

高張力鋼板用の十字形試験片形状の考案と二軸引張時の塑性変形特性の測定

武藤裕

指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

地球環境問題への対応として、CO₂排出量の削減が求められている。自動車においては、そのために燃費向上が必要となる。燃費向上を図る手段の一つに、車体軽量化がある。しかし、軽量化に伴う衝突安全性の低下は望ましくない。軽量化と安全性の確保という二つの要求を満たす方法として、現在では高張力鋼板が多く用いられている。より高強度な材料を用いることで、鋼板の薄肉化と補強部材の省略が可能となり、軽量化が実現できる。現在、引張強さが980 MPa以上の高張力鋼板の利用が拡大している。一方、材料の強度が上がると延性の低下を招き、衝突時に破断を生じやすい。また、高い強度が加工を困難にし、割れやしわといった成形不具合の原因となる。

金属の破断挙動や塑性特性を知る手段として、引張試験がある。二軸引張試験は、実際の材料使用環境に近い、複雑な応力状態での弾塑性変形挙動を測定できる。桑原ら²⁾は試験片の腕部にスリットを加え、ひずみ測定部の変形拘束を小さくした試験片を考案した。彼らの研究は590 MPa級の高張力鋼板を対象としている。一方、近年さらに高強度な1.5~2.0 GPa級の高張力鋼板が開発されている。この高張力鋼板について、過去に本研究室で二軸引張試験が行われた。しかし降伏前にスリットから割れが生じたため、二軸引張での塑性変形挙動を測定するには至っていない。そのため塑性変形特性の測定に適した、十字形試験片の開発が求められる。

本研究では、1.5 GPa級の高張力鋼板 S65C について、ひずみ測定部で塑性変形を実現する十字形試験片の形状を、有限要素法 (FEM) 解析にて検討する。そして、考案した十字形試験片を用いて複数の荷重比で二軸引張試験を行い、二軸引張塑性特性を調べる。

2. FEM 解析

2.1. 解析方法

FEM 解析ソフト Marc Mentat 2016.0.0 を利用し、塑性変形特性の測定に適する十字形試験片の形状を検討した。試験片の対称性から、1/8 モデルで解析した。機械的性質は、過去に本研究室にて実施された単軸引張試験で測定された、ヤング率、ポアソン比、単軸降伏応力及び加工硬化特性に基づき設定した。供試材の高張力鋼板 S65C は、圧延方向単軸引張での引張強さが1430 MPa、ヤング率が200 GPa、ポアソン比が0.31である。x 及び y 軸は Fig. 1 に示すように腕部に沿って定義した。変位の指定については、1/8 モデルの対称面上で対称拘束条件を定義した。また、腕部端部はチャック掴み部となるため、腕の幅方向に変位を拘束し、引張方向の変位のみ与えるようにした。二軸方向での荷重比は $F_x:F_y = 1:1$ で、腕部端面に時間に比例した荷重増加を与えた。要素は二次四面体とし、メッシュ分割はモデル全体を約 1 mm、ひずみ測定部及び応力集中が予想される曲面部を約 0.5 mm と細かくした。

降伏関数については、形状検討では等方性材料とし、von Mises の降伏関数を用いた。また、試験結果において異方性の影響を確認するために、Hill の降伏関数を用いた。Hill の異方性パラメータ決定では、圧延方向単軸引張での降伏応力

σ_0 と、圧延方向から 45° 方向の降伏応力 σ_{45} 、単軸引張試験で測定された圧延方向、圧延直角方向の r 値である r_0 及び r_{90} を用いた。

2.2. 解析結果

形状については、ひずみ測定部の厚さと薄肉形状、腕部付け根の形状ならびに腕部スリットの有無について検討を行った。塑性変形前の応力集中を防ぎ、試験片中心のひずみ分布がなるべく一様となる形状を調べた。Fig. 1 は FEM 解析結果から決定した十字形試験片の形状である。ひずみ測定部を円形に、板厚 1/2 となるように薄肉化した。応力集中による降伏前の割れを防ぐために、腕部同士や薄肉部と周辺の接続を緩やかな曲面接続とした。腕部スリットについては、解析結果で応力集中が見込まれたため、設けていない。

3. 実験方法

3.1. 二軸引張試験

荷重比 $F_x:F_y = 1:1, 2:1, 1:2, 3:2, 2:3, 6:5, 5:6$ の 7 通りで二軸引張試験を行った。各荷重比の実験回数は 1 回である。FEM 解析結果を基に、各荷重比についてひずみ速度がなるべく一定となる荷重制御を構築した。ひずみ測定には、デジタル画像相関法を利用した。実験時の荷重は、二軸引張試験機で測定した。

