

反転負荷試験方法の開発と板材のバウシinger効果の測定

静岡大学工学部機械工学科 Mi3 永谷圭祐
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

近年、自動車パネルへのアルミニウム合金板の適用が進んでいる。しかしながら、アルミニウム合金板は鉄鋼材料に比べヤング率が低いいため、プレス成形時のスプリングバック量が大きいという課題がある。さらに、スプリングバック量は、バウシinger効果に依存することが分かっている。したがって、板材のバウシinger効果を測定し、成形解析によりスプリングバック量を正確に予測することが肝要である。

桑原ら¹⁾は板材に対して反転負荷試験を行い、バウシinger効果を測定した。試験片の座屈を防止するために、油圧シリンダによって面圧を負荷する専用の試験装置を作製している。この装置は歯輪金型を用いて圧縮しているため、試験片に作用する摩擦力を相殺することができる。一方、Bogerら²⁾は試験片を平板で挟む方法で座屈を防止している。簡易的に試験を行うことができるが、計測される荷重に摩擦力が含まれる。また、平板に挟まれない材料区間の座屈を防止する必要があるため、圧縮変位を大きくとれない。Silvestreら³⁾は平板間に一定すき間を設ける方法で座屈を防止している。面圧を負荷していないため、座屈が起こりやすく、圧縮可能なひずみ量は小さくなる。しかし、試験片が平板にほとんど触れないため、計測される荷重に含まれる摩擦力は小さい。BogerらとSilvestreらの開発した治具は汎用的な引張試験機で反転負荷試験ができる。しかしながら、2つの治具で同一材料の圧縮試験をし、摩擦や座屈が荷重とひずみの測定に及ぼす影響を検討した研究は報告されていない。

本研究では、試験片を平板で挟んで面圧を負荷する治具と平板間に一定すき間を設ける治具を作製する。そして、それぞれの治具を用いて引張試験と圧縮試験を行い、荷重の測定精度や座屈せずに測定できるひずみ量の評価をする。その後、反転負荷時の材料特性を簡易的に調査可能な治具の検討を行う。最後に、板材の反転負荷試験を行い、バウシinger効果を測定する。

2. 座屈防止治具の開発

文献3)、4)を参考にし、圧縮時の座屈を防止する治具を2つ設計した。面圧を負荷する治具をFig. 1の左に示す。試験片を外板と内板で挟み込み、バネを用いて面圧を負荷することで座屈を防止する構造である。面圧を負荷しているため座屈が起こりにくいが、摩擦が生じる。一定すき間を設ける

治具をFig. 1の中央に示す。外板と内板に一定のすき間を設けて座屈を防止する構造である。試験片が治具にほとんど触れないため摩擦は少ない。しかし、座屈が起こりやすく、圧縮可能なひずみ量は小さくなる。

座屈防止治具を用いた試験で使用した引張圧縮試験片の形状をFig. 1の右に示す。試験片形状は文献2)を参考に決定した。圧縮時において、平行部の座屈を防止するために平行部長さを短く設計した。また、平板に挟まれない材料区間の座屈を防止するためにつかみ幅を広く設計した。

3. 実験方法

供試材は板厚1.0 mmのA5052-O板を用いた。ひずみはデジタル画像相関法により測定した。チャック変位速度はひずみ速度が $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となるように決定した。面圧を負荷する治具について、外板と内板の試験片に接触する面には、潤滑剤として牛脂を塗布したフッ素樹脂シートを貼付けた。すき間を設ける治具は牛脂のみを使用した。

面圧を降伏応力の0.1、0.5、1.0%負荷し、引張試験を行った。治具を用いずに行った単軸引張試験の流動応力を参考値とし、摩擦力に及ぼす面圧の影響を調べた。すき間を設けた引張試験は試験片と治具が干渉しないので、摩擦力が発生しない。そのため試験を行っていない。

面圧を降伏応力の0.1、0.5、1.0%負荷し、圧縮試験を行った。治具を用いてない単軸引張試験の流動応力を参考値とし、摩擦力に及ぼす面圧の影響を調べた。次に、外板と内板のすき間を試験片の初期板厚+sで一定にして圧縮試験を行った。ここで、 $s = 0.05, 0.08, 0.10, 0.15 \text{ mm}$ とした。設けるすき間を変化させ、それぞれのすき間において座屈せずに圧縮することができる限界ひずみを調べた。

結果は4章に示すが、上記の検討の結果より、一定すき間を設ける方法で反転負荷試験を行うことに決定した。そして、すき間や予ひずみを変えた引張・圧縮試験(TC試験)を行った。ひずみが0.05、0.10、0.15の時に引張から圧縮に反転し、ひずみがゼロになるまで圧縮した。

