特 集 号

研究論文

超塑性を利用した単層 FRM の曲げ加工特性

西村 尚*・伊藤 達也**

山本 弘圀*・若山 修一*

Bending characteristics of single layer fiber reinforced superplastic metal

Hisashi NISHIMURA*, Tatsuya ITOH**

Hirokuni YAMAMOTO* and Shuichi WAKAYAMA*

Bending processing of fiber reinforced metal was attempted. Materials used were single layer continuous boron fiber reinforced superplastic alloys (SPZ: Zn-22%Al), which were fabricated under the optimum condition determined elsewhere. V bending tests were carried out at 250°C, and the effects of the fiber locations and matrix superplasticity on the shape of bent specimen and punch load were investigated. In the case of non-superplastic metal matrix, successful bending is difficult and accompanied with fiber fractures, especially for the FRM with inside or outside fiber locations. On the other hand, when matrix metal show superplasticity, specimens are bent successfully without fiber fractures regardless of fiber locations. Furthermore, matrix superplasticity decreases the punch load due to the low flow stress of matrix metal. It has been made clear by L bending tests carried out for the investigation of the minimum bending radius that matrix superplasticity enhances the minimum bending radius until that of the unrestrained single fiber. The evaluation of strength of bent composites has shown that the heat treatment to remove the superplasticity from matrix metal increases the strength of bent specimen.

Keywords: superplasticity, bending, composite, hot pressing, powder metallurgy

(Received June 13, 1989)

1. 緒 言

繊維強化金属 (FRM) は高温における比強度, 比剛性, 耐久性などの優れた材料であり, 従来の構造用材料に代わる次世代の材料として注目を集めている。しかしながら, その優れた性質にもかかわらず, FRM は非常に延性にとぼしく, 二次加工が困難である。FRM を工業用材料として発展活用させるためには, マトリックスに靱性をもたせると同時に二次加工性の改善が不可欠である。

本研究は, これまでの我々の研究, すなわち超塑性マトリックス FRM の開発^{1), 2)}の延長上に位置し, 超塑性マトリックスを利用して, FRM の曲げ加工を行うものである。具体的には, 超塑性温度での曲げ加工時の曲げ

応力の低減, 強化繊維とマトリックス金属のずれなどを期待した加工性の改善, 繊維の配置条件, 曲げ変形メカニズムについて検討を行った。さらに, 曲げ加工後の FRM 製品の強度試験を行い, 加工性と強度を備えた FRM 製品の加工プロセスについても検討した。

2. FRM の製造法

供試材として, マトリックス金属には比較的低温 (250°C) で超塑性が発現するアルゴンガス噴霧法によって製造された粒径44~74 μm の超塑性 Zn-22%Al 合金 (SPZ) 粉末を用い, 強化繊維にはボロン連続繊維 (ϕ 140 μm) を用いた。それぞれの特性を Table 1 および Table 2 に示す。FRM シートの製造には, あらかじめ金型内に粉末とボロン繊維を積層しておき, 5×10^{-3}

* 東京都立大学工学部 (東京都)。Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University (Setagaya-ku, Tokyo).

** 東京都立大学大学院 (東京都) [現在: 岐阜職業訓練短期大学 (岐阜県揖斐郡)]。Graduate School, Tokyo Metropolitan University (Setagaya-ku, Tokyo) [Present: Gifu Vocational Training College (Ibu-gun, Gifu)].

Table 1 Properties of SPZ powder

Particle Diameter	44~74 μm	
Average Particle Diameter	63.72 μm	
Density	5.23 gcm^{-3}	
Chemical Composition	Zn	Bal
	Al	22.0
	O	0.04 wt%

Table 2 Properties of BORON fiber

Diameter	140 μm
Tensile Strength	3500 MPa
Young's Modulus	420 GPa
Density	2.49 gcm^{-3}

Torr の真空中で温度420°C, 加圧力35 MPa, 10分間保持の条件を用いてホットプレスを行った。この条件は前報¹⁾より最適値を選んで決めてある。その後, マトリックス金属に超塑性を発現させるため380°C, 30分保持後急冷の熱処理 (Initial H. T.) を行った。この条件で製造される FRM 試験片の寸法は80×16×1.5 mm である。

3. FRM の高温引張特性

製造した FRM の250°Cでの引張試験を行った。試験片形状・寸法は80 mm(L)×16 mm(W)×1.5 mm(T)の短柵型試験片にチャックつかみ部に0.4 mmのアルミニウム板を接合して補強したものをを用いた。クロスヘッド速度は3 mm/min である。 $V_f=4\%$ の単層試験片であるが, 混合則 (ROM 値) に従って強化されている。前報¹⁾により定めた FRM の製造条件は, 本方法のボロン繊維の場合でも十分有効であることが分かった。

