

6000 系アルミニウム合金の非線形負荷経路における塑性変形挙動

新家 光

指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

6000 系のアルミニウム合金は強度や耐食性に優れており、代表的な構造用材として利用されている。また輸送機器などの軽量化材料として、期待が大きい¹⁾²⁾。しかし成形性が劣る³⁾。そこでシミュレーションによる検討は製品欠陥の事前予測や生産コストの削減、効率化を図ることができるため重要となる。シミュレーションの精度に影響を与える要因として、塑性流動則がある。現在塑性流動則は関連流動則を用いている。しかし結晶には複数のすべり系があり異なる降伏平面を持つため、降伏曲面のみを考えている関連流動則では塑性変形挙動を完全に再現できない。

そこで塑性流動則を表す様々な理論が新たに提案されている。Kuwabara らは二軸引張を負荷する実験を行ない、塑性ひずみ増分は応力増分の方向に依存することを確認した⁴⁾。またアルミニウムの非熱処理系合金について塑性ひずみ増分の発生方向が応力増分の方向に依存することが確認された⁵⁾。しかし熱処理系合金について、引張-ねじりの線形負荷試験、非線形負荷試験は行なわれていないため、熱処理系合金である A6000 系合金での試験を行なう必要がある。

本研究では、円筒試験片に引張りとねじりを一定比率で与える比例負荷経路、引張後にねじりを与える非線形負荷経路の試験を行なう。この試験では、異なる熱処理を行なった供試材について、塑性変形挙動を測定し、熱処理による特性の違いが結果に与える影響を明らかにする。またこの実験結果と既存の理論との比較を行なう。

2. 実験方法

本研究では A6061-O および T6 材の円筒試験片を用い、単軸引張り、単純せん断および引張-ねじり試験を行ない、時間ごとの引張力、トルクおよび試験片表面の 3 方向のひずみを測定する。それらの結果を整理し、応力とひずみを算出する。試験には島津製作所製の電気-油圧式疲労試験機を用いる。

2.1 線形負荷試験

A6061-T6 材を用いて、引張速度と回転速度の比率が一定となる試験を行なう。引張速度 $\dot{u} = 0.0114[\text{mm/s}]$ 、回転速度 $\dot{\theta} = 0.078[\text{deg/s}]$ を使用する。この変位速度に負荷角度 φ の三角関数をかけて線形負荷を与える。Fig. 1 に概要図を示す。

線形負荷試験で使用する引張速度 \dot{u}_φ 、回転速度 $\dot{\theta}_\varphi$ は次の式 (1) で定義する。

$$\begin{aligned} \dot{u}_\varphi &= \dot{u} \times \cos \varphi, \\ \dot{\theta}_\varphi &= \dot{\theta} \times \sin \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

本研究では負荷角度 φ を $10^\circ \sim 70^\circ$ まで 10° 刻みで変化させた線形負荷試験を行なう。

2.2 非線形負荷試験

非線形負荷試験では、引張速度と回転速度の比率が異なる試験を行なう。Fig. 1 に示すように、まず軸方向のひずみ $\epsilon_{11} = 0.033$ となるまで引張速度 $\dot{u} = 0.0114[\text{mm/s}]$ で単軸引張試験を行なう。その後経路を急変させ負荷角度 φ で線形負荷試験と同様に三角関数を用いて非線形負荷を与える。本研究では 10° 刻みで $15^\circ \sim 75^\circ$ まで、また 90° の非線形負荷試験を行なう。

3. 実験結果

はじめに単軸引張試験、単純せん断試験により供試材の力

学的特性を求めた。Table 1 に A6061-O 材、T6 材の結果を示す。 n 値を比較すると O 材は T6 材の 5 倍大きいことがわかる。また O 材についてセレーションが発生していたため後に比較を行なう塑性ひずみ増分の発生方向がある応力状態で一意に定まらない。このため線形負荷試験、非線形負荷試験は T6 材についてのみ行うものとする。

3.1 線形負荷試験

線形負荷試験について各負荷角度での $\sigma_{12} - \sigma_{11}$ 線図を Fig. 2 に示し、また相当塑性ひずみ $\epsilon^p = 0.002$ となる応力状態をプロットし、その点での塑性ひずみ増分発生方向を橙線で示した。ここで Mises, Tresca の降伏曲面を Fig. 2 に示す。A6061-T6 材が等方性材料であれば $\epsilon^p = 0.002$ となるプロット点は Mises と Tresca の降伏曲面の間となる。しかしプロット点は Mises の降伏曲面より上にあるため等方性材料であるとは言えない。そこで σ_{11} 、 σ_{12} に関する式 (1) の Hill の二次降伏関数について $G = H = 1$ 、 $N = 2.46$ としたときの降伏曲面を併せて Fig. 2 に示す。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}(G+H)\sigma_{11}^2 + N\sigma_{12}^2} \quad (2)$$

