（助成者：舟山 淳起）」の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.486-498，2010.3.
- 3) 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.719-729，2009.3.
- 4) 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.37-48，2006.3.
- 5) 舟山淳起，王春林，宇佐美勉：溶接部の仕上げによる鋼製 BRB の低サイクル疲労性能向上効果，構造工学論文集，Vol.57A，pp.565-578，2011.3.
- 6) 佐藤崇，宇佐美勉，倉田正志：構造用アルミニウム合金 BRB の性能実験と解析，土木学会論文集 A，Vol.66，pp.356-367，2010.6.
- 7) 倉田正志，宇佐美勉：3 種類の構造用アルミニウム合金の繰返し弾塑性構成則の開発と BRB の挙動解析への適用，構造工学論文集，Vol.57A，pp.579-591，2011.3.
- 8) 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.
- 9) 土木学会：鋼・合成構造標準設計方書 [耐震設計編]，丸善，2008.
- 10) 日本材料学会：疲労設計便覧，養賢堂，2005.