論文

リング圧縮試験の薄板形状への適用方法

— 薄鋼板の高ひずみ域の変形抵抗の測定 第 1 報 —

岩田 隆道* 上山 道明* 与語 康宏*

岩田 徳利* 石川 孝司** 鈴木 克幸***

Application of Ring Compression Test for Thin Sheet Metals

— Measurement Method for Flow Stress in Large Strain Range for Thin Sheet Metals (1st report) —

Takamichi IWATA*, Michiaki KAMIYAMA*, Yasuhiro YOGO*,

Noritoshi IWATA*, Takashi ISHIKAWA** and Katsuyuki SUZUKI***

(Received on January 17, 2013)

Flow stress is commonly measured by tensile test in the strain range before necking appears. The equivalent strain given in sheet metal forming is higher than the strain measured by tensile test. Although flow stress strongly affects the accuracy of FEM simulation, particularly for fracture simulations in stretch forming, extrapolated flow stress is applied to a strain range higher than the measurable ones. The purpose of this study is to propose a measurement method for the flow stress of thin sheet metals in a wide strain range, using the ring compression test. By considering the strain distribution of the workpiece and the elastic deformation of dies through compression, as well as the friction between the workpiece and the dies, it is possible to measure the flow stress of thin sheet metals up to a strain of 1.0. The validation of the measured data by the ring compression test developed was also conducted. The measured data was compared with the data obtained by the tensile test and upsettability test with specimens cut from the same thick sheet metal. The data of the ring compression test developed corresponds to other two data sets.

Key words: sheet metal forming, material testing, forming property, flow stress, ring compression test, numerical analysis, finite element method.

1. 緒言

薄鋼板のプレス成形シミュレーションは、製品開発コストの削減や開発サイクルの高速化に必要な不可欠なものとなっており、製品形状や割れなどの高精度な予測が求められている。特に、材料の弾塑性変形挙動は、成形シミュレーションの精度に大きく影響することが知られている。そのため、材料の変形挙動を高精度に表現するための塑性異方性材料モデルと、薄板面内の任意の方向に荷重を負荷したときの変形挙動を測定する材料試験に関する研究が行われ^{1),2)}、鉄鋼およびアルミ材料の降伏初期の塑性異方性変形挙動を測定、モデル化する技術が確立されてきた。

一方、変形抵抗は通常引張試験で測定されるが、一樣伸

び限界を超える領域の変形抵抗は測定できない。しかしながら、実際の薄鋼板のプレス成形中では、素材が複雑な変形を受けることによって成形中に発生する相当ひずみが引張試験の一樣伸び限界より大きくなる領域が多く存在しており、この領域には張出変形部やダイス肩部といった割れが問題となる領域が含まれている。通常、このような領域では、Ludwick 則³⁾、Swift 則⁴⁾などの近似式で引張試験の真ひずみと真応力の関係を外挿した変形抵抗を用いてシミュレーションが実施されるが、割れを高精度に予測するためには相当塑性ひずみが 0.5 を超えるような大ひずみ域での変形抵抗を実測することが望ましい。

薄板のひずみが 0.5 を超えるような大ひずみ域の変形抵抗を測定する方法として、引張試験時のくびれ発生部位を CCD カメラで詳細に観察、解析する方法⁵⁾⁻⁷⁾と、液圧バルジ試験による測定方法⁸⁾⁻¹⁰⁾が提案されている。前者は試験片のくびれ部位のひずみ分布を測定することが可能であるが、薄鋼板から切り出した試験片の応力分布の決定には逆解析を必要とする。そのため、計算モデルや材料特性などに十分注意して高精度な解析を行う必要がある。後者は一

* 株式会社豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1
Toyota Central R&D Labs., Inc.

41-1, Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192, Japan.

** 名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市中千種区不老町

Graduate School of Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan.

*** 東京大学人工物工学研究センター 〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

Research into Artifacts, Center for Engineering, The University of Tokyo

5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan.

