

押出しアルミニウム部材の圧潰解析のための 直交異方性損傷モデルの開発

Development of Orthotropic Damage Model for Crush Simulation of Extruded Aluminum Member

前 博 行*
Hiroyuki MAE

岸 本 喜久雄**
Kikuo KISHIMOTO

要 旨

押出しアルミニウム部材は押出方向と押出垂直方向とで機械特性が大きく異なることが知られる。負荷荷重の方向が一様でない場合における押出しアルミニウム部材のエネルギー吸収性能を評価する際には、それら機械特性の押出方向依存性を考慮する必要がある。そこで本研究では、直交異方性を有する損傷モデルを用いた解析手法を提案することを目的とし、まず押出方向と押出垂直方向とから切出した試験片を用いて引張、3点曲げ、混合モード破壊試験をおこない、直交異方性の影響を把握した。つぎに、簡便な直交異方性損傷モデルを用いて、押出しアルミニウム部材の圧潰挙動をシミュレートし、実験と比較した。その結果、本手法が有用であることが確認された。

ABSTRACT

It is well known that an extruded aluminum member has the different mechanical characteristics between the axial direction and the normal direction. It is important to consider the extruded direction dependence of mechanical characteristics in evaluating the energy absorption performance of the extruded aluminum member at non-uniform loading directions. For simulating such an orthotropic mechanical characteristic, the simple orthotropic damage model was proposed with the simulation method. The test specimens were cut out of the axial aluminum member in the axial and normal directions. The tensile, three-point bending and mixed-mode fracture tests were conducted in order to obtain the orthotropic characteristics. The simple orthotropic damage model was proposed and applied to the crush behavior of the extruded aluminum member. The load displacement curve and damage zone development were compared with those obtained by the experiments. As a result, the usefulness of the orthotropic damage model and simulation methods were validated.

1. まえがき

一般に、押出しアルミニウム部材は押出し方向と押出し垂直方向とで、機械的特性が大きく異なることが知られており、負荷方向がさまざまな場合において、押出しアルミニウム部材のエネルギー吸収性能を評価する際には、これらを考慮したシミュレーション技術の確立が必要と考えられる。過去、押出しアルミニウム部材の衝撃エネルギー吸収特性や解析手法に関する研究が数多くなされてきた。さまざまな荷重荷重条件におけるエネルギー吸収特性評価^{(1)・(6)}や、押出しアルミニウム部材の直交異方性を考慮した解析手法^{(7)・(9)}などがあげられる。しかしながら、直交異方性を考慮したものについては、微小変形を仮定したものに限られていた。

そこで本研究では、押出しアルミニウム部材において、直交異方性を考慮した簡便な損傷モデルを用いた解析手法を提案することを目的とする。まず、押出しアルミニウム部材の押出方向と押出垂直方向とから切出した試験片を用いて引張、3点曲げ試験をおこない、機械的特性の直交異方性を把握する。また、押出しアルミニウム部材の圧潰変形時のき裂発生箇所は、複雑な応力状態を示すことが考えられるため、混合モード破壊靱性試験をおこない、破壊モードが混在する状況の応力拡大係数を測定する。それに基づき、引張、3点曲げ試験で測定された直交異方性について考察をおこない、材料モデルを提案する。最後に、簡便な直交異方性損傷モデルを用いて、押出しアルミニウム部材の圧潰試験の数値シミュレーションをおこなう。そして、実験と解析結果を比較し、本手法の妥当性について検討する。

* 四輪開発センター

** 東京工業大学

2. 材料構成則

本研究の材料モデルは簡単のため、式(1)に示す線形弾塑性モデルを用い、模式図を Fig. 1 に示す。

$$\sigma = a + b\bar{\varepsilon}_p \quad (1)$$

ここで、 a は降伏応力、 b は加工硬化係数であり、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみである。なお、解析は平面応力条件のもとでおこなわれることから、相当塑性ひずみは式(2)として計算している。

$$\bar{\varepsilon}_p^2 = 4/3(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}^2) + 1/3(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) \quad (2)$$

