論文

金属薄板の面内に引張圧縮組合せ応力を負荷する 材料試験法

桑原 利彦* 堀内 義雅**

上間 直幸*** ヤナ ジーゲルハイモヴァ*

Material Testing Method of Applying In-Plane Combined Tension-Compression Stresses to Sheet Specimen

Toshihiko KUWABARA*, Yoshimasa HORIUCHI**,

Naoyuki UEMA*** and Jana ZIEGELHEIMOVA*

(Received on November 13, 2006)

An experimental method of applying in-plane combined tension-compression stresses to a sheet specimen is proposed. Comb-shaped dies are specially designed for the tension-compression test and are installed into a biaxial stress-testing machine developed by one of the authors [Kuwabara and Ikeda: J. JSTP, 40-457 (1999), 145-149]. To check the usefulness of the testing apparatus proposed in this study, we carried out biaxial stress experiments using a high strength steel with a tensile strength of 440MPa, and detailed measurements were made of the plastic work contours as below and the directions of the incremental plastic strain vectors at different levels of work-hardening for linear stress paths in the second and fourth quadrants of the principal stress space, as well as in the first quadrant. We found that the measured work contours are similar in shape, and that the directions of the incremental plastic strain vectors remain almost constant at each constant stress ratio. The work contours and the directions of the incremental plastic strain vectors are in close agreement with those predicted using the Hosford or Yld2000-2d yield function.

Key words : sheet metal forming, material testing, yield function, steel, anisotropy, biaxial stress

1. 緒 言

プレス成形シミュレーションの高精度化への要求が高まっている。プレス成形時に起こる破断、しわ、スプリングバックなどの成形不良は、材料内部に発生する応力によって律則される。したがってこれらの成形不良を高精度に予測するためには、応力の計算値が可能な限り実際の値に近く計算される必要がある。そのためには、シミュレーションで用いる材料モデル（降伏関数）が実際の材料の変形挙動をなるべく精度よく再現できること、が必要である¹⁾。

プレス成形における板材の変形状態は、絞り、張出し、伸びフランジ、曲げの 4 種類に分類される²⁾。張出し変形と伸びフランジ変形においては、材料は単軸もしくは 2 軸引張変形を受ける。このときの応力状態は、2 次元応力座標における第 1 象限に相当する。2 軸引張変形における金

属板材の弾塑性変形挙動を測定するための材料試験法としては、十字形試験片を用いた 2 軸引張試験法³⁾が提案されている。また降伏応力が静水応力に依存しない場合は、接着積層ブロック材を直交 2 方向に圧縮する試験方法^{4), 5)}でも 2 軸引張と等価な応力状態を創成することができる。

一方、絞り変形においては、材料は面内の単軸圧縮もしくは直交 2 方向に引張圧縮の組合せ応力を受ける。このときの応力状態は、2 次元応力座標における第 2 および第 4 象限に相当する。例えば、トレスカの降伏条件式に従う等方性材料であれば、引張と圧縮の降伏応力は同じ値になるので、これらの象限における降伏曲線は傾き 1 の線分で表現される。しかし、マグネシウムやチタンなどの稠密六方晶系材料^{4), 6)~7)}や高強度鋼⁸⁾では、引張と圧縮で材料の降伏応力が異なる現象（SD 効果）が報告されている。このような材料の引張圧縮組合せ応力場における弾塑性変形挙動を実測することは興味深い研究課題であるが、金属薄板に引張圧縮組合せ応力を作用させ、応力ひずみ曲線の直接測定に成功した研究は過去にない。

本研究では、金属薄板の面内直交 2 方向に引張圧縮組合せ応力を作用させて、材料の弾塑性変形挙動を測定するための材料試験法を提案する。さらに、有限要素法による応力解析ならびに 440MPa 級高張力鋼板を用いた実験を行う

