

荷重履歴を受けるアルミニウム合金の 応力—ひずみ関係

宇佐美 勉¹

¹フェロー 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)

要旨

本研究は、構造用アルミニウム合金を用いた履歴型制震ダンパーの開発研究の一環として、3種類の構造用アルミニウム合金の一軸繰返し弾塑性構成則について触れたものである。そのために、構造用アルミニウム合金の繰返し引張—圧縮試験を実施し、鋼材の挙動との相違点を明らかにし、鋼材に対して多くの実績のある修正2曲面モデルを修正することにより構造用アルミニウム合金に対する新しい構成則を構築した。最後に、開発した構成則によりランダム载荷の実験結果を予測し、提案構成則の妥当性を検証した。

キーワード：アルミニウム合金，実験，繰返し载荷，弾塑性構成則，制震ダンパー

1. 緒言

橋梁構造物の耐震性向上策として、制震ダンパーを付与し制震構造化する方法の有効性が広く認識され、高機能な制震ダンパーの研究も行われるようになってきている^{1),2),3)}。大地震に対する制震ダンパーとして履歴型制震ダンパーが、経済性、信頼性、耐久性などの点で一般的に最も適すると考えられる。

履歴型制震ダンパーの素材には、従来鋼材が用いられてきている。しかし、最近、鋼材にない優れた特性、すなわち①軽量である、②耐食性に優れている、③加工性が良い（押出形材が容易に製作出来る）など⁴⁾を生かし、構造用アルミニウム合金（以下、アルミニウムと略称する）を制震ダンパーの素材に用いる研究が少数ではあるが見られるようになってきた。すなわち、アルミニウムのせん断パネルダンパーへの応用^{5),6)}、および著者らによる座屈拘束ブレース（以下、BRBと略称する）への適用性に関する研究などがある^{7),8)}。著者らの研究では、アルミニウムの一種であるA5083P-O材を取り上げ、鋼材に対して多数の実績がある修正2曲面モデル^{9),10)}にさらに修正を施した繰返し弾塑性構成則の開発⁷⁾、ならびにアルミニウムBRBの繰返し引張—圧縮载荷での性能実験と履歴挙動の解析⁸⁾を行い、次のような知見を得ている。

- 1) BRBの性能を左右する全体座屈は、鋼BRBに対して開発された全体座屈防止条件式¹²⁾（安全係数 $v_F \geq 3.0$ ）を満たせば防止できる。
- 2) A5083P-Oは繰返しひずみ硬化の影響が大きく、繰返し载荷の途中で発生応力が母材の引張強度近くに達し、全ての供試体は端部リブ溶接止端部の低サイクル疲労により破断した。これには、端部リブ溶接による母材の低サイクル疲労強度の低下が主要な要因であると考えられる。
- 3) アルミニウムBRBは、高機能な鋼BRBに対して設定された目標性能^{11),12)}（最大軸ひずみ3%、累積塑性ひずみ70%）を満たすことができなかったが、ある程度の性能（最大軸ひずみ1.34~2.25%、累積塑性ひずみ25~34%程度）を保有しており、設置場所を選択することによりBRBとして使用可能である。

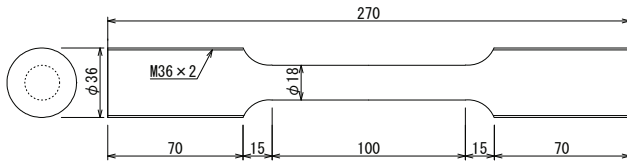


図-1 供試体形状

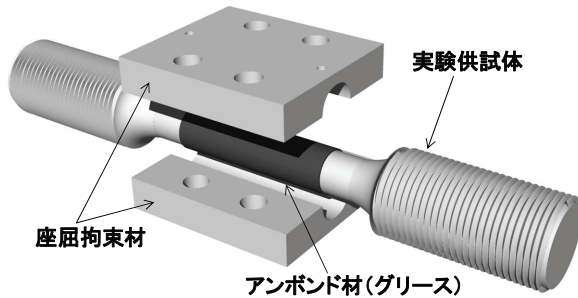


図-2 座屈拘束材の概念図

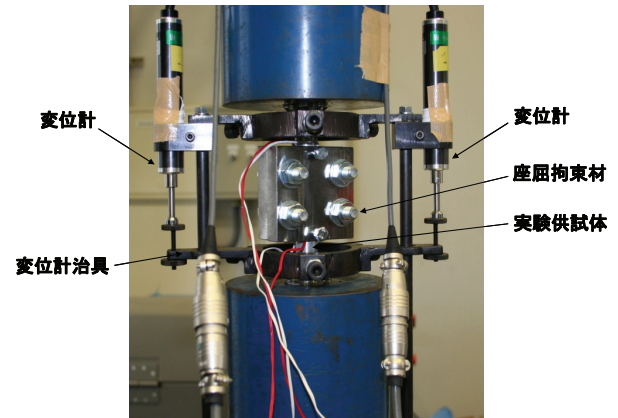


写真-1 実験装置と座屈拘束材を設置した供試体

- 4) 開発した構成則およびBRBの変形解析モデルにより、BRBの全体座屈を含めた繰り返し弾塑性挙動を解析的に再現できる。
 - 5) 今後の研究課題として、種々のアルミニウムを用いた制震ダンパーの性能実験、低サイクル疲労実験を実施し、解析を併用することにより、制震ダンパーとして適するアルミニウム素材を見いだしていく必要がある。
- 以上の知見を踏まえ、本研究では、A5083P-O以外に制震ダンパーの素材として適すると考えられる2種類のアルミニウム(A5052P-O, A6061S-T6)を取り上げ、種々の载荷プログラムでの繰り返し引張-圧縮载荷の素材実験を実施し、繰り返し弾塑性構成則の開発を行う。

2. 構造用アルミニウム合金の素材実験と繰り返し弾塑性構成則

(1) 実験概要

素材として、JIS H4000/JIS H4100で規定されている5000系アルミニウムA5052P-O、6000系アルミニウムA6061S-T6の2種類を用いた。5000系アルミニウムは非熱処理合金、6000系アルミニウムは熱処理合金である。これらのアルミニウムの特性については、例えば文献4)、13)を参照されたい。

実験供試体には、図-1に示すような平行部部の長さが100mmで $\phi=18$ mmの中実丸棒供試体(文献7)のL-供試体を用いた。また、圧縮载荷を含む実験では、中央部に図-2および写真-1に示す座屈防止用の拘束材を設置して実験を行った⁷⁾。供試体および実験装置等の詳細は、文献7)を参照されたい。