般的に行われている方法であるが、測定できるひずみ領域が軟鋼板の場合約 0.5 程度であり、張出変形部やダイス肩部に発生するひずみ 1.0 程度まで測定することはできない。また、バルク材を対象として広く行われている方法として圧縮試験による測定方法がある。圧縮試験の課題は、工具と素材の接触端面における摩擦の取り扱いである。そこで、摩擦係数と変形抵抗の両方を未知数とし、逆解析によってこれらを同定する研究が行われている¹¹⁾。この方法は従来困難であった温度やひずみ速度に依存した変形抵抗を測定することに成功しているが、逆解析の実施には最適化手法を必要とする。一方、摩擦を小さくするために繰り返し潤滑をする方法や、摩擦の影響を相対的に小さくするために、試験片を積み重ねて高さを大きくする方法が提案されている¹²⁾。これらの方法は摩擦の影響を小さくするのに有効であるが、試験が煩雑になってしまう点が問題である。また、同心円状の溝をつけた工具を用いて端面を完全に拘束して変形抵抗を高精度に測定することができる端面拘束圧縮試験も提案されている^{13),14)}。この方法は摩擦の状態に依存せず簡便に変形抵抗を測定できるが、試験片の高さが小さいと金型端面の溝の影響が無視できなくなる。そこで、高さの小さい試験片に適用できる方法として、リング圧縮試験^{15),16)}を用いて摩擦係数と材料の変形抵抗を同時に測定できる手法が提案されている。この方法は、リングの内径変化から摩擦係数を同定した上で、変形抵抗を求める方法である。拘束面の溝による変形が無い場合、試験片高さを小さくすることができる。この方法は、J.R.Douglas らの研究¹⁷⁾に始まり、小坂田らの研究¹⁸⁾によって、剛塑性有限要素法を用いたバルク材の完全な変形抵抗を求める方法が提案されている。

本研究では、プレス成形時の張出変形部やダイス肩部に発生するひずみ 1.0 程度までの変形抵抗を測定可能で、かつ特殊な設備を必要としないで実施できる方法により薄板の変形抵抗を測定できる方法の開発に取り組んだ。そこで、一般的な万能試験機を用いて実施できる圧縮試験による方法に着目した。しかし、今回対象とするプレス成形用の薄板の変形抵抗は、材質が同じであっても厚板で測定した変形抵抗とは異なることがあるため、板厚 1~2mm 程度の板から試験片を切り出し、そのまま測定する必要がある。そこで、試験片高さを小さくできる方法として小坂田ら¹⁸⁾により提案されたリング圧縮試験による方法に着目した。しかし、リング圧縮試験は高さ 1mm 程度の薄板へ適用することを想定していないため、本研究では小坂田ら¹⁸⁾の方法に改良を加えた薄板リング圧縮試験による変形抵抗測定方法を開発した。次に、開発した試験方法の妥当性を検証するために、同一の素材から円柱形状の試験片と薄板形状の試験片を切り出し、バルク形状の大ひずみ域までの変形抵抗を高精度に測定できる端面拘束圧縮試験と、開発した薄板リング圧縮試験による方法で得られた結果を比較した。

2. リング圧縮試験による変形抵抗測定方法

2.1 小坂田らにより提案された方法

バルク材を対象に小坂田ら¹⁸⁾が確立したリング圧縮試験による変形抵抗の決定方法の手順について簡潔に述べる。

① 2次元軸対称モデルの剛塑性有限要素法モデルを用い、

試験片の形状は外形：内径：高さ = 6:3:2 としていくつかの摩擦係数を設定した解析を行う。

② 解析結果から高さ減少率とリング内径の縮小率の関係を導く。この関係に実験点をプロットして摩擦係数を同定する。

③ 同定した摩擦係数を用いた解析結果から、各要素について求められた相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_i$ の体積平均で定義される平均塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_{ave}$ と、そのときの相当応力 $\bar{\sigma}_i$ を式(1),(2)に代入して求める。

$$\bar{\varepsilon}_{ave} = \frac{\sum (\bar{\varepsilon}_i \times V_i)}{\sum V_i} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = a \left(\bar{\varepsilon} \right)^n \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\varepsilon} \right)^m \quad (2)$$

