

直角折れ曲がりのある応力経路における塑性変形挙動

菅野 翔伍

指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

塑性変形挙動は降伏関数, 加工硬化則, 塑性流動則の3つで記述される. そして, 塑性流動則には, 関連流動則がほとんど使用される. 関連流動則では, 降伏曲面が滑らかであり, 降伏曲面の垂線方向に塑性ひずみ増分が発生すると仮定している. 一方, 結晶塑性論に基づけば, 結晶は複数のすべり系を持ち, それぞれ異なった降伏平面を持つ. 複数のすべり系が活動すると, 降伏平面が重なる点が生じる. よって降伏面には尖り点がある. したがって降伏曲面の垂線方向が唯一に定まらず, 塑性ひずみ増分は応力増分の方向にも依存する. つまり, 関連流動則では塑性変形挙動が適切に表現できない.

Kuroda と Tvergaard⁽¹⁾は, 様々な応力経路急変を受ける多結晶体の塑性変形挙動を解析し, 塑性ひずみ増分の方向が唯一に定まらず, 応力増分の方向に依存することを示した. また, Kuwabara ら⁽²⁾は, Kuroda と Tvergaard の解析と同様の負荷条件で, 板材に二軸引張を負荷する試験を行い, 塑性ひずみ増分の応力増分方向依存性を確認した. しかし, 引張-ねじりにおける応力経路急変試験は行っていない.

そこで本研究では, 引張-ねじりにおける応力経路急変試験を行い, 応力急変直後の塑性変形挙動を測定する. また関連流動則を用いて, 同様の応力経路に対する塑性変形挙動を解析する. これらの実験値と解析値を比較することで, 塑性ひずみ増分の応力増分方向依存性を確認する.

2. 実験および解析の方法

本研究では, 軸力-内圧-ねじり型多軸応力試験機を使用する. 試験片は外径 19 [mm], 公称肉厚 0.75 [mm], 長さ 140 [mm] の A3003-O 円管である. これらを使用して単軸引張試験, 単純せん断試験, 比例負荷試験, 応力経路急変試験を行う. Fig. 1 に各試験での応力経路を示す. 比例負荷試験は軸方向の引張応力 σ_{11} とせん断応力 σ_{12} の比を $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ で一定に保持する試験である. そして, 応力経路急変試験は σ_{11} を負荷し, σ_c に到達後, σ_{11} を停止させ, σ_{12} を負荷する試験である. ここで, σ_c は応力急変時の引張応力である. 本研究では, $\sigma_c = 65, 80, 100$ [MPa] とした.

Fig. 1 に示す応力経路に対する塑性変形挙動を解析する. 硬化則として式(1)に示す Voce の式, 降伏関数として式(2)に示す Barlat and Lian の異方性降伏関数, 塑性流動則として式(3)に示す関連流動則を用いる. ここで, $\bar{\sigma}$ は相当応力, $\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ, σ_{22} は円周方向応力である.

$$\bar{\sigma} = Y_{\infty} - (Y_{\infty} - Y_0) \exp(-C \bar{\epsilon}^p) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} \left\{ a |K_1 + K_2|^M + a |K_1 - K_2|^M + c |2K_2|^M \right\} \right]^{1/M} \quad (2-a)$$

$$K_1 = \frac{\sigma_{11} + h \sigma_{22}}{2} \quad (2-b)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - h \sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2} \quad (2-c)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (3)$$

ここで, Y_{∞}, Y_0, C は材料パラメータである. a, c, h, p は異方性パラメータであり, M は材料パラメータである. ただ

し, $h=1, M=8$ と事前に決定している. $d\lambda$ は塑性係数である.

単軸引張試験結果より, Y_{∞}, Y_0, C および異方性パラメータ a, c を同定する. 単純せん断試験結果より, 異方性パラメータ p を同定する.

3. 実験結果

Fig. 2 に単軸引張試験と単純せん断試験より得られた応力-ひずみ関係を示す. 単軸引張試験結果より, 材料パラメータを $Y_{\infty} = 107.6$ [MPa], $Y_0 = 35.3$ [MPa], $C = 1032$ と同定し, 異方性パラメータを $a = 1.26, c = 0.74$ と同定した. また, 単純せん断試験結果より, 異方性パラメータを $p = 0.97$ と同定した. 次に, 同一の応力値に対するひずみの差を求めた. Fig. 2 より, 実験値と解析値の差は, 単軸引張試験で最大 7 [%], 単純せん断試験で最大 14 [%] である. この差は今回用いた構成式の再現精度を示す.

$\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ の比例負荷試験における塑性ひずみ増分の発生方向を求める. Fig. 3 に示すように塑性ひずみ増分 $d\epsilon^p$ を軸方向成分 $d\epsilon_{11}^p$ とせん断方向成分 $d\epsilon_{12}^p$ に分解し, 塑性ひずみ増分の発生方向 θ を $\theta = \arctan(d\epsilon_{12}^p/d\epsilon_{11}^p)$ とする. 比例負荷試験結果より, θ は $8-9$ [°] であった. 一方, $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ における解析値の θ は 8.5 [°] であり, 実験値と一致した.