実験は、表-1に示す5種類の異なる载荷パターンのもとで行った。表中の値は、折り返し点でのひずみ値である。また、供試体名はアルミニウムの名称の頭文字4桁をとり、LはL-供試体、Tは引張試験を表し、L-供試体内、Rの付いた供試体は座屈拘束材を設置して実験を行った供試体である。実験の種類は次の5種類である。[1] 単調引張载荷実験、[2] 片振り载荷実験、[3] 変動振幅载荷実験、[4] 定振幅载荷実験、[5] ランダム载荷実験。実験[1]は材料定数の決定のための実験、実験[2]～[4]は種々の繰り返し载荷パターンにおける挙動を調べるための実験であり、修正2曲面モデル^{9)、10)}の再修正モデルのパラメータ決定のための実験でもある。実験[5]は提案モデルによる予測結果の検証のための実験である。なお、文献7)、9)、10)では、除荷領域での弾性域の大きさの変化を調べるための実験も行っているが、この量は実験[2]～[4]からも求められるので、本研究では実施しなかった。

(2) 実験結果

測定された軸方向荷重 P と軸方向工学ひずみ e (軸方向変位を初期の標点間距離で除した量)は次式により真応力 σ 、真ひずみ ε に変換して表示する。

$$\sigma = P(1+e)/A \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad (2)$$

表-1 载荷パターン

合金種	供試体名	実験の種類	载荷パターン (数値は公称全ひずみ値 (%) で、引張を正とする)
A5052P-O	A505-L-1-T	[1]	破断まで単調引張载荷
	A505-L-R2	[4]	0.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00
	A505-L-R3	[3]	0.00, 0.25, -0.25, 0.50, -0.50, 0.75, -0.75, 1.00, -1.00, 1.25, -1.25, 1.50, -1.50, 2.00, -2.00, 2.50
	A505-L-R4	[2]	0.00, 0.25, -0.30, 0.50, -0.30, 0.75, -0.30, 1.00, -0.30, 1.25, -0.30, 1.50, -0.30, 1.75, -0.30, 2.00, -0.30, 2.25, -0.30, 2.50
	A505-L-R5	[5]	0.00, 1.00, -3.00, 5.00, 1.00, 8.00, 6.00, 10.00
	A505-L-R6	[5]	0.00, 0.60, 0.10, 0.40, -0.30, 0.30, -0.90, -0.20, -0.40, 0.80, 0.50, 1.30, 0.20, 1.60, -0.90, 1.90, -1.20, 3.25, 2.94
A6061S-T6	A606-L-1-T	[1]	破断まで単調引張载荷
	A606-L-R2	[4]	0.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00, -2.00, 2.00
	A606-L-R3	[3]	0.00, 0.50, -0.50, 0.75, -0.75, 1.00, -1.00, 1.25, -1.25, 1.50, -1.50, 1.75, -1.75, 2.00, -2.00, 2.25, -2.25, 3.00
	A606-L-R4	[2]	0.00, 0.50, -0.50, 0.75, -0.50, 1.00, -0.50, 1.25, -0.50, 1.50, -0.50, 1.75, -0.50, 2.00, -0.50, 2.50, -0.50, 3.00, -0.50, 3.50, -0.50, 4.00, -0.50, 4.50, -0.50, 5.00
	A606-L-R5	[5]	0.00, 2.50, -1.50, 4.00, 0.00, 5.00, 1.00, 6.00
	A606-L-R6	[5]	0.00, 0.60, 0.10, 0.40, -0.30, 0.30, -0.90, -0.20, -0.40, 0.80, 0.50, 1.30, 0.20, 1.60, -0.90, 1.90, -1.20, 3.25, 2.77

Note : [1] 単調引張载荷, [2] 片振り载荷, [3] 変動振幅载荷, [4] 定振幅载荷, [5] ランダム载荷

表-2 材料定数

合金種	供試体	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$ (%)	σ_0 (MPa)	σ_u (MPa)	δ_u (%)	ν	$\sigma_{0.2}/\sigma_u$
A5083P-O	3本の平均	71.8	147	0.404	118	366	16.8	0.31	0.402
A5052P-O	A505-L-1-T	70.2	106	0.345	84.8	247	21.1	0.33	0.429
A6061S-T6	A606-L-1-T	70.0	288	0.599	259	334	12.4	0.33	0.862

Note 1 : E =ヤング係数, $\sigma_{0.2}$ =0.2%耐力, $\epsilon_{0.2}$ =0.2%耐力におけるひずみ, σ_0 =比例限度力 (5000系は $0.8\sigma_{0.2}$, 6000系は $0.9\sigma_{0.2}$), σ_u =引張強度, δ_u =伸び, ν =ポアソン比, $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ =降伏比

Note 2 : A5083P-Oの材料定数は文献7) 参照

ここに、 A = 試験片の実測断面積である。

a) 単調引張载荷実験

単調引張载荷実験から得られた2種類のアルミニウムのヤング係数 E , 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$, 0.2%耐力におけるひずみ $\epsilon_{0.2}$, 比例限度力 σ_0 , 引張強度 σ_u , 伸び δ_u , ポアソン比 ν , 降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ を表-2 に示す。表-2 はすべて真応力, 真ひずみで表示してある。比較のために、A5083P-O の単調引張試験結果の平均値⁷⁾ も示す。なお、比例限度力 σ_0 は、5000系アルミニウムは $0.8\sigma_{0.2}$, 6000系アルミニウムは $0.9\sigma_{0.2}$ とした。これは、単調引張载荷の応力-ひずみ関係において、ひずみが弾性域での直線から1%大きくなる点を比例限度と見なし、そのときの応力を比例限度力とした。また、図-3 に3種類のアルミニウムの真応力-真ひずみ関係の比較を示す。

