

直交異方性損傷モデルを用いた押出アルミニウム部材の圧潰解析

CRUSH SIMULATION OF EXTRUDED ALUMINUM MEMBER WITH ORTHOTROPIC DAMAGE MODEL

前 博行¹⁾, 大宮 正毅²⁾, 岸本 喜久雄³⁾

Hiroyuki MAE, Masaki OMIYA and Kikuo KISHIMOTO

- 1) (株)本田技術研究所 (〒321-3393 芳賀郡芳賀町下高根沢 4630, Email: hiroyuki_mae@n.t.rd.honda.co.jp)
 2) 慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, Email: oomiya@mech.keio.ac.jp)
 3) 東京工業大学理工学研究科 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, Email: kkishimo@mep.titech.ac.jp)

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 orthotropic mechanical characteristics in evaluating the crash worthiness 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 and three-point bending 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 was validated.

Key Words: Extruded Aluminum Member, Orthotropic Damage Model, Crush Worthiness

1. はじめに

近年、押出しアルミニウム部材は、車体軽量化による燃費低減のため、車体中使用される機会が増えてきている。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。さまざまな荷重負荷条件におけるエネルギー吸収特性評価[1-4]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[5-7]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し方向と押出し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。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。

2. 材料構成則

本研究で扱う材料の応力-ひずみ関係には、全ひずみ理論に基づき、材料の損傷を考慮した以下の構成式を適用した。

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_e + \bar{\epsilon}_p \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = E(1 - D)\bar{\epsilon}_e \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}_p = (\bar{\sigma} - \sigma_y)/b \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 E は弾性係数、 σ_y は降伏応力、 b は加工硬化係数であり、 D は直交異方性損傷パラメータである。また、 $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ、 $\bar{\epsilon}_e$ は相当弾性ひずみ、 $\bar{\epsilon}_p$ は相当塑性ひずみであり、平面応力条件下で解析を行うため、次式を用いて計算した。

$$\bar{\epsilon}^2 = 4/3(\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{xx}\epsilon_{yy} + \epsilon_{yy}^2) + 1/3\epsilon_{xy}^2 \quad (4)$$

また、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[8]を参考に、以下に示す直交異方性損傷則を提案する。

$$D = \int_{\bar{\epsilon}_1}^{\bar{\epsilon}_2} 1/\bar{\epsilon} d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon}_1 = 2/\sqrt{3} \left\{ c_{1xx} \epsilon_x^2 + c_{1xyy} \epsilon_x \epsilon_y + c_{1yy} \epsilon_y^2 + 1/4 (c_{1xy} \epsilon_{xy}^2) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon}_2 = 2/\sqrt{3} \left\{ c_{2xx} \epsilon_x^2 + c_{2xyy} \epsilon_x \epsilon_y + c_{2yy} \epsilon_y^2 + 1/4 (c_{2xy} \epsilon_{xy}^2) \right\}^{1/2} \quad (7)$$

ここで、 D は直交異方性損傷パラメータであり、 $\bar{\epsilon}_1$ は損傷累積開始の相当ひずみであり、 $\bar{\epsilon}_2$ は損傷累積終了の相当ひずみである。また、 c_{1ijkl} 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 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行った。Fig. 1 に 3 点曲げ試験の有限要素モデルを示し、Fig. 2 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。

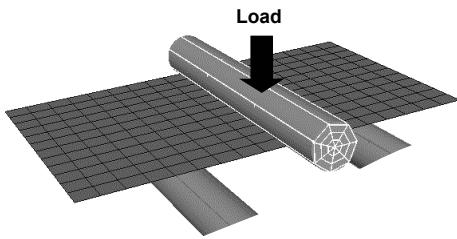


Fig. 1 Finite element model of three point bending test

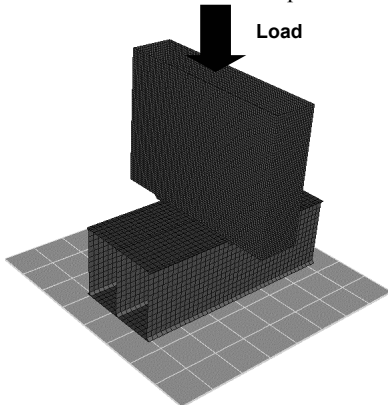


Fig. 2 Finite element model of aluminum extrusion crush test

3. 供試材料及び実験

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 3 mm 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と 3 点曲げ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°C を 3 時間とした。引張試験片は厚さ 2 mm 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、曲げ試験片は長方形薄板 ($L=40, w=20, t=2$ mm) を用いた。また、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 の長さに切り出したものを用いた。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。さらに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。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。

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

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。両組成とも、応力値においては、押し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。3 点曲げ試験では、有限要素解析結果と合わせて次章の Fig. 3 と 4 に示されているが、両組成とも、押し出し方向 (Fig. 3 と 4 における凡例名 Axial) の破断変位が押し出し垂直方向 (Fig. 3 と 4 における凡例名 Normal) 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 と 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れており、本研究においても同様の結果を得た。アルミ部材の圧潰試験での圧縮荷重変位曲線においても、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。

