

薄板材料の伸び・縮みフランジ成形における フランジ部のせん断変形特性の数式化

顧 莉薇*・中島 浩衛*²・細井 祐三*²・小野 宗憲*²・戸澤 康壽*²

Modeling of Shearing Deformation Characteristics of Flange
in Stretch-type and Shrink-type Flanging of Sheet Metals

Liwei GU, Koe NAKAJIMA, Yuzou HOSOI, Munenori ONO and Yasuhisa TOZAWA

Synopsis : The defective phenomena of dimensional accuracy, cracking, and wrinkling, etc. are generated in the flanging process of press forming such as the panel parts of car body. In this study, the experimental model forming and the analysis are done to clarify the characteristics of shearing deformation, which causes a defective phenomenon of dimensional accuracy of flange height in stretch-type, shrink-type and reverse-type flanging of sheet metals. There is a close relationship between the amount of shearing deformation and the profile curvature ($1/R$) of flange. An analytical modeling of shearing deformation of flange has been led, and the amount of shearing strain can be calculated by introducing the equivalent curvature ($1/\rho_0$).

Key words: stretch-type flanging; shrink-type flanging; reverse-type flanging; accuracy; shearing; profile curvature; analytical modeling.

1. まえがき

薄板材料を用いた自動車車体のパネル部品は、絞り、トリミングそしてフランジングのプレス成形過程を経て製造されている。近年、これら部品の金型設計から部品製造までの開発期間を短縮することを目的に、ダイフェースCADシステムによる金型設計工程において、その部品のプレス成形難易性の定量的な予測・評価を反映できることが重要とされている。従来、第1の絞り工程の成形難易性の定量的予測に関しては、成形限界図(FLD)を用いた多くの研究^{1,2)}が行われてきたが、フランジング工程に関しては解決すべき多くの課題が残されている。例えば、ウェブ部のそり発生やフランジ部のスプリングバック現象があり³⁻⁸⁾、さらに、フランジ部のトリムラインの精度不良、伸びフランジのわれ発生および縮みフランジのしわ発生等である。Fig. 1に典型的な伸びフランジ成形のフランジ高さ精度不良やわれ発生の例を示している⁹⁾。

本研究は、薄板材料のプレス成形における伸び・縮みフランジ成形のフランジ高さ精度不良の起因となるせん断変形に着目して、フランジ部のせん断変形特性の数式化を狙いとした。そこで、単純な伸びフランジ型、縮みフランジ型、直線フランジ型および伸びと縮みの複合フランジ型のモデル成形実験を行い、フランジ先端部のプロフィール方向の伸びひずみ、縮みひずみおよびせん断ひずみの測定を行った。それらの測定結果から、フランジ部の変形特性の定量化と解析を行って、フランジ部のせん断変形の数式化

の導出を行った。なお、フランジ部の変形解析は、永井の不均等伸びフランジ変形の解析手法における相当曲率半径の概念を応用して行った¹⁰⁻¹²⁾。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材料として板厚0.8 mmの4種類の薄板材料、すなわち軟鋼板(SPCC, SPCE, SSPSDX)およびAl合金材(A3003-0)を用いてモデル成形実験を行った。それらの機械的性質の面内平均値をTable 1に示した。

2.2 フランジ成形のモデル実験およびひずみの測定

モデル実験におけるフランジ成形の形状・寸法およびひずみの定義を、伸びフランジ成形についてFig. 2に示した。

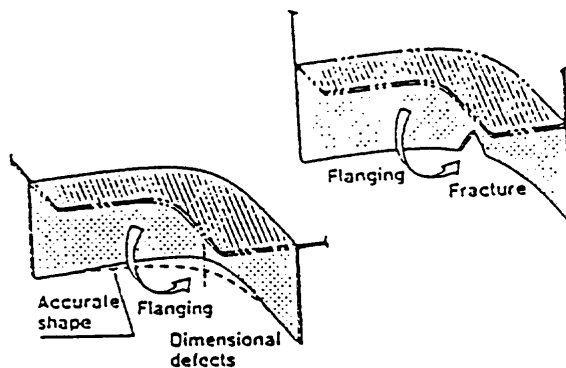


Fig. 1. The defective phenomena in stretch-type flanging.

