

# 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  $h_{max}$  (distance pushed from the punch contact part to the break) and the forming limit section line length ratio  $L/L_0$  ( $L$ : limited wall length of a sheet,  $L_0$ : 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<sup>1)</sup>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<sup>2), 3)</sup>。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<sup>4)</sup>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。

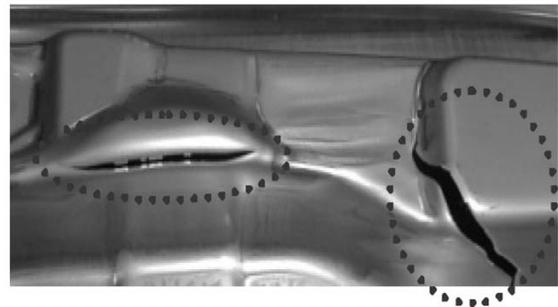


Fig.1 Typical fracture in stretch bending

\* 商船学科

\*\* 専攻科生産システム工学専攻

\*\*\* 商船学科5年

\*\*\*\* 電子機械工学科5年



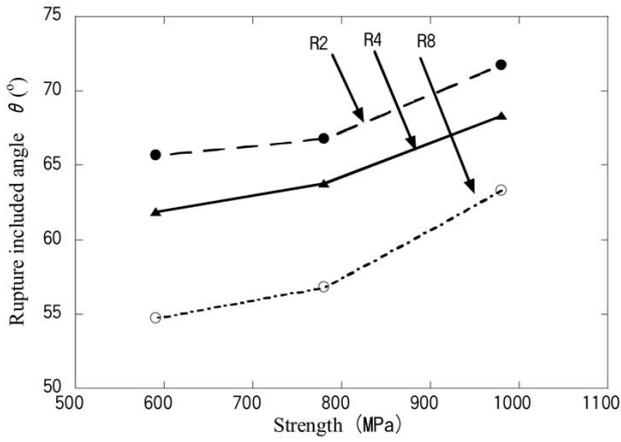


Fig.4 Relation between strength and breaking angle ( $D_p=100\text{mm-A}$ )

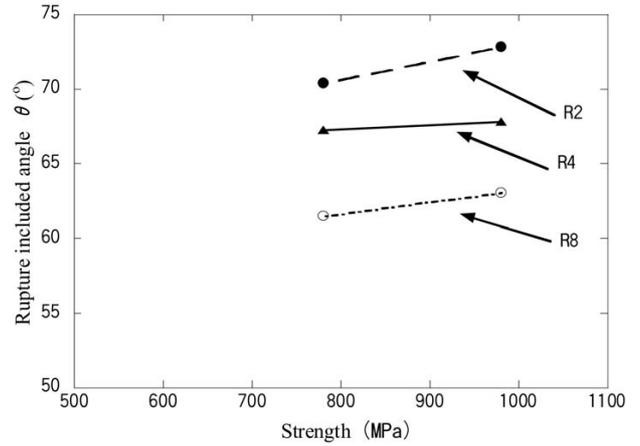


Fig.5 Relation between strength and breaking angle ( $D_p=100\text{mm-B}$ )

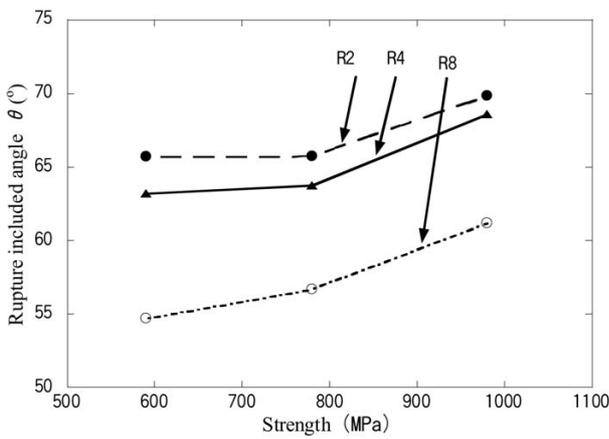


Fig.6 Relation between strength and breaking angle ( $D_p=60\text{mm-A}$ )