ここで、 V_i は各要素の体積である。

④ 解析結果から得られた圧縮荷重 P を用いて、試験片の大きさの影響を除いた見かけの圧縮応力 p を式(3)のように定義する。

$$p = P / A_0 \quad (3)$$

A_0 は圧縮前の端面(圧縮面)の面積である。次に、式(4)のように圧縮応力 p の相当応力 $\bar{\sigma}$ に対する比率を f とおき、これを拘束係数と定義する。

$$f = p / \bar{\sigma} \quad (4)$$

⑤ 実際に測定した圧縮荷重 P_m から式(5)を用いて各圧下率における平均変形抵抗 $\bar{\sigma}_{ave}$ を求める。

$$\bar{\sigma}_{ave} = \frac{P_m}{A_0 \cdot f} \quad (5)$$

⑥ 平均塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_{ave}$ と平均変形抵抗 $\bar{\sigma}_{ave}$ の関係から式(2)の加工硬化指数 n を求め、変形抵抗曲線が決定できる。

⑦ このようにして求めた変形抵抗を用いた解析を再度行い、内径比—摩擦係数の線図を用いて摩擦係数を再度計算し、変形抵抗曲線を求める。この計算を 2 回程度繰り返し、前の計算と現在の計算の差がほとんどなくなったときの変形抵抗を求める。なお、1 回目の計算における変形抵抗の計算値の収束値からのずれは 1~3% 程度である。

さらに、小坂田らの研究¹⁸⁾では、有限要素法による解析時に、式(2)の加工硬化指数 n およびひずみ速度依存指数 m の変形抵抗への影響は考慮する必要がなく、摩擦係数の影響のみを考慮すれば良いことが示されている。

2.2 薄板に適用するための改良点

本研究では、リング圧縮試験を用いた変形抵抗の決定方法を薄板に適用する方法を検討した。板厚 1mm 程度の薄板にリング圧縮試験を適用すると、試験片高さが小さくなり、それに伴って試験片全体のサイズも小さくなるため、以下 3 点の工夫を行った。

① 通常はラムの変位を測定し、試験片の高さ変化を求めるが、治具のたわみ、がたつきの影響を含んだ測定結果とな

る。そこで、金型にマーカーを貼り付け、その変位をビデオ測定することで、これらの影響を除いた高さ減少率を測定した。

②通常はリング内径をノギスで測定するが、高精度に測定するために実体顕微鏡による拡大画像を用いてリング内径を測定した。

③有限要素法による解析では、金型の弾性変形を考慮した弾塑性解析によって高さ減少率の解析精度を向上させた。

また、小坂田らの研究¹⁸⁾では、相当応力の算出に式(2)を用いているが、今回は解析時にテーブル形式で変形抵抗を入力し、塑性ひずみと同様に体積平均して相当応力を求めた。このようにすることで、数式で応力ひずみ関係を仮定せずにテーブル形式で変形抵抗を得ることができる。

3. 実験方法

開発した薄板リング圧縮試験の信頼性を検証するため、板厚 4.5mm の同一の軟鋼板から Fig.1 のように引張試験片、端面拘束圧縮試験片、薄板リング圧縮試験片を切り出し、それぞれの方法で変形抵抗を算出した。

Fig. 1 Schematic diagram of specimens

3.1 小坂田らにより提案された方法

開発した薄板リング圧縮試験のために、試験機は島津製オートグラフを用いて試験片を真ひずみ 1.0 程度に相当する高さ減少率約 65%まで圧縮した。また、試験片に均一の圧力が負荷できるよう、上側の圧縮工具の上方に球面座を設けた Fig.2, Fig.3 に示した治具を用いた。

3.2 実験方法

(1) 引張試験 引張試験は JIS5 号試験片を用い、0.02mm/sec の引張速度で圧延方向引張時の変形抵抗を測定した。

Fig. 2 Schematic diagram of specimen and experimental setup for the ring compression test

Fig. 3 Photo of thin ring compression test

(2) 端面拘束圧縮試験 端面拘束圧縮試験は、直径 3mm、高さ 4.5mm の円柱状の試験片を用い、同心円状の溝をつけた金型で 0.002mm/sec の速度で圧縮した。

