

## 123 炭素鋼の青熱脆性を考慮した温度依存性構成式

## Temperature Dependant Constitutive Equation for Mild Steels with Consideration of Blue Brittleness

正 立矢 宏 (金沢大) ○ 高木幸司 (金沢大・院) 正 放生明廣 (金沢大) 正 茶谷明義 (金沢大)

Hiroshi TACHIYA, Kouji TAKAGI, Akihiro HOJO, Akiyoshi CHATANI  
Kanazawa University, Kodatsuno 2-40-20, Kanazawa city, Ishikawa, Japan**Key Words** : Dynamic constitutive equation, Strain-rate sensitivity, Temperature sensitivity, Elevated temperature, Blue brittleness, Stress-strain curve, Uniaxial compression test, Mild steel

## 1. 緒言

炭素鋼の変形応力は、通常、温度の上昇に伴い低下する。しかし、青熱脆性が生じる温度下においては、炭素鋼の変形応力が急な増加傾向を示すことがある<sup>(1)(4)</sup>。そのため、高温下における材料および構造の弾塑性変形の予測および解析を行なうためには、このような青熱脆性の影響を考慮した構成式が必要となる。そこで、本研究ではSS400およびS45C炭素鋼を対象として、青熱脆性域を含む広い温度下で適用可能である静的な応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を提案する。

## 2. 試験方法および結果

炭素鋼の静的応力-ひずみ関係を求めるために、万能試験機を用い塑性ひずみ速度を約 $10^{-4}\text{s}^{-1}$ とし、常温(293K)から673Kまでの温度域での静的圧縮試験を行なった。応力は試験機付属のロードセルより、ひずみは非接触変位測定器を用いて測定した。なお試験片は、セラミックファイバースリーブで絶縁したニクロム線を試験片に直接巻きつけて加熱した<sup>(2)</sup>。

上述の方法より得たSS400およびS45C炭素鋼の静的応力-塑性ひずみ関係を図1、図2にそれぞれ示す。同図より、両試験片ともに常温から温度が増加するにつれ塑性ひずみに対する応力値が減少し、通常の温度依存性が確認できる。しかし、本試験の範囲の中間温度域以降、塑性ひずみに対する応力値は徐々に増加し、その後再び減少する。このような傾向を詳細に検討するため、図3に塑性ひずみが3%での静的応力と温度の関係を示す。同図より、SS400では500K以降において、S45Cでは400K以降において急激な応力値の増加・減少がみられる。これは、炭素鋼に特有な青熱脆性の影響である<sup>(3)(4)</sup>。

## 3. 青熱脆性を考慮した構成式

3.1 構成式形の検討 青熱脆性の影響による応力値の増加を表すため、応力と温度の関係を図4に示すように2つの応力成分 $\sigma_I$ および $\sigma_{II}$ によって表されると仮定する。すなわち、 $\sigma_I$ は青熱脆性の影響を受けず温度上昇に対して単調に減少する成分を、 $\sigma_{II}$ は青熱脆性により増加する応力成分を表す。本研究では、 $\sigma_I$ を表す式として次式を提案する<sup>(5)</sup>。

$$\sigma_I = K(\varepsilon_p + \alpha)^n \quad (1)$$

ここで、 $K$ 、 $\alpha$ 、 $n$ は次式のように温度 $T$ に関する一次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} K &= K_0 + K_1 T \\ \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 T \\ n &= n_0 + n_1 T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\alpha$ は降伏ひずみに相当し、式(1)において塑性ひずみ $\varepsilon_p$ を零とすれば、各温度下の降伏応力 $\sigma_y$ は次式で表される。

$$\sigma_y = K\alpha^n \quad (3)$$

また、降伏点近傍において、弾性域も含めた応力-ひずみ曲線の変化率、すなわち、接線の勾配の変化が連続であるとすれば縦弾性係数 $E$ が次式で表される。

$$E = \frac{\sigma_y}{\alpha} \quad (4)$$

次に、青熱脆性の影響を表す $\sigma_{II}$ の関数形について検討する。図4に示すように、青熱脆性域では温度の上昇に伴い応力値が一時的に増加し、ある温度を超えると減少する。そこで本研究では、温度に対するこのような変化を表す $\sigma_{II}$ の関数形として次式を提案する。

$$\sigma_{II} = C_1 \exp \left[ C_2 (T - T_0)^2 \right] \varepsilon_p^{C_3} \quad (5)$$