4. 単層繊維配列 FRM の曲げ加工

製造した FRM 短柵試験片を250°Cの超塑性条件下で90°V 曲げおよび90°L 曲げを行った。曲げ治具のパンチ速度は1 mm/min である。FRM の繊維の配置を種々変化させて曲げ加工特性を調べ, 超塑性マトリックスの有効性を確かめた。

4.1 強化繊維の位置

まず, Fig. 1 に示すような単層の繊維強化 FRM の曲げ加工を行った。 V_f はわずかに4%である。マトリックスは超塑性を示すものを基本とし, 溶体化処理を行わない非超塑性のものも比較のために製造した。Fig. 1 の(a)を中心部繊維強化材, (b)を表層部繊維強化材とし, 曲げの方向により, 繊維が引張側になる場合 (outside) と圧縮側になる場合 (inside) とに分けられる。

(a) center

(b) near surface

Fig. 1 Sectional micrographs of test piece.

(a) matrix: non-superplasticity

(b) matrix: superplasticity

Fig. 2 Side angle photographs of FRM bent at 250°C.

Fig. 2 は各繊維位置の FRM を250°Cの炉中でパンチ半径 $R=3\text{ mm}$ でV 曲げ加工した試験片形状を横から見たものである。超塑性が発現しないFRM は比較的曲げ半径が小さく, 超塑性が発現するものは曲げ半径が9 mm と大きめになっている。また, 外側に繊維を配置したFRM はU 形に近い曲げ形状を示している。**Fig. 3** は超塑性を発現しないFRM を曲げ加工したときに生じる形状不良の例である。(a)は繊維を外側に配置したFRM を曲げた例で幅方向に鞍ぞりが発生している。これは幅端面において幅方向は自由拘束, 平面応力状態であり, 曲げの外側では周方向に引張られるので板幅方向に収縮し, 逆に曲げの内側では圧縮されるので板幅方向

(a) camber

(b) crack

Fig. 3 Photographs of V-bent FRM tested at 250°C.

に広がろうとする。その結果、表面が反って幅方向にも曲率を持つようになり、断面は扇状に変形してくる。また、(b)は繊維を内側に配置したもので、これにはマトリックスの表面に割れが生じている。このように超塑性を示さないFRMの曲げ製品には形状不良が生じているが、超塑性を示すFRMの場合には、このような不良は生じない。これは超塑性の発現によりマトリックスが十分な延性を持ち、内・外表面上のひずみに対して十分伸びるために、このような延性不足による不良は生じないものと考えられる。超塑性マトリックスの有効性が明らかになった一例である。

つぎに、曲げ加工品のマトリックス中の繊維の状態を調べた。曲げ加工品の外観上は良好に曲げ加工が行われたとしても、加工中に繊維の破断が生じていないという保証はない。そこで、曲げられたFRMのマトリックスを塩酸で腐食除去して内部の繊維の損傷を観察した。V曲げ後、曲げ部を腐食した写真をFig. 4に示す。(a)の写真は超塑性を示さないマトリックスのFRMを曲げ加工したもので繊維は中央にあるもの以外は折れている状態が観察された。それに対して(b)の超塑性FRM(マトリックスが超塑性)では、繊維がどの位置にあっても繊維の損傷がなく、曲げ加工が成功している。このように、FRMのマトリックスに超塑性を持たせると繊維の折損を防ぐことができる。

4.2 パンチ荷重

曲げ加工中のパンチ荷重について調べた。Fig. 5は、超塑性、非超塑性マトリックスFRMのパンチ荷重-ストローク線図である。マトリックスが超塑性を示さないFRMでは、内側、外側に繊維を配列したものは40 Nとピーク荷重が高く、中央位置に配置したものではやや低

(a) fracture of fiber

(b) success

Fig. 4 Photographs of V-bent FRM tested at 250°C.

Fig. 5 Punch load-stroke curves of V-bending at 250°C.

