

## 421 ひずみ速度および温度依存性を有する動的構成式の決定

## Determination of a dynamic constitutive equation with temperature and strain-rate dependence

正 立矢 宏 (金沢大)

○ 駒形 雄一 (金沢大)

正 茶谷 明義 (金沢大)

正 放生 明廣 (金沢大)

## 1. 緒言

材料の応力-ひずみ関係は、ひずみ速度や温度に依存することが知られている。そのため、機械や構造物の衝撃破壊に対する解析や塑性加工時における加工パラメータの決定の際には、ひずみ速度や温度の影響を考慮する必要がある、これまでもひずみ速度および温度依存性を考慮した構成式が幾つか提案されている。しかし、それらの多くは式形が複雑であり、実用的なものは少ない。そこで、本研究では転位論より、ひずみ速度および温度依存性を有する簡便な動的構成式を提案するとともに、SS400鋼を供試材として、以前に提案した手法により式の中に含まれる材料定数の決定を行った。

## 2. 動的構成式と材料定数の決定法

**2.1 動的構成式** 本論文で対象とするひずみ速度および温度下では、塑性変形の数と温度に対する依存性が熱活性化過程で進行する転位の運動で説明されると考えられる<sup>(1)</sup>。転位論によれば、熱活性化過程がアレニウスの式に従うとし、塑性せん断ひずみ速度は次式のように表される。

$$\dot{\gamma}^p \propto Nbv \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \quad (1)$$

$\dot{\gamma}^p$ ,  $N$ ,  $b$ ,  $v$ ,  $U$ ,  $k$  および  $T$  はそれぞれ塑性せん断ひずみ速度、可動転位密度、バーガースペクトルの大きさ、熱エネルギーによる転位の振動数、活性化エネルギー、ボルツマン定数および温度を表す。また、以前に谷村らは塑性変形の進行の大部分は、転位が熱活性化過程によりパイエルス・ポテンシャルを越えることにより生じると考えて次式に示す動的構成式を提案している<sup>(2)</sup>。

$$\dot{\epsilon}^p = bv(N_0 + C\dot{\epsilon}^p) \exp\left\{-\frac{D}{T(\sigma_0 + \sigma_y)}\right\} \quad (2)$$

ただし、 $N_0$ ,  $C$  および  $D$  は定数であり、 $\sigma_0$  および  $\sigma_y$  は過応力および降伏応力を示す。なお、上式は塑性ひずみに対する可動転位密度  $N$  の増加を考慮しているが、本研究の範囲では、可動転位密度の増加による影響を示す定数  $C$  の影響が無視できることを確認した。したがって、ひずみ速度および温度依存性を考慮した動的構成式として、 $A$  を定数とし、次式を提案する。なお、 $\dot{\epsilon}_0$  は単位ひずみ速度を表す。

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_0 \exp\left\{A - \frac{D}{T(\sigma_0 + \sigma_y)}\right\} \quad (3)$$

**2.2 材料定数の推定方法** 提案した動的構成式内の未知の材料定数  $A$ ,  $D$  の推定は以下のように行う。まず、ホプキンソン棒形一軸圧縮試験を行い、入力棒に作用するひずみ速度の変化を測定する。次に、測定した衝撃端速度波形を境界

条件として、式(3)を用いた弾塑性波伝ば解析を行う。さらに、解析より得られるひずみ速度変化の計算値が測定値に一致するようにガウス・ニュートン法を用いた非線形最小二乗法<sup>(3)</sup>で動的構成式内の材料定数を決定する。