ここで、 ε_{ii} 各方向の塑性ひずみ、 ε_{ij} はせん断塑性ひずみである。

材料の応力ひずみ関係を全ひずみ理論に基づき以下の式を用いて計算をおこなう。

$$\varepsilon_{all} = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (3)$$

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon_e \quad (4)$$

$$\varepsilon_p = (\sigma - a)/b \quad (5)$$

ここで、 ε_{all} はひずみベクトル、 σ は応力テンソル、 E は弾性マトリックスである。

損傷モデルとしては、Johnson と Cook により提案されている等方性線形累積型損傷モデル⁽¹⁰⁾を参考に、以下に示す直交異方性損傷則を提案する。

$$D = \int_{\bar{\varepsilon}_1}^{\bar{\varepsilon}_2} 1/\bar{\varepsilon}_p d\bar{\varepsilon}_p \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = 2/\sqrt{3} \{c_{1xx}\varepsilon_x^2 + c_{1xy}\varepsilon_x\varepsilon_y + c_{1yy}\varepsilon_y^2 + 1/4(c_{1xy}\varepsilon_{xy}^2 + c_{1yz}\varepsilon_{yz}^2 + c_{1zx}\varepsilon_{zx}^2)\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}_2 = 2/\sqrt{3} \{c_{2xx}\varepsilon_x^2 + c_{2xy}\varepsilon_x\varepsilon_y + c_{2yy}\varepsilon_y^2 + 1/4(c_{2xy}\varepsilon_{xy}^2 + c_{2yz}\varepsilon_{yz}^2 + c_{2zx}\varepsilon_{zx}^2)\}^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 D は直交異方性損傷パラメータであり、 $\bar{\varepsilon}_1$ は損傷累積開始の相当塑性ひずみであり、 $\bar{\varepsilon}_2$ は損傷累積終了の相

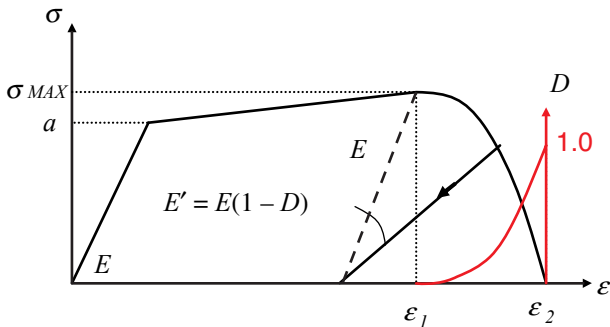


Fig. 1 Illustration of material model with damage

当塑性ひずみである。また、 c_{ijkl} と c_{2ijkl} は直交異方性パラメータである。各方向のひずみ成分に、それぞれ異なる重みを加えることによって、全体のひずみ量に対しての影響度を調整することが可能となる。これらの相当ひずみ量に対する寄与度を制御することによって、現象論的に直交異方性を取り扱うことが可能となる。本解析では、 D が 1 に達すると材料が破壊するものとし、シェル要素における板厚方向に分布した積分点の中で、 D が 1 に達するとその積分点での応力テンソルが 0 と計算される。また、シェル要素のすべての積分点において、 D が 1 に達すると、シェル要素を削除するという多層積分点判定手法を用いている。これにより、き裂の発生と進展を簡易的に表現することが可能となる。

有限要素解析は、汎用陽解法ソルバー RADIOSS Ver.4.4 においてユーザーサブルーチンとして材料則を組み込むことで、計算をおこなっている。Fig. 2 に 3 点曲げ試験の有限要素モデルを示し、Fig. 3 に押し出しアルミニウム部材の圧潰試験の有限要素モデルを示す。有限要素モデルは Belytschko のシェル要素を用いており、板厚方向を 5 点の積分点によって表現している。

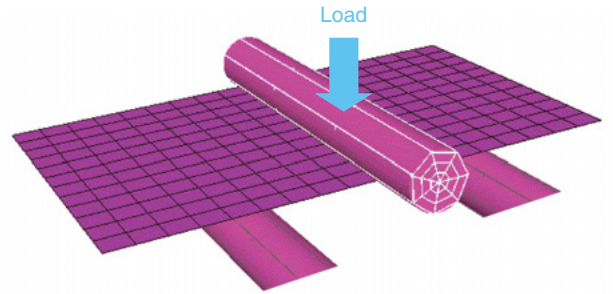


Fig. 2 Finite element model of three-point bending test

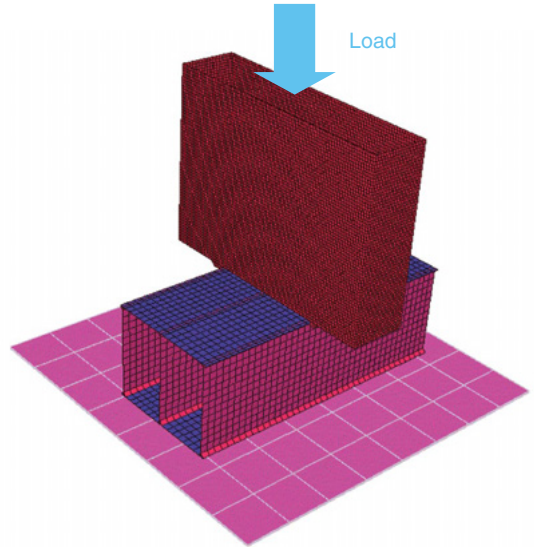


Fig. 3 Finite element model of aluminum extrusion crush test

Table 1 Chemical composition of A6061 (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn
0.40-0.80	0.7	0.05-0.20	0.15
Mg	Cr	Zn	Ti
0.08-0.12	0.04-0.35	0.25	0.15