平成12年8月21日受付 平成12年9月28日受理 (Received on Aug. 21, 2000; Accepted on Sep. 28, 2000)

* 大同工業大学大学院生 (現:コンドセイコー (株)) (Graduate Student, Daido Institute of Technology, now Kondo Seiko Co., Ltd.)

* 2 大同工業大学 (Daido Institute of Technology, 2-21 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457-8531)

Table 1. Mechanical properties of used materials.

| Materials | YS /MPa | TS /MPa | TEL /% | F /MPa | <i>n</i> value | <i>r</i> value |
|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| SPCC | 233 | 322 | 37.5 | 570 | 0.220 | 1.29 |
| SPCE | 161 | 306 | 42.3 | 529 | 0.233 | 1.56 |
| SSPDX | 139 | 289 | 46.4 | 541 | 0.272 | 1.67 |
| A3003-o | 96 | 104 | 34.9 | 174 | 0.235 | 0.67 |

伸びフランジ成形のプロフィール曲率半径 R は、(+)記号で表し、+100, +250 および +400 mm の 3 種類、同様に、縮みフランジ成形の場合は(-)記号で表し、-100, -250 および -400 mm の 3 種類とした。さらに複合フランジ成形の場合は ± 100 および ± 400 mm の 2 種類とした。フランジ長さ $2L$ は 100 mm 一定、ブランク幅 B は 25 mm 一定およびフランジ高さ H (成形前) は 6, 9 および 12 mm の 3 種類の成形を行った。また、ダイス肩半径 r_d とポンチ肩半径 r_p はそれぞれ 3 mm と 6 mm とした。なお、試験片の金型へのセットは、圧延方向をプロフィール方向に対して直角となるようにした。

プロフィール方向ひずみおよびフランジ部のせん断角を次のように測定した。すなわち、あらかじめ成形前試験片に端部から 10 mm 間隔の線をけがき、成形後透明テープによる転写法によってひずみ ϵ_x およびせん断角 ϕ を測定した。また、フランジ先端部のプロフィール方向の長さ変位から、フランジ部全体の平均ひずみ ϵ_{xm} を求めた。

3. 実験結果

3.1 単純フランジ成形のフランジ部の変形特性

3.1.1 フランジ部の伸び・縮み変形特性

(1) プロフィール曲率半径と伸び・縮みひずみとの関係

Fig. 2 に示すように、伸びフランジ成形のフランジ部にせん断変形が発生する。同様に、縮みフランジ成形の場合もせん断変形が発生する。フランジ部先端にプロフィール方向 (x 方向) ひずみ ϵ_x が発生し、フランジ部全体の平均ひずみを ϵ_{xm} とする。また成形高さ方向 (y 方向) ひずみを ϵ_y 、板厚方向 (z 方向) ひずみを ϵ_z とする。成形高さ 6 mm と 12 mm の場合について、フランジ部全体の平均ひずみ ϵ_{xm} とプロフィール曲率 ($1/R$) との関係を示したが、各種供試材別の違いは明確ではない。

直線型フランジ成形の場合は、せん断変形が生じないため、フランジ先端部のプロフィール方向のひずみ ϵ_{xm} は 0 である。Fig. 3 には、直線フランジ成形を中心として、縮みフランジ成形と伸びフランジ成形の値が、ほぼ点対称的に表示され、プロフィール方向ひずみ ϵ_{xm} がプロフィール曲率 ($1/R$) によってほぼ単調に増加している。このことは、プロフィール曲率 ($1/R$) が大きくなるほど、せん断変形が大

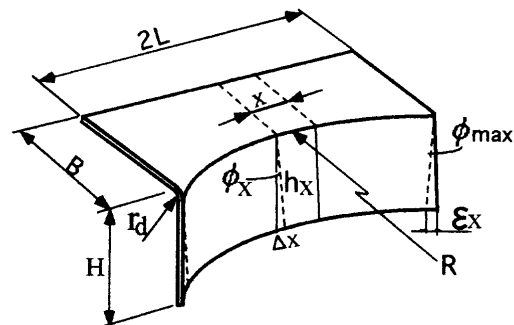


Fig. 2. Definition of shape and dimensions of flanging.