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

4 有限要素解析結果

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. 3 と 4 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。Fig. 3 と 4 における凡例名 Axial base は、押し出し方向における引張試験結果のみによって同定されたパラメータによる有限要素解析結果である。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 と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。

Table 3 Material parameters

	Composition A	Composition B
E (GPa)	71	71
σ_y (MPa)	290	310
b	420	420
$\bar{\epsilon}_1$	0.19	0.09
$\bar{\epsilon}_2$	0.27	0.095
C_{1xx}	1	1
C_{1xyy}	0.633	0.429
C_{1yy}	0.401	0.184
C_{1xy}	1	1
C_{2xx}	1	1
C_{2xyy}	0.267	1
C_{2yy}	0.071	1
C_{2xy}	1	1

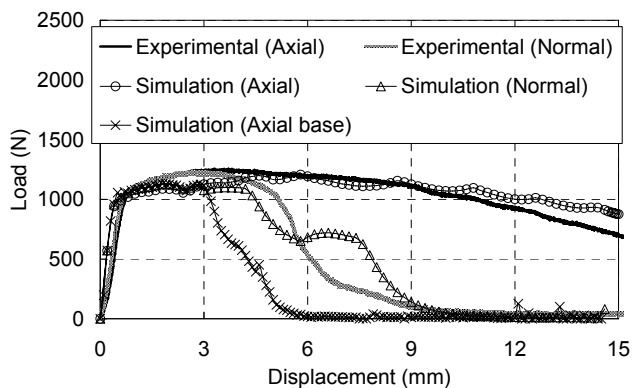


Fig. 3 Bending load displacement curves of composition A

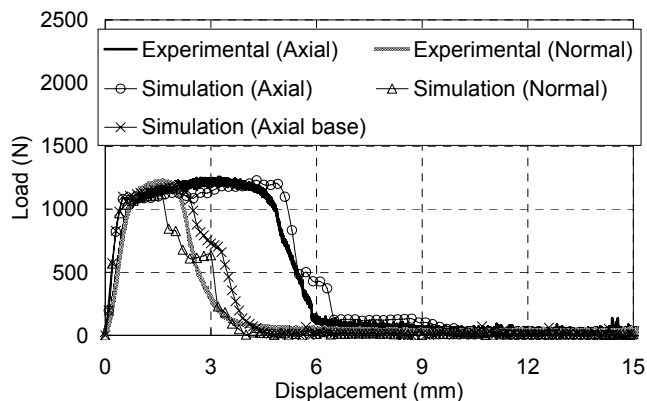


Fig. 4 Bending load displacement curves of composition B

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の比較を Fig. 5 と 6 に示す。組成 A と B どちらにおいても、直交異方性を考慮した際の荷重変位特性 (Fig. 5 と 6 における凡例名 Orthotropic) 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 (Fig. 5 と 6 における凡例名 Tensile Base) 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. 7 に計算された組成 A アルミ部材の変形図を示す。Fig. 8 は、圧潰試験後のアルミニウム部材の写真である。Fig. 7 と 8 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。

