

# 高張力鋼板の穴広げ性に及ぼす機械的特性の影響

辻智文

指導教員 吉田健吾 准教授

## 1. 緒言

近年、地球温暖化抑制のため CO<sub>2</sub> 削減をはじめとした環境への配慮が求められている。自動車業界では、燃費向上のための技術革新が要求される。中でも車両の軽量化は、燃費改善効果が高く重要な取組み課題である。そこで、自動車に高張力鋼板を利用することは、剛性や衝突安全性を維持しつつ薄肉化することが可能になるため、車両軽量化に効果があると期待されている。しかし、高張力鋼板は延性が低いことや、形状凍結性が低いことなど成形性が低いことに関連した問題を多く抱えている。特に、プレス加工時には伸びフランジ変形部での成形不良が問題となっている。そのため、高張力鋼板の伸びフランジ成形性の評価は、プレス成形において重要な技術課題である。伸びフランジ性は穴広げ試験で求められる穴広げ率で評価される。伊藤ら<sup>1)</sup>は初期穴径を変えた穴広げ試験を行い、初期穴径によって  $n$  値や  $r$  値等の材料特性の影響度に変化し、破断位置が変わることを示した。飯塚ら<sup>2)</sup>はシミュレーションで得た成形限界ひずみとひずみ勾配の関係から、ひずみ勾配の増加に伴って穴広げ率が増加すると述べている。これらの研究で使用されている材料は軟鋼やたかだか引張強さ 1 GPa 級の高張力鋼板であった。

本研究では、新たに開発された引張強さ 1.5 GPa 級の高張力鋼板(S65C)の穴広げ試験を球頭パンチで行う。伸びフランジ成形性の評価に加えて、初期穴径と穴広げ率の関係、穴広げ率を支配する要因を明らかにする。また、高張力鋼板の異方性を詳細に調べるために圧延方向から 15°毎に単軸引張試験を行い、異方性と伸びフランジ成形性の関係を調査する。

## 2. 実験方法

### 2.1 デジタル画像相関法

本実験ではデジタル画像相関法を用いてひずみ計測を行った。試験片の表面にスプレーを塗布し、ランダムパターンを作成した。CCD カメラで試験中の試験片を撮影し、変形前後のランダムパターンの相関から変位を求めた。撮影領域全体のランダムパターンの変位分布からひずみ分布を得た。

### 2.2. 単軸引張試験

供試材は厚さ 2 mm の圧延板である。幅 6 mm で平行部 40 mm の試験片を用いた。長手方向と幅の標点間距離はそれぞれ 30 mm, 6 mm とした。異方性を調べるため、圧延方向からの角度が 0°から 90°までの 15°刻みの 7 方向で 2 回ずつ試験を行った。チャック変位速度は 3 mm/min, ひずみ速度は 0.001/s とした。

### 2.3. 穴広げ試験

穴広げ試験には、直径 25 mm の球頭パンチを持つ出し試験機を用いた。穴広げ試験片は 65×65 mm 板の中心に放電加工で穴を開けたものである。穴の直径は 5 mm, 7.5 mm および 10 mm とした。パンチ上昇速度 0.2 mm/s で穴広げ試験を行った。穴広げ試験は穴縁に破断が発生するまで行い、各初期穴径で 3 回ずつ同じ試験を行った。しわ押え力は材料の流入を抑えるために 100 kN とした。

