

アルミニウム合金の繰返し弾塑性構成則に関する 実験的研究

佐藤崇¹・倉田正志²・宇佐美勉³・葛西昭⁴・萩澤亘保⁵

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名古屋市中天白区塩釜口）

²名城大学理工学部建設システム工学科（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）

⁴正会員 博士（工学） 名古屋大学講師 大学院理工学研究科社会基盤工学専攻（〒464-8603名古屋市中種区不老町）

⁵正会員 日本軽金属（株） グループ技術センター 技術企画部長（〒421-3291静岡市清水区蒲原1-34-1）

1. はじめに

従来の制震ダンパーの研究は、素材として鋼材を使用して行ってきたが、アルミニウム合金での使用も可能ではないかと考えられる。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⁾。そのため鉄鋼材に比べ腐食に対する考慮が必要なくなる。またアルミニウム合金は形成が容易に出来るため溶接が不要であり、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、アルミニウム合金の制震ダンパーとしての使用が可能であると思われる。

制震ダンパーにアルミニウム合金を適用するにあたり、アルミニウム合金の弾塑性域を考慮した繰返し挙動を知ることが必要である。現在、繰返し荷重状態での特性に関する研究、ましてや制震ダンパーに関する研究はほとんど行われていない²⁾。そのため本研究は、アルミニウム合金の引張・圧縮繰返し弾塑性挙動実験による基礎的検討を行った。

2. 実験概要

(1) 実験供試体と座屈拘束材

本実験で使用するアルミニウム合金は、押出材の平行部を有する中実丸棒試験片を用いた。合金種は A5083P-O を使用した。A5083P-O はアルミニウム合金の強度を高めるための焼きなまし処理を行っている。

表-1 供試体寸法

実験供試体	合金種	L (mm)	l (mm)	A (mm ²)	適用
S-供試体	A-5083-O	226	56	254	座屈拘束なし
L-供試体		270	100		座屈拘束あり

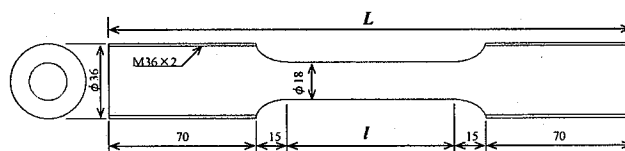


図-1 供試体形状

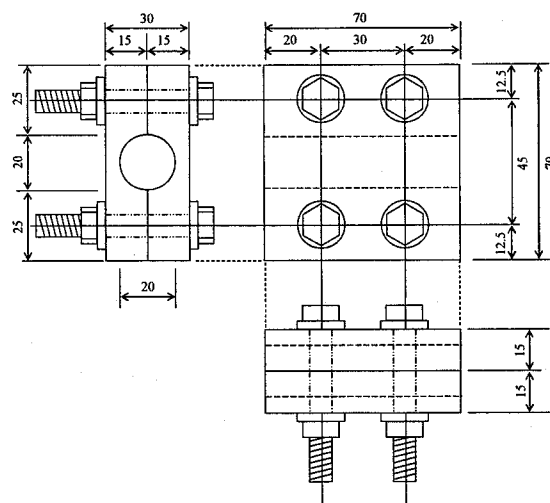


図-2 座屈拘束材

供試体の形状を図-1、寸法を表-1に示す。表-1においてL：全長、l：部材長を示す。S-供試体は座屈防止のため供試体長を非常に短くしてあるがそれでも圧縮でのデータを得ることは難しい場合がある⁴⁾。

表-3 材料定数

供試体名	実験の種類	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$ (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	ν
S-1-T	単調引張	70.1	146	0.408	371	18.7	0.274
S-2-T	単調引張	72.6	146	0.401	370	17.8	0.352
L-1-T	単調引張	72.6	148	0.404	357	14.0	0.303
L-2-C	単調圧縮	70.3	148	0.411	—	—	0.378
L-R3-C	単調圧縮	69.8	149	0.414	—	—	0.386
L-R4-C	単調圧縮	69.0	153	0.422	—	—	—
平均		70.7	149	0.410	366	16.8	0.339

そのため座屈拘束ブレースのアイデア³⁾を基に、供試体平行部をS-供試体の倍程度にし、そこに拘束材を設置することを考えた供試体がL-供試体である。座屈拘束材の寸法を図-2、図-3に示す。座屈拘束材は供試体との全体座屈が生じないように、鋼材を使用し安全率を十分余裕にとっている。なお供試体と座屈拘束材との隙間は、極力摩擦が生じないようにゴムまたはグリースで充填した。