4. 実験結果

4.1 引張、圧縮試験結果

面圧を降伏応力の0.1、0.5、1.0%負荷した引張試験の真応力-対数ひずみ曲線をFig. 2に示す。面圧の大きさが異なるにもかかわらず、それぞれの流動応力は一致した。全ての引張試験において、流動応力は治具を用いてない単軸引張試験よりも5 MPa程度大きくなった。この差はひずみによらず一定であった。

面圧を降伏応力の0.1、0.5、1.0%負荷した圧縮試験の真応力-対数ひずみ曲線も同じくFig. 2に示す。圧縮試験も同様に、面圧の大きさが異なるにもかかわらず、それぞれの流動応力は一致した。全ての圧縮試験において、流動応力は治具を使用していない単軸引張試験よりも大きくなった。降伏点において20 MPa程度の差があったが、変形が進むにつれて差は減少し、 $|\epsilon| = 0.15$ で5 MPa程度

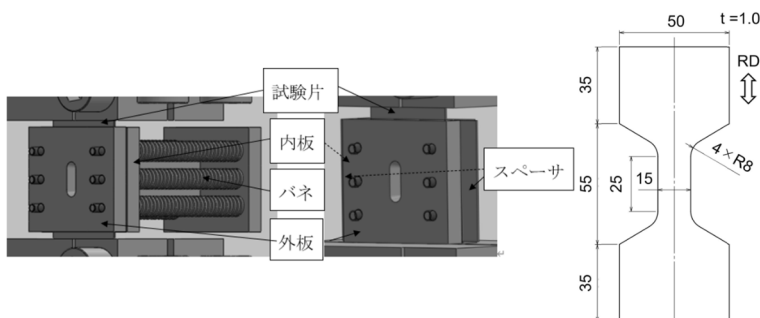


Fig. 1 Buckling prevention device and specimen

となった。 $|\epsilon| = 0.15$ まで圧縮したが、全ての試験において座屈は観察されなかった。

すき間を設けた圧縮試験の真応力-対数ひずみ曲線を Fig. 3 に示す。すき間の大きさに関係なく低ひずみ域の流動応力は治具を用いてない単軸引張試験に一致した。 $s = 0.05, 0.08, 0.10, 0.15$ mm とした試験において、ひずみがそれぞれ 0.01, 0.11, 0.11, 0.15 のとき流動応力が上昇した。 $|\epsilon| = 0.15$ まで圧縮しても座屈は観察されなかった。

摩擦力の影響は引張試験と圧縮試験で異なっている。一方、すき間を設けた試験はすき間の大きさに関係なく低ひずみ域の流動応力が治具を使用していない単軸引張試験に一致した。以上の結果から、すき間を設けた試験の方がより正確な荷重を測定することができる。さらに、 $s = 0.08 \sim 0.15$ において、 $|\epsilon| = 0.10$ まで治具を用いずに行った単軸引張試験の流動応力と一致した。よって、一定すき間を設ける方法で反転負荷試験を行った。

4.2 引張・圧縮試験 (TC 試験) 結果

板厚は引張試験時に減少し、圧縮時に増加する。ひずみがゼロになるまで圧縮するため、試験終了時と開始時の板厚はほぼ等しくなる。よって、全ての試験ですき間は 4.1 節の試験において最小の $s = 0.05$ mm とした。しかし、反転ひずみが 0.10, 0.15 の試験は試験終了時に座屈が観察されたため、これらの試験は $s = 0.02$ mm とした。最終的に、反転ひずみが 0.05, 0.10, 0.15 のとき、それぞれ $s = 0.05, 0.02, 0.02$ mm とした。TC 試験の真応力-対数ひずみ曲線を Fig. 4 に示す。ここで、縦軸は真応力の絶対値である。対数ひずみは応力反転後符号が変わる点から絶対値をとり、それを符号が変わる前の点の対数ひずみに足し合わせて累積対数ひずみ ϵ' とした。ひずみを 0.15 与えた試験のみ、試験終了時に座屈の発生が確認された。しかし、ひずみを 0.05, 0.10 与えた試験は座屈せずに試験できた。引張時に板厚は減少するため、TC 試験の圧縮開始時のすき間はそれぞれ $s = 0.08, 0.08, 0.11$ mm である。4.1 節のすき間を設けた圧縮試験では、 $s = 0.08 \sim 0.15$ において、 $|\epsilon| = 0.10$ まで治具を用いてない単軸引張試験の流動応力と一致した。そのため TC 試験においても、圧縮ひずみが 0.10 までは正確な荷重を測定できている。