(3) 薄板リング圧縮試験 薄板リング圧縮試験には、外径 4mm、内径 2mm、高さ 1mm の薄いリング状の試験片を用いた。圧縮面は Rz/JIS6.3 以下に仕上げられ、加工中の摩擦係数の変化を小さくするため潤滑剤は塗布しなかった。試験片が小さいため、リング内径、外形の測定は実体顕微鏡による拡大画像を用いて行った。また、試験片の高さ減少率は通常押し込み量のストロークから計算するが、本研究では小さい試験片の高さ変化を高精度に測定するため、上下の金型の端に変位測定用のマーカーを貼り付け、その変位をビデオ撮影して測定した。なお、本装置による変位の測定精度は $\pm 3\mu\text{m}$ である。圧縮速度は端面拘束圧縮試験と同様の 0.002mm/sec とした。

3.3 解析方法

(1) 引張試験 実験によって測定された評点間距離と荷重の関係から式(6),(7)を用いて変形抵抗を算出した。

$$\bar{\varepsilon} = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \left(1 + \frac{l-l_0}{l_0} \right) \frac{P}{A_0} \quad (7)$$

ここで、 l_0 は試験前の評点間距離、 l は現在の評点間距離、 P は荷重、 A_0 は試験前の断面積である。

(2) 端面拘束圧縮試験 実験によって測定された試験片高さと荷重の関係から、小坂田らの方法^{13),14)}で変形抵抗を算出した。具体的には式(8)で試験片高さ h を相当塑性ひずみ ε に変換し、式(9)で荷重 P を変形抵抗 Y に変換した。ここで、 R は圧縮率、 f は拘束係数である。 R, ε, f の関係は論文 14) の表 2 にまとめられているものを用いた。

$$\varepsilon = \phi(R) = \phi \left(\frac{h_0 - h}{h_0} \right) \quad (8)$$

$$Y = \frac{1}{f} \frac{P}{A_0} \quad (9)$$

(3) 薄板リング圧縮試験 変形抵抗を算出する手順は 2.1 節で述べた小坂田らの方法¹⁸⁾と同じであるが、今回は有限要素法による解析モデルと、2.1 節の手順③で行う相当応力の算出方法を変更した。このフローチャートを Fig.4 に示した。

解析ソフトは商用ソフトである FORGE を用いた。また、

小坂田らの方法¹⁸⁾と同様に金型を剛体としたモデルと、金型を弾性体としたモデルの2通りで計算し、結果を比較した。その解析モデルを Fig.5 に示した。2.1 節の手順③で行う相当応力の算出は、小坂田らの研究¹⁸⁾で式(2)を用いているのに対し、本研究では、解析で得られた各部位の相当応力を体積平均した式(10)を用いた。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum (\bar{\sigma}_i \times V_i)}{\sum V_i} \quad (10)$$

このようにすることで、2.1 節の手順⑥で行う繰り返し計算時に、式(2)の硬化則の係数を求める手間が省けるとともに、応力ひずみ関係式を仮定することなくテーブル形式で変形抵抗を直接入力することができる。

Fig. 4 Flow chart of thin ring compression test

Fig. 5 Schematic diagram of FEM analysis model

4. 結果と考察

4.1 金型の FEM モデルの影響

Fig.6 に摩擦係数の同定結果を示した。従来の金型を剛体で定義したモデルで計算した場合と、今回の金型を弾性体で定義したモデルで計算した場合の摩擦係数は、それぞれ 0.195, 0.185 となり、異なる結果となった。

また、金型を弾性体で定義したモデルを用いると、治具の弾性変形による試験片の 0.02mm 程度のわずかな変形によって塑性ひずみの分布が変化し、Fig.7 に示したように平均塑性ひずみが減少した。その結果、Fig.8 に示したように従来の金型を剛体で定義したモデルより拘束係数が小さくなった。

Fig. 6 Comparison of relationships between reduction in height and change in inner diameter

Fig. 7 Comparison of average equivalent strain between rigid die model and elastic die model

Fig. 8 Comparison of restraint factor between rigid die model and elastic die model

4.2 薄板リング圧縮試験と端面拘束圧縮試験の比較

Fig.9 に引張試験, 端面拘束圧縮試験, 薄板リング圧縮試験による変形抵抗測定結果を示した. 薄板リング圧縮試験は, 金型を剛体で定義したモデルで計算した場合と, 金型を弾性体で定義したモデルで計算した場合をそれぞれ示した. 開発した薄板リング圧縮試験による変形抵抗は, 低ひずみ域では引張試験の結果に一致し, 高ひずみ域ではバルク材で測定実績のある端面拘束圧縮試験の結果と一致した. そのため, 薄板の変形抵抗が塑性ひずみ 1.0 程度まで高精度に測定できることが実証された. また, 金型を剛体で定義したモデルによる結果は, ひずみ 0.5 以下の領域では金型が弾性体の結果と一致したが, ひずみ 0.5 以上の領域では違いが生じ, 金型を弾性体で定義したモデルを用いる必要性が確認された.