$C_1 \sim C_3$  および  $T_0$  は未知の材料定数である。上式の指数関数部分は、温度 $T_0$ において最大となり、その前後で増加、減少する関数である。 $\varepsilon_p^{C_3}$ は塑性ひずみの影響を表す項として指数関数に乗じたものであり、図1における573Kの測定結果が示すように、ひずみの増加とともに青熱脆性の影響が増加する効果を表すために用いる。

以上の結果より、本研究で提案する青熱脆性域を含む温度域で静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を $\sigma_I$ と $\sigma_{II}$ の和として次式で表す。

$$\sigma_{st} = K(\varepsilon_p + \alpha)^n + \sigma_{II} = C_1 \exp \left[ C_2 (T - T_0)^2 \right] \varepsilon_p^{C_3} \quad (6)$$

3.2 材料定数の決定 式(6)に含まれる未知の材料定数は以下のように決定する。材料定数を決定する際、応力-塑性ひずみ関係のみでは縦弾性係数を近似するためのデータが十分でなく、縦弾性係数を良く表すことができない。そこで、縦弾性係数をよく表すために、まず、各温度下における縦弾性係数および降伏応力の測定値から $\alpha_i (i=0, 1)$ の値を決定する。次に、得られた $\alpha_i$ を代入した式(6)が全温度域での静的応力-塑性ひずみ関係の測定値を良く表すように、非線形最小二乗法で、 $K_i$ 、 $n_i$ 、 $C_1 \sim C_3$ 、 $T_0$ を決定した。決定した材料定数は表1に示す通りである。

以上で決定された構成式より、SS400およびS45C炭素鋼の静的応力-塑性ひずみ関係を求め、測定値とともに図1および図2にそれぞれ示す。同図より、構成式は測定値を良く近似していることが分かる。さらに、決定した構成式が広い温度域で適用可能であることを確認するために、塑性ひずみが3%での応力値と温度の関係を求め測定値と比較した。その結果を図3に示す。また、図5および図6には決定された構成式より得られるSS400およびS45C炭素鋼の降伏応力と縦弾性係数を測定値とともに示す。図1、図2、図5および図6より、計算値と測定値は良く一致しており、提案した構成式が青熱脆性域を含む広い温度域でSS400およびS45C炭素鋼の変形挙動を表し得ることが確認できる。

Table.1 Material constants of eq.(6) for SS400 and S45 C

	$K_0$ (MPa)	$K_1$ (MPa/K)	$a_0$	$a_1$ ( $K^{-1}$ )	$n_0$	$n_1$ ( $K^{-1}$ )	$C_1$ (MPa)	$C_2$ (K-2)	$C_3$	$T_0$ (K)
SS400	$1.23 \times 10^3$	-1.02	$2.28 \times 10^{-3}$	$-2.02 \times 10^{-6}$	$1.29 \times 10^{-1}$	$9.21 \times 10^{-5}$	$7.89 \times 10^2$	$-4.95 \times 10^4$	$3.53 \times 10^{-1}$	$5.81 \times 10^2$
S45C	$1.86 \times 10^3$	-1.11	$2.56 \times 10^{-3}$	$-2.82 \times 10^{-7}$	$1.94 \times 10^{-1}$	$-4.40 \times 10^{-5}$	$6.91 \times 10^2$	$-9.88 \times 10^5$	$5.04 \times 10^{-1}$	$5.37 \times 10^2$