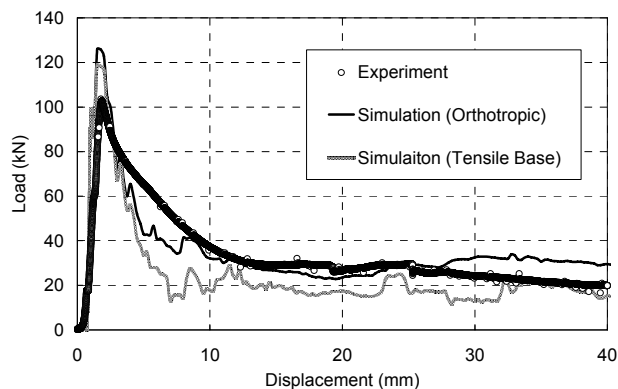


Fig. 5 Load displacement histories of composition A

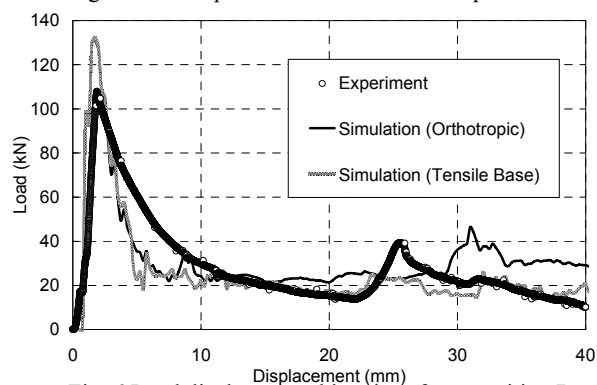


Fig. 6 Load displacement histories of composition B

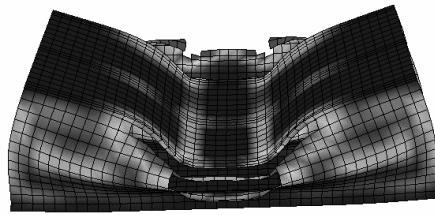


Fig. 7 Deformation of composition A aluminum member

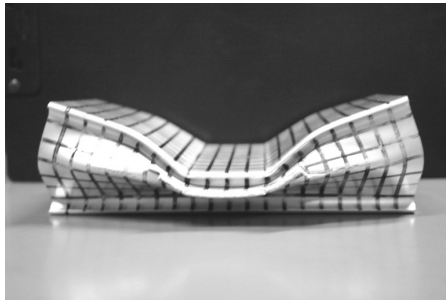


Fig. 8 Photographs of composition A member after crush test

5. 実部品への適用

実部品であるバンパーシステムに本手法を適用した際の有限要素モデルを Fig. 9 に示し、シミュレーション結果として荷重変位関係を Fig. 10 に示す。ここで、荷重と変位は、実験における最大変位と最大荷重によって正規化をおこなっている。最大荷重到達時において、押し出しアルミ部材の断面圧潰が発生し、その後、き裂が発生したため、荷重値の大きな減少が観察された。この際の変形図を Fig. 11 に示す。き裂はバンパービーム取付部において、断面圧潰後に発生し、ビーム端部に進展した。本研究におけるシミュレーション結果は実験で得られた傾向と良い一致を示したことから、本手法のバンパーシステムへの適用は実際開発で利用可能であることが示された。

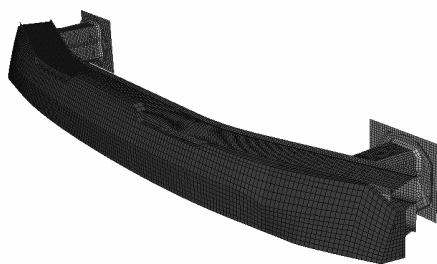


Fig. 9 Finite element model of bumper system

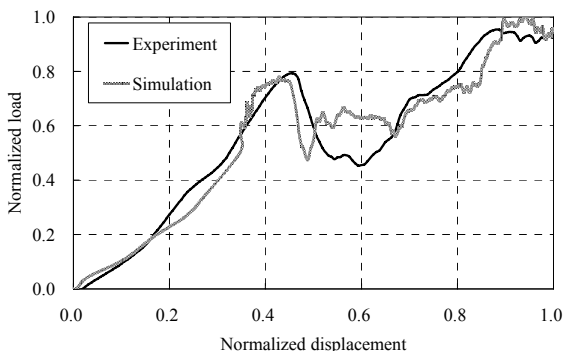


Fig. 10 Load displacement histories of actual bumper system

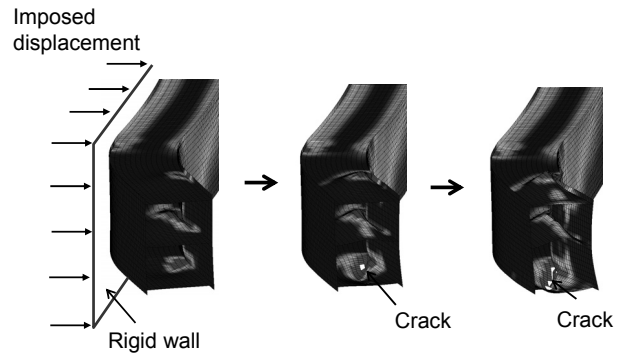


Fig. 11 Snapshots of crush behavior of bumper system model

6. まとめ

押し出しアルミ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。さらに、アルミ部材とバンパーシステム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り、本解析手法が押し出しアルミ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., et al.: Crashworthiness of aluminum extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity, *International Journal of Impact Engineering*, **22**, p.829-864(1999)
- [2] Reyes, A., et al.: Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**, p.1965-1984(2002)
- [3] Reyes, A., et al.: Square aluminum tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Impact Engineering*, **28**, p.1077-1106(2003)
- [4] Kokkula, S., et al.: Offset impact behavior of bumper beam-longitudinal systems: numerical simulations, *International Journal of Crashworthiness*, **11**, 4, p.317-336(2006)
- [5] Lademo, O. G., et al.: An evaluation of yield criteria and flow rules for aluminum alloys, *International Journal of Plasticity*, **15**, p.191-208(1999)
- [6] Clausen, A. H., et al.: Stretch bending of aluminum extrusions for car bumper, *Journal of Materials Processing Technology*, **102**, p.241-248(2000)
- [7] Lademo, O. G., et al.: Modeling of plastic anisotropy in heat-treated aluminum extrusions, *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, p.84-88(2002)
- [8] Johnson, G. R., Cook, W. H.: Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, **21**, 1, p.31-48(1985)