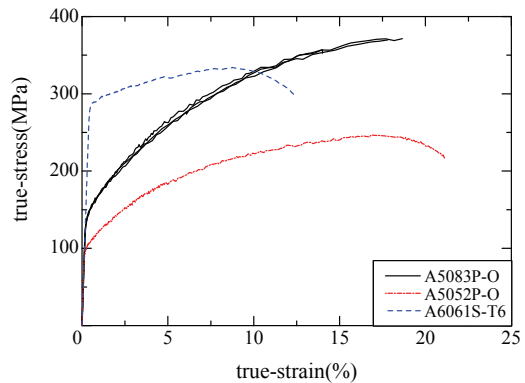


図-3 3種類のアルミニウムの単調引張载荷実験の比較

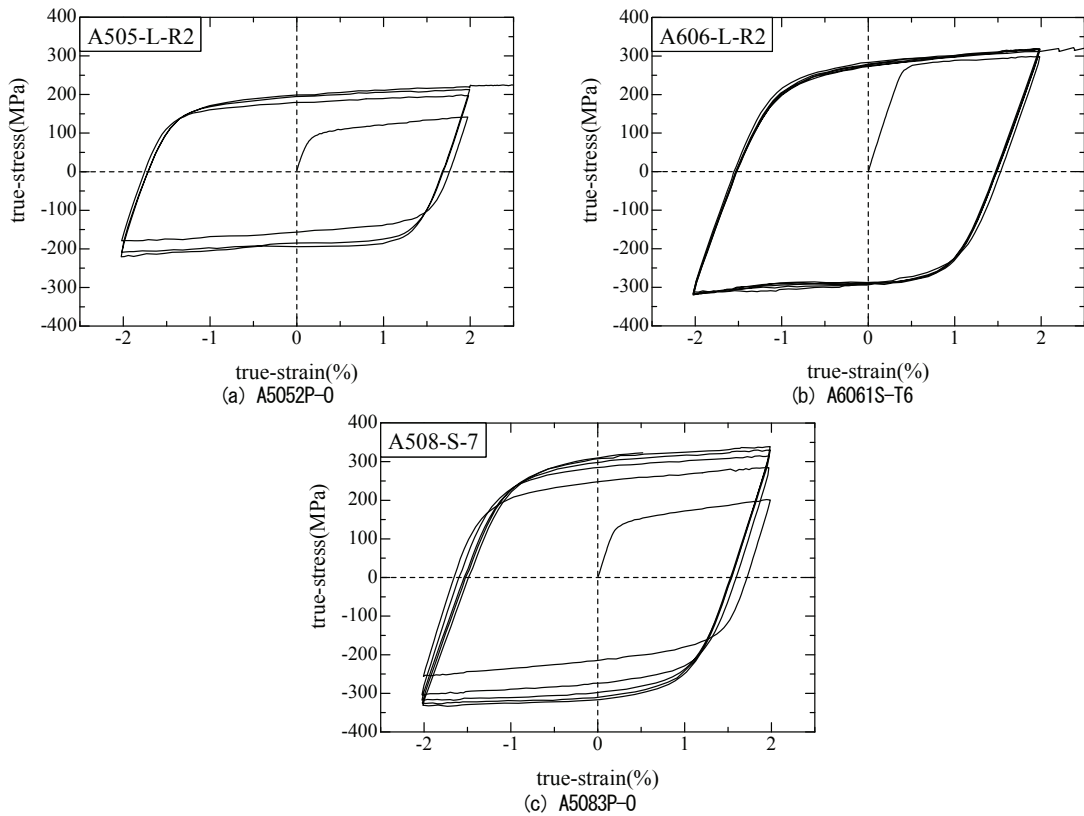


図-4 定振幅載荷実験結果

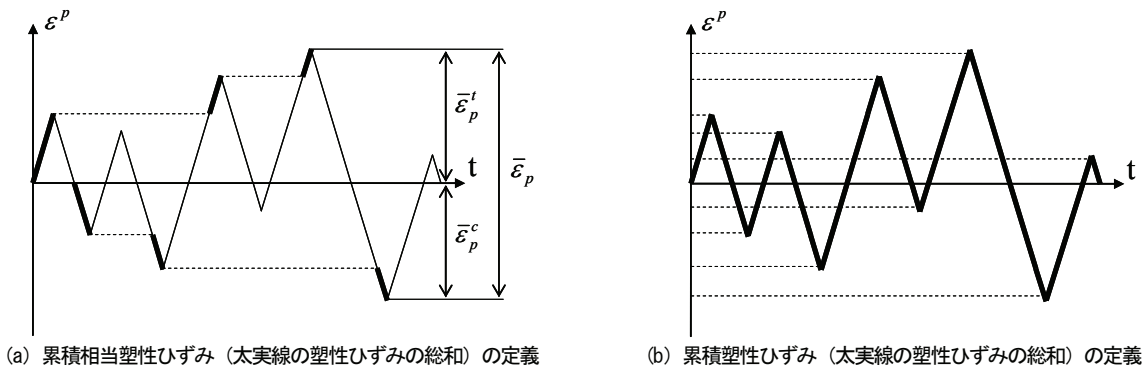


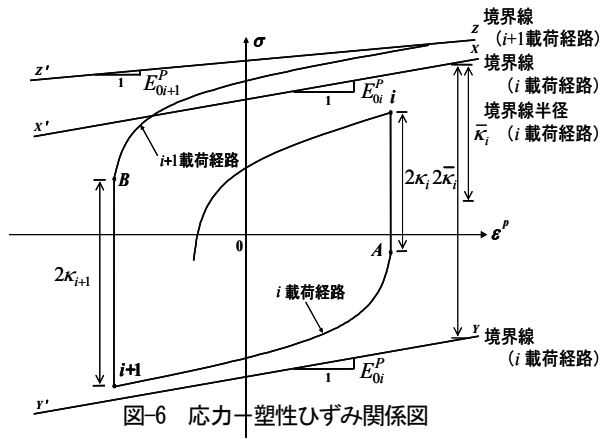
図-5 累積相当塑性ひずみおよび累積塑性ひずみの定義 (ϵ^p = 塑性ひずみ)

図-3 よりすべてのアルミニウムには降伏棚が存在しないことがわかる。A6061S-T6 は熱処理合金で、0.2%耐力は構造用鋼材 SM400 程度であるが、引張強度は SM400 ほど大きくなく、降伏比 (0.2%耐力と引張強度の比で、鋼材に倣って降伏比と称す) は 0.862 と調質高張力鋼¹⁴⁾ (HT690, HT780) 並である。また、伸びも調質高張力鋼と同程度である。A5052P-O は A5083P-O と同様に非熱処理合金で 0.2%耐力は 106MPa と非常に低いが、降伏比も 0.429 と低く、ひずみ硬化の影響が非常に大きいことがわかる。伸び能力は、3 種類のアルミニウム中最大である。この材料は、極低降伏点鋼 (LY100) とよく似た応力-ひずみ関係を持つが、伸び能力は LY100 の 1/2 以下である。A5083P-O は引張強度が 3 種類のアルミニウム中最大であるが、降伏比は最小である。また、A5083P-O および A5052P-O は同じ 5000 系アルミニウムであるが、表-2 より 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ 、引張強度 σ_u 、伸び δ_u 等の材料定数は異なる。

b) 定振幅載荷実験

図-4 (a), (b), (c) にそれぞれ A5052P-O, A6061S-T6, A5083P-O の定振幅載荷実験の応力-ひずみ関係を示す。A5083P-O の結果は文献 7) から採った。鋼材に対して開発された修正 2 曲面モデル^{9), 10)} によると、一定のひずみ幅で

