

単純せん断試験を用いたアルミニウム合金板のバウシinger効果の測定

渥美慎也

指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

プレス成形加工においては金属内部で引張から圧縮に応力変化するような複雑な応力履歴をたどることがある。このような反転負荷が起こった時、反転直前の応力に対して、反転後の降伏応力が低下する。この現象をバウシinger効果と呼ぶ。近年では、プレス成形を用いた自動車のボディの設計などで有限要素法を用いた解析技術が多く使用されているが、バウシinger効果のような複雑な応力変化に対して、高精度な解析がなされていない⁽¹⁾。そのため、複雑な応力変化に伴う弾塑性変形を忠実に再現することが望まれている。

バウシinger効果の測定に対して、Stoutらは円管における、ねじりせん断試験機を用いたバウシinger効果の測定を行っている。供試材として純アルミニウムやMg添加量を変化させたアルミニウム合金などを使用しており、それぞれの材料で大きなバウシinger効果が測定されたと報告している⁽²⁾。また、BouvierらはBH鋼板やA5182-O材を供試材として、単純せん断治具を用いた反転負荷試験⁽³⁾を行った。その結果、BH鋼板においては、再降伏点の低下がみられ、バウシinger効果が大きいと報告しており詳細な検討がなされていない。上記より、アルミニウム合金におけるバウシinger効果の測定に対して、詳細な測定が必要である。

本実験では、アルミニウム合金板におけるバウシinger効果を系統的に調べ、材料の特性を詳細に把握することを目的とする。アルミニウム合金板 A5052-O、A6016-T4 を供試材として単純せん断試験治具を用いてせん断試験を行う。また、予せん断ひずみを変化させた際の反転負荷試験のせん断応力せん断ひずみ曲線から、バウシinger効果を評価する。

2. 実験方法

島津製サーボパルサに取り付け可能な単純せん断治具を用いて実験を行う。サーボパルサはチャック変位速度 \dot{u} を制御する。供試材は、アルミニウム合金板 A5052-O と A6016-T4 を用いる。板厚は両アルミニウム合金共に 0.99mm である。試験片のせん断領域の縦横比を表すアスペクト比は 15 である。すべての実験において試験片の締め付けトルクは 125N m とした。せん断ひずみ ϵ_{12} の計測にはデジタル画像相関法を用いて変位計測を行う ARAMIS を用いる。せん断応力はサーボパルサに付属する、ロードセルで計測される荷重を試験片の断面積で除したものとした。

試験片破断まで単調負荷試験を行う。チャック変位速度は A5052-O において $\dot{u} = 0.037\text{mm/s}$ 、A6016-T4 において $\dot{u} = 0.046\text{mm/s}$ とした。このとき相当ひずみ速度にして約 $5 \times 10^{-3}[1/\text{s}]$ 程度である。

次に、①②に示す反転負荷試験を行った。

- ① A5052-O においては、単純せん断を行い、チャック変位が $u = 0.0863, 0.431, 0.863, 1.72\text{mm}$ の時にせん断方向を反転させた。A6016-T4 においては単純せん断を行い、 $u = 0.106, 0.529, 1.06, 2.12\text{mm}$ の時、せん断方向を反転させた。両材料において、反転後は破断まで試験を行った。なお、反転時のせん断ひずみ ϵ_{12}^+ はそれぞれ、0.01, 0.05, 0.1, 0.2 に対応している。
- ② (A)単純せん断をチャック変位 $u_A\text{mm}$ まで負荷する。(B)

せん断方向を反転させ、チャック変位 $-u_A\text{mm}$ まで負荷する。ここで、A5052-O においては、 $u_A = 0.432$ であり、A6016-T4 においては $u_A = 0.530\text{mm}$ である。なお、反転時のせん断ひずみは、 $\epsilon_{12}^+ = 0.05, -0.05$ に対応している。この工程を(A)(B)の順で5回繰り返して試験を行う。A6016の場合には3回繰り返した後破断したため、計測を終了した。

バウシinger効果の程度を測る指標として、単調負荷試験で得たせん断応力 σ^+ と反転負荷試験で得たせん断応力 σ^- を用いて、反転負荷後のせん断応力の減少率 r_1 を表す式を式(1)に示す。例えば等方硬化である場合は $\sigma_{12}^+ = |\sigma_{12}^-|$ であり、 r_1 は0となる。

$$r_1 = \frac{\sigma_{12}^+ - |\sigma_{12}^-|}{\sigma_{12}^+} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果

