

二段階衝撃実験結果による動的構成式の検討 (アルミニウム材の場合)

An investigation of the dynamic constitutive equation by
the experimental results under impact loading
(Case of Aluminum)

○申 建汎 (金沢大・院) 放生 明廣 (金沢大・工)
茶谷 明義 (金沢大・工) 立矢 宏 (金沢大・工)

Jianxun SHEN, Kanazawa University, 40-20, Kodatuno 2-chome, Kanazawa
Akihiro HOJO, Akiyoshi CHATANI, Hiroshi TACHIYA
FAX: 076-234-4690 E-mail: shin@kyod.ms.t.kanazawa-u.ac.jp

Key Words: Dynamic constitutive equation, Impact strength, Combined stress, High strain rates

1. はじめに

本研究では、自作した二段衝撃試験機を用いてアルミニウム試験片についてねじり-逆ねじり実験及びねじりと引張りの組合せ衝撃実験を行い、応力-ひずみ関係を測定し、その結果をひずみ速度依存性を考慮した構成式による計算結果と比較し、本構成式の妥当性を検討した。なお、本構成式はテンソルのなす角度を導入することにより、負荷、除荷あるいは弾性変形、塑性変形等を区別することなく統一的に表すとともに、加工硬化やバウジング効果等種々の影響を表すことを目指したものである。

2. 構成式について

その詳細は文献(1)に譲るが、以下の式から構成される。

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \dot{\epsilon}_{ij}^e + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} \dot{\epsilon}_{kk}^e \right\}, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{g(\bar{O})}{\bar{O}} O_{ij}, \quad O_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \quad (2)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3}, \quad \bar{O} = \sqrt{\frac{3}{2} O_{ij} O_{ij}}, \quad \bar{\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2} \alpha_{ij} \alpha_{ij}} \quad (3)$$

$$g(x) = \exp(C_1 + x/C_2) \quad (4)$$

$$\alpha_{ij} = K \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (5)$$

$$K = K_{sat}(0)\beta(\xi) + K_{sat}(\bar{\alpha}_{max})(1 - \beta(\xi)), \quad 0 \leq \beta(\xi) \leq 1 \quad (6)$$

$$\xi = \frac{BC}{CC'} = \frac{\sqrt{1-s^2 + s^2 \cos^2 \theta} - s \cos \theta}{2\sqrt{1-s^2 + s^2 \cos^2 \theta}} \quad (7)$$

$$\cos \theta = \frac{O_{ij} \alpha_{ij}}{\sqrt{O_{ij} O_{ij}} \sqrt{\alpha_{ij} \alpha_{ij}}}, \quad s = \bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{max} \quad (8)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 ϵ_{ij} は全ひずみテンソル、 ϵ_{ij}^e および ϵ_{ij}^p はそれぞれ弾性及び塑性ひずみテンソルであり、 (\cdot) は時間による微分を表す。 s_{ij} は偏差応力テンソル、 α_{ij} は移動硬化を表す内部状態変数テンソル、 O_{ij} は過応力テンソルであり、 $\bar{\alpha}$ 及び \bar{O} はそれぞれミーゼスの条件による相当内部状態変数及び相当過応力である。 $\bar{\alpha}_{max}$ は $\bar{\alpha}$ が過去に取った最大値である。関数 $g(\cdot)$ は塑性ひずみ速度依存性を表す関数であり、一軸の衝撃試験から決定できる。本研究では銅材やアルミニウムに適用される式(4)の指数則を用いる。また、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。式(5)中の比例係数 K を決定する式(6)の考え方は以下のものである。

図1は一般的な負荷の状態を模式的に表したものである。過去に $\bar{\alpha}_{max}$ まで負荷された後、現在の負荷点B点からC点へ向って負荷される時、 K は $K_{sat}(0)$ と $K_{sat}(\bar{\alpha}_{max})$ の間の値をとり、 $\xi = BC/CC'$ の関数 $\beta(\xi)$ を用いて表せるとしたもので