繰り返し荷重を行うと、累積相当塑性ひずみ^{7),15)} (塑性ひずみ履歴において過去最大の塑性ひずみを越えた塑性ひずみの和で、図-5 (a) 参照) は変化しないので、後述の境界線間の距離 (境界線半径) は変化しないとされている。すなわち、定振幅荷重では、繰り返しひずみ硬化現象は生ぜず、いくら繰り返しても低サイクル疲労損傷が起こらない限り応力-ひずみ関係の形状は変化しないことになる。ところが、図-4 を見てみると、A6061S-T6 はその傾向にあるが、A5052P-O および A5083P-O は繰り返すごとに応力範囲が膨らみ、明らかに A6061S-T6 あるいは鋼材と違った挙動を示している。この事実は、アルミニウム A5083P-O および A5052P-O (5000 系アルミニウムと総称する) の繰り返し弾塑性挙動が、鋼材および A6061S-T6 (6000 系アルミニウムと総称する) のそれと大きく異なる点の一つであることがわかる。なお、5000 系アルミニウムの A5083P-O および A5052P-O は、応力上昇の度合いが異なり、A5052P-O の方が大きい。



(3) 繰り返し弾塑性構成則の提案

文献7)と同様、本研究でも、鋼材用に開発された一軸応力状態で適用可能な従来の修正2曲面モデル^{9),10)}にさらなる修正を施して2種類のアルミニウムに対する繰り返し弾塑性構成則を提案する。定振幅荷重実験で述べたように、繰り返し弾塑性挙動について、A5052P-O および A6061S-T6 はそれぞれ A5083P-O および鋼材によく似た挙動を示す。このことを踏まえて修正2曲面モデルのモデルパラメータの修正およびパラメータの決定を行う。主要なパラメータとして、a) 境界線半径、b) 弾性域の大きさ、c) 境界線の傾き、d) 形状パラメータ、e) 仮想境界線・記憶線があるが、後の3つのパラメータの決定方法は鋼材と同様であるので省略し、前2者について次に述べる。

a) 境界線半径に関するパラメータ

修正2曲面モデルでは、鋼材は引張および圧縮の両領域に位置する境界線間の距離 (以降、境界線間の距離の1/2である境界線半径 $\bar{\kappa}_i$ を用いる) は累積相当塑性ひずみの増大に伴って、拡大するとされている^{9),10)}。境界線とは、図-6の応力-塑性ひずみ関係において、弾性域終了点 (A または B 点) から始まる塑性域での応力-塑性ひずみ曲線が漸近する直線のことである。定振幅荷重では累積相当塑性ひずみの変化はないため、このモデルに従えば、境界線は移動せず、境界線半径は変化しないはずである。しかし、図-4を見ると、A6061S-T6 は鋼材と同様に境界線半径は変化しないが、A5052P-O は A5083P-O と同様繰り返すごとに応力は増大し、明らかに境界線半径は拡大している。したがって、累積相当塑性ひずみのみでは5000系のアルミニウムの挙動をうまく表現できないと考えられる。そこで、文献7)の考え方に従い、累積相当塑性ひずみと累積塑性ひずみ (塑性ひずみの絶対値の総和で、図-5 (b) 参照) の平均で表される次式の換算累積塑性ひずみを用いて、5000系のアルミニウムの境界線半径の算定式を求める。

