

穴広げ試験を援用した r 値測定方法の開発

益田友祐
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

最近の自動車は、衝突安全性の向上や排ガス規制など多くの課題がある。それらへの対応策の一つとして自動車の軽量化が挙げられる。軽量化の一つの手法として、フレームや外板パネルなどの材質や形状変更が行われている。これらは主にプレス加工によって成形される部品であるが、割れの発生などの成形不良が問題となっている。成形不良を生じさせないためには、材料特性値や塑性異方性の把握が重要である。塑性異方性を示す指標に r 値がある。一般に、 r 値の測定は圧延方向に対して角度を変えた試験片による単軸引張試験で行われる。シミュレーションに用いる Hill の降伏関数や Yld-2004-18p¹⁾などの降伏関数に含まれる異方性係数は、圧延方向から15°刻みの r 値を基に決められる。したがって、圧延方向からの角度を変えた試験片で多くの単軸引張試験を行う必要がある。また、実際の加工では一様伸び以上のひずみが発生することがある。しかし、単軸引張試験では一様伸びまでの r 値しか測定できず、加工時に生じる大ひずみ域の r 値は測定できない。これに対し、黒崎ら²⁾は穴広げ試験を用いることで単軸引張試験では測定できない大ひずみ域の r 値を測定できることを示している。また、試験片の穴縁では圧延方向に対して1回の試験で多くの角度で r 値が測定できる。彼らは圧延方向に対して0°、45°、90°でのひずみを用いて r 値を測定しているが、15°刻みなど多くの角度での r 値測定は行っていない。

本研究では、アルミニウム合金板 A6016-T4 の穴広げ試験で測定されるひずみを基に r 値の同定方法を検討する。基準値として単軸引張試験で r 値を測定し、穴広げ試験により同定された r 値と比較する。また、穴広げ試験に用いる試験片の穴径が r 値に及ぼす影響を確認し、 r 値の測定に適した穴径を検討する。

2. 実験方法

2.1 デジタル画像相関法 (DICM)

本実験では DICM を用いてひずみ計測を行った。試験片の表面に作成したランダムパターンを CCD カメラで撮影し、変形前後のランダムパターンの相関から変位を求め、得られた変位分布からひずみ分布を得た。撮影範囲は80×65 mmとし、撮影時間間隔は単軸引張試験では1.5 Hz、穴広げ試験は1 Hzとした。

2.2 単軸引張試験

供試材は厚さ 0.9 mm の A6016-T4 圧延板である。試験片は幅 12.5 mm、平行部 75 mm のドッグボーン形状とした。長手方向と幅の標点間距離はそれぞれ 50 mm、11 mmとした。異方性を調べるため、圧延方向からの角度 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を22.5°刻みで各 3 回ずつの試験を行った。チャック変位速度は 2.25 mm/min とした。

2.3 穴広げ試験

穴広げ試験には、直径 100 mm、パンチ肩半径 10 mm の平頭パンチを持つ張出し試験機を用いた。穴広げ試験片は 220×220 mm の板の中心に放電加工で穴を開けたものである。穴の直径 D は 20 mm、35 mm および 50 mm とした。パンチ上昇速度 0.1 mm/s で試験を行い、締め付けトルクは 100 kN・m とした。穴広げ試験は穴縁が破断するまで行い、各穴径で 2 回ずつ行った。

3. 実験結果

3.1 単軸引張試験結果

単軸引張試験より、引張強さ、0.2%耐力、ヤング率、ポアソン比、 n 値がそれぞれ 272 MPa、164 MPa、67 GPa、0.33、0.29 と求まった。これらの値は各角度の平均値である。0.2%耐力は対数塑性ひずみが 0.002 の時の真応力、 n 値は Swift の式での近似で求めた。 r 値の定義を板幅方向ひずみ ϵ_w と長手方向ひずみ ϵ_L を用いて、

$$r = \frac{\epsilon_w}{-(\epsilon_w + \epsilon_L)} \quad (1)$$

とする。 ϵ_w 、 ϵ_L に対数ひずみを用いて算出した r 値を r^{ep} 、対数塑性ひずみを用いて算出した r 値を r^p とする。面内の r 値分布を Fig. 1 に示す。ここで、直線付き散布図は単軸引張試験より同定した r^{ep} と r^p を表しており、対数塑性ひずみ ϵ_L^p が 0.1 の時の値である。Fig. 1 の単軸引張試験の結果から、 r^{ep} と r^p は同じ傾向の分布である。また、 r^{ep} は r^p より、 $\theta = 45^\circ$ で 0.01 大きく、 $\theta = 90^\circ$ で 0.02 小さい。しかしながら、同一の θ における 3 回の試験で測定した r^p を比較すると最大で 0.022 のばらつきが生じていた。したがって、 r^{ep} と r^p の差は小さいものとみなし、以降は同等に扱う。