*東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 先端機械システム部門
〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16
Graduate School, Institute of Symbiotic Science and Technology, Division of
Advanced Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture
and Technology, 2-24-16, Nakacho, Koganei-shi, Tokyo 184-8588, JAPAN

**同上 ibid. (graduate student)

***住友軽金属工業(株) 研究開発センター
〒455-8670 名古屋市中区千代 3-1-12
SUMITOMO LIGHT METAL INDUSTRIES, LTD., Research & Development
Center, 3-1-12, Chitose, Minato-ku, Nagoya-shi, 455-8670, Japan

ことにより本試験法の有効性を検証したので報告する。

2. 実験方法

2.1 2 軸応力試験機

本研究で用いた 2 軸応力試験機を **Fig. 1** に示す。本試験機は文献9)および11)～13)で用いた試験機と同じである。各軸方向の最大荷重容量は 50kN である。対向する油圧シリンダには同じ油圧が作用し、各軸の油圧は、制御用コンピュータの指令値に従って、サーボ弁により独立してフィードバック制御される。対向する油圧シリンダの変位はパンタグラフ型の等変位機構¹⁰⁾により強制的に等しくされ、試験片の中心位置は常に定位置に保たれる。ロードセルによる荷重の測定値とひずみゲージによるひずみの測定値は、0.5 秒毎に同時にデータロガーにより収集され、測定用コンピュータに保存される。

2.2 試験片

本研究で用いた試験片を**Fig. 2**に示す. 同図(a)は2軸引張試験用の十字形試験片であり, 文献9)で用いた試験片と同一形状である. 各腕部は, 長さ 60mm×幅 0.2mm のスリットを 7.5mm 間隔に 7 本有し, 60mm×60mm の中心領域(応力測定部)に及ぼす腕部の変形拘束の影響を極力小さくしている. 素板からの試験片の切り出し加工およびスリットの加工はすべてレーザー加工にて行った. 以下, 本試験片を試験片 A と呼ぶこととする.

各軸方向の垂直ひずみ成分は、ひずみゲージ（東京測器製塑性域ゲージ YEFLA-2）により測定した。ひずみゲージは、原点（試験片中心）から 15mm 離れた x, y 軸上の 4ヶ所に貼付した。 x 軸方向のひずみ成分は x 軸上に貼り付けたひずみゲージにより、 y 軸方向のひずみ成分は y 軸上に貼り付けたひずみゲージにより各々測定し、各ひずみ成分毎に、それら 2 箇所の測定値の平均値をもってひずみの測定値とした。各軸方向の垂直応力成分 σ_x, σ_y は、荷重の測定値をその瞬間の断面積（面内塑性ひずみの測定値より算定）で除した真応力として求めた。なお、有限要素法による解析によれば、応力の測定誤差は、応力比 1:1 で 1.3%、応力比 2:1 で 2.2%（最大主応力）および 3.8%（最小主応力）である¹¹⁾。

Fig. 2(b)は、引張圧縮組合せ応力試験用の試験片であり、本研究ではじめて提案する試験片である。長手方向に引張荷重を、幅方向に圧縮荷重を負荷することにより、引張圧縮組合せ応力場を $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ の中心領域（応力測定部）に発生させることができる。本試験片用に特別に設計製作した治具を Fig. 1 の 2 軸応力試験機に装着することにより、引張荷重と圧縮荷重の同時負荷が可能である (2.3 節参照)。以下、本試験片を試験片 B と呼ぶこととする。

試験片 B の腕部は、長さ 60mm×幅 0.8mm のスリットを 7.5mm 間隔に 7 本有し、60mm×60mm の応力測定部に及ぼす腕部の変形拘束の影響を極力小さくしている。素板からの試験片の切り出し加工およびスリットの加工はすべてレーザー加工にて行った。本試験片のスリット幅を 0.8mm とした理由は次のようである。本試験片を幅方向に圧縮すると、スリット幅が狭まり、ついにはスリットの両側面が互いに接触する状態になる。スリットの両側面が接触すると、

