高張力鋼板の引張り曲げ破断限界 中 哲夫*・黒瀬 隆宣**・原田 康平***・岩橋 良次**** Fracture Limits in Stretch Bending of High-Tensile Steel Sheets

Tetsuo Naka*, Takanori Kurose**, Kouhei Harada***, Ryouji Iwasaki****

Abstract

The purpose of it is to decrease the weight of the vehicle advanced the use of the high-Tensile steel sheet. The problem in the forming process of this material is that it is easy to crack, and the spring back is large. Therefore, it is extremely important to clarify the forming limit of the high strength steel sheet in experimental and theoretical. The stretch bending tests of 590-980MPa classes high-Tensile steel sheets were done, and the forming limit was investigated and discussed. Experimental conditions assumed that the punch speed was constancy, went span of the specimen in 60 and 100mm, and the punch tip radiuses by 2, 4, and 8mm. The calculation requested the height of the forming limit hmax (distance pushed from the punch contact part to the break) and the forming limit section line length ratio L/L0 (L: limited wall length of a sheet, L0: initial wall length). Moreover, a practicable estimate calculation was done from the ultimate load condition. The predicted limited wall stretch, as well as the limited forming height, was in good agreement with experimental results.

Keywords : sheet metal forming, stretch bending, high-tensile steel sheet, fracture limits, limited forming height

1.緒 言

自動車軽量化のため高張力鋼板(以下,ハイテンと記 す)の骨格部への使用が進んでいる¹⁾が,これは成形時 に割れやすい,スプリングバックが大きいという問題を 抱えている。したがってハイテン材の成形限界を実験的 にも理論的にも明確にしておくことは極めて重要である ²⁾,³⁾。Fig.1にプレス成形の典型的な破断例を示す。

成形限界にはFLD(成形限界線図:Forming limit diagram)を使う方法が一般的であるが、これでは予測できない重要なケースとして、ダイコーナーにおける引張り曲げ破断がある。

そこで本研究では、590~980MPa級ハイテン材の引張 り曲げ実験を行い、その限界について調査・検討した。 また、吉田ら⁴⁾は、小R(パンチ半径)引張り曲げ破断 限界について、最大荷重条件から実用的な限界予測式を 提案し、アルミニウム合金板の試験結果と予測値を比較 し、両者が良好に一致していることを示した。本研究に おいても、この吉田らの予測式を用いて、ハイテンの引 張り曲げ破断限界について実験結果と予測値の比較、検 討を行った。



Fig.1 Typical fracture in stretch bending

平成18年9月30日受理

2. 引張り曲げ破断試験概要

プレス成形する場合,工具肩R部に生じる引張り曲げ 破断は最も典型的であり,その破断限界を事前に予測す ることは非常に重要である。しかし,工具肩Rや小R部 における破断は非常に局部的な変形であるため,実験的 に破断限界を調査することが難しい。そこで,素材特性 の影響を考慮した破断限界について,吉田らは単純な力 学モデルを用いて,設計基準として成形限界高さh_{max}, 破断限界断面線長比L_{max}/L₀を求めている。

本実験はチャックで試験片を拘束しパンチによる三点 引張り曲げ破断試験を行い,数値シミュレーションを行 う上で重要な曲げ成形限界を求め,実験値と理論値の比 較,検討を行った。Fig2に引張り曲げ試験の模式図を示 す。パンチ接触部から破断まで押込んだ距離を成形限界 高さh_{max}とし,もとの板の長さをL₀として破断まで伸び た板の長さをL_{max}として,破断限界断面線長比L_{max}/L₀ を求めた。また,破断角度を求めるため試験機の横から ビデオカメラにより撮影を行い,破断角の測定を行った。



Fig.2 Pattern diagrams

2.1 試験条件

ハイテン(5種類)はこれまでの研究において速度依 存性がないため、パンチ速度はすべての試験で3mm・ min⁻¹とした。ダイス間スパンD_dは100mmと60mmとし て破断まで押し込んだ。また、パンチ半径R_pを2mm、 4mm、及び8mm(以下R2、R4及びR8と示す)の 6条件として行った。引張り曲げ試験には容量250kNの インストロン型万能試験機を使用した。