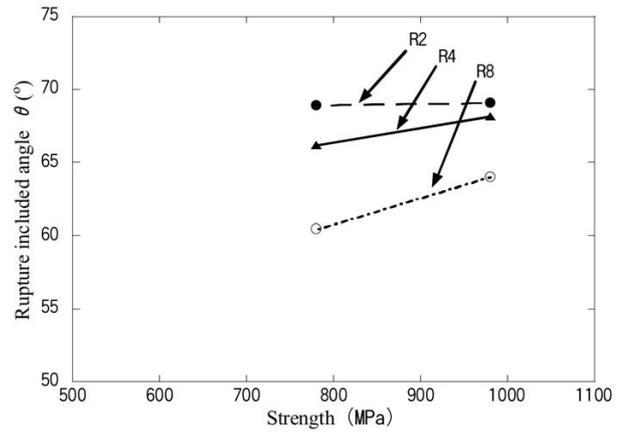


Fig.7 Relation between strength and breaking angle ( $D_p=60\text{mm-B}$ )

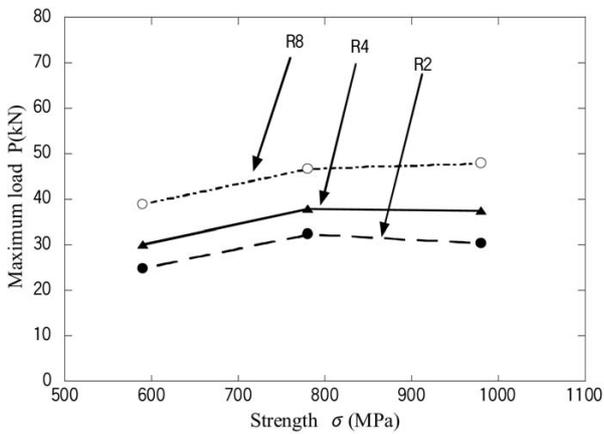


Fig.8 Relation between strength and Maximum load ( $D_p=100\text{m-A}$ )

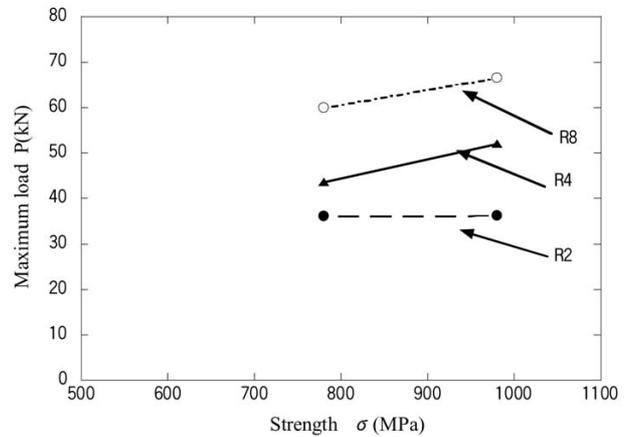


Fig.9 Relation between strength and Maximum load ( $D_p=100\text{m-B}$ )

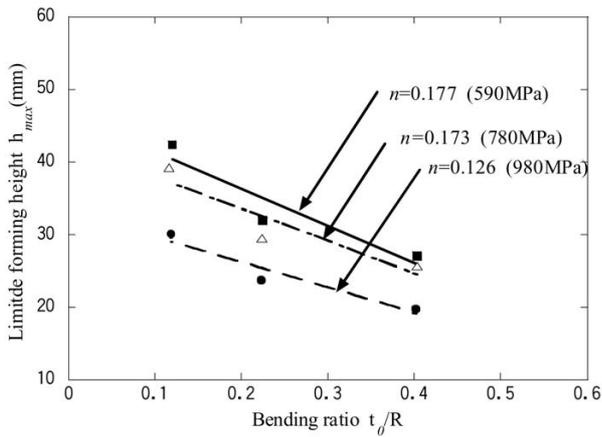


Fig.10 Limited forming height  $h_{max}$  of experiment ( $D_p=100\text{mm-A}$ )