3. 実験手法

3.1. 供試材料および試験片

実験に用いた材料は A6061-T6 アルミニウム合金製の押出成型材料である。厚さ 2 mm と 3mm の薄板から構成される薄肉閉断面矩形管より、押出方向と押出垂直方向とで引張試験片、3点曲げ試験片、混合モード試験片を切り出し加工した。供試材の化学成分を Table 1 に示す。本研究では、延性的な材料と脆性的な材料挙動を把握するため、Mg と Si の配合量が異なる 2 種類の組成を試験した。各組成は、Mg と Si を少なめに含む組成 A と、Mg と Si を多めに含む組成 B を用いた。時効条件は 190℃ を 3 時間とした。引張試験片は厚さ 2mm の薄板部分から切り出した JIS Z2201 14B 号に準拠したものを用い、Fig. 4 に試験片形状を示す。

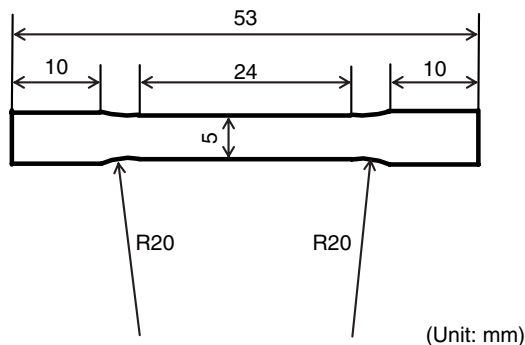


Fig. 4 Schematic illustration of tensile test specimen

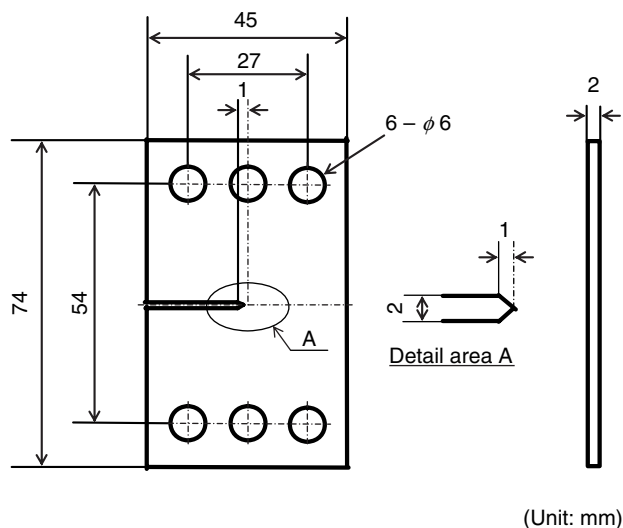


Fig. 5 Schematic illustration of mixed-mode fracture tests specimen

曲げ試験片は長方形薄板(L=40, w=20, t=2 mm)を用いた。また、Richard により提案されている⁽¹¹⁾混合モード破壊試験片の形状を Fig. 5 に示す。予き裂は JSME S001-1992 に準拠し疲労試験によって導入された。押し出しアルミニウム部材の圧潰試験片は、薄肉閉断面矩形管から 200 mm の長さに取り出したものを用いた。

3.2. 実験装置および方法

3.2.1. 引張、3点曲げ試験について

本研究では、準静的応力ひずみ挙動を測定するため、万能試験機(島津製作所製、定格容量 5kN)を使用した。引張速度は 0.5 mm/min とした。3点曲げ試験においては、圧子速度を 50 mm/min とし、圧子での荷重と変位量を測定した。3点曲げ試験装置の写真を Fig. 6 に示す。

3.2.2. 混合モード破壊試験について

引張、3点曲げ試験と同じ万能試験機において、Fig. 7に示される混合モード破壊試験ジグを用いて、破壊試験をおこなった。き裂進展開始時のき裂先端部の応力状態を評価する方法として、応力拡大係数 K を用いた。添え字 I と II はそれぞれ引張支配による破壊形態であるモード I とせ

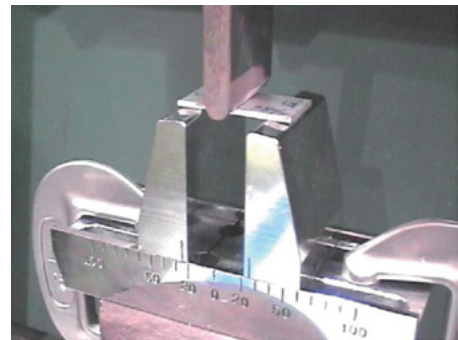


Fig. 6 Photograph of bending test device

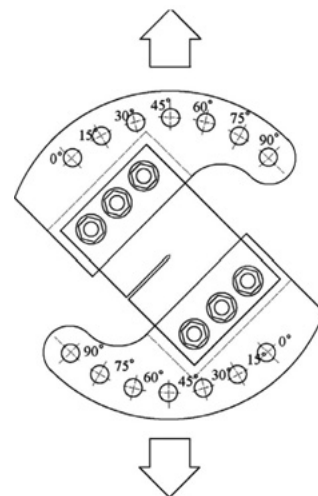


Fig. 7 Schematic illustration of mixed-mode fracture test device

ん断支配による破壊形態であるモード II を意味する。この係数は Richard と Benitz による有限要素解析解が以下の式で示されている⁽¹²⁾。

$$K_{I,II} = F_{I,II} P / WB \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