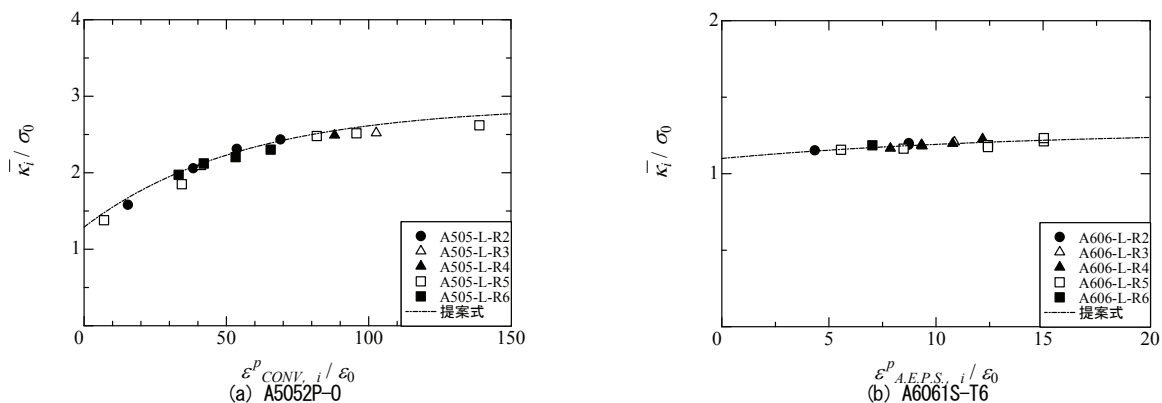


図-7 境界線半径と換算累積塑性ひずみまたは累積相当塑性ひずみの関係

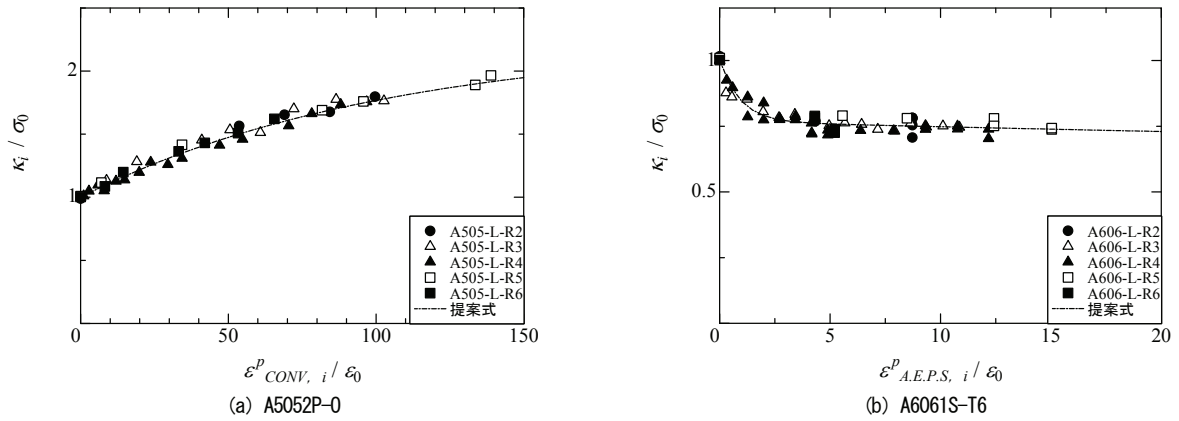


図-8 弾性域の大きさと換算累積塑性ひずみまたは累積相当塑性ひずみの関係

$$\varepsilon_{conv}^p = (\varepsilon_{A.P.S.}^p + \varepsilon_{A.E.P.S.}^p) / 2 \quad (3)$$

ここに、 ε_{conv}^p ：換算累積塑性ひずみ (Converted accumulated plastic strain)， $\varepsilon_{A.P.S.}^p$ ：累積塑性ひずみ (Accumulated plastic strain)， $\varepsilon_{A.E.P.S.}^p$ ：累積相当塑性ひずみ (Accumulated effective plastic strain) である。6000 系アルミニウムは鋼材と同様の累積相当塑性ひずみを用いる。5000 系、6000 系アルミニウムに対する境界線半径の算定式をそれぞれ次式のように定義する。

表-3 修正 2 曲面モデルパラメータ値

内容	パラメータ	パラメータ値			
		A5083P-O ^{*)}	A5052P-O	A6061S-T6	SM400 ^{**)}
(1) ヤング係数 (MPa)	E	7.18×10^4	7.02×10^4	7.00×10^4	引張試験により定める。 ($\sigma_0 = \sigma_y$)
(2) 初期硬化係数 (MPa)	E_{st}^p	3.86×10^4	3.82×10^4	6.40×10^4	
(3) 比例限度力 (MPa)	σ_0	118	84.8	259	
(4) ひずみ硬化開始点ひずみ	ε_{st}^p	1.64×10^{-3}	1.21×10^{-3}	3.70×10^{-3}	
(5) ポアソン比	ν	0.310	0.329	0.331	
(6) 引張強さ (MPa)	σ_u	366	247	334	
(7) 境界線の傾き	E_0^p / E	3.00×10^{-2}	3.08×10^{-2}	1.33×10^{-2}	8.96×10^{-3}
	$\bar{\omega}$	4.94×10^{-3}	1.17×10^{-2}	1.83×10^{-3}	1.31×10^{-2}
(8) 境界線半径	$\bar{\kappa}_0 / \sigma_0$	1.23	1.29	1.10	1.15
	$\bar{\zeta}$	1.75×10^{-2}	1.79×10^{-2}	7.18×10^{-2}	7.60×10^2
(9) 弾性域の大きさ	κ_∞ / σ_0	2.55	2.24	-	-
	\bar{c}	5.98×10^{-3}	9.64×10^{-3}	-	-
	a	-	-	-2.32×10^{-1}	-5.05×10^{-1}
	b	-	-	1.08	2.17
	c	-	-	8.49×10^{-3}	1.44×10
(10) 形状パラメータ	α	-	-	5.23×10^{-1}	1.91×10^{-1}
	e	-104	-20.0	193	500
	f / E_0^p	18.6	15.0	83.1	33.5

*) 文献 7) 参照, **) 文献 9) 参照

5000系アルミニウム

$$\frac{\bar{\kappa}_i}{\sigma_0} = \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} + \left(\frac{\bar{\kappa}_0}{\sigma_0} - \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} \right) \cdot \exp \left[-\bar{\zeta} \cdot \frac{\varepsilon_{CONV,i}^p}{\varepsilon_0} \right] \quad (4)$$

6000系アルミニウム (鋼材と同じ)

$$\frac{\bar{\kappa}_i}{\sigma_0} = \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} + \left(\frac{\bar{\kappa}_0}{\sigma_0} - \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_0} \right) \cdot \exp \left[-\bar{\zeta} \cdot \frac{\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p}{\varepsilon_0} \right] \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_0 =$ 比例限ひずみ ($=\sigma_0/E$)、 $\bar{\kappa}_i = i$ 荷重経路を決定するための境界線半径、 $\bar{\kappa}_0 =$ 初期の境界線半径 ($\varepsilon_{CONV,i}^p = 0$ 、あるいは $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p = 0$ の時の未知の境界線半径で実験データから定める)、 $\bar{\kappa}_\infty = \sigma_u$ ($\varepsilon_{CONV,i}^p = \infty$ 、あるいは $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p = \infty$ の時の境界線半径で引張強度に等しいとする)、 $\varepsilon_{CONV,i}^p =$ 初期から i 番目の荷重反転点までの塑性ひずみを基に算定した換算累積塑性ひずみ量、 $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p =$ 荷重の初期から i 番目の荷重反転点までの塑性ひずみを基に算定した累積相当塑性ひずみ量、 $\bar{\zeta} =$ 実験データから定められる未知量である。なお、式 (4) と式 (5) の相違は最終項のみである。

