

氏 名	申 建 汎
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第 568 号
学 位 授 与 の 日 付	2003 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	課程博士 (学位規則第 4 条第 1 項)
学 位 授 与 の 題 目	様々な負荷に適用できる動的構成式に関する研究
論文審査委員 (主査)	放生 明廣 (工学部・教授)
論文審査委員 (副査)	茶谷 明義 (工学部・教授) 北川 正義 (工学部・教授)
	喜成 年泰 (工学部・助教授) 立矢 宏 (研究科・助教授)

学 位 論 文 要 旨

In this paper, a dynamic constitutive equation that is applicable for various impact and static loadings was investigated. By introducing the angle between the inner-state tensor and its increment tensor, it can describe the behavior of materials, without distinction between loading and unloading, and elastic and plastic state.

Cyclic loading experiments with eight typical strain parts were conducted using SUS304 stainless steel. The present constitutive equation was applied to the measured stress-strain relations. As a result, it agreed well with the experimental values for obtaining stable cyclic stress-strain relationship under proportional and nonproportional loadings.

Also, the numerical calculation was done for Aluminum using finite difference method under the boundary condition of measured axial and angular velocities. The calculated stress and strain agreed well with the experimental ones under torsional and inverse torsional loadings about the strain rate of 40 1/sec. The comparison of calculated result and experimental one for the combined loadings of impact tension and torsion was also performed, and the validity of this constitutive equation was verified. Moreover, the appearing yield points were discussed based on some simulations under two stages combined loadings of tension and torsion.

Key Words : Dynamic Constitutive Equation, Impact Strength, Combined Stress, High Strain Rates, Finite Difference Method, Bauschinger Effect

第 1 章 結 論

一般に金属材料の応力-ひずみ曲線にはひずみ速度依存性、加工硬化やバウジंगा効果、繰返し負荷による硬化や軟化現象等さまざまな現象が現れる。近年、低ひずみ速度域については、繰返し負荷、四角形経路など複雑な非比例負荷、ラチェット現象など様々なひずみ経路に適用できる構成式が提案されているが、さまざまな現象を考慮すればするほど構成式の式形は複雑になり、パラメータの数も多くなり実用性の観点からは難点が生じるようである。また、ひずみ速度が

10~100 1/sec 以上の高ひずみ速度に対してはこのような構成式を適用し、その妥当性を検討した例はあまりない。これは高ひずみ速度下での組合せ衝撃試験が極めて困難なためである。従来の試験機は単純な比例負荷に対するものがほとんどであり、バウジंगा効果が表われる逆負荷など複雑な現象は取扱えない。

本研究では、二段衝撃試験機を試作し、高ひずみ速度下での負荷-逆負荷実験、非比例組合せ負荷実験を行い、さまざまな負荷経路に適用できる動的構成式の妥当性を検証することを目的とする。なお、本構成式はテンソルがなす角度を導入したのものとして、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。

第2章 様々な負荷に適用できる構成式

これまでに提案された様々なひずみ経路に適用される構成式を考察し、その移動硬化、降伏曲面および非比例性などを表している方について検討した。また、本論文に用いる構成式について述べる。

本構成式の詳細は文献に譲るが、以下の式から構成される。

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

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

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

$$O_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}, s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3}, \bar{O} = \sqrt{\frac{3}{2} O_{ij} O_{ij}} \quad (4)$$

$$g(x) = \exp(C_1 + x/C_2) \quad (5)$$

$$\bar{\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2} \alpha_{ij} \alpha_{ij}} \quad (6)$$

$$\dot{\alpha}_{ij} = K \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (7)$$

$$K = K_0 \beta(\xi) + K_1 (1 - \beta(\xi)), \quad 0 \leq \beta(\xi) \leq 1 \quad (8)$$

$$\xi = \frac{BC}{CC'} = \frac{\sqrt{1-s^2 + s^2 \cos^2 \theta} - s \cos \theta}{2\sqrt{1-s^2 + s^2 \cos^2 \theta}} \quad (9)$$

$$\cos \theta = \frac{O_{ij} \alpha_{ij}}{\sqrt{O_{ij} O_{ij}} \sqrt{\alpha_{ij} \alpha_{ij}}} \quad (10)$$

$$s = \bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{\max}, K_0 = K_{\text{sat}}(0), K_1 = K_{\text{sat}}(\bar{\alpha}_{\max}) \quad (11)$$