2.2 供試材

本実験に使用した供試材料は、すべてDP鋼(2相 鋼:Dual phase steel)を用い、A社製は冷間圧延の圧延 条件で厚さ1mmの590MPa級,780MPa級及び980MPa級 ハイテンの3種類を使用。B社製は冷間圧延の厚さ 1.4mmの780MPa級及び980MPa級ハイテンの2種類、計 5種類のハイテンを用いた。今回使用した鋼板はすべて DP鋼で、DP鋼は軟質相のフェライト組織中に硬質相の マルテンサイトを分散させたもので440~1180MPa級ま で広範囲の強度を作り出すことができている。また, Table 1 に使用したハイテンの機械的特性を示す。供試 材は,強度が強くなるにつれn値(加工硬化指数)は小 さくなっている。試験片形状は,Fig.3に示すように試験 片は矩形形状の圧延直角方向(TD)50mmとして,圧延 方向(RD)を230mmと190mmの2種類を用いて引張り曲 げ破断試験を行った。また,スクラブドサークル(直径 6.15mm)をスタンプし,破断部板表面のひずみを測定 した。



Fig.3 Specimen geometry

Table 1Mechanical property

	A-590MPa	A-780MPa	A-980MPa	B-780MPa	B-980MPa
板厚[mm]	1.0	1.0	1.0	1.4	1.4
n 值	0.177	0.173	0.126	0.167	0.155
<i>r</i> 値	0.730	0.732	0.817	0.732	0.817
ヤング率[GPa]	206	206	206	206	206

3. 実験結果

Fig.4にA社製D_d=100mm, Fig.5にB社製D_d=100mm, Fig.6にA社製D_d=60mm, Fig.7にB社製D_d=60mmの強度と 破断角度の関係を示す。強度が上昇するごとに破断角度 は上昇し、ストロークは短くなることが示された。また、 パンチ先端半径が小さくなるに従って、破断角度は大き くなり、ストロークは減少していた。このことから、延 性は強度上昇に伴い減少することが示された。Fig.8にA 社製D_d=100mmの最大荷重、Fig.9にB社製D_d=100mmの 強度と最大荷重の関係を示す。パンチ半径が小さくなる につれ、最大荷重は低下することがわかった。このこと から、強度に伴い上昇しパンチ半径が大きいほど破断力 は大きいことを示した。

Fig.10にA社製D_d=100mm, Fig.11にB社製D_d=100mm の曲げ加工度(初期板厚/パンチ先端半径)と成形限界 高さの実験結果より得られた関係を示す。X軸を曲げ加 工度しており,曲げ加工度はパンチ先端半径が小さくな ると大きくなる。Fig.12にA社製,Fig.13にB社製の曲げ 加工度と破断限界断面線長比の実験結果より得られた関 係を示す。これは,曲げ加工度が大きくなるにつれ成形 限界高さ,断面線長比ともに低下することを示した。ま た,n値が小さいものほど低いことを示した。



Fig.4 Relation between strength and breaking angle $(D_p=100 \text{mm-A})$



Fig.6 Relation between strength and breaking angle $(D_p=60 \text{mm-A})$



Fig.8 Relation between strength and Maximum load $(D_p=100m-A)$



Fig.5 Relation between strength and breaking angle $(D_p=100 \text{mm-B})$



Fig.7 Relation between strength and breaking angle $(D_p=60 \text{mm-B})$



Fig.9 Relation between strength and Maximum load $(D_p=100m-B)$



Fig.10 Limited forming height h_{max} of experiment (D_p=100mm-A)



Fig.12 Limited wall stretch L/L_0 of experiment (Sheet of A-co.)

4. 破断限界の解析的検討

吉田らは、ダイス肩R部の変形を平面ひずみ状態で模擬し、小R部を含む張出部の引張り曲げ破断限界を求める解を導出している。その導いた解を用いて実験値との比較を行った。用いた式を下記に示す。

$$\frac{\mathbf{L}_{max}}{\mathbf{L}_{o}} = e^{n} + (1 - e^{n}) (1 - e^{-(0.4/n)(to/R)})$$
(1)

式(1)から張出部の破断限界断面線長比 L_{max}/L_o は, 素材のn値および曲げ加工部の曲げ加工度 t_o/R (R=Ri+ $t_o/2$)のみに依存することがいえる。また, L_{max}/L_o は破断時の張出部の平均伸び量に対応し、近似 的には小R部近傍の縦壁部伸び量に対応している。幾何 学的関係を満足する値として吉田らが算出された破断限 界成形高さ h_{max} を以下に示し、式の変形を次の(2)(3) (4)式のように行った。

$$\mathbf{R}_{a}\theta + \frac{\mathbf{L}_{0} - 2\mathbf{R}_{a}\sin\theta}{2\cos\theta} = \frac{\mathbf{L}}{2}$$
(2)



Fig.11 Limited forming height h_{max} of experiment $(D_n=100 \text{mm-B})$



Fig.13 Limited wall stretch L/L₀ of experiment (Sheet of B-co.)