図-7 (a) に A5052P-O、(b) に A6061S-T6 の実験から得られた境界線半径をプロットした結果を示す。ただし、 i 荷重経路の塑性ひずみの大きさが3%以上になると応力-塑性ひずみ曲線が境界線に接すると仮定し、3%以上の塑性ひずみが得られている実験データのみを採用している。図-7 (a) では横軸に換算累積塑性ひずみ $\varepsilon_{CONV,i}^p$ 、図-7 (b) では累積相当塑性ひずみ $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p$ を採っている。縦軸および横軸は、それぞれ比例限度力 σ_0 、比例限ひずみ ε_0 で無次元化してある。非線形最小2乗法により式 (4) または式 (5) の2つの未知量 $\bar{\kappa}_0/\sigma_0$ および $\bar{\zeta}$ の値を求めると表-3に示したようになる。また、求められた提案式は、それぞれのグラフにプロットされている。

b) 弾性域の大きさに関するパラメータ

弾性域の大きさは、図-6の $2\kappa_i$ または $2\kappa_{i+1}$ である。過去の研究^{7,9,10)}によれば、境界線半径と同様、5000系アルミニウム A5083P-O に対しては換算累積塑性ひずみ (式 (3))、鋼材に対しては累積相当塑性ひずみが弾性域の大きさの変化を表す適切な量である。そこで、表-1の実験 [2] ~ [4] の結果から、除荷域での勾配 (ヤング係数) が除荷開始時での勾配に比べて1%変動した点を弾性域終了点 (塑性開始点) として弾性域の大きさを求め、A5052P-O では換算累積塑性ひずみ $\varepsilon_{CONV,i}^p$ 、A6061S-T6 では累積相当塑性ひずみ $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p$ に対してプロットした結果を、それぞれ図-8 (a)、図-8 (b) に示す。縦軸および横軸は、それぞれ比例限度力 σ_0 、比例限ひずみ ε_0 で無次元化してある。弾性域の大きさは、A5052P-O (図-8 (a)) では、換算累積塑性ひずみの増大に伴って増大する傾向が見られ、逆に A6061S-T6 (図-8 (b)) では、累積相当塑性ひずみの増大に伴い、減少していくことがわかる。これらの傾向は、A5052P-O は A5083P-O、A6061S-T6 は鋼材と同様である。したがって、5000系アルミニウムの弾性域の大きさの算定式は A5083P-O に対して提案した式⁷⁾、6000系アルミニウムに対しては鋼材と同様の式^{9,10)}を用いる。

5000系アルミニウム

$$\frac{\kappa_i}{\sigma_0} = \frac{\kappa_\infty}{\sigma_0} + \left(1.0 - \frac{\kappa_\infty}{\sigma_0} \right) \cdot \exp \left[-\bar{c} \cdot \frac{\varepsilon_{CONV,i}^p}{\varepsilon_0} \right] \quad (6)$$

6000系アルミニウム (鋼材と同じ)

$$\frac{\kappa_i}{\sigma_0} = \alpha - a \cdot \exp(-b \cdot \varepsilon_{A.E.P.S,i}^p \times 100) - (\alpha - a - 1) \cdot \exp(-c \cdot \varepsilon_{A.E.P.S,i}^p \times 100) \quad (7)$$

ここに、 $\kappa_i = i$ 荷重経路を決定するための弾性域の大きさ (半径)、 \bar{c} 、 a 、 b 、 c 、 $\alpha =$ 実験データから定められる未知量、 $\kappa_\infty =$ 実験データから定められる $\varepsilon_{CONV,i}^p = \infty$ の時の未知の弾性域の大きさである。式 (6)、(7) で $\varepsilon_{CONV,i}^p = 0$ あるいは $\varepsilon_{A.E.P.S,i}^p = 0$ の時の弾性域の大きさ κ_i は比例限度力 σ_0 となる。なお、式 (6) と (7) は異なった表現式となってい

るが、モデルパラメータの相互関係は文献7) に述べてある。

非線形最小2乗法により式(6)の未知量 κ_{∞}/σ_0 、 \bar{c} および式(7)の未知量 a 、 b 、 c 、 α の値を求めると表-3に示したようになる。また、求められた提案式は、それぞれのグラフにプロットされている。

c) まとめ

以上述べてきた2種類のアルミニウム(A5052P-O, A6061S-T6)の構成則に加え、A5083P-O、および鋼材の修正2曲面モデルの主要な項目の比較をまとめたものが表-4である。

表-4 3種類のアルミニウムと鋼材の修正2曲面モデルの主要な項目の比較

項目	アルミニウム			鋼材 (SM400)
	A5083P-O	A5052P-O	A6061S-T6	
境界線の傾き	累積塑性仕事量の増大に伴い減少			
境界線半径	換算累積塑性ひずみの増大に伴い拡大 (定振幅載荷でも拡大する)		累積相当塑性ひずみの増大に伴い拡大 (定振幅載荷では変化なし)	
弾性域の大きさ	換算累積塑性ひずみの増大に伴い増大		累積相当塑性ひずみの増大に伴い減少	
使用する繰り返し弾塑性構成則	修正を施した修正2曲面モデル ⁷⁾		従来の修正2曲面モデル ^{9),10)}	

(4) 実験結果と予測結果の比較

前節で構築した2種類のアルミニウムの繰り返し弾塑性構成則を用いて、ランダム載荷等の実験結果の予測を行う。表-3に、入力値(モデルパラメータ値)を示す。表中の(1)~(6)の量は引張試験により定められる定数であり、表-2と同じである。ただし、初期硬化係数 E_{σ}^p は、ヤング係数 E と応力-ひずみ関係の0.2%耐力での傾きの平均値とし、ひずみ硬化開始点ひずみ ϵ_{σ}^p は、降伏棚がないので比例限ひずみ ϵ_0 と同じである。参考までに、鋼材(SM400)に対する量も記載されている。

図-9にA5052P-O、図-10にA6061S-T6の実験結果と予測結果の比較を示す。それぞれ(a)変動振幅載荷、(b)定振幅載荷、(c)、(d)ランダム載荷の比較である。2種類のアルミニウムの実験結果と予測結果は細部において多少の差が見受けられるが、概ね構築したモデルは実験結果を高い精度で模擬しているがわかる。なお、A5083P-Oの予測結果と実験結果の比較⁷⁾は図-11に転載してある。

4. 結言

本研究では、履歴型制震ダンパーの一つである屈座拘束ブレース(BRB)の素材に、従来使用される鋼材に比べて、①軽量である、②耐食性に優れている、③加工性が良い、などの特色を有する構造用アルミニウム合金を使用することを試みた。はじめに、実験結果を補完する解析的研究に必要である繰り返し弾塑性構成則の開発を行った。そのために、2種類のアルミニウム(A5052P-O, A6061S-T6)の繰り返し引張-圧縮載荷の素材実験を実施し、既報⁷⁾のアルミニウムA5083P-Oの繰り返し弾塑性構成則と同様に、従来の修正2曲面モデル^{9),10)}にさらなる修正を加えた繰り返し弾塑性構成則の開発をまず行った。ここで、A5083P-O, A5052P-O(5000系アルミニウム)は非調質合金、A6061S-T6(6000系アルミニウム)は調質合金である。3種類のアルミニウムと鋼材に対する修正2曲面モデルの主要な項目の比較を表-4にまとめた。以下に、本研究のまとめと結論を述べる。