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 はそれぞれ弾性およ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(5)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。

本構成式は式(7)に示すように、内部状態変数 α_{ij} の増分は塑性ひずみ ϵ_{ij}^p の増分に比例し、その比例係数 K をいろいろ変化させることにより様々な現象を表すようにしたものであり、 K を決定する式(8)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 $K_0 = K_{\text{sat}}(0)$ と $K_1 = K_{\text{sat}}(\bar{\alpha}_{\max})$ 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 $K_{\text{sat}}(\bar{\alpha})$ は単純な一軸負荷曲線から求まる。

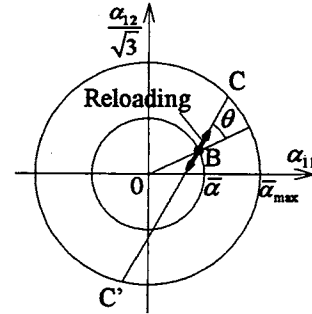


Fig. 1. The loading path.

式(5)中の C_1, C_2 は材料定数であり一軸衝撃試験から決定でき、それぞれ降伏応力の値及びひずみ速度依存性の大きさに影響を与えたと考えられる。

第3章 静的負荷実験結果との比較

本章では、ひずみ速度が約 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 1/sec の範囲で行われた引張りおよびねじりの組合せ実験データと、本構成式による計算値との比較を行った。

実験装置は島津オートグラフ (AG-100kND) に自作のねじり負荷装置を取付けることによって、試験片に引張圧縮負荷とねじり負荷を同時に与えることを可能としたものである。引張圧縮負荷はオートグラフのクロスベットの一定速度で上下移動させることにより与え、ねじり負荷はパーソナルコンピュータによりステッピングモータの回転速度を制御して与える。試験片材料は SUS304 ステンレス鋼で寸法と形状は図2に示す。

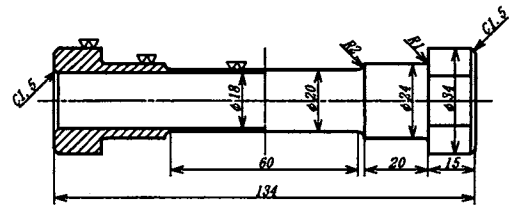


Fig. 2. Shape and dimensions of the specimen.

従来から非比例負荷では繰返し回数に対する応力の飽和は遅くなり、加工硬化も大きいと知られている。一方、本構成式によれば比例負荷時では構成式中の θ は 0° または 180° に限られるのに対して、非比例負荷では、 θ はそれ以外の値 90° に近い値もとりうる。そこで、加工硬化率は θ の影響を受けるものと考え、次の G_1 の発展式を用いた。

$$\dot{C}_1 = \phi_1 \sin \theta \left\{ 1 + \log^{\phi_2} \left(1 + \phi_2 \bar{\epsilon}^{\phi_3} \right) \right\}^{-1} \cdot \bar{\epsilon}^{\phi_3} \quad (12)$$

ここで、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 は材料定数であり、 $\bar{\epsilon}^{\phi_3}$ は相当塑性ひずみである。上述の考えを用いた結果、円形、多角形、階段と十字などさまざまなひずみ経路に対する挙動を统一的に表現することに可能になった。

なお、計算では実験時の引張・圧縮ひずみ速度およびねじりによるせん断ひずみ速度を与えて、応力成分や塑性ひずみ速度成分を求めた。そして、それらから応力-ひずみ曲線および応力経路などを求め、実験値と比較した。

その結果としては、比例負荷の場合はもちろん、非比例負荷においても本構成式による計算値が実験値とよく一致しており、本構成式の妥当性を明らかにした。

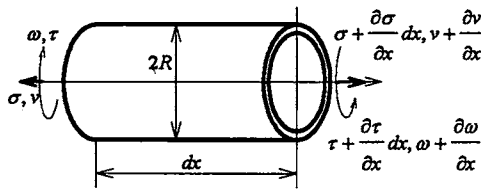


Fig. 3. Thin walled cylinder.

