

座屈試験における試験片寸法としわ発生の関係

静岡大学工学部機械工 Mi3 萩原将太
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

金属材料の加工方法の1つにプレス加工がある。軽量かつ薄い製品を大量に成形できるため自動車や電化製品など様々な分野で活用されている。しかし、プレス加工には成形過程において寸法精度を低下させるスプリングバックやしわなどの成形不良が多数存在する。特にしわの発生を抑制することは製品の精度向上の大きな要素となる。しわとは mm 単位の面外変位である。しわの発生を抑制するためには、事前にしわの発生する場所や大きさを予測して、板材の形状や大きさを決定することが重要である。

しわに関する研究の1つに、吉田⁽¹⁾が考案した Yoshida Buckling Test (YBT) がある。正方形の金属板の対角軸方向に引張荷重を加えることにより、試験片中央部の横幅方向に圧縮力を発生させる。その圧縮力により、試験片中央部にしわを発生させ、しわと荷重条件や材料特性との関係を検討する。吉田らは試験片の形状や引張方向を変化させた実験を行い、しわとの関係性を調査していたが、試験片の寸法を変化させた場合の関係性は明らかになっていない。

本研究では、供試材としてアルミニウム合金板 A5022-O 材を使用し、YBT と同様に引張試験した際に発生するしわの評価を行う。加えて試験片を拡大、縮小して金属板の面内寸法比としわの関係性を調査し、板材の寸法としわの関係性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究では、供試材として A5022-O 材を使用する。試験片の板厚は 1.0 mm である。試験片の模式図を Fig. 1 に示す。

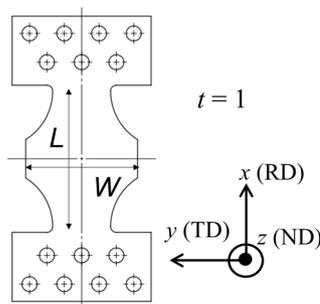


Fig. 1 Test piece

チャック間距離を L 、試験片中央部幅を W とする。 $(L, W) = (60, 50), (120, 100), (180, 150)$ とした 3 種類の試験片を使用する。この時、各試験片の面内寸法は全て相似である。寸法比を $\alpha = L/60$ と定義する。 $L = 60$ mm を基準寸法とすると、それぞれ $\alpha = 1, 2, 3$ である。次にアスペクト比を $\beta = W/L$ 、 $\gamma = t/L$ と定義する。面内の寸法は全て相似であるため β は $\beta = 5/6$ で一定の値となるが、板厚は不変であるため、 γ は $\gamma = 1/60, 1/120, 1/180$ と変化する。

2.2 実験条件

オートグラフのチャック変位速度は 4 mm/min。各試験片に対し 3 回ずつ引張試験を行う。

2.3 しわの評価方法

試験片中央部の模式図を Fig. 2 に示し、試験片中央部の幅方向の断面の模式図を Fig. 3 に示す。試験片中央部の幅方向側の両端を A, B とし、その中点を C とする。 A, B, C の座標はそれぞれ $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(\frac{x_A+x_B}{2}, \frac{y_A+y_B}{2}, \frac{z_A+z_B}{2})$ である。次に試験片の中心を D 、その座標を $D(x_D, y_D, z_D)$ とする。試験前は点 C と点 D は一致しているが、引張試験によってしわが発生すると座標に差が生じる。このときの座標のずれをしわ高さ h と定義し、以下の式で表す。

$$h = \sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 + (z_D - z_C)^2} \quad (1)$$

次に点 D から圧延方向に前後 25 mm で標点を取り、標点間距離を $l = 50$ mm とする。この標点間距離の伸び λ [mm] を用いて長手方向のひずみを λ/l と定義する。ただし、標点間距離を前述した寸法比に合わせるために $\alpha=1$ の試験片では $l = 25$ mm、 $\alpha=3$ の試験片では $l = 75$ mm とする。