Fig. 1 Biaxial tensile testing machine

Fig. 2 Geometry of specimen : (a) Cruciform specimen for biaxial tension test (specimen A) ; (b) Specimen for combined tension-compression test (specimen B)

その接触面で圧縮荷重の一部が負担されてしまうため、真応力を計算する際に必要となる断面積が特定できなくなる。そこで試験片 B のスリット幅を 0.8mm として、試験片 A のスリット幅よりも広くとった。これにより、幅方向の圧縮ひずみが約 10%に達するまでは、スリットの両側面が接触することなく試験片を圧縮することが可能となる。

各軸方向の垂直ひずみ成分は、2 軸ひずみゲージ（東京測器研究所製 FCA-1-11）を応力測定部の中心に貼り付けて測定した。

2.3 引張圧縮試験用治具

試験片 B に引張荷重と圧縮荷重を同時に負荷するための治具を考案した。治具の形状と組立方法の概要を **Fig. 3** に示す。まず、同図(a)に示す下型を、2 軸引張試験機の対向する 1 組の油圧シリンダの先端に接続する。下型の先端部は櫛歯を有しており、一方の下型の櫛歯が他方の下型の櫛歯の間に互い違いに挿入されるように設計した。櫛歯の

歯幅は2.7mm, 歯間の間隔は3mmである. 左右の下型をかみ合わせ, その上に試験片 B を置いた状態を同図(b)に示す. 次に, (b)の状態の左右の下型の上から(c)に示す上型をかぶせ, ボルトで固定する. ここで, 下型と上型の間にスペーサを挟むことにより, 下型と上型のすき間を試験片の板厚の1.05倍に設定した. これにより, 素板にしわ抑え力を負荷する装置が不要であり, 定すき間方式で試験片の挫屈を抑制することができる. 下型の中央には幅60mmの圧縮板が固定されており, これが試験片 B の応力測定部の板縁を左右から圧縮する.

試験片と金型間の摩擦力を低減するために, 試験片と上型および下型の間に厚さ $50\mu\text{m}$ のテフロンシートを挿入した. さらに下型の上に敷いたテフロンシートの縁を折り曲げ, 圧縮板と試験片端面の間にもテフロンシートを挟むことにより, 圧縮荷重負荷面の摩擦係数も極力低減するよう工夫した.

引張圧縮試験開始時の治具の組上がり状態をFig. 3 (d)に示す. 試験片 B は上型と下型の間にはさまれ, その両端は2軸引張試験機の引張用チャックでつかまれている. ひずみゲージのリード線は上型の歯間のすき間から引き出されている.

Fig. 3 Test jigs for combined tension-compression test : (a) Lower die ; (b) Specimen B put on lower dies ; (c) Upper die ; (d) Specimen B sandwiched between lower and upper dies with both ends cramped by the chucks of a biaxial tensile testing machine

Table 1 Mechanical properties of a test material

Tensile direction	$\sigma_{0.2}$ /MPa	c^* /MPa	n^*	α^*	r^{**}
0°	287	808	0.245	0.009	1.04
45°	294	788	0.251	0.013	1.49
90°	317	811	0.236	0.015	1.51

* Approximated using $\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n$ at $\epsilon^p = 0.05 \sim 0.09$

** Measured at uniaxial plastic strain $\epsilon^p = 0.09$

2.4 供試材

供試材は, 板厚 0.8mm の 440MPa 級高張力鋼板である. 供試材の機械的性質を Table 1 に示す. 以下, 材料の圧延方向を x 軸, 圧延直角方向を y 軸とする.

2.5 2軸応力試験の方法

Fig. 1の2軸応力試験機を用いて, 2軸引張試験と引張圧縮組合せ応力試験を行った. 2軸引張試験では試験片 A を用い, 公称応力比を $\sigma_{Nx}:\sigma_{Ny} = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$ の7通りに変化させた. 圧延方向および圧延直角方向の単軸引張試験では, JIS13号B型試験片を使用した. 引張圧縮組合せ応力試験では試験片 B を用い, 公称応力比を $\sigma_{Nx}:\sigma_{Ny} = 3:-1, 1:-1, 1:-3, -1:3, -1:1, -3:1$ の6通りに変化させた.