ここで、 W は試験片幅、 B は試験片厚さ、 a は予き裂長さ、 P は負荷荷重である。 F_I 、 F_{II} は荷重軸角度および予き裂長さによって定まる補正係数である。

試験中は予き裂先端をビデオマイクロスコープ(スカラー社製、VMS-3000)で観察し、き裂の発生と進展を測定した。Fig. 8 に試験装置の概観写真を示す。

3.2.3. アルミニウム部材の圧潰試験について

部品レベルの試験として、アルミニウム部材の圧潰破壊試験をおこなった。本実験の概観写真を Fig. 9 に示す。アルミニウム部材は鉄製のジグに固定されており、四角柱形状の圧縮ジグを 100 mm/min で移動させ、アルミニウム部材を圧潰させた。その際にホームビデオカメラによって、部材の変形ならびにき裂の進展状況を撮影した。



Fig. 8 Photograph of mixed-mode fracture test device



Fig. 9 Photograph of crush test device

4. 結果および考察

4.1. 引張試験結果

引張試験の結果から得られた組成 A と組成 B の機械的特性を Table 2 に示す。組成 A の応力ひずみ関係を Fig. 10

Table 2 Mechanical properties

	Composition A		Composition B	
	Axial	Normal	Axial	Normal
Elastic modulus (MPa)	70.5	70.8	71.4	70.1
Yield stress (MPa)	278	270	303	291
Tensile strength (MPa)	316	311	336	331
Rupture stress (MPa)	270	264	296	308

に、組成 B の応力ひずみ関係を Fig. 11 に示す。両組成とも、応力値においては、押出し方向と垂直方向とで異方性がわずかに確認されたが、顕著な違いは観察されなかった。また、降伏応力や引張強度の直交異方性は無視できると考えられる。一方で、組成 A の破断ひずみは組成 B の破断ひずみよりも大きな値を示し、組成 A が組成 B よりも延性的な挙動を示した。また、組成 A と組成 B の応力値を比較すると、Mg と Si を多く含む組成 B の方が大きな応力値となった。

4.2. 3 点曲げ試験結果

Fig. 12 と 13 に組成 A、組成 B の曲げ試験での荷重変位関係を示す。両組成とも、押出し方向の破断変位が押出し垂直方向よりも大きい傾向となり、引張試験では観察されなかった直交異方性が曲げ試験では顕著に現れた。また、組成 A は Mg, Si を多く含む組成 B よりも延性的な挙動を示した。一般に、Mg, Si 系アルミニウム合金においては、Si 等の添加粒子が起点となって、き裂が発生することが報告さ