Fig. 9 Comparison of flow stresses by the tensile test, upsetting test and the thin ring compression test

5. 結 言

薄板のプレス成形時の張出変形部やダイス肩部に発生する, ひずみ 1.0 程度の領域の変形抵抗を測定するため, 薄板形状の試験片における変形抵抗を計算する方法の開発に取り組んだ. その結果を以下に記す.

- (1) バルク材を対象としているリング圧縮試験を用いた変形抵抗の決定方法に, ①高さ減少率の測定の高精度化と, ②変形抵抗を同定するとき無視できなくなる金型の弾性変形を考慮した解析を行うことで, 薄板形状に適用可能な高ひずみ域の変形抵抗測定方法を開発した.
- (2) 開発した薄板リング圧縮試験による高ひずみ域の変形

抵抗の結果は, バルク材で高ひずみ域までの測定実績がある端面拘束圧縮試験の結果と一致したことから, 板厚 1.0mm 程度の薄板の変形抵抗を相当塑性ひずみ 1.0 程度まで高精度に測定できることが実証できた.

- (3) 従来の金型を剛体としたモデルを用いたリング圧縮試験による変形抵抗の測定結果は, ひずみ 0.5 以上の領域で金型を弾性体で定義したモデルと差が認められた. このことから, 板厚 1.0mm 程度の薄板の変形抵抗をひずみ 1.0 程度まで求めるためには, 金型の弾性変形を考慮することが重要である.

参 考 文 献

- 1) 白鳥英亮・池上皓三: 材料, **16**-165(1967), 433-439.
- 2) Kuwabara, T.: Int. J. Plasticity, **23**-3(2007), 385-419.
- 3) Ludwik, P.: Element der Tech. Mech, (1909), 32.
- 4) Swift, H.W.: J. Mech. Phys. Solids, **1** (1952), 1-18.
- 5) Coppieters, S., Cooreman, S., Sol, H., Van Houtte, P. & Debruyne, D.: J. Mater. Process. Technol., **211**(2011), 545-552.
- 6) Vaz Junior, M., Cardoso, E.L., Andres, P. & Rojas, M.: Proc. Metal Forming 2012 Congress, (2012), 935-938.
- 7) Yoshida, Y., Yukawa, N. & Ishikawa, T.: Mater. Process. Des., **1**(2011), 1869-1874.
- 8) 吉田清太・吉井康一・小森田浩・臼田松男: 塑性と加工, **11**-114(1970), 513-522.
- 9) 吉田清太・吉井康一・臼田松男・渡辺肇: 塑性と加工, **11**-116(1973), 670-675.
- 10) 西村尚・宮川松男: 塑性と加工, **14**-144(1973), 3-11.
- 11) Yanagida, A., Liu, J. & Yanagimoto, J.: Mater. Trans., **44**-11 (2003), 2303-2310.
- 12) 日本塑性加工学会・鍛造分科会編: 精密鍛造, (2010), 日刊工業新聞社.
- 13) Osakada, K. & Mori, K.: CIRP Annals, **27**-1(1978), 135-139.
- 14) Osakada, K., Kawasaki, T., Mori, K. & Taniguchi, N.: CIRP Annals, **30**-1(1981), 135-138.
- 15) 久能木真人: 科学研究所報告, **30**-2(1954), 63-92.
- 16) Male, A.T. & Cockcroft, M.G.: J. Inst. Met., **93**(1964), 38.
- 17) Douglas, J. R. & Altan, T.: Trans. ASME, J. Eng. Ind., **97** (1975), 67-76.
- 18) 小坂田宏造・白石光信・村木重節・徳岡雅康: 日本機械学会論文集 C 編, **55**-516(1989), 2213-2220.