ある。なお、関数 $K_{sat}(\cdot)$ は単純な一軸負荷曲線から求まる。

式(4)中の C_1, C_2 は材料定数であり、次節で述べる試験機を用いてひずみ速度急変試験を行った結果 $C_2 = 1.3 \text{MPa}$ であった。他のパラメータ及び関数型は、計算値が静的なねじり-逆ねじり実験と一致するように、

$$K_{sat}(x) = E(k_1 + k_2 \cdot \exp(x/k_3)), \quad x: \text{MPa} \quad (9)$$

$$\beta(x) = \beta_1 x^{\beta_2}$$

ただし、

$$k_1 = 0.02, k_2 = 0.3, k_3 = 5 \text{MPa}, \beta_1 = 1, \beta_2 = 1.5$$

$$E = 70 \text{GPa}, \nu = 0.33, C_1 = -83.5, C_2 = 1.3 \text{MPa}$$

としたものである。なお、静的なねじり-逆ねじりに対して計算値と実験値との比較結果を図2に示す。同図を見れば、逆負荷時の再降伏付近で応力の計算結果は実験よりやや大きくなるが、この点を除けば両者がほぼ一致している。

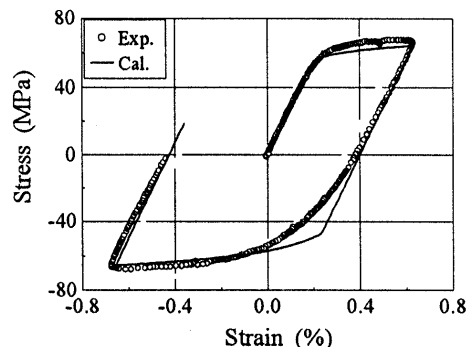


Fig.2. Comparison between experimental value and calculated one.

3. 実験装置と実験方法

二段衝撃試験機の概要を試験片とともに図3に示す。同図(a)は試験機の概略であり、トーションバーを利用したもので、入力棒と出力棒の間に試験片を取付ける。入力棒及び出力棒は、市販の軸受用丸棒から切り取ったもので、長さはそれぞれ1200mmと1300mmで、直径は共に15mmである。同図に示すように入力棒のA点とB点をそれぞれクランプし、左端C点に設置された組合せ負荷装置により、AB間およびBC間にそれぞれ大きさ及び向き異なる組合

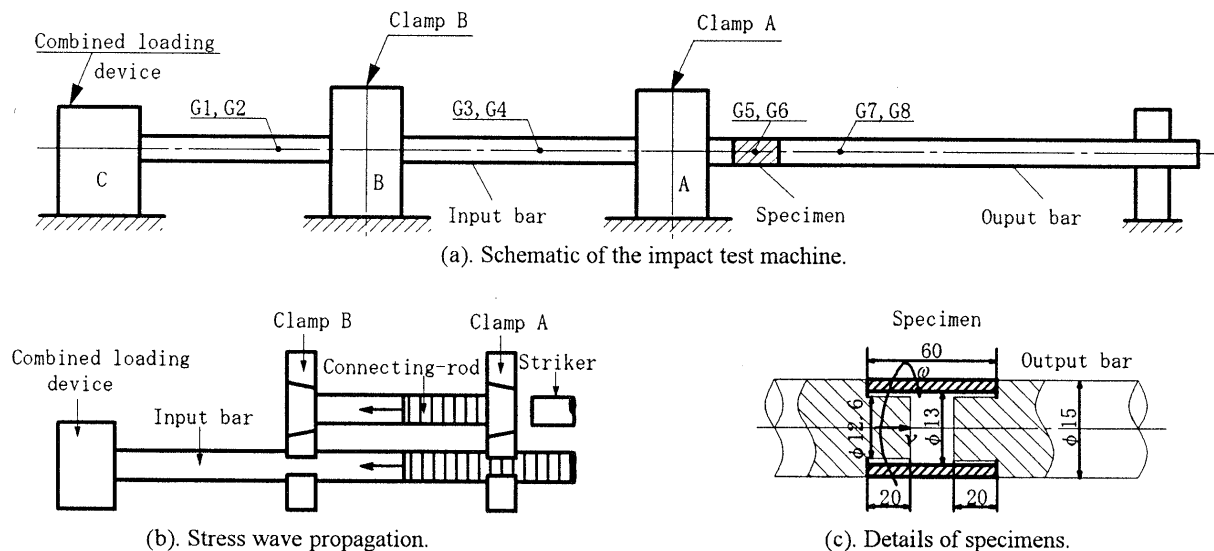


Fig.3. The impact test machine and the specimens.