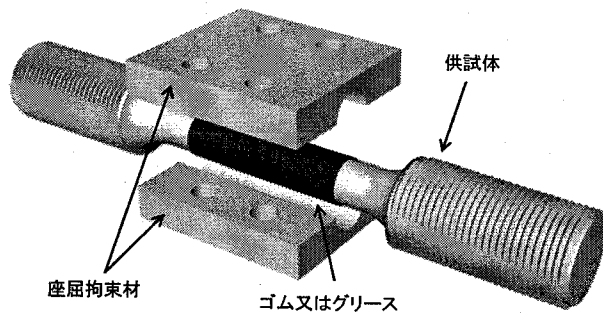


図-3 座屈拘束材の概念図

(2) 実験装置

実験装置および座屈拘束材を設置したL-供試体を写真-1に示す。実験装置はMTS疲労試験機(容量250kN)を用い、試験体の両端を試験機の治具にねじ込み固定した⁴⁾。軸方向変位は変位計治具の両端に取り付けた2本の変位計をモニターし、変位によりアクチュエーターの荷重を制御した。

(3) 载荷パターン

アルミニウム合金の繰返し弾塑性挙動を把握するために、文献4)にともない、表-2に示す異なる5種類の载荷パターンの実験を行った。

弾性域の大きさの変化を調べる実験は、除荷開始点から数点の応力-ひずみ関係より、除荷時の勾配(ヤング係数)を算出し、この勾配が1%変動した

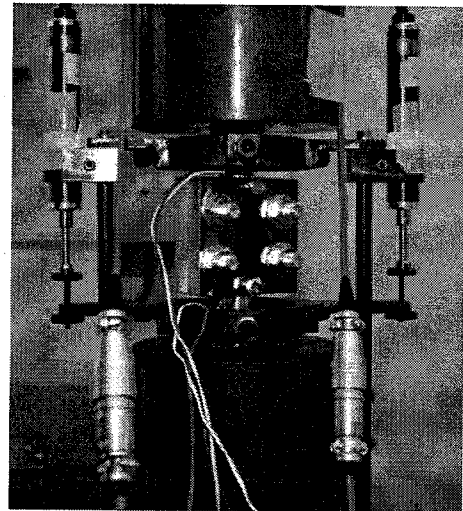


写真-1 実験装置とL-供試体

表-2 载荷パターン

载荷パターン	供試体名
単調载荷実験	S-1-T, S-2-T, L-1-T, L-2-C, L-R3-C, L-R4-C
片振り载荷実験	L-R5, S-3
両振り载荷実験	S-4, L-6, L-R7
弾性域の大きさの変化を調べる実験	S-5, S-6
ランダム载荷実験	S-7

注) T の入った供試体は引張, C の入った供試体は圧縮载荷を示す。また R の入った供試体は座屈拘束材を設置。

時を塑性開始点と判断し再载荷を行う。これを一定間隔のひずみで繰り返す。

3. 実験結果

(1) 単調引張・圧縮载荷実験

単調引張・圧縮载荷実験から得られた材料定数の結果を表-3に示す。表-3において E : ヤング係数, $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力, $\epsilon_{0.2}$: 0.2%ひずみ, σ_u : 引張強さ, ϵ_u : 伸び, ν : ポアソン比を示す。なお本論文はすべて真応力, 真ひずみで計算してある。供試体L-

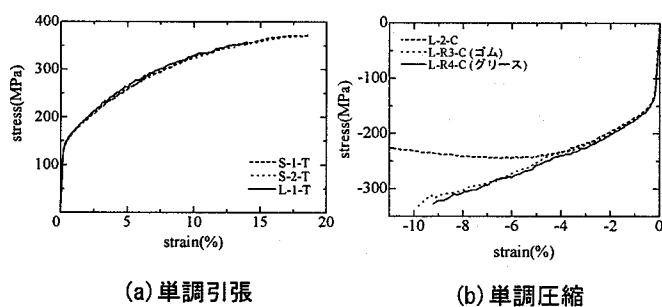


図-4 真応力-真ひずみ関係(単調载荷)