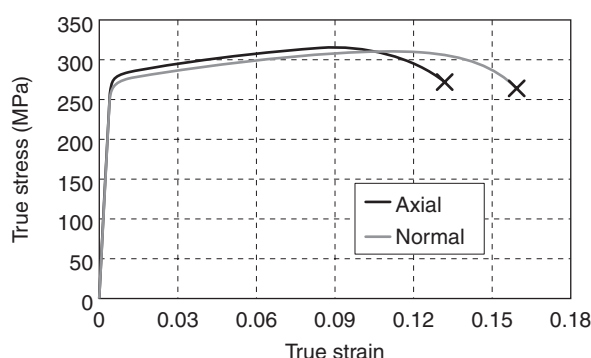


Fig. 10 Stress-strain curves of composition A

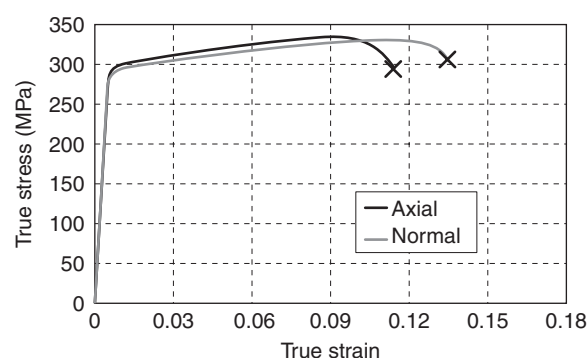


Fig. 11 Stress-strain curves of composition B

れており^{(13)・(15)}、本研究においても同様の結果を得た。Fig. 14 は組成Aの3点曲げ試験後の試験片裏面の写真であり、図中に示される領域を電子顕微鏡(JEOL製, JSM-5300T)により観察した。Fig. 15 と 16 には組成Aの押し出し方向と押し出し垂直方向試験片の曲げ試験後の試験片裏面の電子顕微鏡写真である。Fig. 15に示される通り、押し出し方向試験片の破壊形態は最外層からの引張による破壊であるが、微小なき裂が数多く試験片表面に観察された。一方、押し出し垂直方向試験片においては、破壊面がせん断帯に沿って板厚方向に傾いて形成されており、ひずみの局所化が起きていることが明らかになった。これらの破壊形態の違いが、3点曲げ試験で観察された直交異方性の要因と考えられる。

4.3. 混合モード破壊試験結果

本試験で得られた荷重変位関係とき裂開始点から、き裂先端の応力拡大係数を得た。各組成の応力拡大係数の分布図を Fig. 17 と 18 に示す。組成Aと組成Bとを比較する

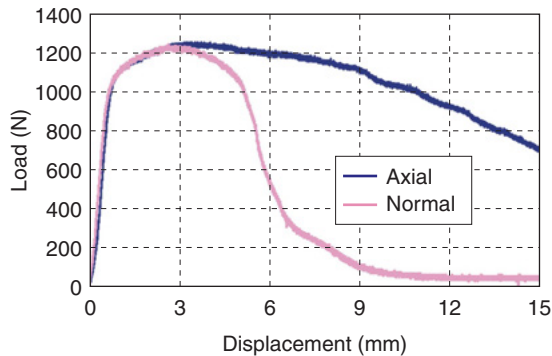


Fig. 12 Load displacement histories of composition A

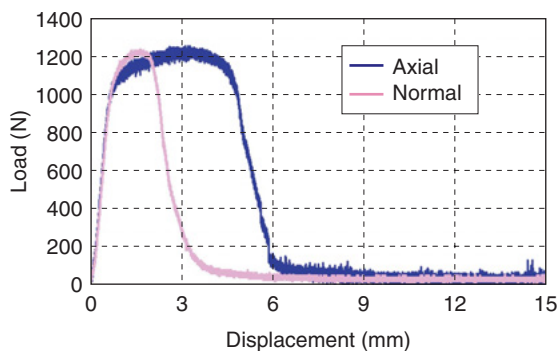


Fig. 13 Load displacement histories of composition B

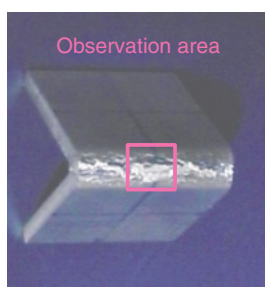


Fig. 14 Specimen of composition A after bending test

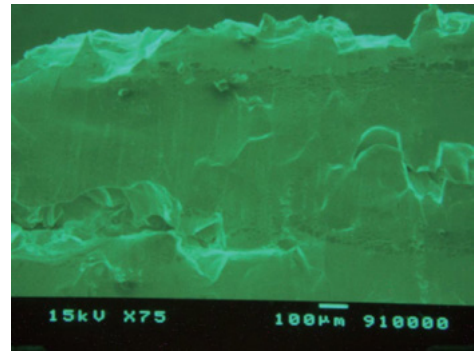


Fig. 15 SEM photograph of composition A cut in the axial direction after bending test

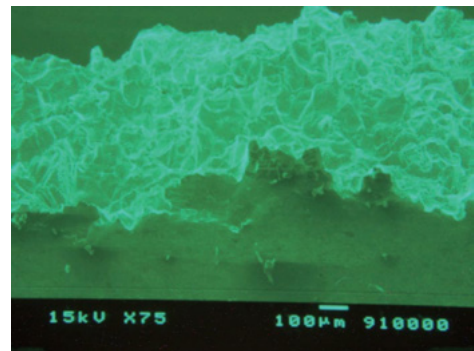


Fig. 16 SEM photograph of composition A cut in the normal direction after bending test