- 1) 5000系アルミニウムに対しては、従来の修正2曲面モデル^{9),10)}に用いられる累積相当塑性ひずみ(図-5(a))では境界線半径、弾性域の大きさの進展がうまく表現できないため、累積相当塑性ひずみと累積塑性ひずみ(図-5(b))の平均値で定義される換算累積塑性ひずみ(式(3))の概念を導入した。
- 2) 5000系アルミニウムは、鋼材と異なり、換算累積塑性ひずみの増大に伴い、境界線半径は拡大し、弾性域の大きさは増大する。この実験結果を考慮するため、式(4)および(6)の算定式を提案した。
- 3) 6000系アルミニウムは、繰り返し載荷に伴う境界線の傾きや半径の変動、弾性域の大きさの進展が鋼材と同様であり、従来の修正2曲面モデル^{9),10)}の考えがそのまま利用できる。(式(5)および(7))
- 4) 開発した繰り返し弾塑性構成則を用いて、A5052P-O, A6061S-T6のランダム載荷実験結果を予測したところ良好な結果を得た。(図-9, 図-10)
- 5) 3種類のアルミニウムと鋼材に適用可能な繰り返し弾塑性構成則をまとめて表-4に示す。

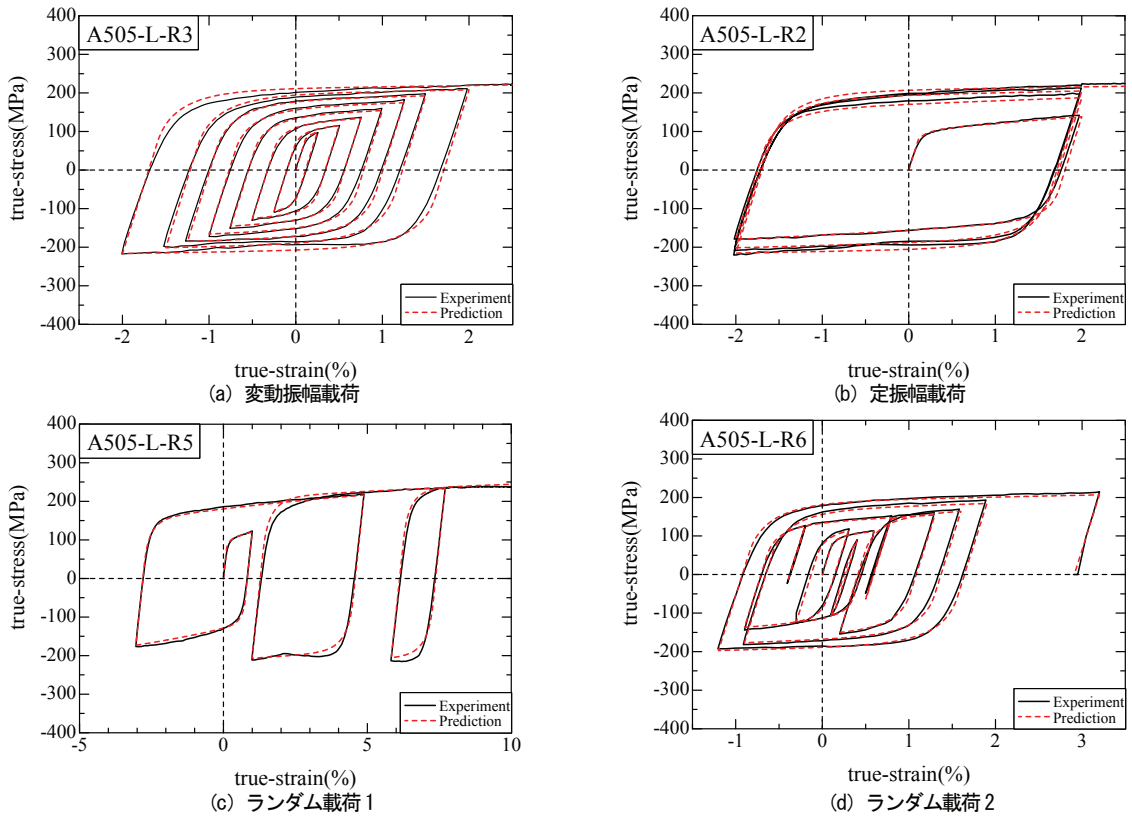


図-9 実験と予測の比較 (A5052P-0)