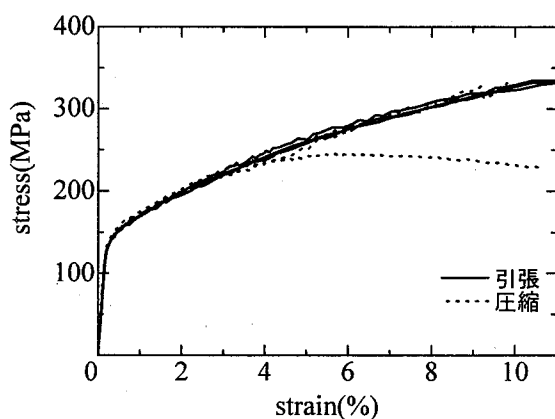


図-5 引張側および圧縮側での真応力-真ひずみ関係の比較

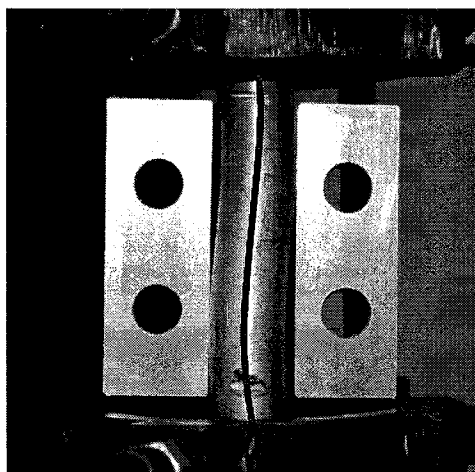


写真-2 残留ひずみ 9%での供試体の変形状況

R3-C, L-R4-Cにおいては座屈拘束材を設置してある。

図-4, 図-5に単調引張および単調圧縮载荷実験での真応力-真ひずみ関係を示し, 図-5は両载荷を比較したものである。圧縮側の真応力-真ひずみ関係を見ると座屈拘束をしていない供試体は, 供試体の座屈により耐力が低下していることが分かる。しかし座屈拘束をしている供試体は引張側と同様の曲線を描いており, 座屈拘束材の効果を確認できた。写真-2は除荷後の残留ひずみ9%での供試体の変形状況であり, 座屈拘束材により供試体が2次モードに座屈していることが分かる。図-5より, 測定された応力-ひずみ関係を真応力, 真ひずみで表現すると, 引張と圧縮で座屈を起こした一体を除き, ほとんど同一の曲線が得られることが分かる。なおアルミニウム合金でよく見られるセレーション⁵⁾(引張試験を行う際に生じる鋸歯状の荷重変動)は, 本実験では確認することが出来なかった。

(2) 片振り・両振り载荷実験

図-6に片振り载荷での真応力-真ひずみ関係を示す。圧縮側も引張側と同様の曲線を描くことが分かる。

図-7に両振り载荷での真応力-真ひずみ関係を示す。S-4とL-6を比較すると, S-4 ($l/r=11.1$) に比べL-6 ($l/r=22.2$) は圧縮側で供試体が座屈し耐力が低下していることが分かる。一方, L-6と同様の供試体に座屈拘束材を設置したL-R7は, L-6のような荷重低下は見られなかった。図-8は座屈拘束材を設置した供試体と, 設置していない供試体を比較した真応力-真ひずみ関係である。圧縮側での座屈拘束材の効果が確認することができる。片振り载荷, 両振り载荷ともに圧縮側で部分的に耐力が低下しているところがあるが, これは座屈拘束材から供試体はみ出した部分で座屈が起きたのが原因である。

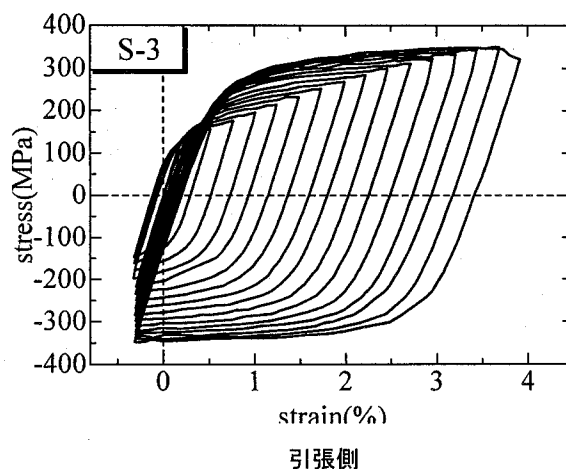
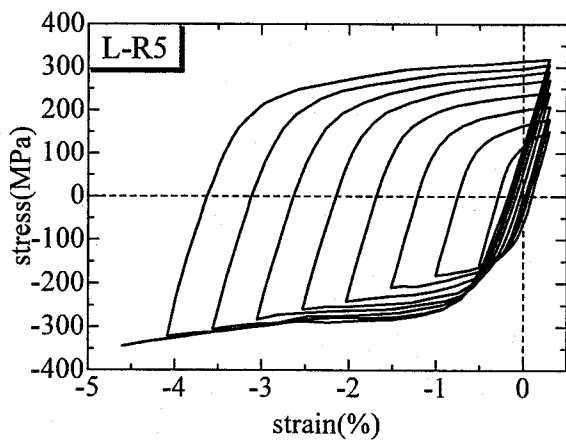
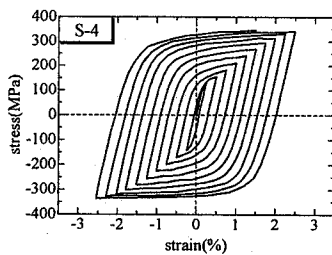


図-6 真応力-真ひずみ関係(片振り载荷)

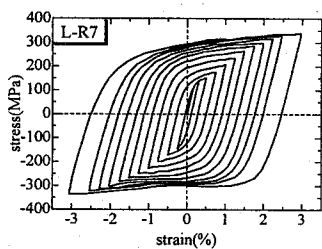


圧縮側

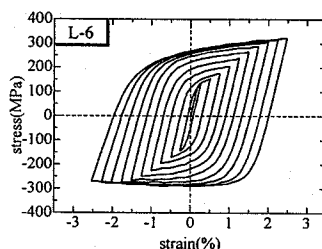
図-6 真応力-真ひずみ関係 (片振り载荷)