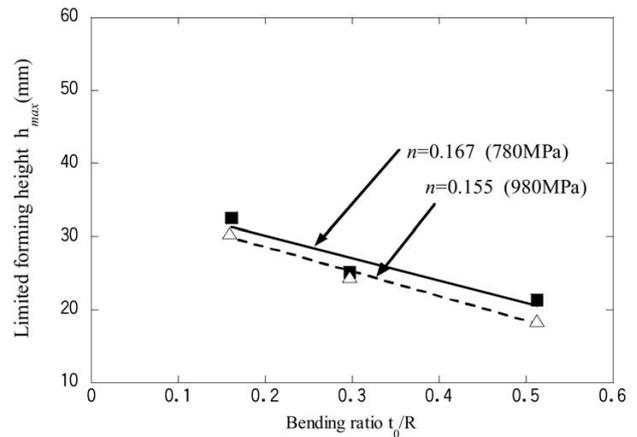


Fig.11 Limited forming height  $h_{max}$  of experiment ( $D_p=100\text{mm-B}$ )

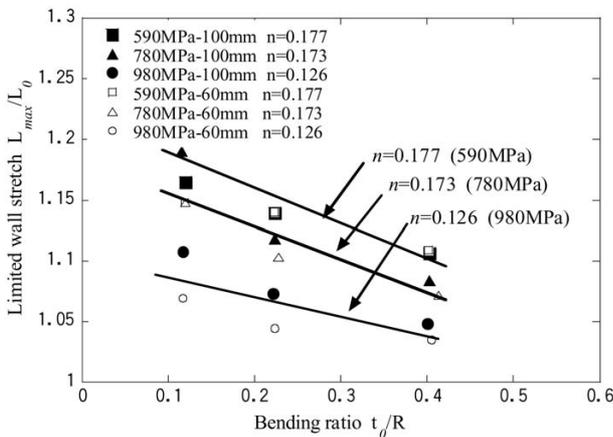


Fig.12 Limited wall stretch  $L_{max}/L_0$  of experiment (Sheet of A-co.)

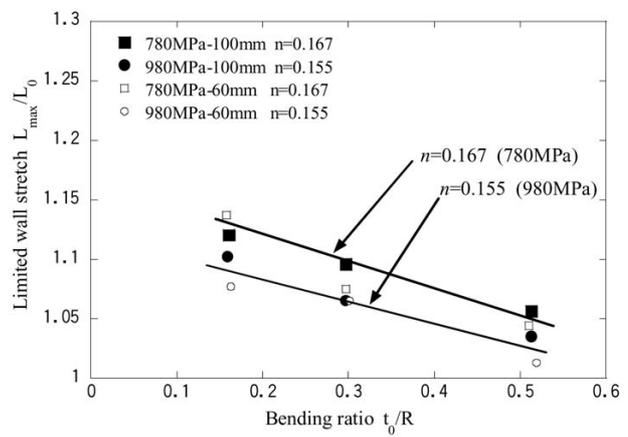


Fig.13 Limited wall stretch  $L_{max}/L_0$  of experiment (Sheet of B-co.)

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。

$$\frac{L_{max}}{L_0} = e^n + (1 - e^n) \left( 1 - e^{-(0.4/n)(t_0/R)} \right) \quad (1)$$

式(1)から張出部の破断限界断面線長比  $L_{max}/L_0$  は、素材の  $n$  値および曲げ加工部の曲げ加工度  $t_0/R$  ( $R=R_i+t_0/2$ ) のみに依存することがいえる。また、 $L_{max}/L_0$  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。

$$R_a \theta + \frac{L_0 - 2R_a \sin \theta}{2 \cos \theta} = \frac{L}{2} \quad (2)$$

$$\sqrt{\left\{ h_{max} - R_a (1 - \cos \theta) \right\}^2 + \left\{ \frac{L_0}{2} - R_a \sin \theta \right\}^2} = \frac{L}{2} - R_a \theta \quad (3)$$

であるため

$$h_{max} = R_a (1 - \cos \theta) + \sqrt{\left( \frac{L}{2} - R_a \theta \right)^2 - \left( \frac{L_0}{2} - R_a \sin \theta \right)^2} \quad (4)$$

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。

$$R_a = R_p + R_d + t_0 \quad (5)$$

以上から求めた式を用い、破断限界断面線長比  $L_{max}/L_0$ 、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  $L_{max}/L_0$ 、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 $L_{max}/L_0$ 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 $t_0/R$ が破断限界断面線長比 $L_{max}/L_0$ 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 $L_{max}/L_0$ 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