このとき応力角度 $\alpha = \arctan(\sigma_{12}/\sigma_{11})$ 、相当塑性ひずみ増分発生方向 $\beta = \arctan(d\epsilon_{12}^p/d\epsilon_{11}^p)$ とすると α 、 β の関係は Fig. 3 となる。この結果より線形負荷試験の塑性ひずみ増分発生方向は Hill の降伏関数を満たして関連流動則から算出した塑性ひずみ増分発生方向に対して $-2^\circ \sim 10^\circ$ の範囲に分布しているである。

3.2 非線形負荷試験

線形負荷試験と非線形負荷試験の各負荷角度の試験結果について、例として非線形負荷試験 90° と各線形負荷試験の $\sigma_{12} - \sigma_{11}$ 線図を併せて Fig. 4 に示す。このとき線形負荷試験において相当塑性ひずみ ϵ^p が 0.02 となる応力状態で塑性ひずみ増分、ひずみ増分発生方向を求めた。また非線形負荷試験において同一の応力比となる応力状態で塑性ひずみ増分とひずみ増分の発生方向を求め、それぞれの結果を比較する。線形負荷試験、非線形負荷試験により得られたそれぞれの塑性ひずみ速度発生方向、ひずみ速度発生方向を応力図と併せて Fig. 4、Fig. 5 に示す。Fig. 4 の橙線が線形負荷試験における塑性ひずみ増分発生方向であり、黄線が非線形負荷試験における塑性ひずみ増分発生方向となる。また Fig. 5 において青線が線形負荷試験におけるひずみ増分発生方向であり、赤線が非線形負荷試験におけるひずみ増分発生方向となる。

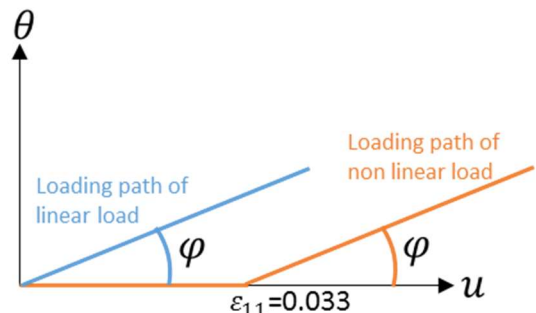


Fig. 1 Loading path of each load test

Table 1 Test results of uniaxial stretching and simple shear

	Young's modulus [GPa]	Shearing modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	n-value [-]	0.2% proof stress [MPa]
O	70.9	27.1	0.329	0.291	50
T6	66.3	27.1	0.318	0.059	343

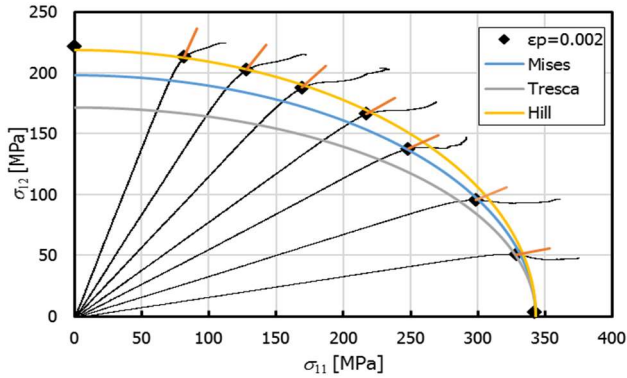


Fig. 2 Test result of linear load and yield surface

同様に他の非線形負荷試験と線形負荷試験の結果についても塑性ひずみ増分、ひずみ増分の発生方向を比較した。Fig. 4, Fig. 5 より塑性ひずみ増分、ひずみ増分の方向が線形負荷試験、非線形負荷試験で異なっている。

これについてそれぞれ同一の応力比となる応力状態での塑性ひずみ増分の差分を θ^p 、ひずみ増分の差分を θ とおき、 $\theta^p - \theta$ 線図を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より θ に対して θ^p の値は正であり、 $2^\circ \sim 12^\circ$ の間に分布している。塑性流動挙動が関連流動則に従うのであれば、 θ^p は常にゼロとなる。しかし Fig. 6 の結果より、応力状態にのみ依存して塑性ひずみ増分を考える関連流動則では、塑性流動を表現できず、塑性ひずみ増分の発生方向は、応力状態以外にも依存すると考えられる。ただしひずみ増分の発生方向では塑性ひずみ増分の発生方向に対して傾向を見出せない。

