大ひずみ線形二軸応力下における純チタン版の塑性変形挙動

吉留諒平, 桑原利彦, 林田康宏

Plastic deformation behaviour of pure titanium sheet under linear biaxial loading with large strain

Ryohei YOSHIDOME and Toshihiko KUWABARA
and Yasuhiro HAYASHIDA

Deformation behavior of pure titanium sheet (JIS#2) under biaxial tension was measured for a large strain range over 10%. Tubular specimens made of the pure titanium sheet sample were fabricated by bending and welding the sheet edges. A servo-controlled tension-internal pressure testing machine was used to apply linear strain paths to the tubular specimens, and true stress-logarithmic plastic strain curves, contours of plastic work in stress space and the directions of plastic strain rates were measured. The measured values were compared with those predicted using Hill's quadratic yield function. The test material exhibited differential hardening and the predicted deformation behavior by Hill's quadratic function were in fair agreement with the experimental results for a strain range of $\varepsilon_p^0 \geq 0.1$.

Key Words : Pure titanium, Biaxial tensile test, Differential Hardening

1. 緒 言

純チタンは高比強度, 高耐食性, 生体親和性に優れている点から, 宇宙航空分野や民生分野など幅広い分野で使用されている。その一方で, 工具への焼きつきが起りやすい, 強い面内異方性を示すなど, 難成形な材料である。よってチタン板の適用部品を拡大するには, 成形シミュレーションの予測精度を向上させて, 成形不具合を高精度に予測し, プレス工程設計のトライレス化を推進することが肝要である。そのためにはチタン板の材料モデリング技術の向上が必須である。

筆者らの一人^{1),2)}は, JIS1 種純チタン板の低ひずみ域, 大ひずみ域での塑性変形挙動の測定と材料モデリングに成功した。本研究では, サーボ制御円管バルジ試験機を用いて, 0.1 を超える塑性ひずみ域での JIS2 種純チタン板の塑性変形挙動の測定と材料モデリングに成功したので報告する。

2. 実験方法

供試材は板厚 0.5mm の JIS2 種純チタン板である。単軸引張試験により測定された供試材の機械的性質を表 1 に示す。この材料を巻き, 板縁を溶接することによって円管状の試験片 (外径 62.5mm) を製作し, 軸力-内圧型二軸バルジ試験機を用いて, 二軸応力状態下での弾塑性変形挙動を測定した。以下, 添え字の記号として, 素材の圧延方向および圧延直角方向を各々 0 お

よび 90 で, 円管試験片の管軸方向および円周方向を各々 ϕ および θ で表す。

本研究で使用した軸力-内圧型二軸バルジ試験機を図 1 に示す。試験片に軸力 T と内圧 P を同時に負荷し, 軸方向応力 σ_ϕ , 円周方向応力 σ_θ を測定・制御できる。軸力はロードセル, 内圧は圧力計によって測定をした。

全ての材料試験はひずみ速度比制御で行った。圧延方向と圧延直角方向のひずみ速度比が, $d\varepsilon_0 : d\varepsilon_{90} = 1:1, 1:0, 0:1, 2:-1, -1:2$ の 5 経路で実験を行った。また, ひずみ速度は相当ひずみ速度が

Table 1 Mechanical properties of the pure titanium (JIS#2)

Tensile direction / deg	E / GPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	c^* / MPa	n^*	α^*	r^{**}
0	111	240	577	0.14	0.0023	1.38
90	123	304	535	0.11	0.0032	3.53

*Approximated using $\sigma = c(\alpha + \varepsilon^p)^n$ for $0.002 \leq \varepsilon^p \leq \varepsilon_B^p$

**Measured at nominal strain $\varepsilon_N = 0.1$

Fig. 1 Experimental apparatus for biaxial stress tests for a tubular specimen

$\dot{\varepsilon} = 1.5 \times 10^{-4} / s$ となるように試験を行った。管軸方向および円周方向応力 σ_ϕ , σ_θ は式(1), (2)より算出した。

$$\sigma_\phi = \frac{P\pi(D/2-t)+T}{\pi t(D-t)} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P(D-2t)(R_\phi-t)}{(2R_\phi-t)t} - \frac{(D-t)}{(2R_\phi-t)} \sigma_\phi \quad (2)$$

3. 実験結果

JIS 二種純チタン板の等塑性仕事面の測定結果を図2に示す。最大で $\varepsilon_0^p = 0.179$ の塑性ひずみレベルまで測定することに成功した。 $d\varepsilon_0 : d\varepsilon_{90} = 1:1, 1:0, 0:1$ では、溶接部中央に小さな亀裂が生じて破断したが、 $d\varepsilon_0 : d\varepsilon_{90} = 2:-1, -1:2$ では、第1負荷で測定可能な最大ひずみまで測定できた。 $\varepsilon_0^p < 0.005$ の塑性ひずみ範囲では、応力径路の乱れのために、等塑性仕事面を測定できなかった。また $\varepsilon_0^p \geq 0.025$ の塑性ひずみ領域では、応力径路はほぼ直線的である。

実験から求めた無次元化等塑性仕事面と、異方性パラメータ $\sigma_0, \sigma_{90}, \sigma_b$ (等二軸引張時の降伏応力) を用いて決定した Hill の二次降伏関数 (Hill- σ) に基づく理論降伏曲面との比較を図3に示す。 $\varepsilon_0^p < 0.1$ では等塑性仕事点がひずみの進展と共に変化しており、異方硬化挙動が確認された。一方、 $\varepsilon_0^p \geq 0.1$ では、等塑性仕事点はほぼ同一の Hill- σ 降伏曲面上に載り、概ね等方硬化していることがわかる。

Fig. 2 Measured stress paths and stress points comprising contours of plastic work.

4. 結言

- 1) JIS 二種チタン合金板の二軸応力試験を行い、塑性ひずみレベル $\varepsilon_0^p = 0.179$ までの塑性変形挙動の測定に成功した。

Fig. 3 Normalized contour of plastic work for $\varepsilon_0^p \leq 0.09$ (a) and $\varepsilon_0^p \geq 0.1$ (b).

- 2) $\varepsilon_0^p < 0.1$ では等塑性仕事点がひずみの進展と共に変化しており、異方硬化挙動が確認された。一方、 $\varepsilon_0^p \geq 0.1$ では、等塑性仕事点はほぼ同一の Hill- σ 降伏曲面上に載り、概ね等方硬化した。
- 3) $\varepsilon_0^p \geq 0.1$ では、等塑性仕事点は Hill- σ 降伏曲面と概ね一致した

文 献

- 1) M. Ishiki, T. Kuwabara, Y. Hayashida, Measurement and analysis of differential work hardening behavior of pure titanium sheet using spline function, Int. J. Mater. Forming, (2011), Doi 10.1007/s12289-010-1024-5.
- 2) Sumita S., Yamagishi S., Hayashida Y., Kuwabara T., The study of Work Hardening for Pure Titanium by Pipe Bulge test with large strain, The proceedings of the 2010 Japanese spring conference for the Technology of plasticity, (2010), pp.37-38. (in Japanese)
- 3) Hill, R.: Proc. Roy. Soc. London, A193 (1948), 281-297.