## 3. 試験方法および結果

**3.1 高温下圧縮試験方法** 動的構成式の決定に必要な測定値を得る衝撃試験には、前述のようにホプキンソン棒形一軸圧縮試験機を用い、常温から 673K までの様々な温度における、最大塑性ひずみ速度が 500, 1000(1/s) 近傍の動的応力-ひずみ関係を測定した。衝撃試験における試験片の加熱には小型炉を用い、予め加熱した試験片を試験時に炉から試験機に迅速に移動させることにより試験を行った。また、静的試験には万能試験機を用い、常温から 523K までの温度域において試験を行った。応力は試験機に付属のロードセルより、またひずみは非接触変位測定器を用いて測定した。なお、静的圧縮負荷時は市販のニクロム線を試験片に直接巻きつけて加熱した。

**3.2 試験結果** 試験の結果得られた代表的な例としてひずみが 3% 時における衝撃および静的応力と温度の関係を図 1 に示す。同図よりひずみ速度の上昇に伴い、応力値も増加し、ひずみ速度依存性が確認される。また、グラフが全体的に右下がりであることから温度依存性も確認される。しかし、衝撃試験では約 673K 付近、静的試験では約 523K 付近以降において温度に対する応力値の変化が緩やかになる、青熱脆性の影響が見受けられる。現段階では提案する動的構成式によって青熱脆性域内の材料の変形挙動を表すことは困難であるため、本研究では対象とする構成式の適用温度範囲を 293K から 473K までとした。

## 4. 構成式の決定

**4.1 静的特性の数式化** 提案した動的構成式を用いるためには、対象とする温度下での材料の静的な応力-ひずみ関係を必要とする。しかし、各温度下において静的試験を行い、応力-ひずみ関係をあらかじめ明らかにしておくことは難しい。そこで、任意の温度下における材料の応力-ひずみ関係に関しても数式化を行う。一般に、金属材料の真応力-真ひずみ関係は、次式で近似できることが知られている。

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4)$$

なお、本研究で対象とするひずみ域は数%程度と小さく、また塑性域のみを考慮することから、式(4)を基本とし公称応力および公称ひずみの関係を次式で表す。

$$\sigma_s = K(\epsilon^p + \alpha)^n \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon^p$  は塑性ひずみ、 $K$ ,  $\alpha$ ,  $n$  は温度に依存する材料定数である。検討の結果、293K から 473K までの温度範囲、ひ

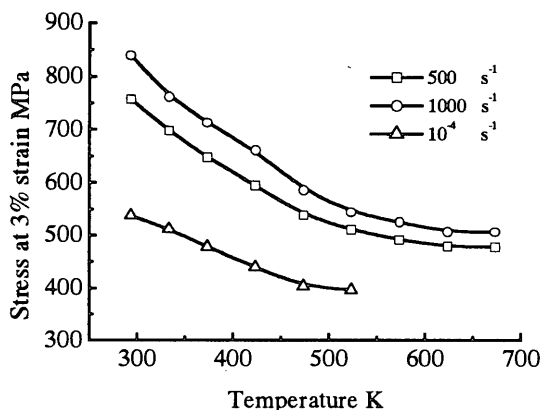


Fig.1 Relationship between the stress and temperature.

Table1 Material constants of eq.(6)

$K_0$ (MPa)	$1.02 \times 10^3$
$K_1$ (MPa/K)	-0.502
$\alpha_0$	$2.32 \times 10^{-3}$
$\alpha_1$	$-2.22 \times 10^{-6}$
$n_0$	$5.80 \times 10^{-2}$
$n_1$	$2.69 \times 10^{-4}$

Table2 Material constants of eq.(3)

$A$	$D$ (MPa·K)
12.38	$11.41 \times 10^5$

ずみ速度一定の下では、式(4)の各材料定数は温度とほぼ線形関係にあることを確認したので、各定数を次式のとおり、温度  $T$  に関する一次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} K &= K_0 + K_1 T \\ \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 T \\ n &= n_0 + n_1 T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上式に含まれる未知のパラメータは、293Kと473Kの静的試験結果より、最小二乗法を用いて推定した。推定の結果、得られた材料定数を表1に示す。なお、詳細は略すが、2つの温度下での測定値より決定されたパラメータにより、他の温度下における材料定数の値が、十分近似できることを確認している。