応力経路急変試験においても同様の方法で, 応力急変後の塑性ひずみ増分の発生方向 θ を求めた. Fig. 4 に応力経路急変試験での応力比と角度 θ の関係を示す. 同図には関連流動則を用いた解析における θ , ならびに比例負荷試験において,

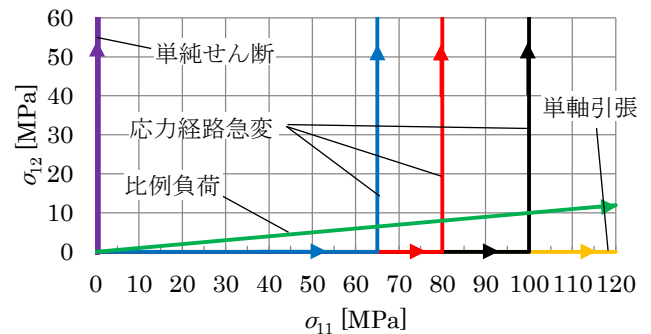


Fig. 1 Stress path

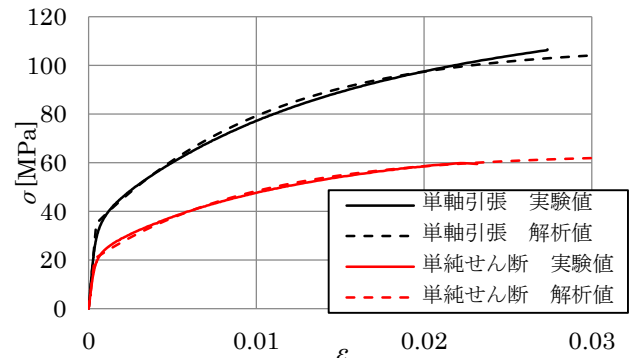


Fig. 2 Stress-strain diagram

$\sigma_{11} = 65, 80, 100$ [MPa] における θ も示す。このとき、関連流動則では降伏曲面の垂線方向に塑性ひずみ増分が発生するため、 θ は応力状態にのみ依存する。したがって、 θ は応力経路に依存しない。Fig. 4 より、応力経路急変後の θ は、図示した $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0 \sim 0.2$ の全ての範囲で解析値よりも大きい。そして σ_{12}/σ_{11} が増加するにつれてその差は拡大している。 $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ のとき、応力経路急変試験での θ は $11 \sim 13$ [°] である。一方、前述したように比例負荷試験における θ は関連流動則を用いた解析における θ と一致している。また、Fig. 3 に示すように、 $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ のとき、応力経路急変試験と比例負荷試験は交わる。つまり、応力状態は同じとなる。しかし、応力状態が同じであっても、塑性ひずみ増分の発生方向 θ は異なっている。したがって、塑性ひずみ増分の発生方向 θ は、応力状態だけでなく応力増分方向にも依存する。また、応力経路急変試験では、塑性ひずみ増分のせん断方向成分 $d\epsilon_{12}^p$ が解析値よりも大きいといえる。

次に、応力経路急変後のせん断応力—せん断ひずみ関係を求めた。 $\epsilon_{12} = 0.002$ になるまでの結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、実験値は解析値を下回っている。つまり、同一の応力値に対する ϵ_{12} は実験値のほうが大きい。したがって、 $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0.1$ となる σ_{12} のとき、 ϵ_{12} の差は $\sigma_c = 60$ [MPa] のとき 20 [%]、 $\sigma_c = 80$ [MPa] のとき 49 [%]、 $\sigma_c = 100$ [MPa] のとき 8 [%] である。 $\sigma_c = 65, 80$ [MPa] においては、構成式の再現精度 (14 [%]) 以上の差がある。したがって、同じ応力状態に達した時、実験値の ϵ_{12} が解析値の ϵ_{12} よりも大きいことが確認できた。

4. 考察

すべての応力経路急変試験において、 θ は解析値における θ よりも大きかった。このとき、応力経路急変試験におけるせん断応力—せん断ひずみ関係は、解析値を下回る結果となるはずである。Fig. 5 より、 $\sigma_c = 65, 80$ [MPa] の応力経路急変試験については、実験値が解析値を下回ることを確認している。しかし、 $\sigma_c = 100$ [MPa] の応力経路急変実験については、実験値と解析値がほぼ一致している。これは、硬化則に Voce の式を使用した際の近似精度に起因する。Voce の式は応力が飽和応力 Y_0 に漸近する式である。Fig. 2 の単軸引張試験より、 $\sigma_{11} = 100$ [MPa] 付近では、Voce の式による近似値は、実験値を下回っている。よって、 $\sigma_c = 100$ [MPa] の解析値は、 σ_{12} を過小に見積もっていると考えられる。したがって、塑性ひずみ増分の発生する方向 θ の増加により実験における塑性流動応力が低下したにもかかわらず、Voce の式による解析値は実験値に一致した。