座屈拘束なし (S-供試体)



座屈拘束あり (L-供試体)



座屈拘束なし (L-供試体)

図-7 真応力-真ひずみ関係 (両振り载荷)

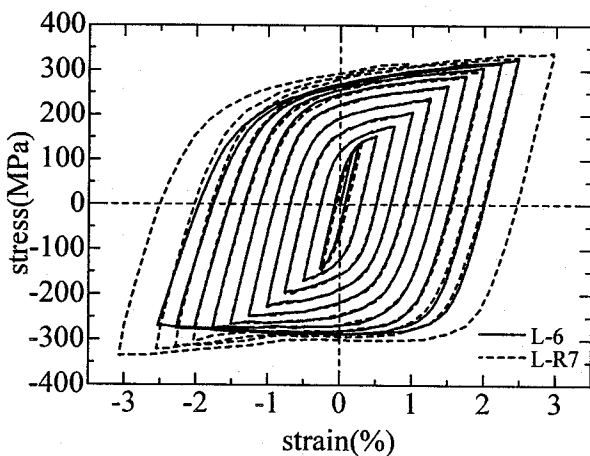


図-8 座屈拘束材の効果

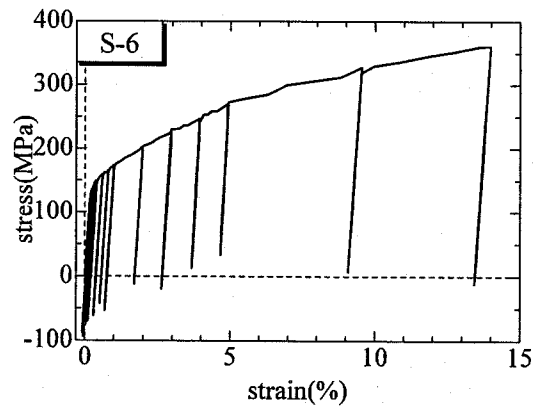
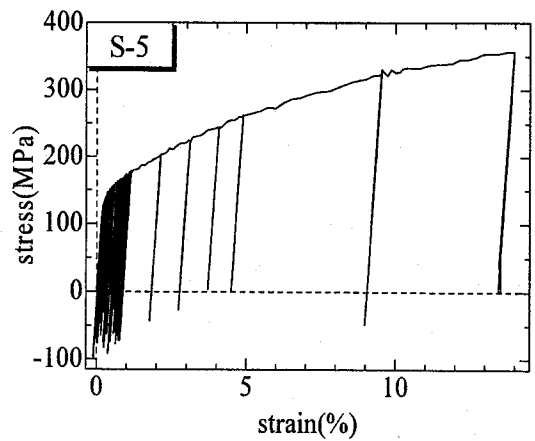


図-9 弾性域の大きさの変化を調べる実験結果

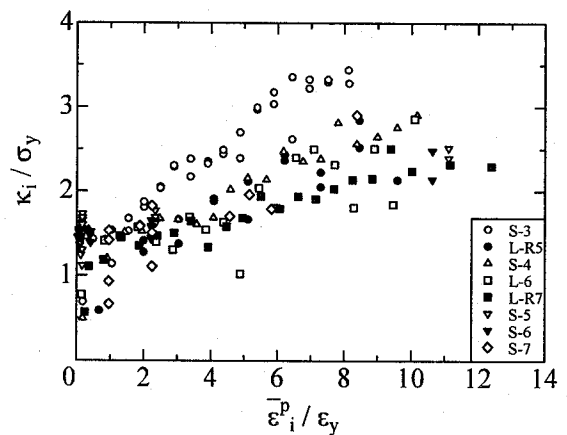


図-10 弾性域の大きさと累積相当ひずみの関係

(2) 弾性域の大きさの変化を調べる実験

弾性域の大きさの変化を調べる実験は、修正二曲面モデルの適用を考慮に入れ行った実験である。図-9に2. (3)で述べた载荷方法での真応力-真ひずみ関係を示す。図-10に縦軸に累積相当塑性ひずみを無次元化した値を、横軸に弾性域の長さを無次元化した値をプロットした結果を示す。一般的な鋼材⁶⁾は、累積相当塑性ひずみの増加にともない弾性域の長さは減少するとされているが、アルミニウム合金の弾性域は累積相当塑性ひずみの増大により弾性域の大きさは増大することがわかる。

4. 構成則の提案

(1) 単調引張・圧縮载荷での構成則

アルミニウム構造物の構造解析または耐荷力研究に一般的に用いられる、応力-ひずみ関係式である Ramberg-Osgood 式 (R-O式) を以下に示す²⁾。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (4.1)$$