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 $R_p=8\text{mm}$ 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。

- 1) 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。
- 2) 計算結果より曲げ加工度 $t_0/R$ が大きくなると破断限界断面線長比 $L_{max}/L_0$ と破断限界成形高さ $h_{max}$ は低下

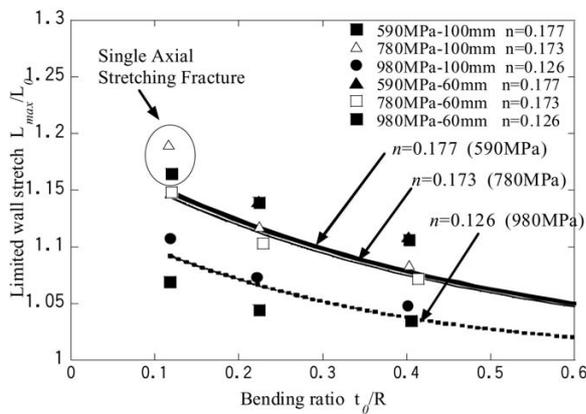


Fig.14 Comparison of limited wall stretch  $L/L_0$  between experiment and calculation (Sheet of A-co.)

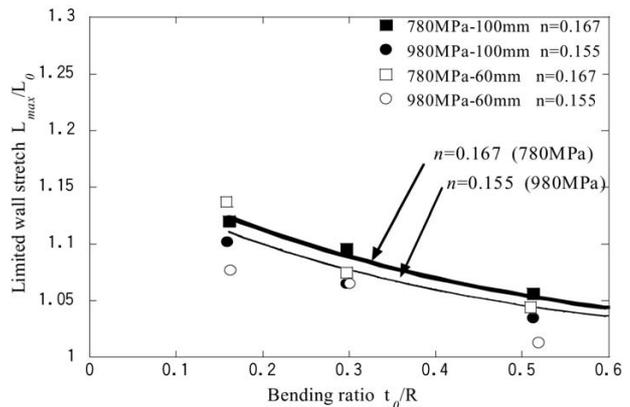


Fig.15 Comparison of limited wall stretch  $L/L_0$  between experiment and calculation (Sheet of B-co.)

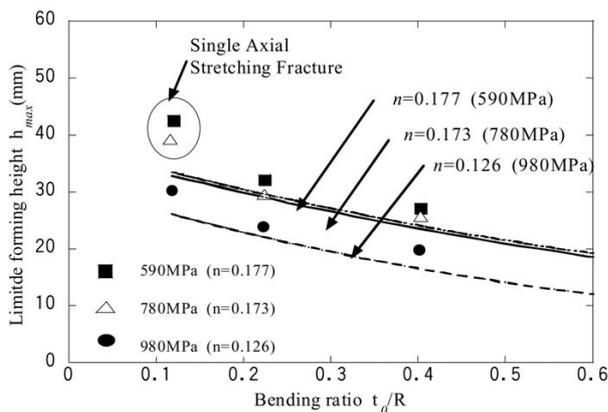


Fig.16 Comparison of limited forming height  $h_{max}$  between experiment and calculation ( $D_d=100\text{mm-A}$ )

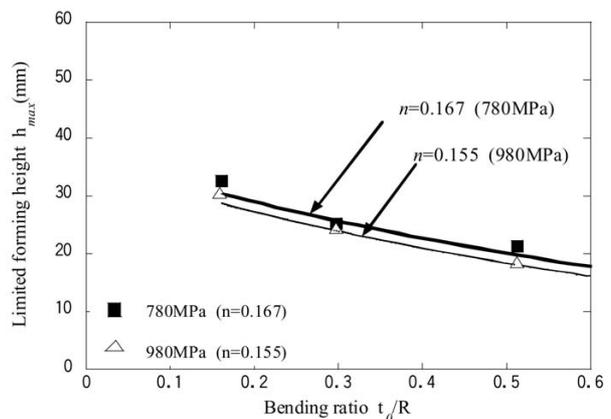


Fig.17 Comparison of limited forming height  $h_{max}$  between experiment and calculation ( $D_d=100\text{mm-B}$ )

