

ひずみ速度を考慮した構成則による応力-ひずみ曲線の予測

長谷川 晃彦
指導教員 吉田健吾 准教授

1. 緒言

我々の身近には電車やバスなどの輸送機器を始め、家電製品などの金属製品であふれている。金属を用いプレス加工によりものを作るうえで、金属の塑性変形挙動を知ることは重要であり、その中で応力-ひずみ線図は不可欠で基本的な情報である。金属材料は鍛造、プレス加工などによる製造時および使用時に、様々なひずみ速度下におかれることが多い。応力-ひずみ線図はひずみ速度によって異なるため、ひずみ速度を考慮した応力-ひずみ線図の定式化が必要となる。そこで今日までにひずみ速度を考慮した加工硬化式として n 乗硬化則の拡張式や、Cowper-Symonds モデル、材料の発熱を考慮した Johnson-Cook モデルなどが提案されている。

本研究では冷間圧延鋼板 (SPCC)、ジュラルミン (A2017)、A6016 を用い $10^{-4} \sim 10^{-1}$ [1/s] の異なったひずみ速度で単軸引張試験を行う。実験により各ひずみ速度で得られた応力-ひずみ線図を、ひずみ速度を考慮した各モデルに適用することにより、各材料による実験値の再現性をあきらかにし、モデルの妥当性を検証する。

2. 実験方法

2.1. 単軸引張試験

島津製精密万能試験機オートグラフ AG-100kND を用いて単軸引張試験を行う。試験条件として、チャック速度を 0.5[mm/min], 5[mm/min], 50[mm/min], 500[mm/min] とした。供試材は厚さ 0.9[mm] の SPCC, A2017 及び、厚さ 1.0[mm] の A6016 で、試験片形状は JIS13B 号とした。

2.2. 各構成式による計算

2.2.1. n 乗硬化則の拡張式

n 乗硬化則の拡張式は式(2.1)で表される¹⁾。

$$\sigma = k \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (2.1)$$

最も遅いひずみ速度の時の実験データを用い式(2.1)のひずみ速度成分を除いた式から最小二乗法により n 値(加工硬化指数)の同定を行う。ひずみ速度成分を除いたのは、加工硬化による影響とひずみ速度硬化による影響を区別するためである。次に対数塑性ひずみ $\varepsilon^p = 0.1$ のときの実験データから Excel のソルバー機能を用いた最小二乗法により k, m 値の同定を行う。

2.2.2. Cowper-Symonds モデル

Cowper-Symonds モデルは式(2.2)で表される。 $\varepsilon^p = 0.1$ のときの実験データから定数 p, γ, D の同定を行う。

$$\sigma = p \varepsilon^n \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\gamma} \right)^D \right) \quad (2.2)$$

2.2.3. Johnson-Cook モデル

Johnson-Cook モデルは式(2.3)で表される。 $\varepsilon^p = 0.05, 0.15$ のときの実験データから定数 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, x, y$ の同定を行う。また試験片の温度 T は公称応力-ひずみ線図から試験片の発熱、試験片表面から空気中への放熱、放射、また試験片からチャックへ熱が伝導し、チャック表面からの放熱、放射の 5 成分を計算することにより求めた。

$$\sigma = (C_0 + C_1 \varepsilon^x) \left(1 + C_2 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(C_3 - C_4 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^y \right) \quad (2.3)$$

2.2.4. 発熱の計算方法

材料が塑性変形する際、塑性変形仕事のうち 95% 程度は熱に変わると言われている²⁾。そのことに留意し、試験片の塑性変形によるひずみ e_1 , ひずみ e_2 の微小区間の発熱量 ΔW [J] は応力-ひずみ曲線の面積、試験片の体積 V [m³] を用いて、以下の式で求められる²⁾。

$$\Delta W = 0.95 \times V \times \int_{e_1}^{e_2} s(e) de \quad (2.4)$$

次に放熱の計算方法を示す³⁾。試験片表面から空気中への放熱 ΔW_1 [J], 放射 ΔW_2 [J] は、対流熱伝達率 h [W/m² · K], 表面積 A [m²], 室温と試験片表面の温度差 Δt [K], 放熱が起きている時間 t [s] ステファンボルツマン定数 σ , 放射率 e を用いて以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= h A t \Delta t \\ &= h A t (\Delta t + 273.15)^4 \\ &\quad - 273.15^4) \sigma e A t \end{aligned} \quad (2.5)$$

放熱を考慮した試験片の表面温度 T_b は、室温 T_r [K] を用いて以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} T_b &= T_r \\ &+ \frac{\Delta W - \Delta W_1 - \Delta W_2}{\rho \times C_p \times V} \end{aligned} \quad (2.7)$$