2軸応力下での加工硬化挙動を定式化するため, これまでの研究^{7), 9), 11) ~ 13)} 同様, 等塑性仕事面^{14), 15)}を測定して, 異方性降伏関数による計算値と比較した. 等塑性仕事面は以下の手順で求めた. まず圧延方向の単軸引張試験より, 既定の対数塑性ひずみ ϵ_0^p に達するまでになされた単位体積あたりの塑性仕事 W を求める. ついで, 2軸応力試験より測定された応力ひずみ曲線より, W と等量の塑性仕事を与える真応力 (σ_x, σ_y) を応力空間にプロットし, 当該の ϵ_0^p に対する等塑性仕事面を決定した. ϵ_0^p の値を十分小さくすれば, 測定された等塑性仕事面は, 供試材の初期降伏曲線と見なすことができる.

3. 有限要素法による試験片の応力解析

試験片 B による応力の測定誤差を評価するため, 有限要素解析を行った. 使用したソフトウェアは, ABAQUS Ver. 6.5 である. 試験片形状の対称性を考慮して, 試験片の1/4領域を解析対象とした. Fig. 4に要素分割を示す. 平面応力状態を仮定し, 要素は4節点四角形要素を用いた. 座標軸は, 引張軸方向を x 軸, 圧縮軸方向を y 軸とする.

荷重比は $F_x:F_y = 1:-1$ とした. 引張荷重 F_x は, 腕部端面に均等分布荷重として作用させた. 圧縮荷重 F_y は, 応力測定部の側面60mm区間に対して, 均等圧縮変位の境界条件のもとで作用させた. 圧縮工具と応力測定部端面の間の摩擦係数は0.05と設定した. 材料の加工硬化式は, Table 1の圧延方向の値を用い, Von Misesの降伏条件式を仮定した.

応力測定部の相当塑性ひずみがほぼ0.002に達した時点での, 応力測定部における応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ の分布を Fig. 5に示す. 等高線の増分は約2MPaである. スリット端部の近傍では応力勾配が急峻であるが, 応力測定部の中心領域では応力勾配は小さい. このときの荷重の計算値は $F_x = -F_y = 4280\text{N}$ であり, 板厚ひずみはほぼゼロであった. 従ってこの時点での真応力 (応力測定部における平均値) は, $4280(\text{N})/30(\text{mm}^2) = 142.7(\text{MPa})$ と計算できる. 一方, 応力測定部の中心部 (実験ではここでひずみを計測している) において, $139.2 < \sigma_x < 141.8\text{MPa}$, $140.9 < -\sigma_y < 143.2\text{MPa}$ の範囲に入っているため, 応力の測定誤差は σ_x で3%未満, σ_y で2%未満である. せん断応力は, 応力測定部の中心を含む約70%の面積範囲で $-2.2 < \sigma_{xy} < 0\text{MPa}$ (最大主応力の1.5%未満) であるため, ほぼ純粋せん断応力状態とみなしてよい. 相当塑性ひずみがほぼ0.04に達した時点に

Fig. 4 Initial mesh division used for the finite element analysis of the specimen B as shown in Fig. 2 (b)

Fig. 5 Distribution of (a) σ_x , (b) σ_y and (c) σ_{xy} calculated using FEM in the gauge section of the specimen B. $F_x = -F_y = 4280\text{ N}$ (Equivalent plastic strain is about 0.002). The increment of contour is about 2MPa.