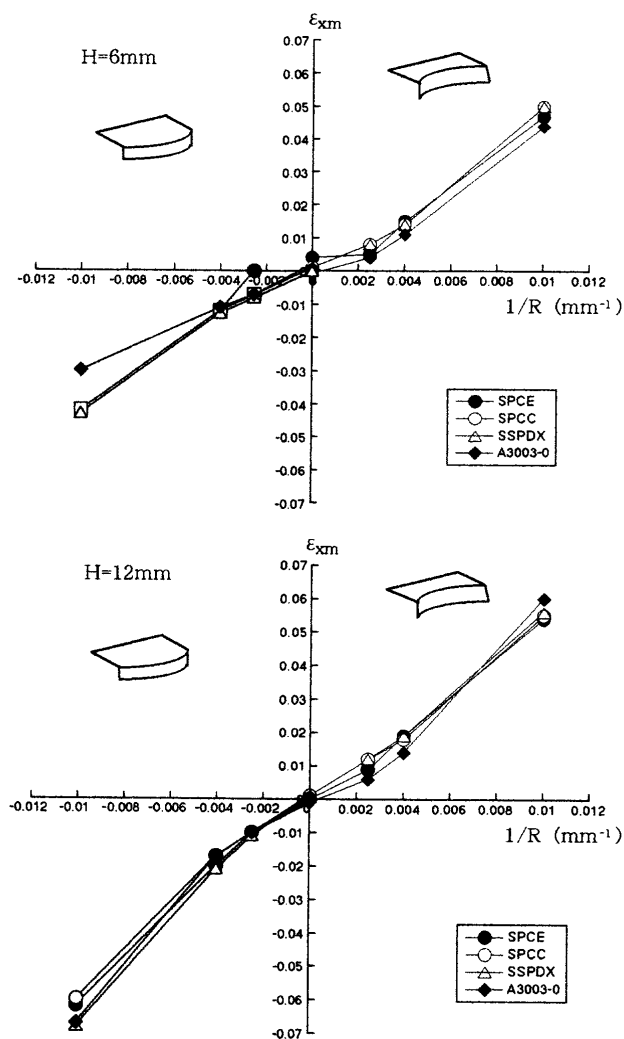


Fig. 3. Relationship between mean strain ϵ_{xm} of flange edge and flange profile curvature $1/R$.

きくなることを示している。また、成形高さ H が高い方が、 ϵ_{xm} も大きく傾向がある。

(2) 伸び・縮み平均ひずみ ϵ_{xm} とフランジ成形高さ H との関係

Fig. 4 に、プロフィール曲率半径 $R=100$ mm の場合について、伸び・縮み平均ひずみ ϵ_{xm} とフランジ成形高さ H との関係を示した。軟鋼板 (SPCC) と Al 合金材 (A3003-o) の両材料とも、成形高さ H が高くなるにつれて、ひずみ ϵ_{xm} は

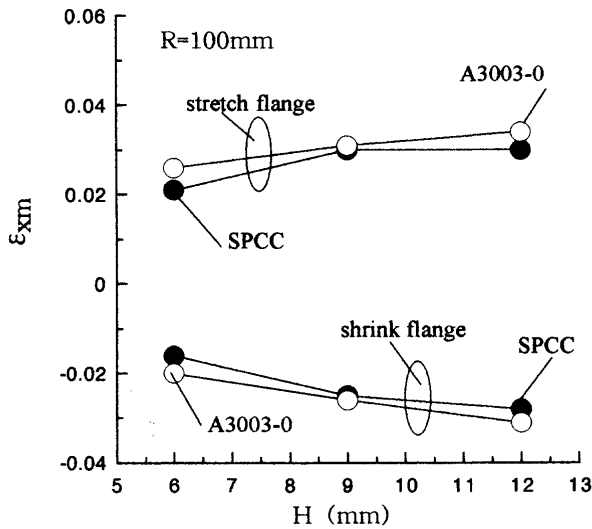


Fig. 4. Relationship between mean strain ϵ_{xm} of flange edge and flange height H ($R=100$ mm).