4. 結言

アルミニウム合金 A6061-O材および T6 材押し円管を用いて、線形負荷試験、非線形負荷試験を行い、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. A6061-T6 材について、線形負荷経路と非線形負荷経路による同一応力比での塑性ひずみ増分発生方向は一致せず、応力状態以外にも依存する。
2. ひずみ増分発生方向に対して、塑性ひずみ増分発生方向は正となり $2^\circ \sim 12^\circ$ の間に分布している。
3. ひずみ増分の発生方向では、塑性ひずみ増分発生方向の傾向を見出せない。

5. 参考文献

- 1) 松田健二, 池野進: 軽金属 50-1 (2000), 23-36
- 2) 彌永大作, 桑原利彦, 上間直幸, 浅野峰生: 軽金属, 62-1 (2012), 7-13
- 3) 桑原利彦, 栗田圭一: 軽金属 50-1(2000), 2-6.
- 4) Kuwabara, T. Kuroda, M. Tvergaard, V. Nomura, K. : Acta materialia, 48(2000), 2071-2079.

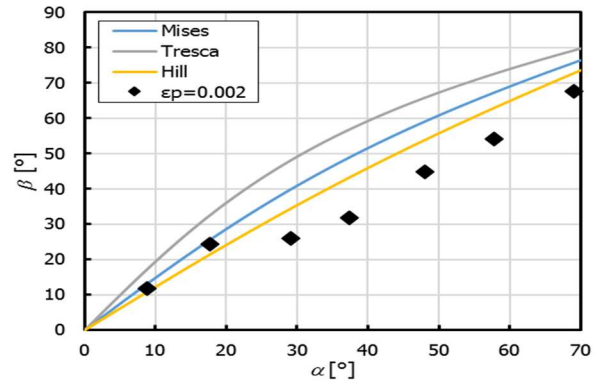


Fig. 3 Incremental direction of plastic strain

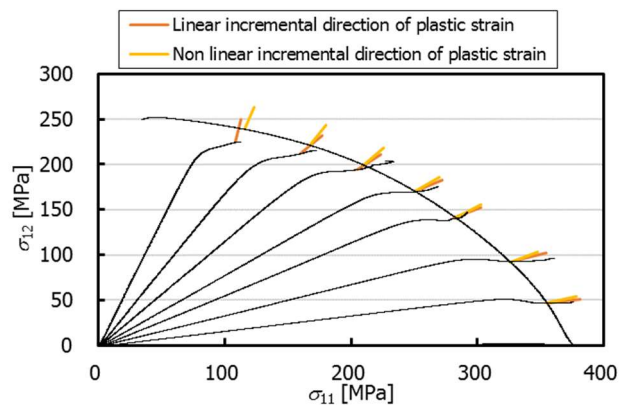


Fig. 4 Comparing incremental direction of plastic strain

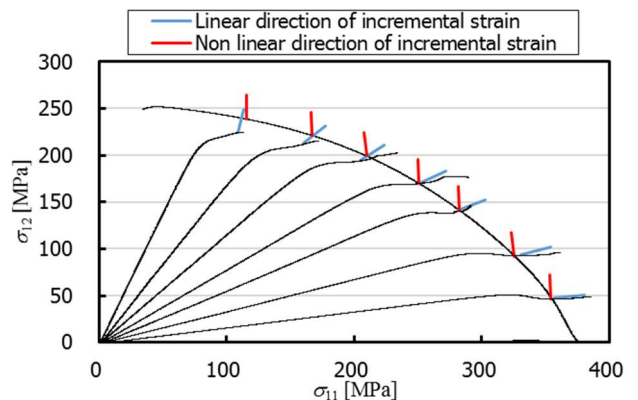


Fig. 5 Comparing direction of incremental strain

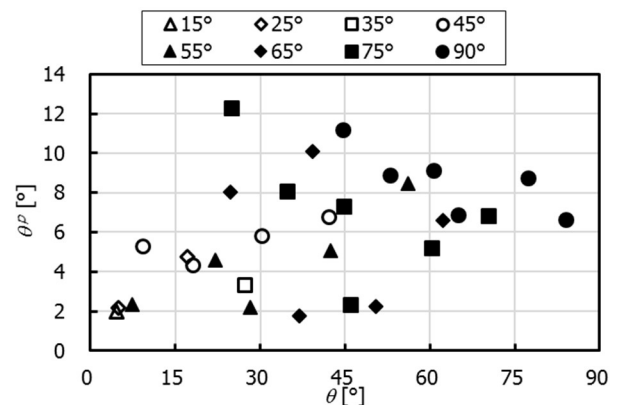


Fig. 6 Relationship of θ and θ^p to each load angle