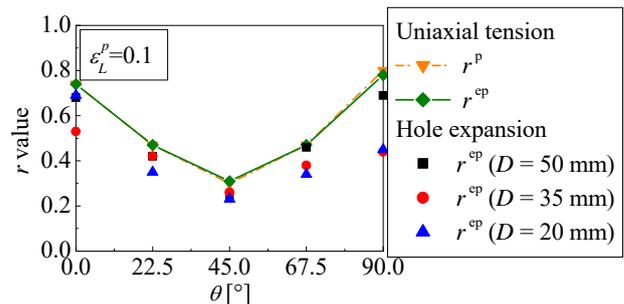


Fig. 1 Distribution of r value in plane

3.2 穴広げ試験結果

穴広げ試験片の圧延方向を x_1 軸、圧延直角方向を x_2 軸、板厚方向を x_3 軸とする。この座標系を DICM で規定する座標系とし、試験結果から得られるひずみを ϵ_{11} 、 ϵ_{12} 、 ϵ_{22} とする。 x_3 軸を時計回りに θ 回転させた座標系を x_i とすると、 x_i 座標系のひずみ ϵ_{11} 、 ϵ_{22} は次式で算出される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \cos^2 \theta \epsilon_{11} - 2 \sin \theta \cos \theta \epsilon_{12} + \sin^2 \theta \epsilon_{22} \\ \epsilon_{22} &= \sin^2 \theta \epsilon_{11} + 2 \sin \theta \cos \theta \epsilon_{12} + \cos^2 \theta \epsilon_{22} \end{aligned} \quad (2)$$

ϵ_{11} 、 ϵ_{22} がそれぞれの θ における ϵ_L 、 ϵ_w に対応する。

Fig. 1 の散布図は穴広げ試験で同定した r^{ep} を表しており、 ϵ_L^p が 0.1 の時の値である。単軸引張試験と同様な傾向の分布が得られたが、全ての穴径において単軸引張試験よりも小さい値となった。特に、 $\theta = 0^\circ$ 、 90° では単軸引張試験と比較して $D = 20, 35$ mm の r^{ep} が 0.2~0.3 程度小さい値となっている。この原因として DICM では穴縁での変位分布を得ることができず、穴縁から離れた位置のひずみを用いて r^{ep} を同定したことが挙げられる。

次に穴縁からの距離と r^{ep} の関係を調べた。 $D = 50$ mm の実験結果より得られた関係を Fig. 2 に示す。穴縁からの距離の増加とともに r^{ep} が減少しており、おおよそ線形であることが

わかった。穴縁からの距離と ε_L も同様に直線的な関係であった。そこで、穴縁からの距離と r^{ep} (ε_L) の関係を直線で近似し、穴縁での r^{ep} (ε_L) を外挿することとした。直線近似に用いる範囲を **Table 1** に示す。ここで R_0 は初期穴半径である。 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 2.5° 刻みで分割した。また、特定の角度 θ から $\pm 1.25^\circ$ の範囲に含まれる実験結果を θ の結果とした。穴縁近傍の不安定な実験結果を避けるために $R_0 + 0.2 \text{ mm}$ からひずみ比が20%低下する位置までの実験結果を利用した。

直線近似によって得られた穴縁の r^{ep} の面内分布を **Fig. 3** に示す。**Fig. 1**と比較して、 $D = 20, 35 \text{ mm}$ の r^{ep} が単軸引張に近い値となっている。また、 $D = 50 \text{ mm}$ では $\theta = 85^\circ$ において分布から外れている。その結果を除くと単軸引張試験に対して ± 0.04 の精度で測定が行えている。 $D = 50 \text{ mm}$ の $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ における ε_L と r^{ep} の関係を **Fig. 4** に示す。穴広げ試験による r^{ep} は単軸引張試験と比較して上下にぶれが生じているが、単軸引張試験に近い値が得られている。また、単軸引張試験では約 $\varepsilon_L = 0.20$ までしか r^{ep} が測定できていないのに対し、穴広げ試験では約 $\varepsilon_L = 0.30$ までの大きいひずみ域の r^{ep} が測定できている。

Table 1 Specified range

Hole diameter D [mm]	Degree range $[\circ]$	Distance range [mm]
50	$\theta - 1.25 \sim \theta + 1.25$	$R_0 + 0.2 \sim R_0 + 2.5$
35		$R_0 + 0.2 \sim R_0 + 2.1$
20		$R_0 + 0.2 \sim R_0 + 1.4$

4. 考察

Fig. 4 より穴広げ試験で得た r^{ep} は $\varepsilon_L = 0.05$ 以下で変動が見られる。 $D = 50 \text{ mm}$, $\theta = 0^\circ$, ε_L が約0.002の時に **Table 1** の範囲に含まれる r^{ep} を **Fig. 5** に示す。抽出された r^{ep} は3つのみで、近似直線の切片が $r^{ep} = 1.1$ に近い値となっている。このように、ひずみが十分に進展するまではデータのばらつきや解析不可能な点が生じる。したがって、近似直線による外挿値が乱れることが考えられる。