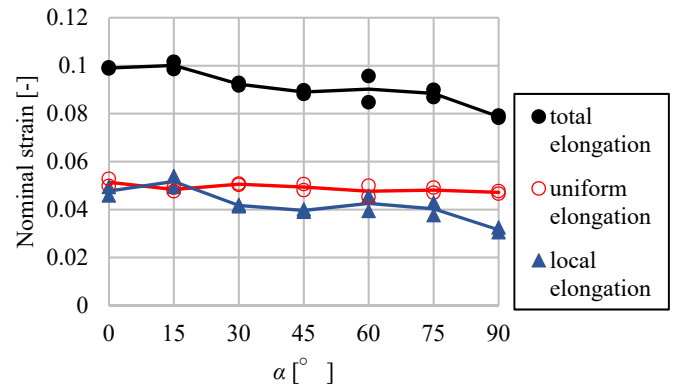
## 3. 実験結果

### 3.1 単軸引張試験結果

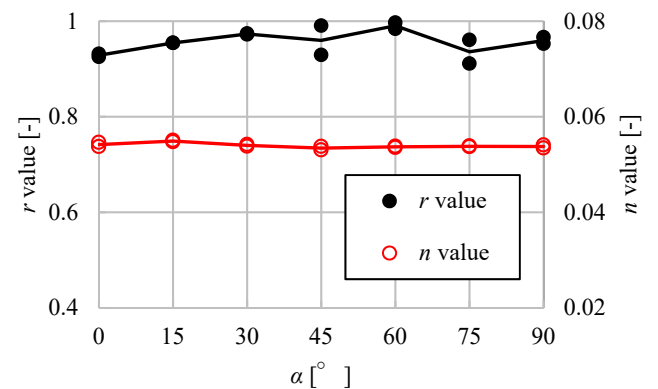
単軸引張試験より同定された機械的特性を **Table 1** に示す。降伏応力、引張強さ、ヤング率は試験片の切出し角度の変化に対して差が小さかったため、平均値を示している。しかし、伸びに関しては角度の影響が確認できる。板面内の全伸び、一様伸び、局部伸びの分布を **Fig. 1** に示す。 $\alpha$  は圧延方向からの角度である。試験開始から引張強さまでの公称ひずみを一様伸び、引張強さから破断までの公称ひずみを局部伸び、その合計を全伸びと定義した。プロット点は各試験結果で、実線は平均値を表わしている。一様伸びに対する  $\alpha$  の影響は小さく、差は 5%以内であるが、局部伸びに関しては  $\alpha$  が大きい程、伸びが小さくなる傾向が明確である。面内の  $r$  値と  $n$  値の分布を **Fig. 2** に示す。 $r$  値は対数塑性ひずみが 0.03 の時の値で、 $n$  値は Swift の式で近似することで求めた値である。プロット点は各試験結果で、実線は平均値を表わしている。角度  $\alpha$  が変わっても有意な変化は確認できないため、異方性は小さい。

**Table 1** Mechanical properties of S65C

| Yield stress [MPa] | Tensile strength [MPa] | Young's modulus [GPa] | $r$ value[-] | $n$ value[-] |
|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| 1301               | 1434                   | 202                   | 0.957        | 0.0540       |



**Fig. 1** In-plane distribution of elongations



**Fig. 2** Distribution of  $n$  value and  $r$  value in plane

### 3.2 穴広げ試験結果

穴広げ試験を行ったところ、すべての試験片で穴縁から破断が発生した。初期孔径が 5 mm, 7.5 mm の場合は、圧延方向から 0° の一定方向で破断が発生した。圧延方向から 0° の方向の穴縁では 90° の方向に単軸引張を受ける。Fig. 1 に示した単軸引張試験の結果から、圧延方向から圧延直角方向に向かって全伸びが減少する傾向がある。そのため、全伸びが最も小さい 90° 方向に引張りを受ける位置で破断が発生したといえる。一方、10 mm の場合は、圧延方向から 0°, 45° および 90° で破断し、破断方向は不規則であった。

穴広げ試験で得られた穴広げ率を Fig. 3 に示す。穴広げ率  $\lambda$  は試験前の穴の直径  $d_0$  と試験後の穴の直径  $d$  を用いて、

$$\lambda = (d - d_0) / d_0 \times 100 \quad (1)$$

とする。プロット点は各試験結果で、実線は平均値を表わしている。初期孔径が 5 mm および 7.5 mm の穴広げ率の平均はほとんど同じ値で約 37% であった。初期孔径が 10 mm の場合は約 42% で他と比べて約 5% 高い値であった。したがって、初期孔径 7.5 mm から 10 mm の間で穴広げ率の向上が確認できる。穴広げ率の向上を穴縁の板厚ひずみを調べることで確認した。板面内の板厚ひずみの分布を Fig. 4 に示す。板厚ひずみは試験前と試験後の試験片の穴縁の板厚をポイントマイクロメータで測定し求めた。初期孔径が 5 mm, 7.5 mm の場合は、板厚ひずみの差は小さくほとんど同じ値で約 -0.12 であった。初期孔径 10 mm の場合は、板厚ひずみはどの角度においても初期孔径 5 mm および 7.5 mm の板厚ひずみよりも小さくなっており、成形限界が拡大している。この結果は初期孔径 7.5 mm から 10 mm の間で穴広げ率が向上することと整合する。

この要因を明らかにするために、圧延直角方向の穴縁の最大主ひずみが 0.25 に達した時の圧延直角方向のひずみ勾配を調べた。その結果を Fig. 5 に示す。ひずみ勾配は穴縁近傍の半径方向の最大主ひずみの勾配とする。初期孔径が異なっても穴縁を原点とした。飯塚ら<sup>2)</sup>は、ひずみ勾配の増加に伴って成形限界が拡大することを示している。しかし、今回の初期孔径の範囲では、穴縁近傍のひずみ勾配はほとんど同じであり、ひずみ勾配からは成形限界拡大の要因は分らなかった。