3.2. 試験時の応力の推定

腕部スリットを設けないために荷重を受ける瞬間の断面積が設定できず、試験時の応力が算定できない。そこで、解析結果から試験時の応力を推定した。応力推定方法について、模式図で表したものを Fig. 2 に示す。

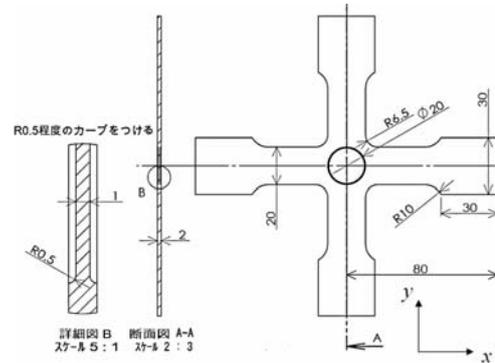


Fig. 1 Shape of determined cruciform specimen

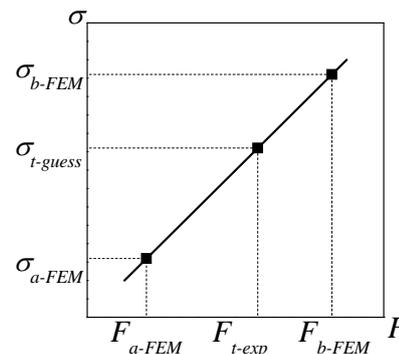


Fig. 2 The way of stress guess

試験時の荷重 F_{t-exp} に対して、解析で得た荷重から $F_{a-FEM} < F_{t-exp} < F_{b-FEM}$ となる荷重 F_{a-FEM} 及び F_{b-FEM} を得る。また、その時の応力 σ_{a-FEM} 及び σ_{b-FEM} を得る。Fig. 2 に示すように応力-荷重関係を線形補間することで、試験時の応力 $\sigma_{t-guess}$ を推定した。

4. 実験結果

二軸引張試験により得られた対数ひずみ線図を Fig. 3 に示す。 $F_x:F_y=1:1, 2:1, 1:2$ については試験結果と解析結果で良く一致している。一方、 $F_x:F_y=2:3$ では、最大主ひずみの増大に伴う差異の拡大がみられた。相当塑性ひずみについては、 $F_x:F_y=1:1$ で最も大きく $\epsilon^p=0.034$, $F_x:F_y=5:6$ で最も小さく $\epsilon^p=0.003$ まで得られた。異方性の影響を調べるために、相当塑性ひずみ $\epsilon^p=0.001, 0.002, 0.005, 0.01$ での無次元化等塑性仕事面及び von Mises, Hill の無次元化降伏曲面を Fig. 4 に示す。等方的に硬化する場合は各荷重比で等塑性仕事面が一致する³⁾が、Fig. 4 ではその挙動はみられなかった。

関連流動則では、塑性ひずみ増分ベクトルが降伏曲面の法線方向と一致するとしている。これを確認するために Fig. 5 に各相当塑性ひずみ ϵ^p での塑性ひずみ増分ベクトル方向の測定値と、降伏曲面の法線ベクトル方向の関係を示す。Fig. 5 では、 φ と θ [°] をそれぞれ次のように設定した。

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{d\epsilon_y^p}{d\epsilon_x^p}\right) \quad (2)$$

ここで σ_x, σ_y は x, y 軸方向の降伏応力を表す。 $F_x:F_y=1:1$ ($\varphi = \theta = 45^\circ$) ではプロットと曲線に一致がみられる。一方、 $F_x:F_y=3:2$ ($\varphi \cong 26^\circ$), $6:5$ ($\varphi \cong 35^\circ$) では、他の荷重比よりも差異が大きくみられた。また、 $F_x:F_y=2:1$ ($\varphi \cong 7\sim 13^\circ$), $1:2$ ($\varphi \cong 77\sim 82^\circ$) では Fig. 4 と同様に、他の荷重比よりも試験結果のプロットのばらつきが大きくみられた。

5. 考察

本研究で検討した von Mises, Hill の降伏曲面と等塑性仕事面の一致について、差異を定量的に評価し、降伏関数の再現精度について確認する。Fig. 4 に示した無次元化等塑性仕事面及び無次元化降伏曲面について、平均二乗誤差を考える。原点から無次元化等塑性仕事面までの距離を r_i , 原点から無次元化降伏曲面までの距離を r'_i とおく。各相当塑性ひずみ ϵ^p 毎の平均二乗誤差 δ_n は、式(3)で求められる。