5. 結言

面圧およびすき間によって圧縮時の座屈を防止する治具を作製した。そして、それぞれの治具を用いて引張試験と圧縮試験を行った。最後に反転負荷試験を行い、バウシinger 効果を測定した。本研究により得られた知見を以下に記す。

- (1) 面圧を負荷した試験は、摩擦力の影響が引張試験と圧縮試験で異なった。
- (2) すき間を設けた試験は $s = 0.08 \sim 0.15$ のとき、 $|\epsilon| = 0.10$ まで正確な荷重を測定できた。
- (3) TC 試験について、 $\epsilon' = 0.05, 0.10$ まで引張、 $\epsilon' = 0$ まで座屈せずに圧縮することができた。

6. 参考文献

- 1) T.Kuwabara, K.Nagata, T.Nakako, Proc. AMPT(2001), 407.
- 2) R.K.Boger, R.H. Wagoner, E. Barlat, M.G. Lee, K.Chung, Int. J. Plasticity 21(2005), 2319-2343
- 3) E.Silvestre, J.Mendiguren, L.Galdos, E.Sáenz de Argandoña, Int. J. Mech. Sciences 101-102(2015), 10-20
- 4) J.Marcadet, DirkMohr, Int. J. Plasticity 72 (2015) 21-43

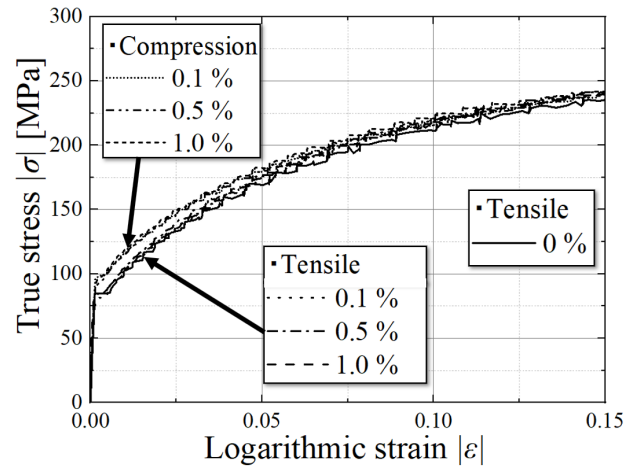


Fig. 2 True stress logarithmic strain curves in clamping device

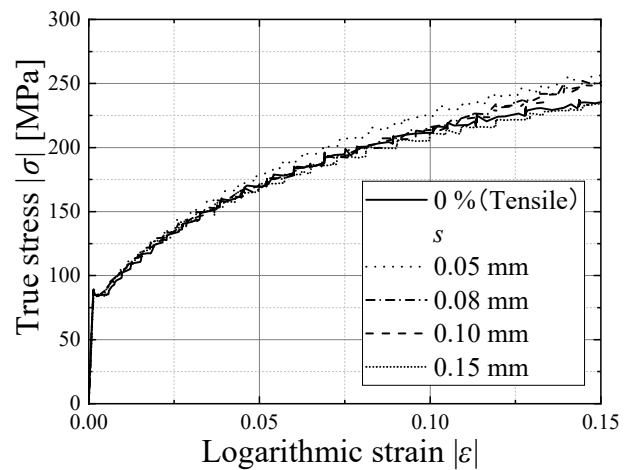


Fig. 3 True stress logarithmic strain curves in gap device

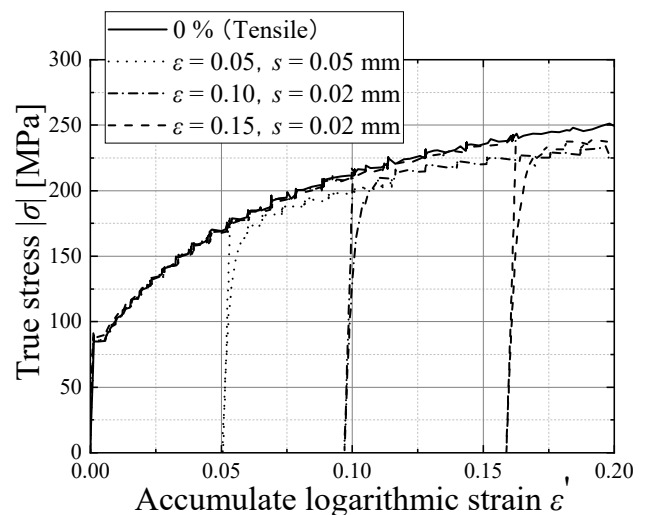


Fig. 4 True stress logarithmic strain curves in TC test