い。20 Nのピーク荷重を示している。しかし、超塑性マトリックスFRMでは、非超塑性マトリックスFRMの1/3程度の荷重で加工が進行しており、繊維の位置に関係なく、パンチ荷重はほぼ同様な傾向を示している。このパンチ荷重の差は前報¹⁾でも示されているようにマトリックスの変形抵抗の差であることは明らかである。パンチ荷重の低さが繊維の折損を押えていることに関連してくる。

4.3 加工限界

V曲げにおいては、パンチ先端アールの形状通りに曲がらないため、最小曲げ半径で代表される曲げ加工限界は明らかにされなかったが、これを定量的に把握するためにL曲げを行った。L曲げでは、ダイ半径を変えることにより90°に曲げたときのFRMの最小曲げ半径を求め、曲げ加工性を定量的に比較した。曲げ加工後マ

トリックスを腐食し繊維に損傷がなく曲げ加工が行えたものを○印で、繊維の折損もしくはマトリックスの割れを生じたものを×印で表す。

マトリックスが超塑性を示さないFRMのL曲げ加工結果をTable 3(a)に示す。繊維を内側に配置したものではR=10 mmでも曲げが不可能、中央配置でR=8 mmまで、外側配置でR=10 mmまで曲げ加工が成功した。このように、非超塑性マトリックスFRMは、内側・外側・中央の順に曲げ加工限界が向上してゆく結果となった。

一方、超塑性マトリックスFRMのL曲げ加工結果をTable 3(b)に示す。マトリックスに超塑性が発現することによりFRMの最小曲げ半径はR=6 mmまで向上し、しかも繊維の位置に関係なく曲げ加工が可能となっている。繊維単体の最小曲げ半径はR=6 mmであり、ほぼそれに近い曲げ加工が可能である。ここでも、超塑性マトリックスの有効性が実証された。

4.4 曲げ部表面のひずみ分布

L曲げ型を用いてR=6 mmで曲げ加工した超塑性マトリックスFRMの表面に0.5 mm間隔のけがき線を入れ、曲げ加工後転写フィルムにけがき線を写しとり、工具顕微鏡によって座標を計測してひずみを求めた。その結果をFig. 6に示す。図中の“Matrix”の表示は強化繊維を含まない超塑性圧粉板を曲げた場合の表面ひずみ分布であり、内側、外側ともほぼ等しいひずみを得ており曲げ加工の中立軸が板厚の中心上に存在していることが分かる。一方、繊維が中央配置のFRMでは、“Matrix”とほぼ等しいひずみ分布を示しており、曲げ

Fig. 6 Strain distribution of surface on FRM bent at 250°C.

Fig. 7 Ideal models of bending deformation on single layer FRM.

の中立軸がFRM断面の中心、すなわち繊維層上に存在することが分かる。内側および外側繊維のFRMでは、それぞれの繊維が入っている側の表面はひずみが小さく、反対にマトリックス側の表面では非常に大きな圧縮または引張ひずみを示している。これは断面のどの位置に繊維層があっても常に繊維上に曲げ中立軸が存在し、繊維には単純な曲げ応力しか作用していないためと推測される。Fig. 5に示すパンチ荷重が繊維の位置にかかわらず一定であるのは、このことを裏づけている。

上記の仮定に基づいて、この曲げ変形状態をモデル化したものがFig. 7である。このように超塑性マトリックスを持つFRMでは、マトリックスの変形抵抗が小さいために中立軸は常にFRM断面の繊維層上に存在し、マトリックスの超塑性伸びによって大きな曲げひずみにも対処できるものと考えられる。

4.5 繊維曲げ半径に着目した加工限界

Table 3 Effect of fiber location on minimum bending radius of 90°L-bending					
(a) matrix: non-superplasticity					
		Die radius			
		R10	R8	R6	R4
Location of fiber	inside	×	×	×	×
	center	○	○	×	×
	outside	○	×	×	×
Single fiber		○	○	○	×
(b) matrix: superplasticity					
		Die radius			
		R10	R8	R6	R4
Location of fiber	inside	○	○	○	×
	center	○	○	○	×
	outside	○	○	○	×
Single fiber		○	○	○	×

Table 3 では超塑性マトリックスの場合、繊維の位置に関係なく曲げ加工が可能であるという結果を得た。これは曲げアールによる比較であり、曲げ製品の内側表面の半径が曲げ限界の基準になっている。しかし、実際には繊維が内側と外側の場合とでは繊維の曲げ半径は異なり、外側になるにつれて繊維曲げ半径は大きくなる。そこで繊維の曲げ半径について着目し、曲げ加工限界を検討してみる。