2節で述べた単調負荷試験と実験①のせん断応力せん断ひずみについて、A5052-O は Fig. 1 に、A6016-T4 は Fig. 2 に示す。ここで、せん断応力は絶対値をとった。せん断ひずみは応力が最も低下した時のせん断ひずみに、応力反転符号が変わる点から、式(2)であらわされるせん断ひずみ ϵ_{12}^A を足し合わせて累積せん断ひずみ ϵ_{12}^+ とした。

$$\epsilon_{12}^A = \sum |\Delta \epsilon_{12}| \quad (2)$$

Fig. 1 より、A5052-O は予せん断ひずみ 0.01 以外の反転負荷試験では、明確な応力の低下がある。Fig. 2 より、A6016-T4 はすべての予せん断ひずみにおいて、反転負荷後のせん断応力が単調負荷試験のせん断応力よりも小さくなった。また、両アルミニウム合金ともに単調負荷試験で破断するところ(図中の赤丸)で応力がほぼ一致する。両アルミニウム合金における実験は2回行い、せん断応力せん断ひずみ線図は応力の誤差はほとんどなかったため実験の再現性はあった。

反転負荷による応力の低下を明確にするために式(1)の r_1 を用いて、応力が負になる時のせん断ひずみ ϵ_{12}^A と r_1 の関係をA5052-O は Fig. 3 に A6016-T4 は Fig. 4 に示す。Fig. 3 より $\epsilon_{12}^+ = 0.05$ における r_1 は、予せん断ひずみ $\epsilon_{12} = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$ の順に 0.5%, 6.8%, 5.4%, 2.2%であった。Fig. 4 より、 $\epsilon_{12}^+ = 0.05$ における r_1 値は $\epsilon_{12}^+ = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$ の順に 4.5%, 4.2%, 4.1%であった。両アルミニウム合金共に、予せん断ひずみ 0.1 以上を境に r_1 値が大きくなっている。また、Fig. 3 より $\epsilon_{12}^A = 0.1$ 以降では、予せん断ひずみ $\epsilon_{12} = 0.05, 0.1$ で r_1 が大きくなる傾向があった。Fig. 4 より $\epsilon_{12}^A = 0.05$ 以降では、予せん断ひずみ $\epsilon_{12}^+ = 0.01, 0.05$ は、 r_1 に大きな違いはなかった。

Fig. 5 に A5052-O と A6016-T4 における実験②のせん断応力とせん断ひずみの関係を示す。A5052-O については、繰り返すごとに反転直前の応力に対して単調負荷試験との応力差が大きくなっている。A6016-T4 についても、応力差がみられた。Fig. 6 に実験②の r_1 と累積せん断ひずみ ϵ_{12}^+ との関係を示す。A5052-O においては、 $\epsilon_{12}^+ = 0.3$ まで応力を反転すごとに r_1 が上昇し、 $\epsilon_{12}^+ = 0.3$ 以降では、応力反転直前の r_1 が 10[%]とほぼ一定になった。A6016-T4 でも、応力が上昇していく傾向があったが、A5052-O に対して $\epsilon_{12}^+ = 0.2$ における r_1 が 5%ほど低かった。

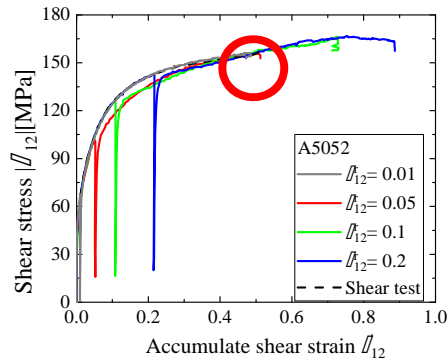


Fig. 1 Shear stress - strain curve (A5052-O)

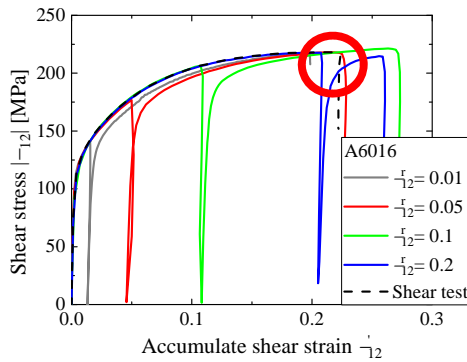


Fig. 2 Shear stress - strain curve (A6016-T4)