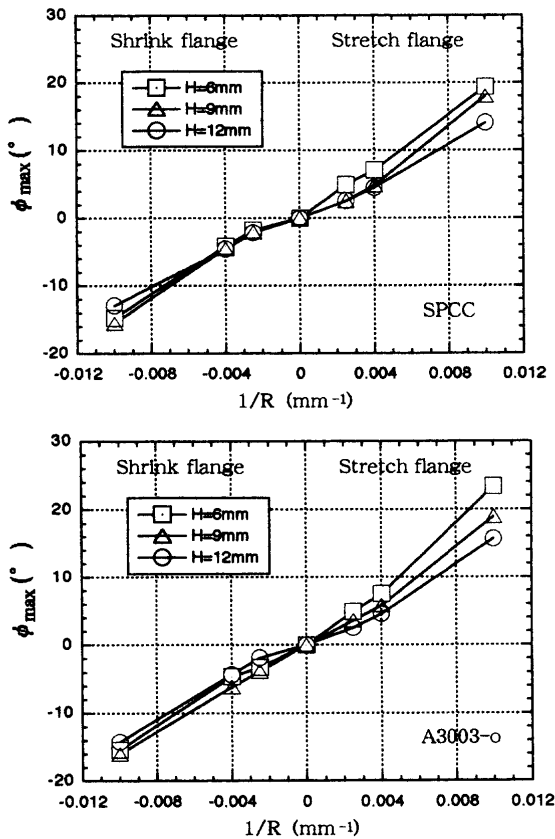


Fig. 5. Relationship between maximum shearing angle ϕ_{max} and profile curvature $1/R$.

大きくなっている。Al合金材と軟鋼板の違いの差はほとんど認められなかった。

3.1.2 フランジ部のせん断変形特性

(1) プロフィール曲率(1/R)とせん断角 ϕ との関係

フランジ部に生じるせん断角 ϕ は、プロフィール方向(x方向)位置によって異なるので、フランジ両サイド部に生じる最大せん断角 ϕ_{max} とプロフィール曲率(1/R)との関係をFig. 5に示した。同図における両者との関係は、直線

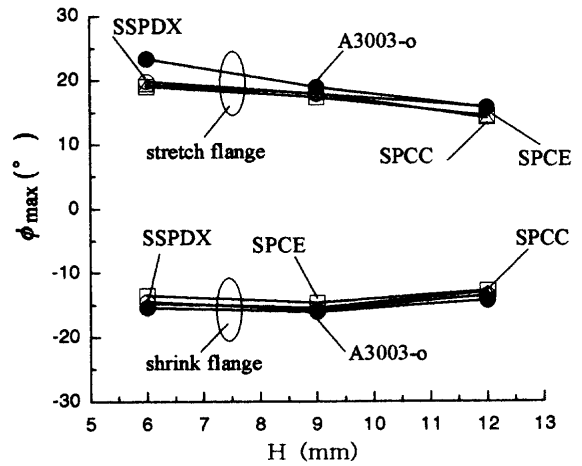


Fig. 6. Relationship between maximum shearing angle ϕ_{max} and Flange height H ($R=100$ mm).

フランジ成形のせん断角 ϕ_{max} が0となる点を中心として点対称的な分布となっている。また、成形高さ H の違いは、特に伸びフランジ成形のプロフィール曲率半径 R が100 mmの場合に明瞭に現れている。すなわち、伸びおよび縮みフランジ成形とも、プロフィール曲率(1/R)が小さくなれば、せん断角 ϕ_{max} も小さくなることを示している。

(2) 最大せん断角 ϕ_{max} とフランジ成形高さ H との関係

プロフィール曲率半径 R が100 mmの場合について、最大せん断角 ϕ_{max} とフランジ成形高さ H との関係をFig. 6に示した。伸びフランジ成形の場合は、フランジ高さ H の影響が認められるが、縮みフランジ成形の場合はほとんど認められない。また、材料別の差もほとんど認められなかった。

(3) 最大せん断角 ϕ_{max} と伸び・縮みの平均ひずみ ϵ_{xm} との関係

Fig. 7に軟鋼板材(SPCC)とAl材(A3003-0)それぞれ最大せん断角 ϕ_{max} と伸び・縮みひずみとの関係を示すように、せん断角は同じでも、成形高さが大きくなる。当然のことながら、プロフィール方向のひずみ ϵ_{xm} も増大することを示している。