せ静荷重を蓄える。その後2つのクランプをA, Bの順に解放することによって応力波を発生させ、試験片に二段の組合せ負荷を加える。試験片に生ずる軸ひずみ ϵ 及びせん断ひずみ γ はそれぞれ試験片中央部に貼付したゲージG5,G6で測定し、また試験片を透過した軸方向荷重及びせん断荷重はそれぞれ出力棒に貼付したゲージG7,G8で測定しこれによる応力を試験片の応力と見なした。

図3(c)は試験片および接着部の寸法を示したもので、試験片は直径15mm肉厚1mmで市販のアルミニウム円筒から切り取った長さ60mmのものを用いた。実験では試験片直前入力棒側の軸方向変位及び回転角をそれぞれ2台の光学式変位計(ZimmerOHG model 100D)により測定し、それを時間に対して微分したもの(v, ω)を境界条件として与え差分法による計算を行い、実験に測定した試験片中央部でのひずみ、及び試験片出力端での応力と比較した。なお、試験片と入出力棒の連結には接着剤を用いることとした。

4. 実験値と計算値の比較

今回は、まず入力棒にクランプAを締付ねじり荷重を加えた後、クランプBを締付、更にBC間に引張り荷重を加えて解放したときの応力およびひずみの測定結果と計算結果を比較した。図4に境界条件として与えた回転角速度 ω 及び軸方向変位速度 v を示す。同図によれば、クランプAの解放時に若干の軸方向変位速度が発生している。これは、クランプBの締付によって、AB間にも微小な引張り荷重が加わったためと思われる。

図5(a),(b)はそれぞれねじり方向及び軸方向の比較結果である。同図中、白丸および黒丸はそれぞれひずみ及び応力の実験値であり、細線および実線はそれらに対応する計算値である。同図を見れば、塑性変形の初期においてせん断ひずみの計算値がやや小さい(図(a)150 μ s~280 μ sの間)が、計算値と実験値はほぼ一致している。

なお、衝撃ねじり-逆ねじり負荷においても、計算値と実験値との比較を行ったが、紙面の都合で省略する。

5. 結言

アルミ材について、二段衝撃試験機により得られたねじり-逆ねじり、ねじり-引張りの実験値と本構成式による計算値と比較した。いずれも両者がほぼ一致しており、本構成式は高ひずみ速度域でも適用できることを示した。

文献:

- (1). HOJO A., et al., APCFS&ATEM'01, SENDAI, (2001), p461.

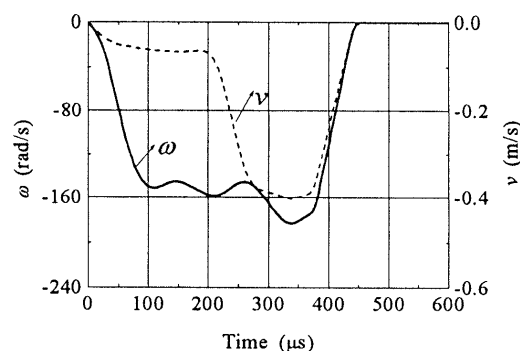
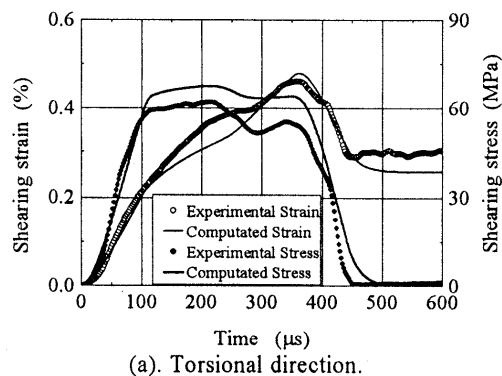
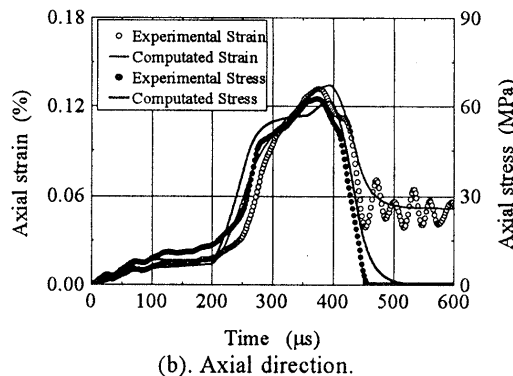


Fig.4. Applied axial and angular velocities.



(a). Torsional direction.



(b). Axial direction.

Fig.5. Comparison of the experimental value with calculated one under combined loadings.