**4.2 動的構成式の決定** 提案した動的構成式に含まれる未知の材料定数  $A$ ,  $D$  を、衝撃試験結果および式(5)による静的応力ひずみ関係より、非線形最小二乗法で推定した。推定には静的特性の数式化と同じく293Kと473Kでの測定値を用いた。得られた材料定数の値を表2に示す。推定は数回行ったが、いずれも表2に示すような値に収束した。

**4.3 動的構成式の妥当性の検討** 提案する動的構成式の妥当性を検討するため、決定された材料定数を用いて弾塑性波伝ば解析を行い、応力-ひずみ関係および応力-塑性ひずみ速度関係の計算値を求め、実際の測定値と比較した。図2に応力-ひずみ関係、図3に応力-塑性ひずみ速度関係の計算値と測定値をそれぞれ示す。両図より計算値は測定値と良く一致していることが確認される。以上のことから、幅広いひ

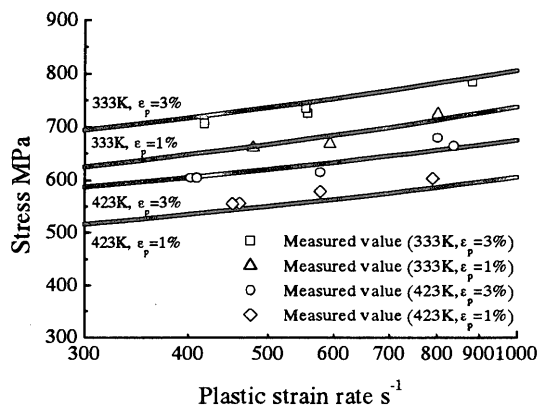


Fig.2 Relationship between stress and plastic strain-rate

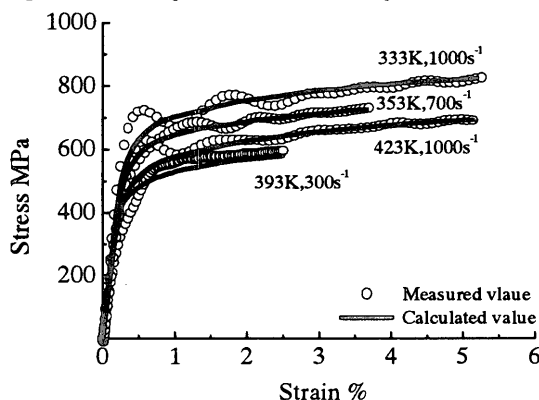


Fig.3 Stress-strain curve

ずみ速度域および293Kから473Kまでの温度域において、本研究で提案する動的構成式は試験片の変形挙動をほぼ正確に表現可能であり、同式および決定した材料定数の妥当性が確認できる。

5. 結言

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1)温度およびひずみ速度依存性を共に表現し得る簡潔な動的構成式を転位論に基づき提案した。
- (2)提案する動的構成式中の未知の材料定数を、ひずみ速度波形の測定値と、構成式を用いた弾塑性波伝ば解析の計算結果が一致するように非線形最小二乗法で決定した。その結果、近似対象となる測定結果を良好に近似可能な材料定数が決定された。
- (3)決定された材料定数を用いて種々の温度およびひずみ速度下で、弾塑性波伝ば解析を行い、得られた計算値と測定値を比較したところ、いずれの条件下でも両者はよく一致し、提案した動的構成式が広いひずみ速度および温度下で、適用可能であることが確認された。

参考文献

(1)林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, 日刊工業新聞社,(1988), 64-70  
 (2)S.TANIMURA,Int.J.Engng Sci., 17-9(1979), 997-1004  
 (3)立矢宏・放生明廣・安高聡・茶谷明義, 非線形最小二乗法による炭素鋼の動的構成式推定, 機論, 59-563, A(1993), 1720-1725