チャックの表面温度 T_c [°C] は、熱伝導によって試験片からチャックに伝わる熱エネルギーと、チャック表面から空気中への放熱 ΔW_1 [J] と放射 ΔW_2 [J] の和の等式から求めることができる。チャックの厚さを h [m], チャックの表面積 A_1 [m²], チャックの熱伝導率 μ とすると以下の等式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{h} (T_b - T_c) A_1 t &= \Delta W_3 + \Delta W_4 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_3 &= (T_c - T_r) h A_1 t \\ \Delta W_4 &= ((T_c + 273.15)^4 - (T_r + 273.15)^4) \sigma e A t \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで ΔW_4 は微小であるので 0 と仮定し、(2.10)式から T_c を求めた。 T_c から ΔW_3 が求まり、微小区間の最終的な温度変化 ΔT_f [K] は以下の式で与えられる

$$\begin{aligned} \Delta T_f &= \frac{\Delta W - \Delta W_1 - \Delta W_2 - \Delta W_3}{\rho \times C_p \times V} \end{aligned} \quad (2.11)$$

この方法より、時間 t [s] の間の試験片の温度変化を計算できる。

3. 実験結果

3.1. 単軸引張試験の結果

オートグラフによる各ひずみ速度による単軸引張試験の結果は Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 のようになった。SPCC ではひずみ速度が上がるほど公称応力も上昇した。A2017 では SPCC とは逆にひずみ速度が上がるほど公称応力は減少した。また A2017 は局部伸びが他の材料と比べ極端に低く、 10^{-4} [1/s] のときに 0.05 であり SPCC と比べ 0.2 程度低かった。A6016 はひずみ速度による変化がほとんど見られなかった。

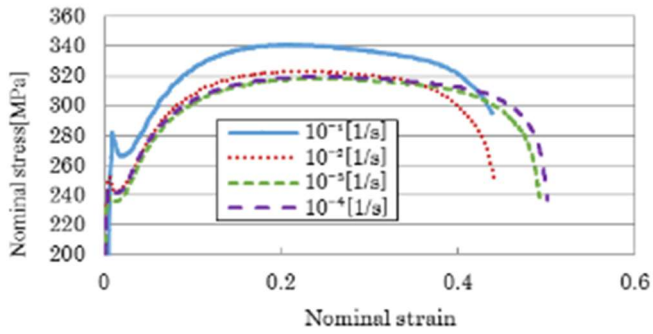


Fig.1 Nominal stress-strain curve of SPCC

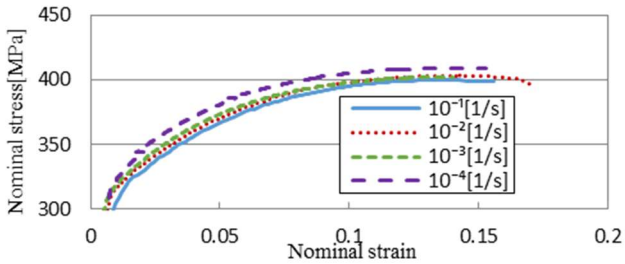


Fig.2 Nominal stress-strain curve of A2017

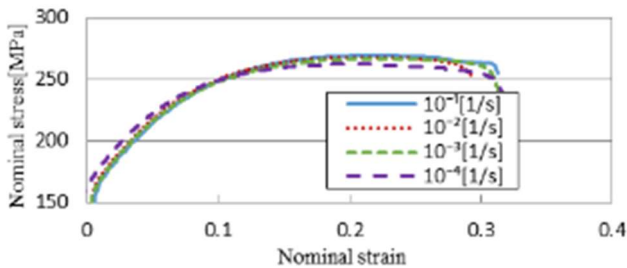


Fig.3 Nominal stress-strain curve of A6016

3.2. n 値, m 値の同定結果

同定した n 値, m 値を **Table 1** に示す. A2017 のみ m 値が負の値となった. このことから A2017 ではひずみ速度が増すにつれ材料が軟化することが分かる.

Table 1 Material parameter of n power heading extension model

Steel type name	n value	m value
SPCC	0.21514	0.010224
A2017	0.16024	-0.0028219
A6016	0.22264	0.000482

3.3. SPCC の各モデルによる実験値との比較

Fig.4 に SPCC での真応力の実験値と各モデルによる真応力の予測値の相対誤差を示す. ひずみ速度を考慮していない n 乗硬化則では, ひずみ速度が速くなるにつれ相対誤差は大きくなる. 特にひずみ速度 10^{-2} [1/s] 以上では相対誤差 2% 以上誤差があり, 10^{-1} [1/s] では 7.393% であった. このことから 10^{-2} [1/s] 以上ではひずみ速度を考慮する必要があると考えられる.

また, n 乗硬化則の拡張式から Cowper-Symonds モデルにすることにより, 大きく誤差を改善できた. また発熱を考慮した効果は特に見受けられなかった. この材料では Cowper-Symonds モデルが適していると考えられる.