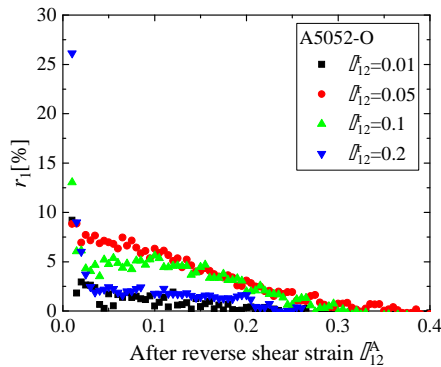


Fig. 3 r_1 data (A5052-O)

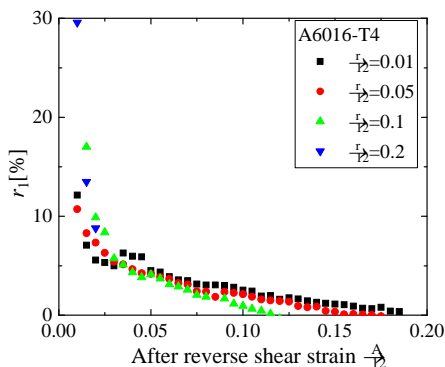


Fig. 4 r_1 data (6016-T4)

4. 考察

本実験では A5052-O, A6016-T4 の両方のアルミニウム合金において Fig. 3, Fig. 4 より $\epsilon'_{12}=0.05$ における r_1 が 0.5[%]~6.8[%]であり, 降伏後応力低下があった. そのため,

Scout らが述べたような A5052-O, A6016-T4 においてパウシンガー効果が起きたと考えられる. また, $\epsilon^A_{12}=0.01$ 以降においても応力の低下がみられた. A5052-O は予ひずみ量による r_1 の差異があったが, A6016-T4 では見られなかった. Bouvier や Stout らは, 降伏点以降の応力低下について評価していなかった. しかし, 今回の実験より材料や予ひずみを変えると, 降伏後の r_1 において, 差異があることが分かった. また, 長谷川らは転位論の観点から, 予ひずみが小さい時は転位の消滅を原因としたパウシンガー効果が起こり, 予ひずみが大きいときは転位壁の崩壊を原因としたパウシンガー効果がおこると述べている. 本研究においても予ひずみや材料によって, 反転後のせん断ひずみと r_1 値の傾向に違いがあったため, 上記のような転位の変化があったと推論される.

5. 結言

A5052-O, A6016-T4 におけるパウシンガー効果の測定から以下の知見を得た.

1. A5052-O, A6016-T4 とともに明らかなパウシンガー効果があった.
2. A5052-O, A6016-T4 とともに再降伏点以降においても, 応力の低下があった.
3. 繰り返しせん断試験の結果, A5052-O, A6016-T4 とともに繰り返すごとに降伏応力の低下があった.

参考文献

- (1) Hino, Hamasaki : 塑性と加工, vol.57 (2016), 199-203
- (2) Scout ら : Metallurgical Transactions A, Volume 21A December (1990), 3201-3213
- (3) Bouvier ら : Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006), 96-103
- (4) Hasegawa, Yakou : 鐵と鋼, 70(11) (1984), 1551-1558

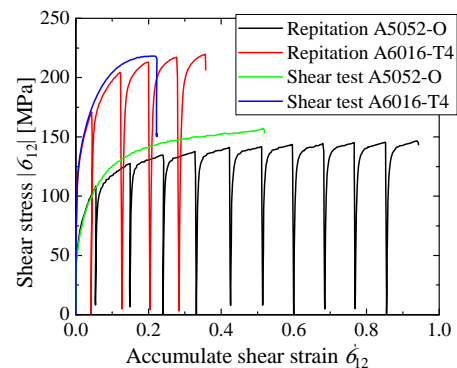


Fig. 5 Shear stress - strain curve

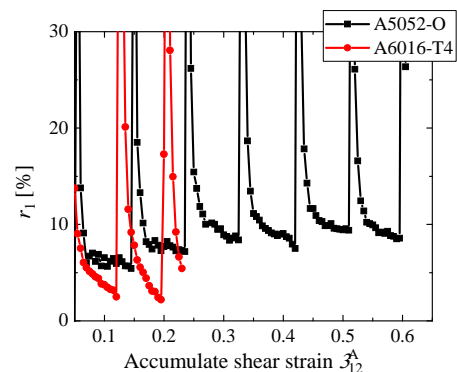


Fig. 6 r_1 data (Repetition)