5. 結言

アルミニウム合金 A3003 押し出し円管を用いて、単軸引張試験、単純せん断試験、比例負荷試験、応力経路急変試験を行い、塑性ひずみ増分の発生方向を調べた結果、以下の知見を得た。

1. 比例負荷試験において、塑性ひずみ増分の発生方向は、Barlat and Lian の異方性降伏関数を使用した関連流動則による解析値と一致する。
2. 応力急変試験において、塑性ひずみ増分の発生方向は、せん断応力増分方向に傾くため、関連流動則における塑性ひずみ増分の発生方向と一致しない。
3. 塑性ひずみ増分の発生方向は、応力状態だけでなく応力増分方向にも依存する。

参考文献

- 1) Kuroda M., and Tvergaard V.: Acta materialia., 47 (1999),

- 2) Kuwabara T., Kuroda M., Tvergaard V. and Nomura K.: Acta materialia, 48(2000), 2071-2079.

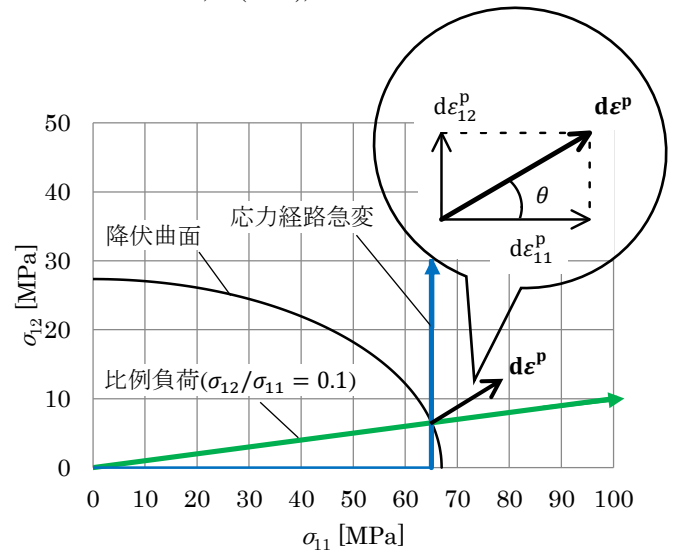


Fig. 3 Schematic of incremental plastic strain

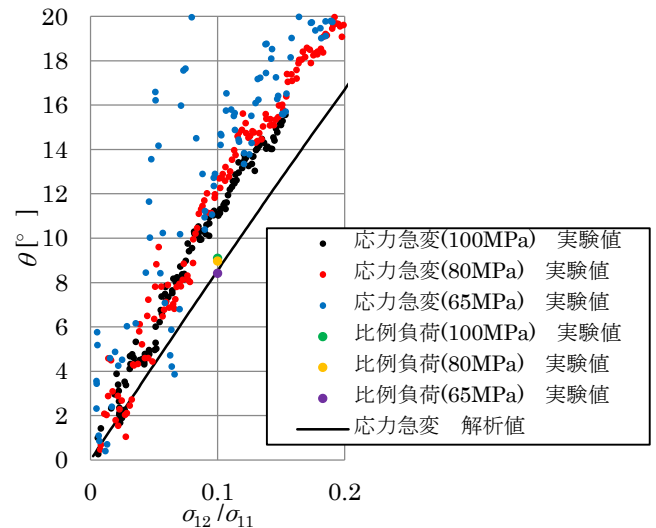


Fig. 4 Angle of incremental plastic strain

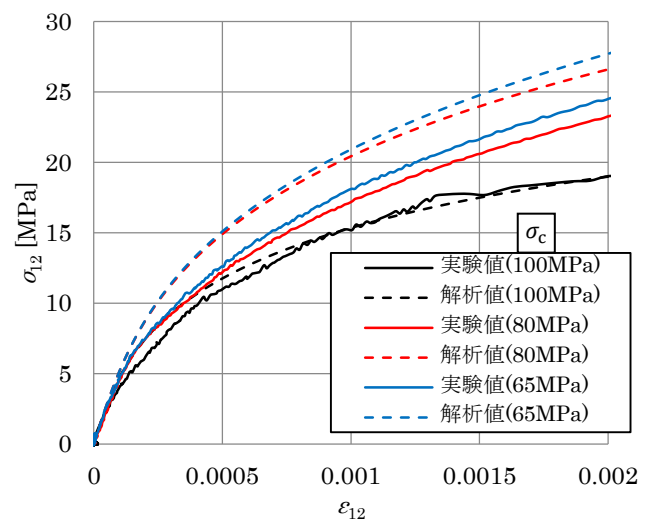


Fig. 5 Shearing stress-shearing strain diagram