Fig. 3 より、近似直線によって外挿した r^{ep} が単軸引張試験による r^{ep} よりも小さくなっている。ここで、**Fig. 2** より $\theta = 0^\circ$ で穴縁からの距離が最も短い点では近似直線に対して大きな値を示している。したがって、穴縁近傍では r^{ep} が近似直線から外れて増大していると考えられる。また、**Fig. 3** の $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ において、 $D = 50 \text{ mm}$ よりも $D = 20 \text{ mm}$ の値が小さくなっている。これは穴径が小さいほど穴縁近傍での r^{ep} の増加が大きいことが考えられる。以上のことから穴広げ試験を用い、単軸引張試験と同等の精度で r 値の算出を行うには穴縁近傍でのひずみ分布を正確に得る必要がある。

5. 結言

デジタル画像相関法により、A6016-T4 圧延板の単軸引張試験、穴広げ試験の変形を計測した。その後、 r 値の算出方法の検討を行い、次の知見を得た。

- (1) 単軸引張試験では約 $\varepsilon_L = 0.20$ までしか r 値の測定ができないのに対し、穴広げ試験では約 $\varepsilon_L = 0.30$ の大きいひずみ域まで r 値の測定できた。
- (2) DICMを用いることで、1回の試験で圧延方向からの角度が 2.5° 刻みでの r 値を算出できた。また、 $D = 50 \text{ mm}$ では単軸引張試験と比較して $\varepsilon_L = 0.1$ のとき、 ± 0.04 の精度で r 値が測定できた。
- (3) $D = 20 \text{ mm}$ は 50 mm と比較して直線近似に用いる範囲

に含まれる実験結果が少ない。したがって、直線近似によって r 値を同定するには、穴径が大きい試験片での測定が望ましい。

- (4) 穴広げ試験で単軸引張試験と同等の精度で r 値を同定するには解像度が高いカメラや穴縁でランダムパターンが作成できる手法を考案する必要がある。

参考文献

- 1) F. Grytten, B. Holmedal, O.S. Hopperstad, T. Børvik : International Journal of Plasticity **24** (2008) 2248–2277
- 2) 黒崎靖, 海野芳弘 : 日本機械学会論文集, 51 (1985), 409-416

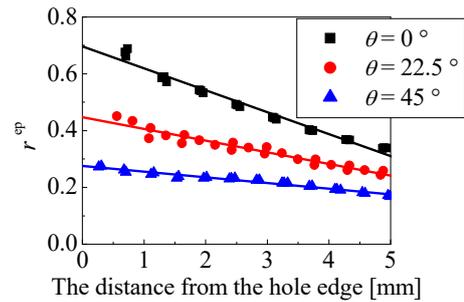


Fig. 2 The distance from the hole edge and r value

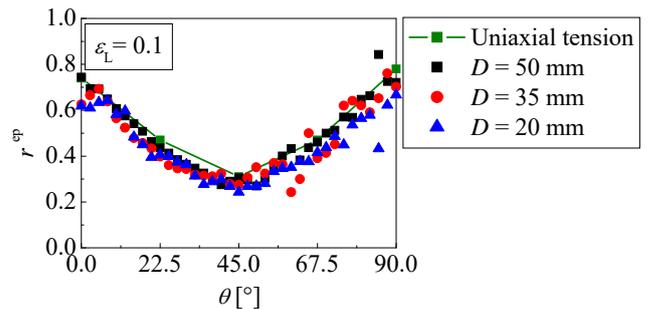


Fig. 3 r value distribution of estimated data

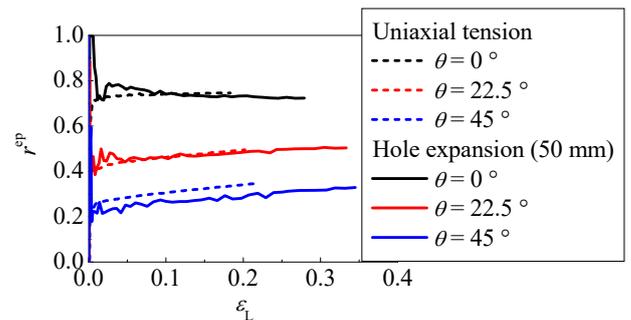


Fig. 4 r value distribution of logarithmic strain

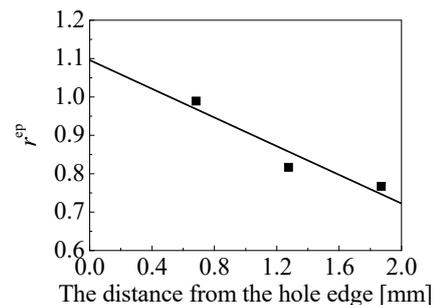


Fig. 5 Approximate curve after starting of the test 1 minute