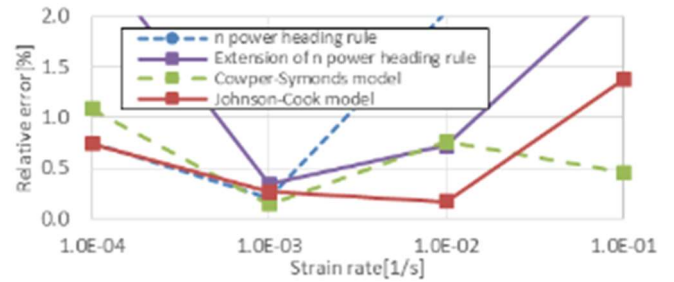


Fig.4 Error of the calculated and experimental values (SPCC)

3.4. A2017 の各モデルによる実験値との比較

Fig.5 に A2017 での真応力の実験値と各モデルによる真応力の予測値の相対誤差を示す. SPCC と比べるとひずみ速度の影響は少なく, ひずみ速度 10^{-1} [1/s] のときの n 乗硬化則での相対誤差は 1.8% 程度と SPCC の 7% と比べて 5% 以上小さい値となっている. またこのグラフから n 乗硬化則の拡張式で十分精度よく実験値を再現できていることがわかる. また Cowper-Symonds モデルと Johnson-Cook モデルの結果を比較すると発熱を考慮したことによる改善は見られない. 試験片温度の高い高ひずみ速度域において, Cowper-Symonds モデルの方が予測精度がよいのである.

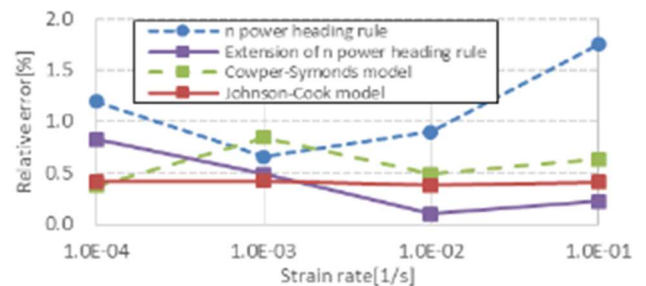


Fig.5 Error of the calculated and experimental values (A2017)

3.5. A6016 の各モデルによる実験値との比較

Fig.6 に A6016 での真応力の実験値と各モデルによる真応力の予測値の相対誤差を示す. n 乗硬化則とその拡張式を比較するとどのひずみ速度域でも誤差はほぼ一致している. つまりこの材料はひずみ速度依存性がほとんどないことがわかる. これは m 値が 0 にかなり近い値であることから伺える. また 10^{-3} [1/s] までの低ひずみ速度域ではどのモデルでも実験値の再現性は変わらない. 10^{-2} [1/s] から Johnson-Cook モデルのみ精度が良くなっている. これは材料の発熱による影響であると考えられる. というのもひずみ速度が速くなるほど発熱量も大きくなり, 材料が軟化するが, Johnson-Cook モデルのみそれを考慮しているためである. この材料は他の材料に比べ発熱による影響が大きい材料であることが分かった.

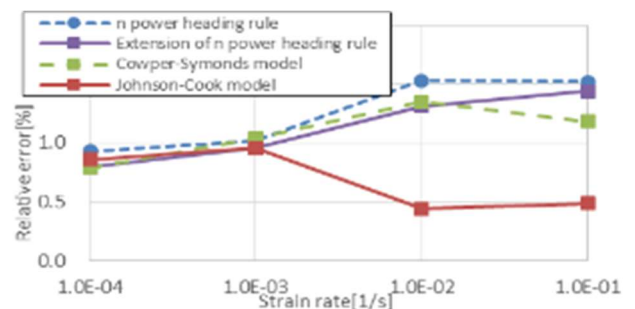


Fig.6 Error of the calculated and experimental values (A6016)

5. 結言

SPCC, A2017, A6016 を用いて常温におけるひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ [1/s] の単軸引張試験を行った。各ひずみ速度での応力-ひずみ線図の近似式を用いて実験値との差を比較し以下の知見を得た。

- (1) SPCC では発熱を考慮する必要はないが、Cowper-Symonds モデルにより予測精度は上昇する。
- (2) A2017 では n 乗硬化則の拡張式で十分精度よく応力-ひずみ線図を予測できる。
- (3) A6016 では発熱を考慮すると予測精度は上がる。

参考文献

- 1) 後藤学:塑性学(1982),17-18.
- 2) 土田紀之, 友田陽, 長井寿:鉄と鋼 90(2004),63.
- 3) 八光電機:「熱の計算:熱伝導」
<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/s01050.html>