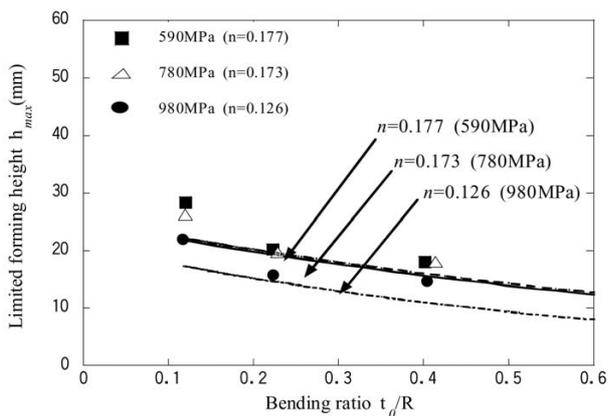


Fig.18 Comparison of limited forming height  $h_{max}$  between experiment and calculation ( $D_d=60\text{mm-A}$ )

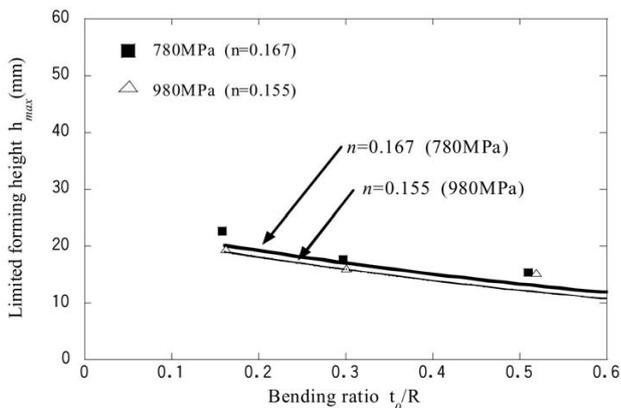


Fig.19 Comparison of limited forming height  $h_{max}$  between experiment and calculation ( $D_d=60\text{mm-B}$ )

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.
- 2) 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.

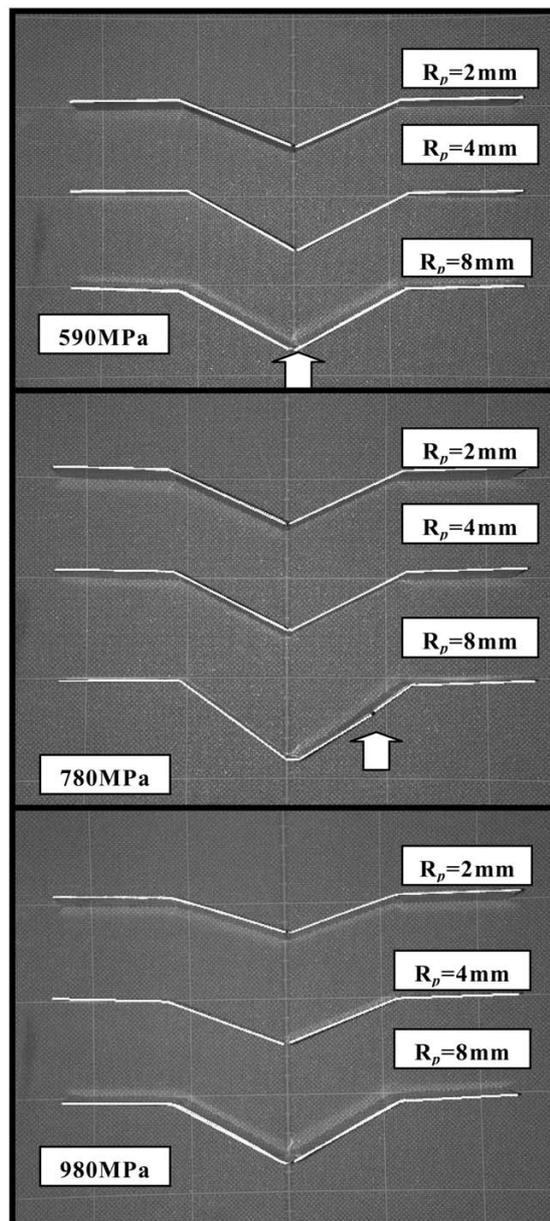


Fig.20 Fracture point in stretch bending of typical specimens ( $D_d=100\text{mm-A}$ )