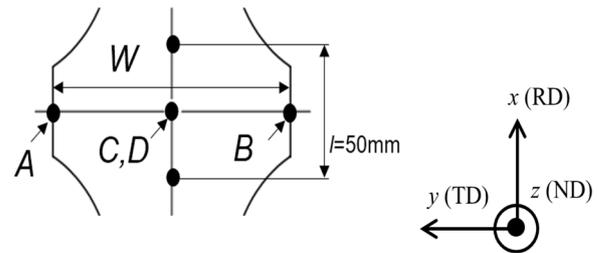


Fig. 2 Central part of test piece

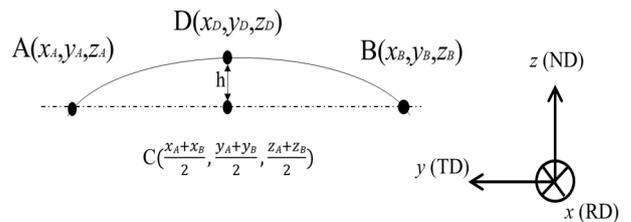


Fig. 3 The wrinkle shape

2.4 曲げ剛性

部材の曲がりにくさを表す指標として、断面二次モーメントが有用である。長方形断面における断面二次モーメント I は幅を L 、高さを t とすると式(2)で求められる。

$$I = \frac{Lt^3}{12} \quad (2)$$

本実験では試験片の長手方向に引張応力が作用し、幅方向に圧縮応力が働く。そのため長手方向が断面二次モーメントを求める際の幅方向となる。よって、チャック間距離を幅、板厚を高さとする。式(2)を用いたとき、それぞれの試験片の断面二次モーメントは $I = 5, 10, 15 \text{ mm}^4$ である。

式(2)より、 I は寸法の 4 乗に依存している。そこで I を L^4 で除したものを I' とし、式(3)で表す。

$$I' = \frac{I}{L^4} = \frac{1}{12} \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (3)$$

$L = 60, 120, 180$ mmの試験片の I' はそれぞれ $I' = 1.60 \times 10^{-7}, 2.01 \times 10^{-8}, 5.95 \times 10^{-9}$ である。各試験片のチャック間距離と板厚が相似だと仮定すると、 t/L は一定となるため、 I' は全ての試験片で同じとなる。しかし、本実験では板厚が一定である。そのためアスペクト比 t/L が変化し、 I' は一定にならない。

3. 実験結果

2.1 節で述べた 3 種類の試験片に対して、同試験条件下で単軸引張試験を各 3 回行った。しわ高さを Fig. 4 に示す。ここで横軸はひずみ λ/l 、縦軸はしわ高さ h [mm] である。

Fig. 4 より、試験片寸法が大きくなるほどしわ高さも大きくなるのが分かる。また $L = 120$ mm, 180 mm の試験片ではそれぞれ平均して 6.21 mm, 11.4 mm のしわが発生した。これに対し、 $L = 60$ mm の試験片ではしわ高さは 0.03 mm であった。そのためしわは発生しているが無視できる。

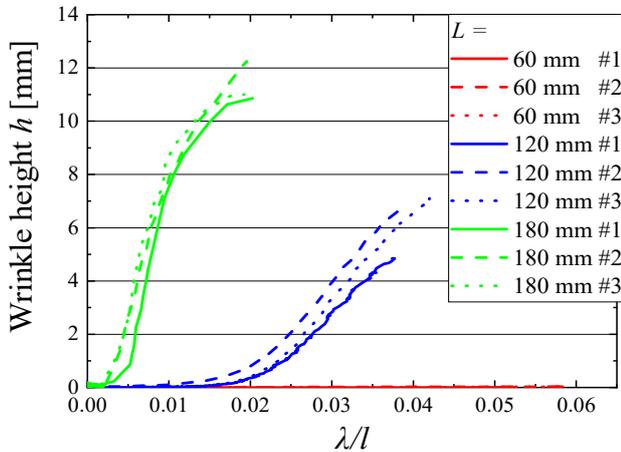


Fig. 4 Wrinkle height-strain curves

ひずみを測定する際の標点間距離は寸法比に伴って変化しているが、しわ高さを求める際の寸法比は考慮していない。そこで、試験片寸法の影響をなくすため、Fig. 5 に各試験片のしわ高さを寸法比 α で除した値を示す。