Fig. 8 は繊維の位置と繊維の曲げ半径を基準として超塑性 FRM の曲げ加工結果を示したものである。この図より、繊維の配置位置には無関係に FRM 内の繊維の曲げ半径が約 6 mm 程度で△(一部の繊維が破断)となり、 $R=6\text{ mm}$ を下回ると完全に曲げ加工が不可能になってくる。すなわち、FRM の曲げ加工限界は、FRM 内の繊維の曲げ半径が繊維単体で曲げた場合の最小曲げ半径より小さくなると破断することによって決まる。このことを Fig. 6 の結果とあわせて検討すると、繊維がどこにあるろうとも、繊維層上に曲げの中立軸が存在し、繊維が伸び縮みすることなしに、すなわち繊維には単純に曲げ応力のみが作用する。よって、繊維層が FRM 断面のどの位置にあっても繊維層半径が繊維単体の曲げ半径に達するまで曲げ加工が可能であることが明らかになった。

4.6 繊維の破壊形態

Fig. 9(a) は繊維を内側配置した FRM の $R=5\text{ mm}$ (実質繊維曲げアール 5.3 mm) で曲げ加工を行ったとき、Fig. 9(b) は外側配置で $R=4\text{ mm}$ (実質繊維曲げアール 5.2 mm) で曲げ加工を行ったときの繊維の破断状態を示す写真である。どちらも繊維の破壊部は斜めに破断している。これは繊維が脆性的であり、かつ圧縮強度が低いことから曲げ応力によってせん断破壊で折損するものと考えられる。破断は数か所で発生しており、繊維単体で曲げたときとは異なる。Fig. 10 は非超塑性マトリックス FRM の曲げ後の繊維の破断例で外側配置の場合は直角に折れ、内側配置の場合は少し圧縮を受けるためにやや斜めに破断している。このように、マトリックスの状態、繊維の位置によって繊維の破断の様子は異なる。

Fig. 8 Effect of bending radius in fracture on fiber.

Fig. 9(a) Photograph of broken fiber in FRM bent at 250°C (inside).

Fig. 9(b) Photograph of broken fiber in FRM bent at 250°C (outside).

(a) outside

(b) inside

Fig. 10 Photographs of broken fibers in FRM after bending.

ってくる。

そこで、曲げ変形を塑性学的に考察すると、一般に曲げ変形は圧縮応力と引張応力が存在し、断面内のこれらの総和はゼロとなる。

$$\int \sigma dA = 0 \quad (1)$$

そして、曲げ応力が作用しない位置が曲げ中立軸となる。ここで以下の仮定をおく。

- (1) マトリックスは弾完全塑性体とし、繊維は弾性体とする。
- (2) マトリックスと繊維は完全に接合されている。マトリックスが弾性範囲のとき、Fig. 11のように応

Fig. 11 Stress distribution of curved beam.

力状態を仮定すると(1)より

$$\sigma_m y_n b - A_f \sigma_f - \frac{1}{2} \frac{(t - y_n)^2}{y_n} \sigma_m b = 0 \quad (2)$$

ここで、記号は Fig. 11 のように定め、添字の m はマトリックス、 f は繊維を表す。

$$\sigma_m = E_m \left(\frac{y_n}{\rho} \right), \sigma_f = E_f \left(\frac{h - y_n}{\rho} \right)$$

を(2)に代入して解くと、

$$y_n = \left(\frac{2A_f E_f h}{E_m b} + t^2 \right) \left/ \left(\frac{2A_f E_f}{E_m b} + 2t \right) \right. \quad (3)$$

となる。これに、各変数を代入して繊維が中央にある場合 ($h = 0.75$ mm) は $y_n = 0.75$ mm、外側配置の場合 ($h = 1.29$ mm) は $y_n = 0.85$ mm と曲げ中立軸が求まる。弾性限界時の曲げ半径 ρ_s は

$$\sigma_m = E_m \left(\frac{y_n}{\rho} \right)$$

で繊維が中央にある場合 ($h = 0.75$ mm) は、 $\rho_s = 1750$ mm、外側配置の場合 ($h = 1.29$ mm) は $\rho_s = 1983$ mm となる。

マトリックスが全塑性状態のときは Fig. 11 (b) のように応力状態を仮定すると式(2)は

$$\sigma_m y_n b - A_f \sigma_f - \sigma_m b (t - y_n) = 0 \quad (4)$$

となる。ここで

$$\sigma_f = \frac{E_f}{\rho} (h - y_n)$$

これを y_n について解くと

$$y_n = \left(\frac{A_f E_f}{\rho} h + \sigma_m b t \right) \left/ \left(\frac{A_f E_f}{\rho} + 2\sigma_m b \right) \right. \quad (5)$$