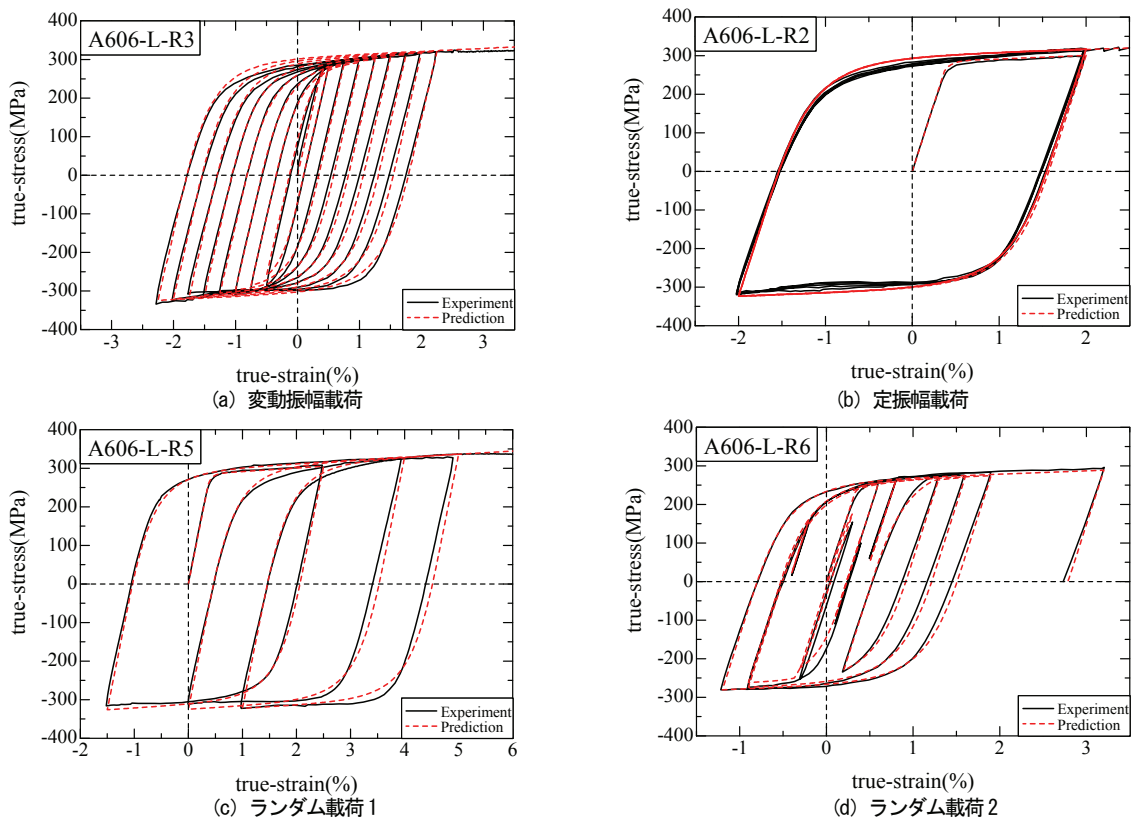


図-10 実験と予測の比較 (A6061S-T6)

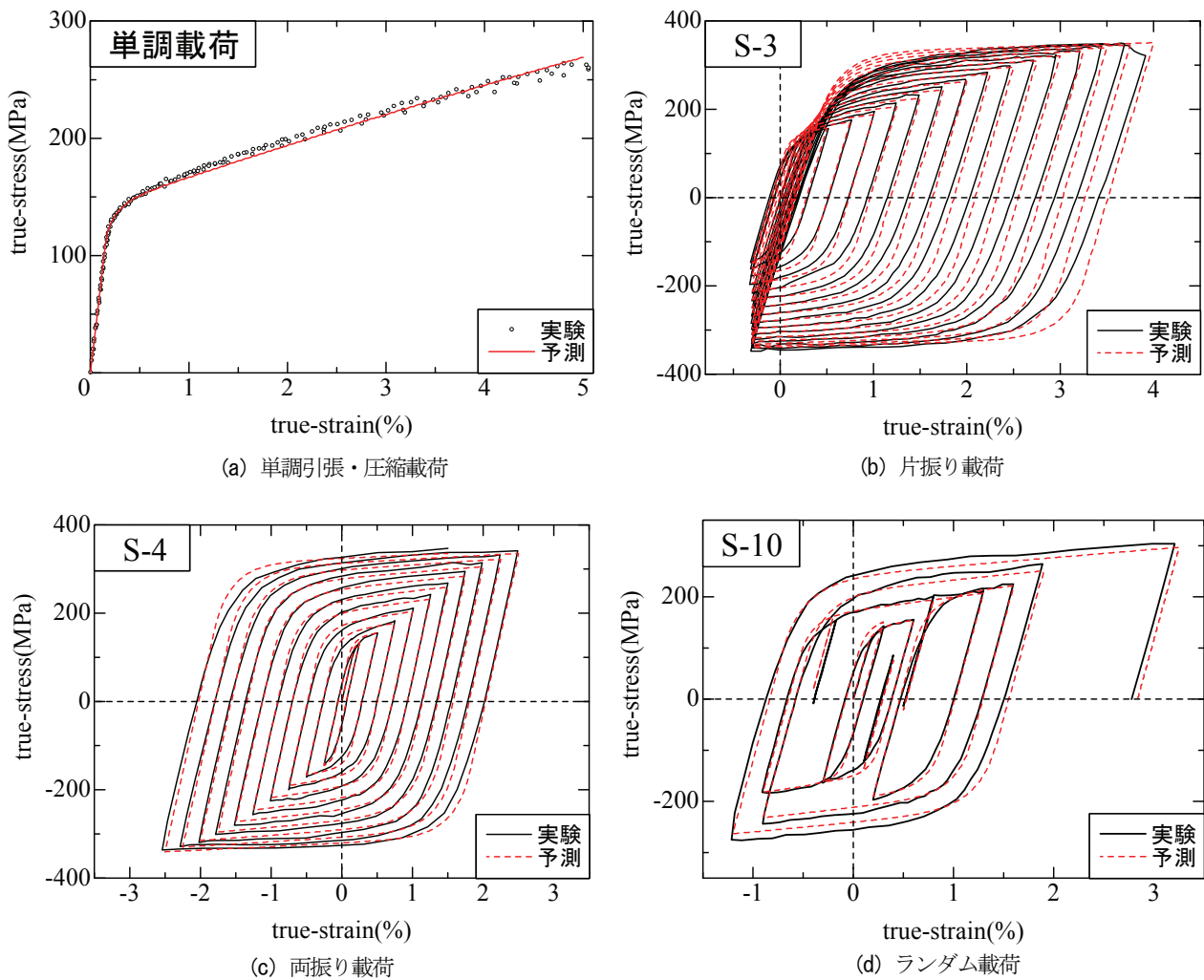


図-11 実験と予測の比較⁷⁾ (A5083P-0)

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) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編], 丸善, 2008.1.
- 3) 日本鋼構造協会: 鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上, JSSC テクニカルレポート No.85, 2009.9.
- 4) 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.
- 5) Rai, D. C. and Wallace, B. J.: Aluminum shear-links for enhanced seismic resistance, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.27, No.4, pp.315-342, 1998.
- 6) Di Sarno, L. and Elnashai, A. S.: Special metals for seismic retrofitting of steel buildings, *Progress of Structural Engineering and Materials*, Vol.5, pp.60-76, 2003.
- 7) 宇佐美勉, 倉田正志, 佐藤崇, 葛西昭, 萩澤亘保: 構造用アルミニウム合金の繰り返し弾塑性構成則, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.980-993, 2009.10.
- 8) 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, No.2, pp.356-367, 2010.6.
- 9) 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り返し弾塑性モデル, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.1-14, 1991.3.
- 10) 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, pp.179s-188s, 1992.1.
- 11) 宇佐美勉: 高機能制震ダンパーの開発研究 (特別講演), 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.

- 12) 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, 土木学会, Vol.55A, pp.719-729, 2009.3.
- 13) 日本アルミニウム協会: アルミニウムハンドブック (第7版), 昭栄社, 2007.1.
- 14) 本州四国連絡橋公団: HBS 鋼材規格 (HBS G3102-1978), 1978.10.
- 15) 皆川勝, 西脇威夫, 増田陳紀: 塑性流れ域における構造用鋼材の単純繰り返し挙動の推定, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.35A, pp.53-65, 1989.3.