本研究では5%ひずみまでを適用範囲に考え、R-O 式を修正した式を提案する。本提案式を以下に示す。応力 σ が比例限界 σ_0 未満は次式を用いる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.2)$$

応力 σ が比例限界 σ_0 以上は次式を用いる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \frac{\sigma_{0.2}}{E} \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (4.3)$$

ここで σ : 応力, ε : ひずみ, E : ヤング係数, $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力, σ_0 : 比例限界応力 ($\sigma_{0.2}$ の80%), α : 形状パラメータ, n : 硬化パラメータである。単調引張・圧縮载荷実験より式(4.3)の未知数 α , n を非線形最小二乗法により算出した。文献7)で提案されている方法より式(4.3)の未知数 n を算出した。図-11は式(4.1), 式(4.3)と実験結果との比較を示す。式(4.1)は、大ひずみ領域になると、安全側ではあるが実際の実験値と大きく異なってくる。一方、式(4.3)は非常によく予測できていることが分かる。

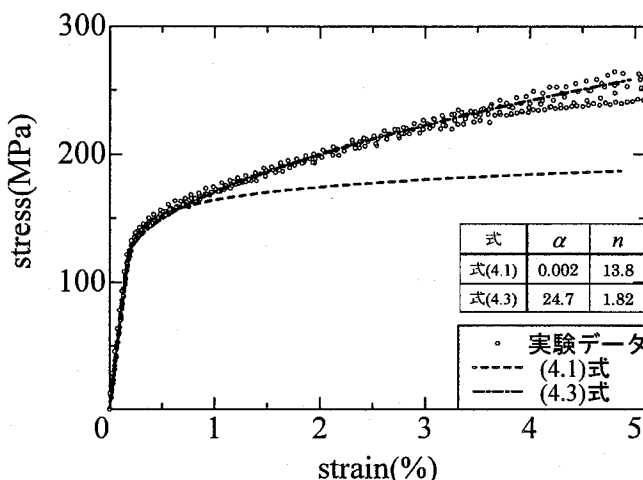


図-11 式(4.1)と式(4.3)の比較

(1) 引張・圧縮繰返し载荷での構成則

片振り・両振り载荷実験や、弾性域の大きさの変化を調べる実験の応力-ひずみ関係の結果をふまえると、弾性域が累積相当ひずみの増加にともない増加していることが分かる。よって繰返し载荷での構成則は弾性域が変化しない移動硬化則やMasing則などの構成則の適用は難しくなる。以上をふまえてアルミニウム合金での構成則は、弾性域の変化を考慮に入れた修正2曲面モデルの適用が妥当だと考えられる。本節では、修正2曲面モデルに対してアルミニウム合金を適用させるために、引張・圧縮繰返し载荷実験で得られた結果よりモデルパラメータ⁴⁾を決定する。

a) 境界線の傾きに関するパラメータ

引張・圧縮領域に位置する境界線の傾きは、塑性仕事の増大に伴い減少するとされている。よって*i*番目の载荷経路の境界線の傾き E_{0i}^P 、塑性仕事量 W_i^P をそれぞれ無次元化した関係として表せることができる。

$$\frac{E_{0i}^P}{E} = \frac{E_0^P/E}{1 + \bar{\omega} \cdot \left(\frac{W_i^P}{\sigma_0 \varepsilon_0} \right)} \quad (4.4)$$

$\bar{\omega}$ は各種鋼材に固有の定数, E_{0i}^P は*i*番目と(*i*+1)番目の荷重反転点間の载荷経路のための傾き, W_i^P は载荷の初めから*i*番目の荷重反転点までの塑性仕事量, E はヤング係数, σ_0 は比例限界応力, ε_0 : 比例限界ひずみである。

再载荷点から次の折り返し点までの塑性ひずみの長さが3%以上の範囲で経路が線形になるとし、該当する複数の実験データを用い、縦軸に境界線の傾き E_{0i}^P 、横軸に塑性仕事量 W_i^P を無次元化した値をプロットし(図-12)、最小二乗法により近似式を求め、式(4.4)の未知数 E_0^P/E と $\bar{\omega}$ を算出した。