3.2 複合フランジ成形のフランジ部の変形特性

3.2.1 複合フランジ成形のプロフィール方向ひずみ ϵ_x とせん断角 ϕ

複合フランジ成形の場合、フランジ部の中心線 $X=0$ に対して左右対称に伸びフランジ変形と縮みフランジ変形が共存した形でせん断変形が生じている。Fig. 8に示すように、中心線から X/L の位置に対して複合されたせん断変形となっている。すなわち、フランジ先端部のプロフィール方向ひずみ ϵ_x は、縮みフランジ相当部では負(縮みひずみ)となり、また、伸びフランジ相当部では正(伸びひずみ)となっていることがわかる。同様に、フランジ部のせん断角 ϕ の分布も、縮みフランジ相当部で正、伸びフランジ相当部で負となっている。

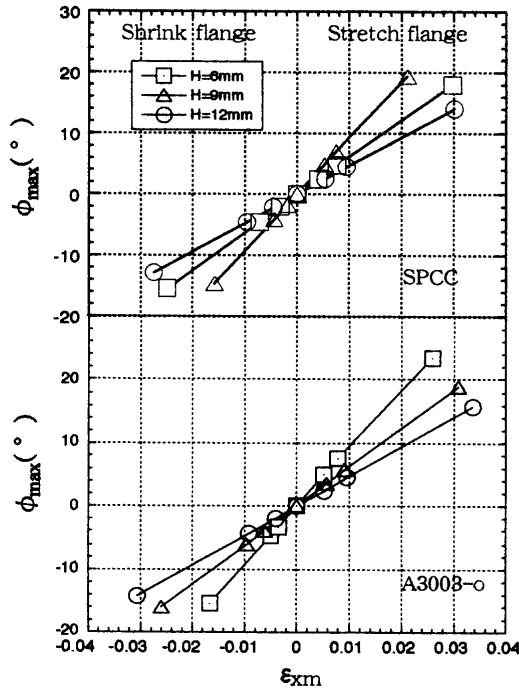


Fig. 7. Relationship between maximum shearing angle ϕ_{max} and mean strain ϵ_{xm} of flange edge.

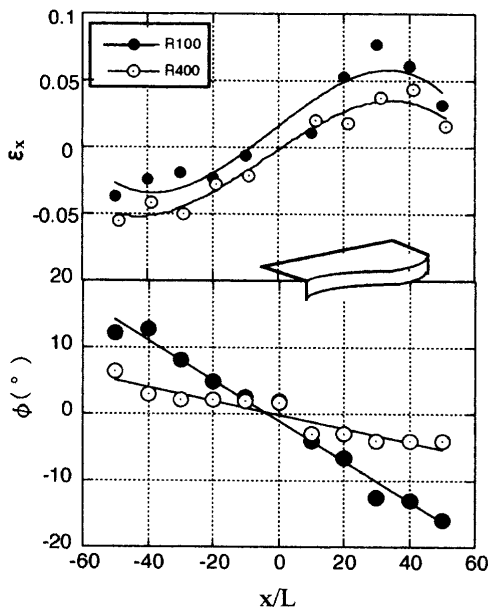


Fig. 8. Distribution of shear strain ϕ and strain ϵ_x in reverse flanging (SSPDX).

3.2.2 複合フランジ成形のフランジ部のせん断変形特性
 複合フランジ成形のひずみ ϵ_x 分布を、Fig. 8に示したように、プロフィール方向ひずみ ϵ_x は、フランジ部の中心、すなわち、異なる両フランジ成形の接続点で最小値となり、両フランジ相当部の中央近傍で最大値を示している。これは複合フランジ成形の場合の特徴と考えられる。
 フランジ部のせん断角 ϕ の分布は、中央部で最小値となり、両フランジ成形側で、中心線から X/L の位置にシフトするにつれて、大きくなっている。また、プロフィール曲