### 4. 考察

初期孔径が 5 mm および 7.5 mm の試験片では圧延方向から 0° の一定方向で破断が発生した。これは、単軸引張試験の全伸びの結果と一致している。しかし、初期孔径 10 mm の試験片の場合に破断角度の変化とばらつきが出る原因の特定には至っていない。伊藤ら<sup>1)</sup>の引張強さ 440 MPa 級の高張力鋼板の平頭パンチによる穴広げ試験でも、初期孔径を変えることで破断方向が変化する結果が得られている。この研究では、初期孔径によって  $n$  値や  $r$  値等の材料特性の影響度が変わり、初期孔径が小さい場合は  $n$  値の低い角度、初期孔径が大きい場合は  $r$  値が低い角度で破断が生じることを示している。しかし、本研究の供試材の  $r$  値および  $n$  値は、角度による有意な差はない。したがって、 $r$  値および  $n$  値の結果からは初期孔径 10 mm の破断角度が変わる要因を明らかにできなかった。ただし、 $r$  値は対数塑性ひずみが 0.03 の時の値で、 $n$  値は一樣伸びの間のひずみで求めたが、破断ひずみは最大主ひずみが 0.3 から 0.4 の間であり、ひずみ域に大きな差がある。そのため、高ひずみ域での材料特性の測定が今後の課題である。

### 5. 結言

高張力鋼板 (S65C) の異方性を考慮した単軸引張試験と穴広げ試験の結果から次の知見を得た。

1. 供試材の引張強さ、降伏応力、 $n$  値、 $r$  値に関しては異方性が小さかったが、伸びに関する異方性が確認され、圧延方向からの角度が大きい方が全伸び、局部伸びは小さい。
2. 穴広げ成形による穴縁の破断は、基本的には全伸びが小さい方向で生じるが、初期孔径が大きい場合に破断方向がばらつく場合がある。
3. 穴縁近傍のひずみ勾配が同じでも穴広げ率が異なる場合があり、ひずみ勾配以外にも穴広げ性に影響を及ぼす要因が存在すると考えられる。

### 参考文献

- 1) 伊藤泰弘・中澤嘉明: 塑性と加工, 50-586 (2009), 1039-1043.
- 2) 飯塚栄治・土部正樹・山崎雄司・稲積透: 塑性と加工, 51-594 (2001), 700-705.

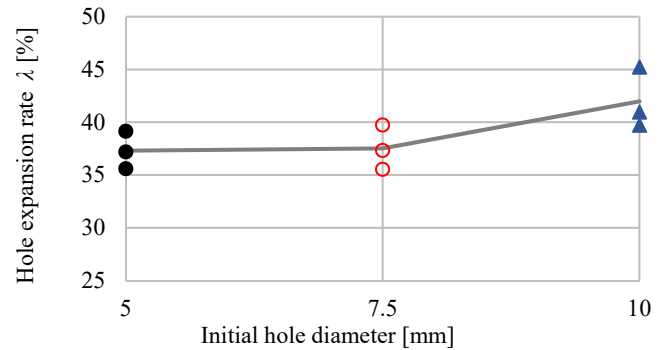


Fig. 3 Hole expansion rate

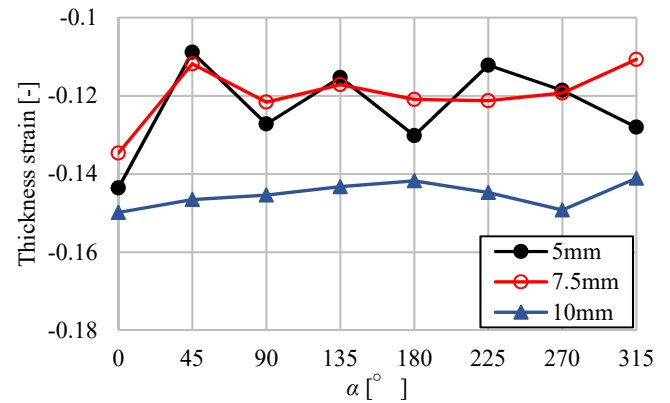


Fig. 4 Thickness strain

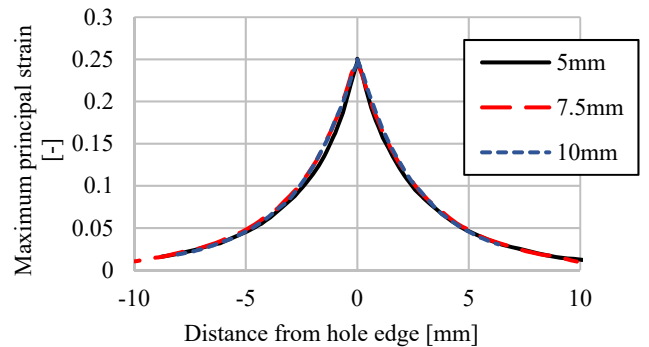


Fig. 5 Strain gradient of TD