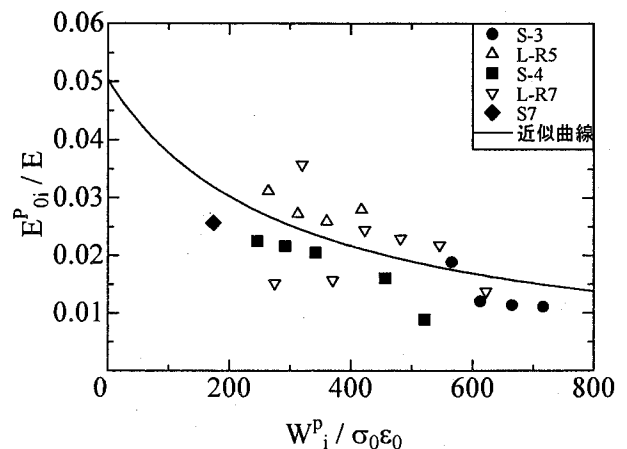


図-12 境界線の傾きと累積相当塑性ひずみの関係

b) 境界線半径に関するパラメータ

ここでも、再載荷点から次の折り返し点までの塑性ひずみの長さが3%以上の範囲で経路が線形になるとし、再載荷点と次の経路の境界線との距離を、境界線半径 $\bar{\kappa}_i$ の2倍とする（図-13参照）。このとき、次の経路の境界線は、式(4.4)より求められる傾きを持ち、次の折り返し点を通る直線であるとする。境界線半径 $\bar{\kappa}_i$ 、累積相当塑性ひずみの大きさの1/2である ρ_i をそれぞれ無次元化した関係として表せることができる。

$$\frac{\bar{\kappa}_i}{\sigma_0} = \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} + \left(\frac{\bar{\kappa}_0}{\sigma_0} - \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} \right) \exp \left[-\zeta \left(\frac{\rho_i}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

縦軸に境界線半径 $\bar{\kappa}_i$ 、横軸に累積相当塑性ひずみの大きさの1/2である ρ_i をそれぞれ無次元化した値をプロットし（図-14）、最小二乗法により近似式を求め、式(4.5)の未知数 $\bar{\kappa}_\infty/\sigma_0$ と $\bar{\kappa}_0/\sigma_0$ および ζ を算

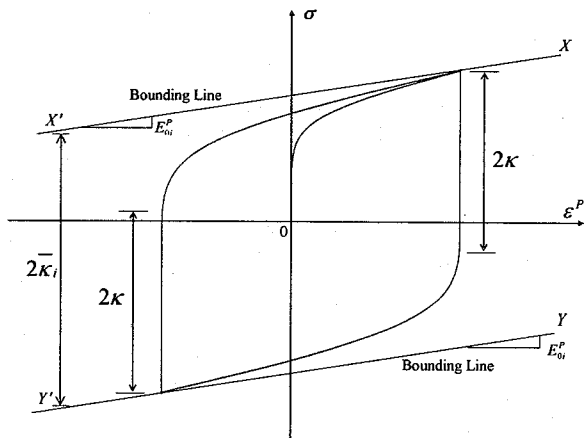


図-13 応力-塑性ひずみの関係

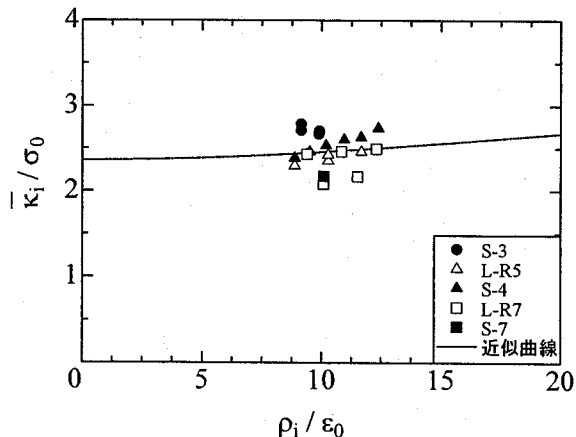


図-14 境界線半径と累積相当塑性ひずみの関係

出するが、 $\bar{\kappa}_i$ は一定であると考えると式(4.2)の $\bar{\zeta}$ はゼロとなるので、 $\bar{\kappa}_\infty/\sigma_0$ と $\bar{\kappa}_0/\sigma_0$ は等しくなる。つまり $\bar{\kappa}_i$ は ρ_i に関わらず一定である。

c) 弾性域の長さに関するパラメータ

修正二曲面モデルでは、弾性域の長さは累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ の増加に伴って指数関数的に減少するとされている。しかしアルミニウム合金は指数関数的に減少する傾向が見られる。よって除荷点と塑性開始点の応力差を弾性域の長さ $2\kappa_i$ 、累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_i^p$ をそれぞれ無次元化した関係として表せることができる。

$$\frac{\kappa_i}{\sigma_0} = \frac{\kappa_\infty}{\sigma_0} + \left(\frac{\kappa_0}{\sigma_0} - \frac{\kappa_\infty}{\sigma_0} \right) \exp \left(-c \frac{\bar{\varepsilon}_i^p}{\varepsilon_0} \right) \quad (4.6)$$

ここで、 κ_0 は初期の弾性域の大きさの1/2、つまり比例限界応力 σ_0 である。縦軸に弾性域の長さ $2\kappa_i$ 、横軸に累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_i^p$ をそれぞれ無次元化した値をプロットし（図-15）、最小二乗法により近似式を求め、式(4.6)の未知数 κ_∞/σ_0 と c を算出