このように y_n は ρ の関数となる。

ここで、マトリックスが降伏してからの ρ を代入して中立軸の移動を計算した結果を次に示す。

Fig. 12 は中央に繊維を配置した場合と外側に配置した場合の結果である。試験片寸法、 V_f 、材料物性値等は実験にあわせてある。中央配置の場合は上下対称なので常に中立軸の移動はなく、マトリックスが超塑性か非超塑性の区別もない。非対称の外側配置においては、超塑性マトリックスはマトリックスが降伏しはじめるとすぐに繊維層の上に中立軸の移動が起こるが、非超塑性マトリックスの場合は $\rho = 50$ mm になるまで中立軸は繊維外に存在することになる。したがって、非超塑性マトリックスの場合は $R \div \rho = 50$ mm に達するまでは繊維に引張りまたは圧縮力が作用し大きな曲げ荷重となる。Fig. 5 のパンチ荷重がピークを示すのはストローク 4.5 mm 前後で、これは $R = 50$ mm に相当しこのことを裏づけている。これまで、実験によって曲げ中立軸が繊維上にあると仮定してきたが、計算からも同様な結果を得ることができた。

4.7 曲げ製品の熱処理による強度の改善

マトリックスに超塑性を生じさせることにより、曲げ加工性を改善することができることを明らかにしたが、曲げ後も超塑性を示すことは強度上好ましくない。そのために曲げ加工された FRM に結晶粒を粗大化するための熱処理を行った。条件は 380°C 、1 時間保持後空冷した。これを二次熱処理と呼ぶ。Fig. 13 は二次熱処理を施した FRM と施さない FRM に曲げモーメントを加え、曲げモーメント-変位線図を書いたものである。

まず、繊維の位置の影響について見ると、外側配置のものは、内側、中央に比べて強度が高くなっている。繊維に引張力が加わった場合には強く、圧縮が加わった場合には弱いことが明らかである。二次熱処理の効果も明らかである。曲げ製品の強度は、二次熱処理を施し、織

Fig. 12 Variation of neutral axis y_n by difference of fiber's location and bending radius ρ .

Fig. 13 Bending moment-Deflection curves of FRM at R.T. after L-bending at 250°C.

Fig. 14 Bending moment-Deflection curves of bent FRM.

維を引張側におくことにより向上する。

つぎに、二次熱処理を施した FRM 曲げ製品の室温および高温 (250°C) 強度の比較を Fig. 14 に示す。これより高温状態で FRM 製品を用いると、強度が 10% 程度低下する結果が得られた。高温におけるマトリックスの強度低下によるものである。しかし、超塑性マトリックスの場合よりも強度は高く、二次熱処理の効果が現れている。高温では大きな変形にも耐えており、室温よりも繊維の折損に対しては保護効果があることがわかる。

以上のことから、曲げモーメントに対しては非超塑性マトリックスが望ましいが、大変形に対する繊維の折損防止の立場からは、マトリックスが延性を持っている方が望ましいことが分かった。

4.8 曲げ加工後のスプリングバック

Fig. 15 は超塑性マトリックス FRM を 250°C の下で L 曲げによって R=6 mm に 90° 曲げた製品を再び 250°C 加熱した状態におけるスプリングバックを測定した結果で

Fig. 15 Effect of heat treatment on spring-back of FRM after bending at 250°C.

ある。マトリックスが超塑性状態では、FRM は繊維が弾性状態で曲げられていることから、時間と共にスプリングバックすることが分かる。しかし、曲げ後熱処理によって非超塑性マトリックスとしたものでは初期にマイナスのスプリングバックが大きいものの、ある時間がたつと一定値に落ちつく。スプリングバックに見られる形状の保持という面からは、二次熱処理が有効であることが明らかとなった。なお、曲げ後、室温の下で放置した場合は、マトリックスが超塑性のままであってもほとんどスプリングバックは認められなかった。

5. 結 言

超塑性を利用した FRM の曲げ加工性についての基礎的なデータを得る目的で単層繊維強化 FRM について実験および考察を試みた。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 超塑性マトリックスを用いることにより繊維単体の曲げ半径まで繊維の破断なしに曲げ加工が行えた。
- (2) 繊維の位置の加工限界に及ぼす影響はなく、繊維がどの位置にあっても、曲げの中立軸は繊維上にある。曲げ後の製品強度面から見ると繊維が引張り側に位置するように配置することが望ましい。
- (3) 製品強度上はマトリックスに超塑性を示さない方がよく、そのための熱処理を行う必要がある。

本研究は文部省科学研究費および軽金属奨学会の研究助成を受けたこと、素材の製造について三菱金属(株)により援助を受けたことを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 西村尚, 山本弘圀, 山岸新一: 軽金属, **38** (1988), 665.
- 2) 若山修一, 西村尚: 軽金属, **38** (1988), 672.