$$\sqrt{\left\{\mathbf{h}_{max} - \mathbf{R}_{a}\left(1 - \cos\theta\right)^{2}\right\} + \left\{\frac{\mathbf{L}_{o}}{2} - \mathbf{R}_{a}\sin\theta\right\}^{2}} = \frac{\mathbf{L}}{2} - \mathbf{R}_{a}\theta \qquad (3)$$

$$\mathbf{h}_{max} = \mathbf{R}_{a} \left(1 - \cos \theta \right) + \sqrt{\left(\frac{\mathbf{L}}{2} - \mathbf{R}_{a} \theta \right)^{2} - \left(\frac{\mathbf{L}_{0}}{2} - \mathbf{R}_{a} \sin \theta \right)^{2}} \quad (4)$$

なおR_aは、パンチ肩及びダイス肩R部における曲げ中 心半径の和であり、次式でおく。

$$R_a = R_p + R_d + t_o \tag{5}$$

以上から求めた式を用い,破断限界断面線長比 L_{max}/L₀,破断限界成形高さh_{max}を求め,実験値との比較 を行った。

5. 実験結果と理論値との比較

上記の式を用いて破断限界断面線長比L_{max}/L₀,破断

限界成形高さh_{max}を予測値としてグラフ化し,実験値と の比較,検討を行った。結果をFig.14にA社製,Fig.15に B社製の破断限界断面線長比L_{max}/L₀の実験値と予測値の 関係を示す。これはパンチ先端部の曲げ加工度と破断限 界断面線長比の関係を表したグラフである。式(1)にて、 n値と曲げ加工度t₀/Rが破断限界断面線長比L_{max}/L₀に強 く関連していることがわかる。図においては,n値が小 さくなるにつれ破断断面線長比L_{max}/L₀は実験値および 予測値ともに低下している。予測値と実験値を比較する とこれもほぼ合っていることが示されている。Fig.16に A社製,Fig.17にB社製のスパン100mm,Fig.18にA社製, Fig.19にB社製のスパン60mmの成形限界高さh_{max}の試験 結果と予測値の曲げ加工度との関係を示す。

成形限界高さh_{max}は曲げ加工度が大きくなるにつれ低 下することを示しており,試験結果も予測値と同じ傾向 を示しほぼ合っている。これにおいて,式(1),(2)を用 いることにより破断限界を予測することができることが わかった。ただし,Fig.14,16において実験値と解析値に



Fig.14 Comparison of limited wall stretch L/L_obetween experiment and calculation (Sheet of A-co.)



Fig.16 Comparison of limited forming height h_{max} between experiment and calculation (D_d=100mm-A)

おいて差が出たもの(○で囲んでいる)は、実験において試験片に単軸引張り状態の箇所が出たためと思われる。Fig.20に実験において単軸状態での割れを示す。矢印の箇所が単軸引張り状態の割れを示しており、2つともR_n=8mmのときに起こっていることを示している。

6. 結 言

本研究では、吉田らがアルミニウムにて求めた破断限 界における仮定を用いて、高張力鋼板の引張り曲げ破断 限界の実験結果と予測値の比較を行い、以下のような結 果が示された。

- 実験結果より破断角度(破断限界成形高さの逆)は、 板強度の上昇に伴い大きくなることを示した。また、 最大荷重はパンチ半径が小さくなるにつれ、小さい 荷重で早く破断していることを示した。
- 計算結果より曲げ加工度t₀/Rが大きくなると破断限 界断面線長比L_{max}/L₀と破断限界成形高さh_{max}は低下



Fig.15 Comparison of limited wall stretch L/L_o between experiment and calculation (Sheet of B-co.)



Fig.17 Comparison of limited forming height h_{max} between experiment and calculation (D_d=100mm-B)



Fig.18 Comparison of limited forming height h_{max} between experiment and calculation $(D_d=60$ mm-A)



Fig.19 Comparison of limited forming height h_{max} between experiment and calculation (D_d =60mm-B)

していることを示した。また、n値(加工硬化指数) が小さくなると L_{max}/L_0 と h_{max} は低下することを示した。

3)実験値は吉田らの予測式と傾向は一致しているが、 全体的に大きな成形限界高さが得られた。しかし、 これは実験技術上の問題であり、実際のプレス成形 で平面ひずみ状態の引張り曲げが生じたときに大き な成形限界が得られることを保証するものではない。この点について今後さらに検討したい。

参考文献

- 1) 栗山幸久: 塑性と加工, 45-525 (2004-10), 804.
- 吉田総仁,京極秀樹,篠崎賢二,山根八洲男:機械 技術者のための材料加工学入門,147-169.
- 3) 日本塑性加工学会編:わかりやすいプレス成形, 69-82.
- 4) 吉田正敏 他: 塑性と加工, 46-536 (2005), 859-863.



Fig.20 Fracture point in stretch bending of typical specimens (D_d=100mm-A)