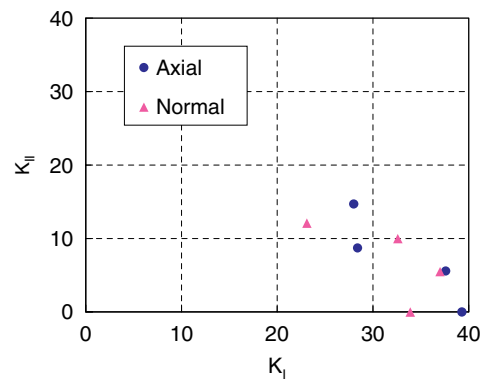


Fig. 17 Mixed-mode stress intensity factors of composition A

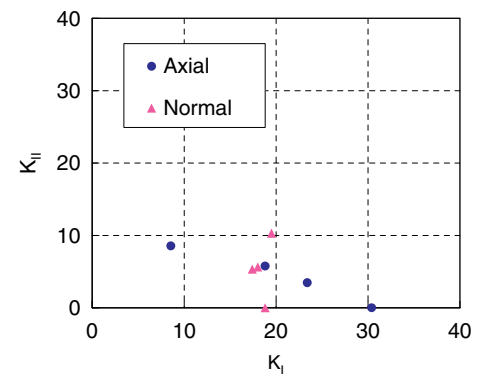


Fig. 18 Mixed-mode stress intensity factors of composition B

と、応力拡大係数は全体的に組成Aが組成Bよりも大きな値を示しており、組成Aが組成Bよりも延性的な破壊挙動を示すという3点曲げ試験結果を裏付ける結果となった。また、各々の組成における押し出し方向と垂直方向での応力拡大係数を比較してみると、モードI応力状態では、押し出し方向における応力拡大係数の方が押し出し垂直方向よりも大きくなっているが、モードIIの成分が増えるに伴い、押し出し方向と垂直方向での応力拡大係数の差は小さくなっていく傾向となった。3点曲げのき裂開始点の応力状態は、モードIに近いのに対して、引張試験時のき裂開始点での応力状態は、純粋なモードIというよりも、せん断支配のモードIIが支配的な状態と考えられ、それによる混合モード破壊を起こしたと推測される。これら実験観察結果から、直交異方性損傷モデルの材料定数を決める際には、直交異方性が顕著に現れる3点曲げ試験結果に基づくのが良いということがわかった。

4.4. アルミニウム部材の圧潰試験結果

Fig. 19は圧潰試験での圧縮荷重変位曲線を示す。3点曲げ試験と同様に、組成Aの最大荷重値が組成Bよりも小さい値を示した。また、試験後のアルミニウム部材の写真をFig. 20と21に示す。組成Aにおいては、き裂は部材端部まで進展しなかったが、組成Bにおいては、き裂が部

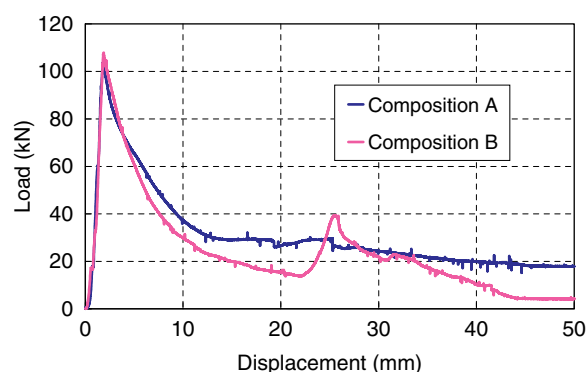


Fig. 19 Load displacement histories of crush tests

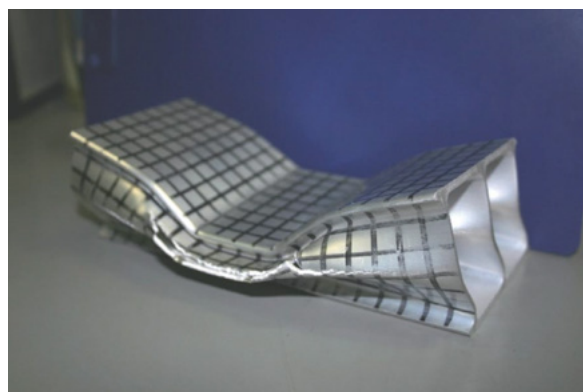


Fig. 20 Composition A after crush test

Table 3 Material parameters

	Composition A	Composition B
Elastic modulus (GPa)	71	71
Yield stress (MPa)	290	310
Strain hardening parameter	420	420
ϵ_1	0.19	0.09
ϵ_2	0.27	0.095
C_{1xx}	0.401	0.184
C_{1xyy}	0.633	0.429
C_{1yy}	1	1
C_{1xy}	1	1
C_{1yz}	1	1
C_{1zx}	1	1
C_{2xx}	0.071	1
C_{2xyy}	0.267	1
C_{2yy}	1	1
C_{2xy}	1	1
C_{2yz}	1	1
C_{2zx}	1	1

材端部まで達した。以上から、組成Aは延性的な破壊挙動を示したのに対し、組成Bは脆性的な破壊挙動を示したと考えられる。

4.5. 3点曲げ試験と計算の比較

本提案の材料構成則において、異方性パラメータを除くすべての材料定数は引張試験結果に基づき決定された。また、異方性パラメータにおいては、3点曲げ試験における荷重変位特性とシミュレーション結果とが類似するようなパラメータ群を求めた。Table 3に組成AとBで用いた材料定数を示し、Fig. 22と23に、同定された定数を用いた3点曲げ試験のシミュレーション結果と実験結果を示す。提案する直交異方性損傷モデルを用いることによって、3点曲げ試験において観察された直交異方性が、組成AとBにおいて精度良く表現されることが明らかになった。また、直交異方性を考慮せず引張試験結果のみによって材料定数を決定した場合は、実験結果の再現性が低い結果となった。