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r'_i - r_i)^2} \quad (3)$$

(n : 各 ϵ^p におけるデータ数)

Mises の降伏曲面では $0.02 < \delta_n < 0.035$, Hill の降伏曲面では $0.02 < \delta_n < 0.045$ を示し、異方性の影響は小さいが存在すると思われる。

桑原ら³⁾の研究や、箱山ら²⁾の 590 MPa 級高張力鋼板の二軸バルジ試験では、異方性降伏関数として Yld2000-2d を用いた結果が、試験結果と概ね一致するとしている。この関数は、Fig. 5 に示した相当塑性ひずみ $\epsilon^p=0.002$ のプロットと、よく似た降伏曲面の法線ベクトル方向の曲線を描く。よって Yld2000-2d による再現精度の向上が考えられる。

本研究では、S65C について Hill の降伏曲面と二軸引張試験で一致する結果は得られなかったが、異方性の影響は小さいことがわかった。今後の課題としては、腕部スリットを設けない形状での応力推定精度の向上と、他の異方性降伏関数による再現性の検討がある。

6. 結言

1.5 GPa 級高張力鋼板の、塑性域での二軸引張試験可能な十字形試験片形状を FEM 解析を用いて考案した。それを基に行った高張力鋼板の二軸引張試験から、次の知見を得た。

- (1) $F_x:F_y=1:1$ の場合に、相当塑性ひずみ $\epsilon^p=0.034$ まで塑性変形を負荷することができた。
- (2) 1.5 GPa 級の鋼板の降伏曲面は、von Mises の降伏曲面との差異が小さいことから、二軸応力状態での異方性は小さい。
- (3) 等二軸引張以外では、腕部スリットを設けない場合、降伏付近で最小主ひずみが減少する。また試験片形状により、荷重比とひずみ測定部での応力比が一致しない。

参考文献

- 1) 松本繁ら：塑性と加工, 53-623 (2012), 31.
- 2) 箱山智之ら：塑性と加工, 54-630(2013),628-634.
- 3) 桑原利彦ら：塑性と加工, 48-558(2007), 630-634

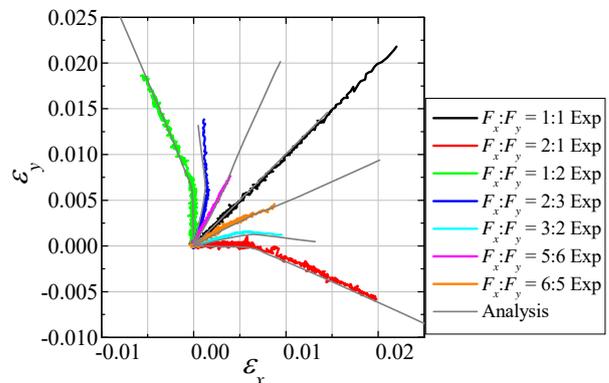


Fig. 3 Strain path

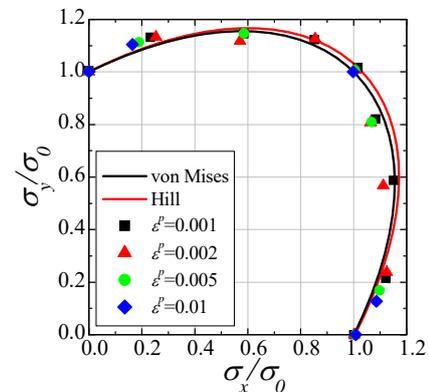


Fig. 4 Normalized work contours with yield surface

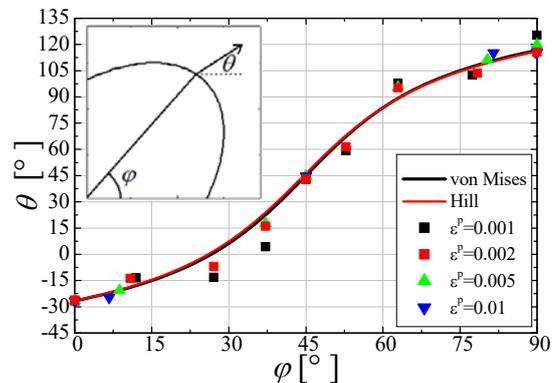


Fig. 5 Comparison of measured directions of incremental plastic strain vectors with directions of normal vectors of yield surface