対して同様の解析を行った。その結果、応力の測定誤差は σ_x で 1%未満、 σ_y で 4%未満であることを確認した。またせん断応力は、応力測定部の中心を含む約 70%の面積範囲で最大主応力の 4%未満であった。以上よりほぼ純粋せん断応力状態とみなせることがわかった。

4. 実験結果および考察

引張圧縮組合せ試験による実験結果の一例として、公称応力比 $\sigma_{Nx} : \sigma_{Ny} = 1 : -1$ において測定された真応力-対数塑性ひずみ曲線を Fig. 6 に示す。比較のために、圧延方向の単軸引張試験より測定された真応力-対数塑性ひずみ曲線を破線で示す。前者の塑性流動応力は後者のそれに比べて明らかに低下している。これは、平面応力状態に対して描かれる Tresca や Von Mises の降伏曲線の形状からも容易に

推測できる。

等塑性仕事面の測定結果を Fig. 7 に示す。比較のために、次数 6 の Yld2000-2d 降伏関数¹⁶⁾による降伏曲線も併記する。Yld2000-2d の 6 個の材料パラメータの決定においては、圧延方向および圧延直角方向の単軸引張試験から測定された r 値および塑性流動応力、ならびに等 2 軸引張における塑性流動応力と塑性ひずみ増分比 $d\epsilon_y^p/d\epsilon_x^p$ を用いた。各プロット点から伸びている線分は、その応力点に達した瞬間における塑性ひずみ増分ベクトルの方向を示す。一つの応力比に対して試験を 2 回づつ行い、得られた測定値の平均値をプロットした。測定値のばらつきは当該塑性流動応力の概ね 2%以下であった。Yld2000-2d は、 $\sigma_{Nx} : \sigma_{Ny} = 3 : -1$ および $1 : -1$ において、塑性流動応力を実験値よりも若干低めに予測しているが、それ以外の応力比では実験値とよい一致を示している。

無次元化等塑性仕事面の測定値と各種降伏曲線との比較を Fig. 8 に示す。無次元化等塑性仕事面とは、Fig. 7 の応力点の値を当該の ϵ_0^p に対応する σ_0 で除して無次元化して表示したものである。材料が等方的に硬化するのであれば、加工硬化 (ϵ_0^p の増加) にもよって等塑性仕事面は相似形

Fig. 6 True stress-logarithmic plastic strain curves measured for $\sigma_{Nx} : \sigma_{Ny} = 1 : -1$

Fig. 7 Comparison of work contours with the Yld2000-2d yield criterion : $\epsilon_0^p = \bullet 0.0005, \circ 0.005, \blacktriangle 0.02, \triangle 0.03, \blacktriangledown 0.04$

状を保ち、すべての測定値は同一曲線上に載るはずである。しかし、本供試材の等塑性仕事面の形状は、加工硬化とともにわずかながら形状が変化する、いわゆる異方硬化¹⁵⁾を示している。すなわち、第1象限の $\sigma_x > \sigma_y$ の領域では、加工硬化に伴い等塑性仕事面はわずかに膨張傾向を示している。同様の傾向は、平均 r 値がおよそ1.5以上の鋼板の2軸引張試験^{9), 12), 13)}においても観察されている。一方、第2および第4象限では、等塑性仕事面はわずかに縮退傾向を示している。これについては、単なる実験誤差であるのか、なんらかの材料学的因子に起因する現象であるのかは現段階では不明である。

さらに同図において、(1) 等塑性仕事面は次数6のHosfordの降伏関数¹⁷⁾と概ね一致している、(2) Hillの2次降伏関数¹⁸⁾は、平面ひずみ引張から等2軸引張に至る応力範囲において、材料の塑性流動応力を過大に評価している(等塑性仕事面の外側に位置している)、ことがわかる。これらも、 r 値が比較的大きい鋼板に特有の傾向である^{9), 12)}。