第4章 組合せ衝撃を受ける薄肉円筒の数値解析

図3に示すような、衝撃引張り及びねじりを受ける薄肉円筒を考える。このような問題の基本式は次のように表される。

引張りに対して

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t}, \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \dot{\epsilon}^p \quad (13)$$

ねじりに対して

$$\rho R \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x}, \quad R \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \gamma}{\partial t}, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{1}{G} \frac{\partial \tau}{\partial t} + \dot{\gamma}^p \quad (14)$$

となる。ここで、 v, σ 及び ϵ はそれぞれ軸方向の速度、応力及びひずみで、 ω, τ 及び γ は角速度、せん断応力及びせん断ひずみである。 ρ, E, G 及び R はそれぞれ密度、ヤング率、横断面係数及び半径である。なお、式(13)と(14)中の三つの式はそれぞれ運動方程式、適合条件式および構成式である。

連立方程式(13)と(14)は準線形双曲形一階偏微分方程式系であり、特性曲線法を用いて解くことができる。

すなわち、特性曲線は

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \pm c_0, & c_0 &= \sqrt{E/\rho} \\ \frac{dx}{dt} &= \pm c_1, & c_1 &= \sqrt{G/\rho} \\ \frac{dx}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

となり、連立方程式はこれらの特性曲線に沿って次の全微分形に直すことができる。

$$\begin{aligned} d\sigma \mp \rho c_0 dv &= -E \dot{\epsilon}^p dt, & dx &= \pm c_0 dt \\ d\sigma - E d\epsilon &= -E \dot{\epsilon}^p dt, & dx &= 0 \\ d\tau \mp \rho c_1 R d\omega &= -G \dot{\gamma}^p dt, & dx &= \pm c_1 dt \\ d\tau - G d\gamma &= -G \dot{\gamma}^p dt, & dx &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

初期条件及び境界条件を与えれば、この特性曲線に沿って差分をとることにより、各変数の値を求めることができる。

本研究では、本構成式と解析方法を用い、次章に述べる衝撃試験機の実験結果より得られる軸方向速度および角速度を境界条件として与え、試験片のひずみおよび応力を計算し、実験結果と比較し本構成式の妥当性を検討する。

第5章 二段衝撃試験機の性能解析および実験例

衝撃試験機の概要を試験片とともに図5に示す。同図(a)は二段階衝撃試験機の概略であり、トーションバ

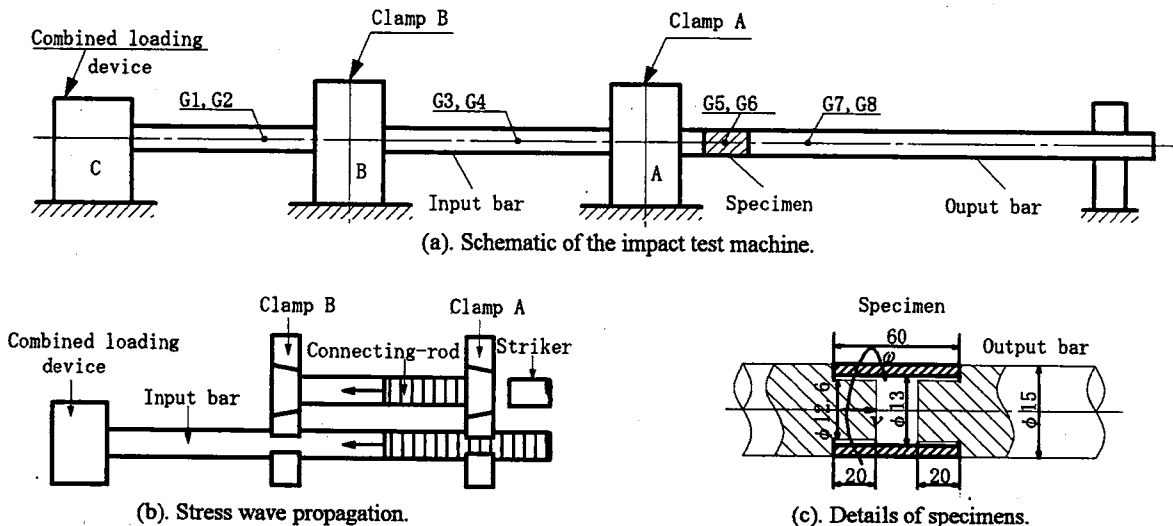


Fig. 5. The impact test machine and the specimens.