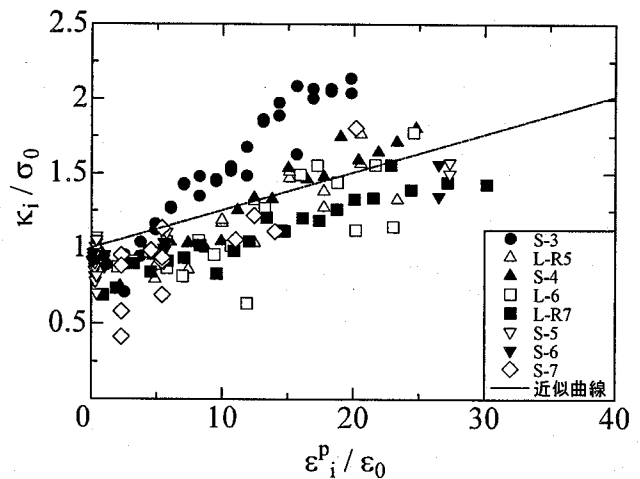


図-15 弾性域の大きさと累積相当塑性ひずみの関係

た。

d) 形状パラメータ

a) 境界線の傾きに関するパラメータで算出した初期の境界線の傾き E_{oi}^p 、そのサイクルでの境界線の傾き E_{oi}^p 、始めて塑性域に入る点から境界線までの σ 軸に平行な距離 δ_m 、現応力点と境界線までの σ 軸に平行な距離 δ を用いて、現応力点での傾き E^p （接線塑性係数）を表す式を以下に示す。（図-16参照）

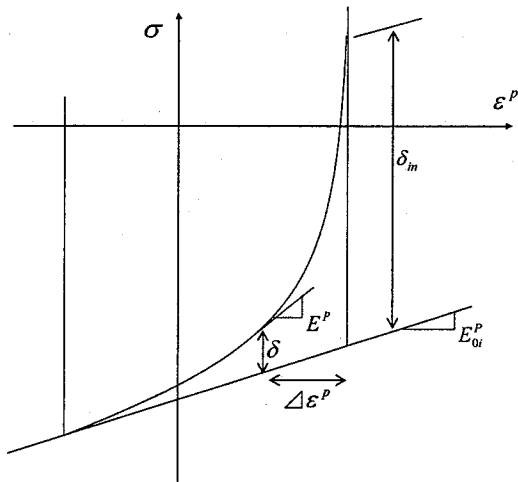


図-16 応力-塑性ひずみ曲線の形状

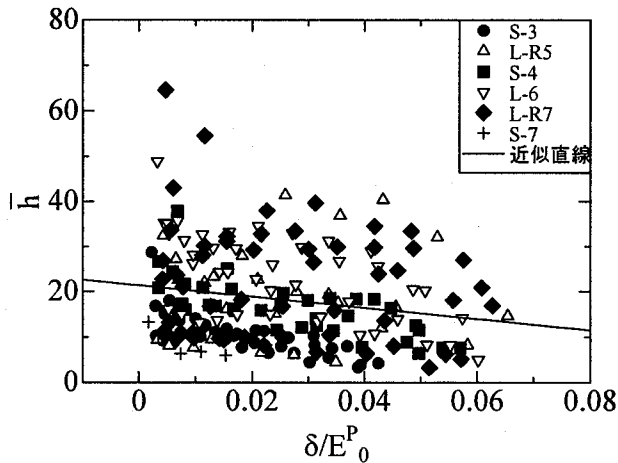


図-17 形状パラメータ $\bar{h}$ と δ の関係

$$\frac{E^p}{E_0^p} = \frac{E_{oi}^p}{E_0^p} + \bar{h} \frac{\delta}{\delta_m - \delta} \quad (4.7)$$

式(4.7)から形状パラメータ $\bar{h}$ を求め、これと現応力点から境界線までの距離 δ を無次元化した関係をグラフにプロットしたものを図-17に示す。一方、図-17より形状パラメータ $\bar{h}$ と現応力点から境界線までの距離 δ は、 δ が増加するに伴って $\bar{h}$ は線形に減少する傾向にある。よって形状パラメータ $\bar{h}$ 、現応力点から境界線までの距離 δ をそれぞれ無次元化した関係として表せることができる。

$$\bar{h} = -\frac{\delta}{E_0^p} \cdot e + \frac{f}{E_0^p} \quad (4.8)$$

上式より最小二乗法により近似式を求め、式(4.8)の未知数 e と f/E_0^p を算出した。

表-4 アルミニウム合金用モデルのパラメータ

内容	パラメータ	値
境界線の傾き	E_0^p/E	913
	$\bar{\omega}$	993
境界線半径	$\bar{\kappa}_0/\sigma_0$	2.35
	$\bar{\zeta}$	1.45×10^3
累積相当塑性ひずみの増加に伴う弾性域の増大	κ_∞/σ_0	1.64×10^4
	C	1.55×10^{-6}
形状パラメータ	e	-124
	f/E_0^p	21.4