各 ϵ_0^p のレベルまで塑性変形が達した瞬間における塑性ひずみ増分ベクトル($d\epsilon_x^p, d\epsilon_y^p$)の方向と各種降伏関数による計算値(降伏曲線の法線ベクトル方向)をFig. 9に示す。応力比によらず、 $0.005 \leq \epsilon_0^p$ では塑性ひずみ増分ベクトルの方向はほぼ一定であり、次数6のYld2000-2dもしくはHosford降伏関数による計算値と概ね一致している。

5. 結 論

金属薄板の面内直交2方向に引張圧縮組合せ応力を負荷するための治具および試験片を考案した。さらに、有限要素解析ならびに440MPa級高張力鋼板(板厚0.8mm)を用いた実験を行うことにより本試験法の有効性を検証した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 有限要素法による解析の結果、本試験法による応力の測定誤差は最大主応力方向で3%未満、最小主応力方向で2%未満と推定された。
- (2) 応力空間の第2および第4象限における440MPa級高張力鋼板の応力ひずみ曲線の測定に成功した。
- (3) 440MPa級高張力鋼板の等塑性仕事面および塑性ひずみ増分の方向は、次数6のYld2000-2dもしくはHosford降伏関数による計算値と概ね一致した。

今後は、チタンやマグネシウムのようなSD効果を有する板材に本試験法を適用し、引張圧縮組合せ応力場における塑性変形挙動を明らかにする予定である。

参 考 文 献

- 1) 桑原利彦：塑性と加工，**44**-506 (2003)，234-239。
- 2) 薄鋼板成型技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック 第2版，(1997)，423，日刊工業新聞社。
- 3) Kuwabara, T.: Int. J. Plasticity, **23**-3 (2007)，385-419。
- 4) Lee, D. & Backofen, W. A.: Trans. TMS-AIME, **236** (1966)，1077-1084。
- 5) 戸澤康壽・中村雅勇：塑性と加工，**13**-140 (1972)，699-702。
- 6) Kelley, E. W. & Hosford, W. F.: Trans. TMS-AIME, **242** (1968)，654-661。
- 7) Kuwabara, T., Katami, C., Kikuchi, M., Shindo, T. &

Fig. 8 Comparison of work contours with theoretical yield loci. Stress components are normalized by the uniaxial tensile flow stress, σ_0 , corresponding to specific values of ϵ_0^p .

Fig. 9 Comparison of measured plastic strain rate vectors with those predicted using conventional yield criteria

- Ohwue, T.: Proc. 7th Int. Conf. Numerical Methods in Industrial Forming Processes, (2001), 781-786, Balkema.
- 8) Spitzig, W. A., Sober, R. J. & Richmond, O.: Acta Metall. **23**-7 (1975)，885-893。
- 9) 桑原利彦・池田聡：塑性と加工，**40**-457 (1999)，145-149。
- 10) 白鳥英亮・池上皓三：材料，**16**-165 (1967)，433-439。
- 11) Kuwabara, T., Kuroda, M., Tvergaard, V. & Nomura, K.: Acta Mater., **48**-9 (2000)，2071-2079。
- 12) Kuwabara, T., Bael, A. V. & Iizuka, E.: Acta Mater., **50**-14 (2002)，3717-3729。
- 13) 池田聡・桑原利彦：鉄と鋼，**90**-12 (2004)，1016-1022。
- 14) Hill, R. & Hutchinson, J. W.: J. Appl. Mech., **59** (1992)，S1-S9。
- 15) Hill, R., Hecker, S. S. & Stout, M. G.: Int. J. Solids Struct., **31** (1994)，2999-3021。
- 16) Barlat, F., Brem, J. C., Yoon, J. W., Chung, K., Dick, R. E., Lege, D. J., Pourboghrat, F., Choi, S. H. & Chu, E.: Int. J. Plasticity, **19** (2003)，1297-1319。
- 17) Logan, R. W. & Hosford, W. F.: Int. J. Mech. Sci., **22**-7 (1980)，419-430。
- 18) Hill, R.: Proc. Roy. Soc., **A193** (1948)，281-297。