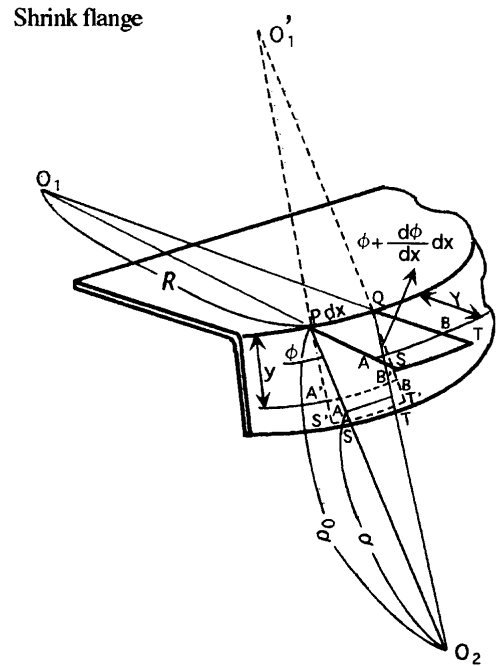


Fig. 9. Definition of element of shrink flanging.

率半径 R 100 mmの方が、 R 400 mmの場合よりせん断角が大きく現れている。

4. フランジ部のせん断変形特性の数式化と実験結果との比較

4.1 フランジ変形に関する基礎式

4.1.1 プロフィール曲率半径 R と相当曲率半径 ρ_0 との幾何学的関係

フランジ変形に関する基礎式を導くため、縮みフランジ成形の場合におけるフランジ部の要素の定義と成形前後における要素変化をFig. 9に示した。ここで、フランジ曲げ部のプロフィール方向のひずみは無視し、フランジ部の変形は、主としてせん断変形とフランジ先端部のプロフィール方向の伸び変形または縮み変形からなると仮定した。このせん断変形を厳密に解くことは困難であるとされているが、永井¹²⁾は、不均等伸びフランジ変形の解析において、変形の幾何学的関係から「相当曲率半径(ρ_0)」の概念を導入してせん断変形の解析を行っている。

本研究においても、永井の「相当曲率半径(ρ_0)」の概念を、縮みフランジ成形にも拡張して、伸び・縮みフランジ成形のフランジ部のせん断変形について解析を行った。せん断変形の解析を行うにあたり、Fig. 9に示した変形要素を次のように定義した。

変形前のウェブ部とフランジ部の両面における境界線 PQ に垂直な線素 PS は変形後 PS' となる。変形前のフランジ部内の線素 AB は、境界線 PQ から Y の距離にあり、変形後は $A'B'$ となり、 PQ から y の距離となる。

変形前のフランジ線素 PS と変形後の線素 PS' とのなす角

度を ϕ とすると、 ϕ はせん断変形によって生じるせん断ひずみに相当し、ここではせん断角と呼ぶこととする。また、プロフィール曲線 PQ の曲率半径 OIP を R とし、PS' と QT' の延長線の交点 O_2 から P までの長さを ρ_0 と定義し、 ρ_0 をフランジ成形の「相当曲率半径」と呼びこととする。

4.1.2 フランジ変形の基礎式の導出

伸びおよび縮みフランジ成形の $1/R$ と $1/\rho_0$ との関係式は、幾何学的関係から、式(1)と式(2)が導かれる。

伸びフランジ成形の場合：

$$1/R - 1/\rho_0 = d\phi/dx \dots\dots\dots (1)$$

縮みフランジ成形の場合：

$$1/R - 1/\rho_0 = d\phi/dx \dots\dots\dots (2)$$

フランジのプロフィール方向の伸びひずみと縮みひずみは、次の式(3)と式(4)のように定義される。

伸びひずみ：

$$\epsilon_x = \ln(A'B'/AB) = \ln(1+y/\rho_0) \dots\dots\dots (3)$$

縮みひずみ：

$$\epsilon_x = \ln(A'B'/AB) = \ln(1+y/\rho_0) \dots\dots\dots (4)$$

基礎式の誘導に当たって、材料の垂直異方性 (r 値) の影響を考慮すると、 $r = \epsilon_y/\epsilon_z$ であり、 $1+1/r = k$ とすると、 $\epsilon_y/\epsilon_z = -1/k$ となる。フランジ高さ方向ひずみ ϵ_y は、式(5)となり、 ϵ_y と ϵ_x との関係は式(6)がえられる。

$$\epsilon_y = \ln(dy/dY) \dots\dots\dots (5)$$

$$dy = e^{-\epsilon_y/k} dY \dots\dots\dots (6)$$

伸びフランジ成形における y , h および ϵ_x は、式(6)を積分すると式(7)、式(8)および式(9)がえられる。

$$\frac{y}{\rho_0} = \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{Y}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{h}{\rho_0} = \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{H}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\epsilon_x = \ln \left[1 + \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{H}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \dots\dots\dots (9)$$