4.6. アルミニウム部材圧潰試験と計算の比較

アルミニウム部材の圧潰試験結果と、同定されたパラメータ群を用いておこなった数値シミュレーション結果と

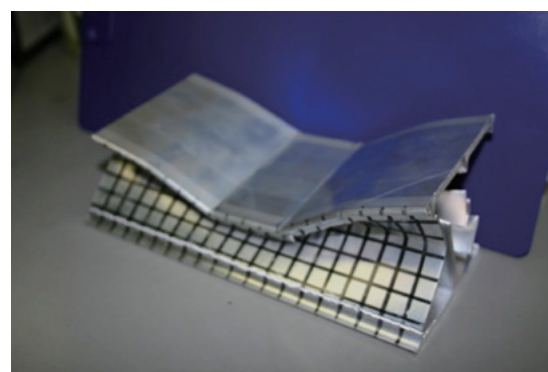


Fig. 21 Composition B after crush test

の比較を Fig. 24 と 25 に示す。組成 A と B どちらにおいても、荷重変位特性は、従来の直交異方性を考慮しないシミュレーション結果よりも、最大荷重到達後の荷重変位特性において、シミュレーション精度向上が確認された。また、Fig. 26 に計算された組成 A の相当塑性ひずみ分布および変形図を示す。Fig. 27 は、圧潰試験後のアルミニウム部材の写真を示す。Fig. 26 と 27 に示されるように、アルミニウム部材の変形モードおよびき裂発生箇所も精度良く計算されている。これは、最大荷重到達以降の、き裂の発生および進展を本研究の直交異方性損傷モデルを用いることで計算できることを示唆している。