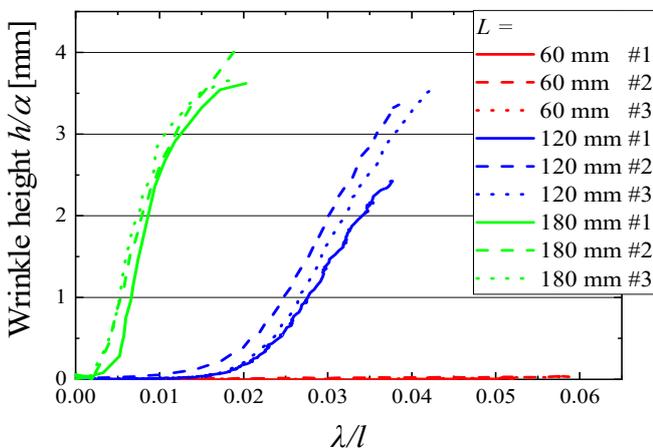


Fig. 5 Unification of order

試験片が完全に相似ならば変形挙動は一致するはずである。

Fig. 5 より、寸法を考慮しただけでは、全ての試験片で同様のしわ高さ、ひずみになっていないことが分かる。したがって、変形の起こりにくさという観点から、曲げ剛性がしわの発生との関係を考える。2.4 節の I' でひずみとしわ高さを除し、正規化したものを Fig. 6 に示す。横軸は正規化ひずみ $\lambda/(I')$ 、縦軸は正規化しわ高さ $h/(I'\alpha)$ [mm] である。

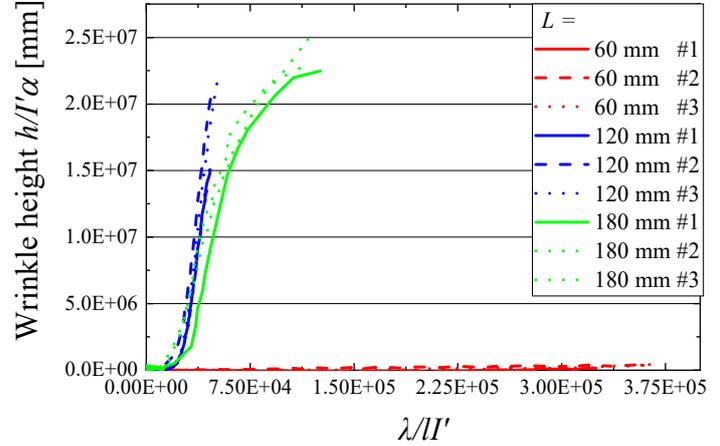


Fig. 6 Normalized wrinkle height

Fig. 6 から、ひずみを正規化するとしわの発生時期がほぼ一致した。正規化しわ高さ $h/(I'\alpha) = 1.0 \times 10^7$ におけるひずみは $L = 120$ では 3.65×10^4 , $L = 180$ では 4.41×10^4 である。 $L = 120$ に対する $L = 180$ のひずみの誤差率は 21% であった。完全な一致には至らなかったが、近い挙動が確認できる。したがって、しわの発生には断面二次モーメント I や試験片の寸法比が影響している。

4. 結言

A5022-O 材を供試材とし、単軸引張試験としわの評価を行い、試験片寸法としわの関係を調査した。この研究から以下の結論を得た。

- (1) 板厚が一定の場合、試験片寸法が大きいくほどしわも大きくなる。
- (2) $\alpha = 60$ mm の試験片は変形が小さく、しわが発生しない。
- (3) 板厚が一定ならば、試験片寸法を比例変化させて引張試験を行ってもしわ高さとひずみは比例変化しない。
- (4) 断面二次モーメントと寸法比を用いてひずみを正規化するとしわの発生時期は一致する。

参考文献

- (1) 吉田清太：塑性と加工，vol.24 no.272 901-908(1983-9)
- (2) J.B.Kim, J.W.Yoon, D.Y.Tang：International Journal of Mechanical Sciences 42(2000 1683-1714)
- (3) 石川裕紀：異方性降伏関数を用いた A5022-O 板の穴広げ成形シミュレーション，吉田研究室(2020)
- (4) 宮崎俊弥：大型単軸引張試験治具を用いた交差効果の測定，吉田研究室，卒業論文(2020)
- (5) 水口義久：基礎材料力学 改訂版，株式会社 養賢堂(2014)，p172