同様に、縮みフランジ成形の場合の y , h および ϵ_x は、式(10)、式(11)および式(12)がえられる。

$$\frac{y}{\rho_0} = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{Y}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{h}{\rho_0} = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{H}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\epsilon_x = \ln \left[1 - \left(\frac{1+k}{k} \right) \frac{H}{\rho_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \dots\dots\dots (12)$$

また、 $r=1(k=2)$ の場合は、 $(1+k)/k=3/2$ を代入することとなる。フランジ部のせん断角と相当曲率半径 ρ_0 およびプロフィール方向ひずみ ϵ_x との関係は、Fig. 2 に示したように、フランジ部の中心から X の位置におけるせん断角 ϕ_x は、幾何学的関係から近似に式(13)によって表される。

$$\phi_x = \Delta x \times h_x = \epsilon_x \frac{L}{h_x} \dots\dots\dots (13)$$

また、式(13)に式(8)および式(11)を代入することによって、式(14)と式(15)がえられ、それぞれのフランジ成形のせん断角が求められる。

伸びフランジ成形のせん断角：

$$\phi_x = \left(\frac{\epsilon_x}{e^{\epsilon_x} - 1} \right) \frac{L}{\rho_0} \dots\dots\dots (14)$$

縮みフランジ成形のせん断角：

$$\phi_x = - \left(\frac{\epsilon_x}{e^{\epsilon_x} - 1} \right) \frac{L}{\rho_0} \dots\dots\dots (15)$$

また、伸びフランジ成形の場合の $1/R$, $1/\rho_0$ および $d\phi$ との関係を表す式(1)について積分すると、式(16)となり、これより式(17)の最大せん断角 ϕ_{max} がえられる。

$$\phi_x = \int d\phi = \int \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho_0} \right) dx \dots\dots\dots (16)$$

$$\phi_{max} = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho_0} \right) L \dots\dots\dots (17)$$

縮みフランジ成形の場合は、同様に式(2)について積分すると式(18)の最大せん断角 ϕ_{max} がえられる。

$$\phi_{max} = - \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\rho_0} \right) L \dots\dots\dots (18)$$

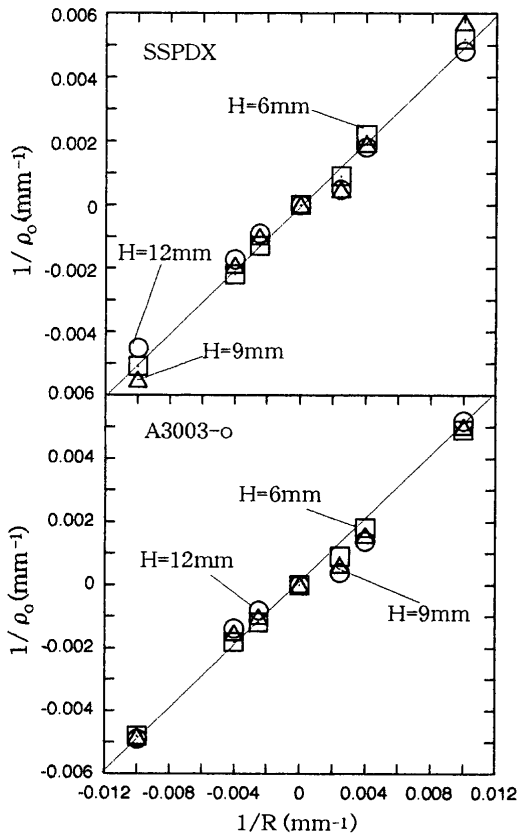


Fig. 10. Relationship between $1/R$ and $1/\rho_0$.