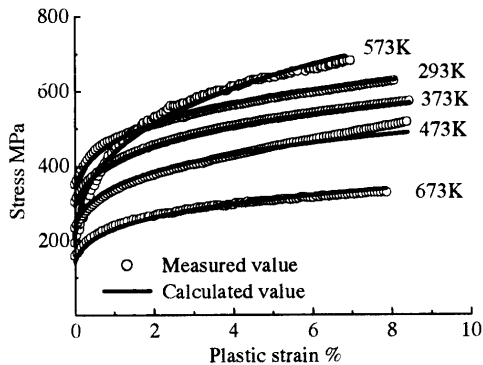


Fig.1 Static stress - strain curves on SS400

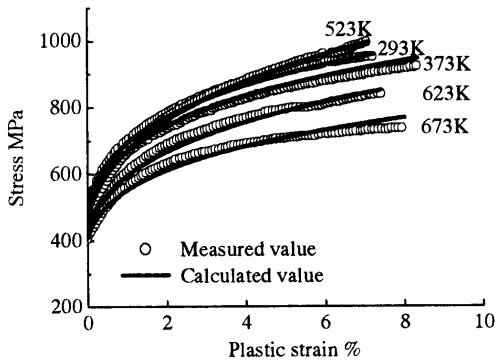


Fig.2 Static stress - strain curves on S45C

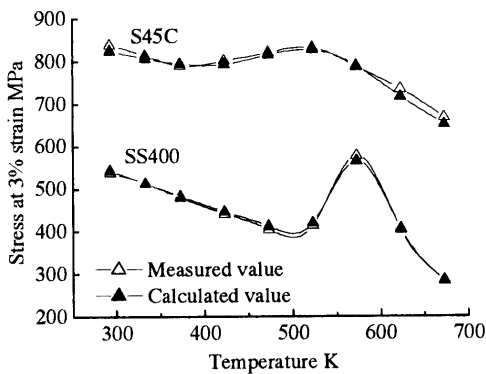


Fig.3 Relation between stress and temperature on SS400 and S45C

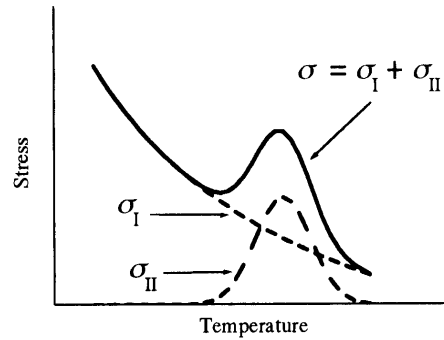


Fig.4 Relation between the stress and temperature of steels

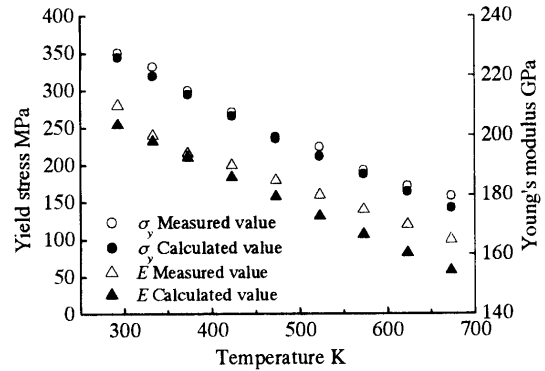


Fig.5 Yield stress and Young's modulus on SS400

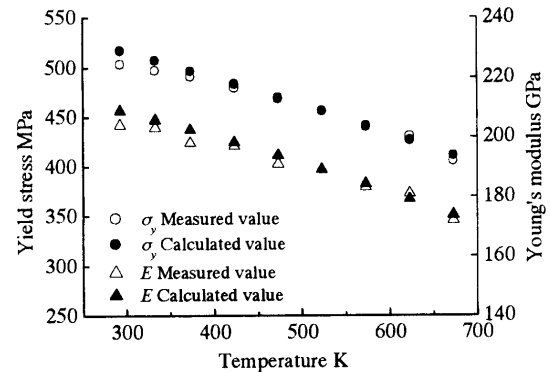


Fig.6 Yield stress and Young's modulus on S45C

4. 結言

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1)高温下においてSS400 および S45C 炭素鋼を試験片とした静的圧縮試験を行い、種々の温度下におけるこれらの材料の静的応力-塑性ひずみ関係を得るとともに、その変形挙動に靭脆性の影響が現れることを確認した。
- (2)炭素鋼に生じる応力と温度との関係を、靭脆性の影響を含まない項および含む項とに分類し、それぞれの変化を考察することで、靭脆性域を含めた広い温度下に適用可能な静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を提案した。
- (3)提案した式に含まれる未知の材料定数を、非線形最小二乗法で測定結果を近似することにより求め、同構成式が靭脆性域を含む広い温度下で、SS400 および S45C 炭素鋼の静的応力-塑性ひずみ関係をよく表すことを確認した。

参考文献

- (1)谷村真治・三村耕司・煤田努, 広ひずみ速度域を対象とした各種材料グループに適用し得る実用構成式, 材料, 50-3(2001), 210-216
- (2)立矢宏・放生明廣・茶谷明義, 温度およびひずみ速度依存性を考慮した炭素鋼の動的構成式の決定, 日本機械学会論文集A編, 69-681(2003), 916-923
- (3)例えば大森正信・吉永芳豊・武井英雄, 軟鋼の引張性質におよぼす変形速度の影響, 日本金属学会誌, 29-11(1965), 1087-1093
- (4)大森正信, 材料性質と環境(その2), 日本機械学会誌, 76-653(1973), 555-566
- (5)宮川大海・坂木庸晃, 金属学概論, 朝倉書店,(1998), 136-137