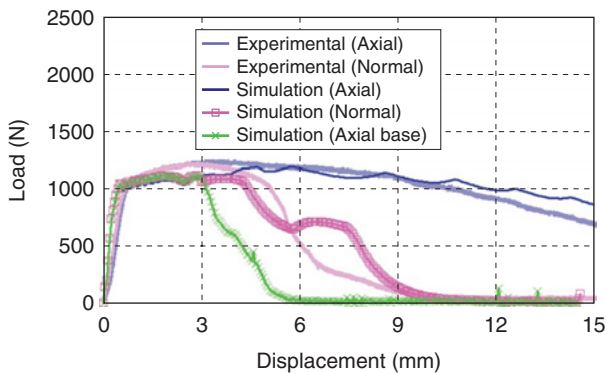


Fig. 22 Bending load displacement curves of composition A

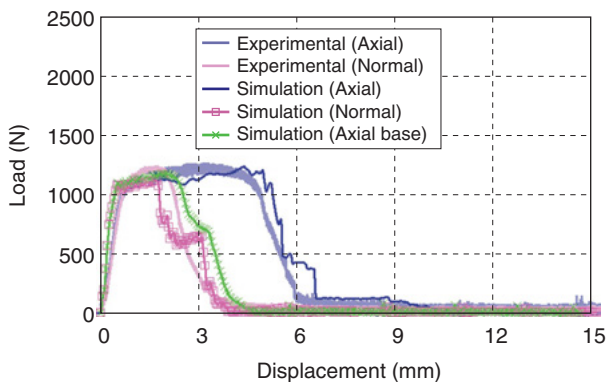


Fig. 23 Bending load displacement curves of composition B

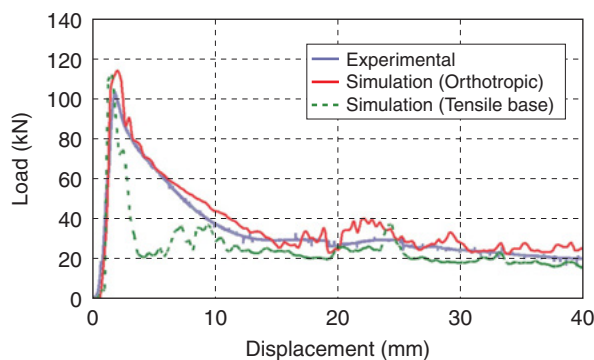


Fig. 24 Load displacement histories of composition A

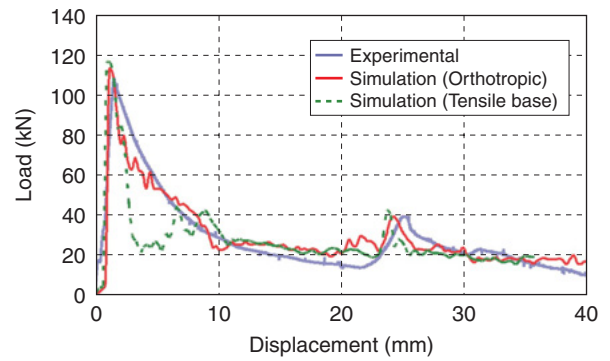


Fig. 25 Load displacement histories of composition B

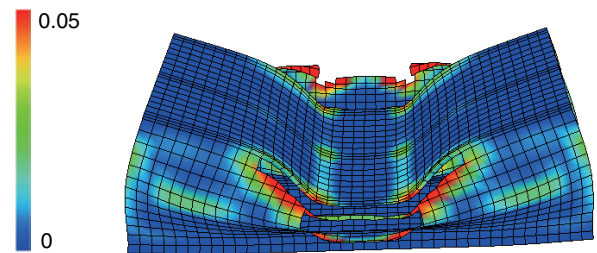


Fig. 26 Equivalent plastic strain distribution of composition A

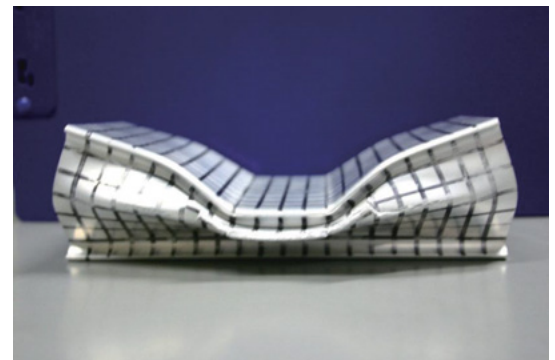


Fig. 27 Photographs of composition A member after crush test

5. まとめ

押し出しアルミニウム部材の圧潰挙動を予測するため、簡便な直交異方性損傷モデルを提案した。引張試験結果に基づき弾塑性構成則の材料定数を同定し、3点曲げ試験結果を用いて直交異方性損傷モデルの材料定数を同定した。同定された材料定数を用いて、アルミニウム部材の圧潰試験を有限要素解析した結果、荷重変位関係と損傷域ともに実験結果と良い一致を示した。以上から、押し出しアルミニウム部材の圧潰時における変形や荷重を計算するためには、直交異方性損傷則が重要であることが示唆された。また、本研究における解析手法が押し出しアルミニウム部材の圧潰挙動解析において有用であることが示された。

参考文献

- (1) Langseth, M., Lademo, O. G.: Tensile and torsion testing of AA6060-T4 and T6 aluminum alloys at various strain rates, Technical Report, Norwegian University of Science and Technology(1994)
- (2) Langseth, M., et al.: Crashworthiness of aluminum extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity, International Journal of Impact Engineering, Vol.22, p.829-864(1999)
- (3) Reyes, A., et al.: Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.44, p.1965-1984(2002)
- (4) Reyes, A., et al.: Square aluminum tubes subjected to oblique loading, International Journal of Impact Engineering, Vol.28, p.1077-1106(2003)
- (5) Reyes, A., et al.: Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study, International Journal of Solids and Structures, Vol.41, p.1645-1675(2004)
- (6) Kokkula, S., et al: Offset impact behavior of bumper beam-longitudinal systems: numerical simulations, International Journal of Crashworthiness, Vol.11, No.4, p.317-336(2006)
- (7) Lademo, O. G., et al.: An evaluation of yield criteria and flow rules for aluminum alloys, International Journal of Plasticity, Vol.15, p.191-208(1999)
- (8) Clausen, A. H., et al: Stretch bending of aluminum extrusions for car bumper, Journal of Materials Processing Technology, No.102, p.241-248(2000)
- (9) Lademo, O. G., et al.: Modeling of plastic anisotropy in heat-treated aluminum extrusions, Journal of Materials Processing Technology, Vol.125-126, p.84-88(2002)
- (10) Johnson, G. R., Cook, W. H.: Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.1, p.31-48(1985)
- (11) Richard, H. A.: VDI FORSCHUNGSHEET 631, Seiten, p.1-60(1985)
- (12) Richard, H. A., Benitz, K.: A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics, International Journal of Fracture, Vol.22, p.55-58(1983)
- (13) Wang, Q. G.: Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.34, No.12, p.2887-2899(2003)
- (14) Naka, T., Yoshida, F.: Deep drawability of type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed, Journal of Materials Processing Technology, Vol.89-90, p.19-23 (1999)
- (15) Gokhale, A. M., Patel, G. R.: Analysis of variability in tensile ductility of a semi-solid metal cast A356 Al-alloy, Materials Science and Engineering A, Vol.392, p.184-190 (2005)

■著 者■



前 博行



岸本喜久雄