4.2 フランジ変形のモデル式と実験結果との対比

4.2.1 プロフィール曲率($1/R$)と相当曲率($1/\rho_0$)との関係

それぞれのフランジ相当曲率($1/\rho_0$)は、フランジ先端部のプロフィール方向の伸びひずみおよび縮みひずみ(ϵ_x)の実測値を、式(9)および式(12)に代入することによって求められる。このようにして求めたフランジ相当曲率($1/\rho_0$)とプロフィール曲率($1/R$)との関係は、Fig.10に示すように、軟鋼板(SSPDX)とアルミニウム合金材(A3003-O)ともほぼ同様の傾向となり、フランジ高さの影響は小さいことがわかる。また、フランジ相当曲率($1/\rho_0$)は、プロフィール曲率($1/R$)の約1/2倍に相当している。

プロフィール曲率半径等の関係から、相当曲率半径があらかじめわかれば、式(8)および式(11)の成形高さ h と相当曲率半径との関係式から、フランジ成形高さ h の推定および設計が可能となることを示している。

4.2.2 伸びおよび縮みフランジ成形のせん断角の計算値と実験値の比較

伸びおよび縮みフランジ成形の最大せん断角 ϕ_{max} とプロフィール曲率($1/R$)との関係において、式(17)と式(18)を用いた計算値と実験値との関係をFig.11に示した。プロフィール曲率($1/R$)が小さいほど、最大せん断角が小さくなり、計算値と実測値はほぼ一致していることを示している。

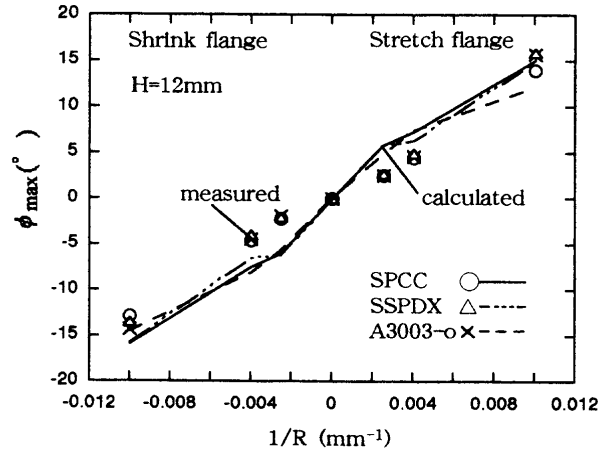


Fig. 11. Comparison between experimental result and calculated result of maximum shear angle ϕ_{max} .

また、 r 値の違いを含めた材料特性の差は、非常に小さいことも明らかとなった。以上のことから、プロフィール曲率($1/R$)が決まれば、どの程度のせん断変形を生じるかを予測することが可能であることを示している。

5. 結言

本研究で得られた結果を総括すると次のようになる。

(1) 伸びおよび縮みフランジ成形および複合フランジ成形のフランジ部に、せん断変形の発生が認められ、せん断変形量はプロフィール曲率($1/R$)との間に密接な関係がある。このせん断変形を抑制するには、プロフィール曲率を小さくすることが有効的な方法である。

(2) フランジ部のせん断変形を求める解析式を導き、相当曲率($1/\rho_0$)を求めることによって、フランジ部の伸び、縮みおよびせん断変形のひずみ特性が得られる。また、寸法精度が要求されるフランジ成形高さ(h)の推定の可能性もえられた。

文 献

- 1) K.Nakajima and T.Kikuma: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **9** (1968), 46.
- 2) 第2版プレス成形難易ハンドブック、薄鋼板成形技術研究会編、日刊工業新聞社、東京、(1997)、23.
- 3) Y.Tozawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **28** (1987), 93.
- 4) Y.Tozawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **29** (1988), 26.
- 5) L.Gu, K.Nakajima, M.Ono and Y.Tozawa: *Proc. Jpn. Spring Conf. Technol. Plast.*, (1996), 100.
- 6) Y.Tozawa: *J. Jpn. Inst. Light Met.*, **48** (1998), 317.
- 7) L.Gu, K.Nakajima, M.Ono and Y.Tozawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **40** (1999), 41.
- 8) K.Sato, R.Miya and H.Watanabe: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **31** (1990), 1414.
- 9) 第2版プレス成形難易ハンドブック、薄鋼板成形技術研究会編、日刊工業新聞社、東京、(1997)、214.
- 10) Y.Nagai: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **22** (1981), 912.
- 11) Y.Nagai: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **23** (1982), 23.
- 12) Y.Nagai: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **24** (1983), 247.