以上の方法により決定したアルミニウム合金用モデルのパラメータを表-4にまとめる。

5. 実験データとシュミレーションの比較

図-18は両振り载荷実験でのS-4供試体の真応力-真ひずみ関係と、表-4のパラメータを用いた予測曲線の比較した結果を示す。予測曲線を見ると、境界線半径および弾性域の変動が表されていない。境界線半径の変動が表されていない原因として、図-14を見ると、プロット数が少なく、まとまった累積相当塑性ひずみ間でのデータしか得られなかったため、近似曲線はほぼ直線になってしまい、変動が顕著に現れなかったと考えられる。一方、弾性域の変動が表されていない原因として、弾性域の大きさの変化を調べる実験での弾性域の大きさ κ_i のデータが、

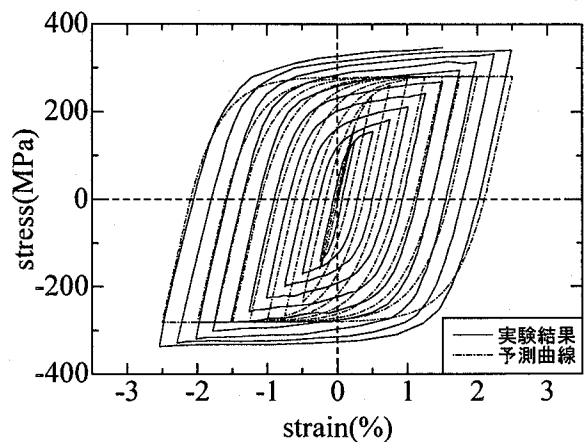


図-18 実験結果と予測曲線の比較

小さい累積相当塑性ひずみで、初期の弾性域の大きさである κ_0 より小さくなってしまったため、式(4.6)のパラメータ c が小さくなり、変動が顕著に現れなかったと考えられる。

6. おわりに

アルミニウム合金の構成則の開発を目的に、素材(A5083P-O)の単調増大実験および引張・圧縮繰返し実験を行った。実験に際しては、高圧縮ひずみ時のデータを得るため、座屈拘束材を素材に被せた新しい実験手法も採用した。この研究により以下のことが明らかになった。

- 1) 座屈拘束材を設置すると、引張・圧縮同様の応力-ひずみ関係を描くことが出来ることにより、構成則を作成する際の高圧縮ひずみ側でのデータを得ることが出来る。
- 2) アルミニウム合金の単調増大実験での従来開発された構成則⁷⁾は、低ひずみ領域では高い精度で予測できるが、大ひずみ領域になると実験値より低い応力が出てしまうため、新たに式(4.3)を提案した(図-11)。
- 3) アルミニウム合金は、鋼材と異なり、累積相当塑性ひずみの増大にともない弾性域は増大する。このことは、繰返し構成則での移動硬化則の適用を困難にし、等方硬化的な性質を加味する必要がある。一方、境界線の傾きは、鋼材と同様、累積相当塑性ひずみの増大にともない小さくなる。
- 4) アルミニウム合金の繰返し増大実験構成則として、鋼材に対して開発された修正2曲面モデルの適用を考え、モデルパラメータを定めた。予測値は、実験値に対してある程度の精度を持つ結果が得られたが、さらなる精度向上が必要である。

今後は今回の研究で得られたパラメータを見直し、実験結果との比較を行い精度向上を目指す。さらに、他のアルミニウム合金として、例えばA6061S-T6、A5052P-Oでも同様の実験及び解析を行う予定である。

謝辞：本研究は文部科学省のハイテク・リサーチ・センター整備事業として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)の研究課題の一環として実施された。また、実験供試体は、日本軽金属(株)からの無償提供を受けた。記して関係各位に深謝したい。

参考文献

- 1) 大倉一郎, 萩澤宣保, 花崎昌幸: アルミニウム構造学入門, 東洋書店, 2006
- 2) F.M. Mazzolani: Aluminium Alloy Structures, Second Edition, E & FN SPON, pp59-64, 1995
- 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全体座屈, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.37-48, 2006.3.
- 4) 田中良仁, 水野英二, 沈赤, 宇佐美勉: 降伏棚を有する鋼材の繰返し弾塑性モデル, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1-14, 1991.3.
- 5) 大谷茂生, 遠藤誠一, 小松原俊雄, 稲垣, 裕輔: Al-Mg系合金の引張変形におけるセレーションの発生, 軽金属学会秋季大会第99回秋期大会講演概要, pp147-148, 2000
- 6) Shen. C., Tanaka. Y., Mizuno. E, and Usami, T.: A Two-Surface Model for Steels with Yield Plateau, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.8, No.4, Jan., pp.179s-188s, 1992
- 7) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 萩澤宣保, 大隅心平: 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係の定式化およびMIG溶接と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力の定式化, ALST研究レポート1, 2007.3.