一を利用したもので、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試験片側 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および向きの異なる組合せ静荷重を蓄える。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、試験片に二段階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。

本試験機では、2 つのクランプ A および B を設け、それぞれのくさび片を連結棒で連結することによってそれらをほぼ同時に解放する。図 5(b)はこのときの入力棒および連結棒中を伝ばする応力波の様子を示すものである。

図 5(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 台のツインマーにより測定し、それを時間に対して微分したものを境界条件として計算を行い、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。また、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。接着剤は熱硬化性接着剤、Three Bond 2082C であり、80℃で 1 時間保持し硬化させた。

本章では、本試験機を用いていくつかの実験を行い、性能を確かめ実験例などを示した。

第 6 章 本試験機による実験結果と本構成式による計算値の比較検討

本構成式中の関数型及びパラメータについては、物理的な根拠はあまりないが、計算値が静的なねじり-逆ねじり実験と一致するように、

$$K_{rot}(x) = E(k_1 + k_2 \cdot \exp(x/k_3)), \quad x: \text{MPa} \quad (17)$$

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

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-逆ねじりに対してこれらの定数や関数型を用いたときの計算値を実験値と比較した結果を図 6 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。

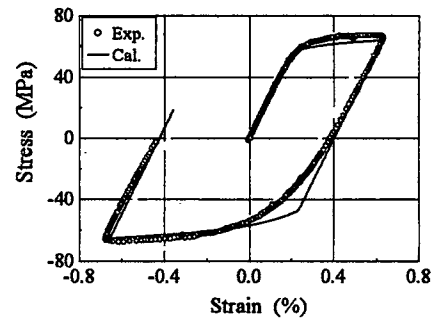


Fig.6. Comparison of the experimental stress-strain curve with the calculated one under static torsion and reversal torsion.

図 7 に本試験機を用いた衝撃ねじり-逆ねじりの実験結果と計算結果の比較を示す。同図中、白丸及び実線はそれぞれ実験及び計算に得られた応力-ひずみ関係であり、細線は静的なねじり-逆ねじり実験結果である。なお、計算は、これ以後のものも、試験片長さ 20mm とし両側の接着部はないものとして行い、応力は出力端での値、ひずみは中央での値である。同図をみれば、ひずみ速度依存性が見られ、アルミニウム試験片は動的負荷にも静的な試験と同様にバウジング効果が見られる。また、本構成式による計算値は図 6 の静的な場合と同様に逆負荷時の遷移を除けば実験値とほぼ一致しており、本構成式は高ひずみ速度にも適用できると思われる。なお、図 8 に境界条件として与えた回転角速度と時間の関係を示す。

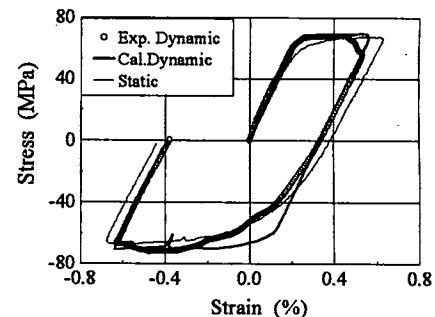


Fig.7. Comparison of the experimental value with calculated one under impact torsion and reversal torsion.

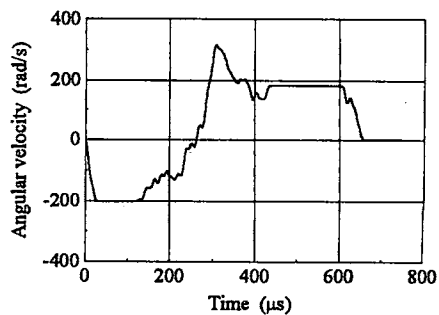


Fig.8. The relation between angular velocity and time.

本章では、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。結果としては、計算値と実験値はほぼ一致しており、本構成式及び用いた材料定数は妥当であると思われる。

また、引張り-ねじりの組合せ衝撃負荷逆負荷を想定したシミュレーション計算を行い、見かけの降伏条件などについて検討を行った。その結果、負荷逆負荷時に降伏点はミーゼスの円の上にあるとともに、逆負

荷時はバウジנג効果により円の半径は小さくなることがわかった。

第7章 結論

本論文では、様々な負荷に適用できる動的構成式を確立するために、引張りとねじりの組合せ衝撃を受ける薄肉円筒の応力-ひずみ関係について計算を行い、二段衝撃試験機による実験結果と比較し、その妥当性を検討した。本章では得られた結果をまとめて記す。

学位論文審査結果の要旨

平成 15 年 1 月 21 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料に基づき検討した。平成 15 年 1 月 24 日の口頭発表後の第 2 回学位論文審査委員会において協議の結果、以下のように判定した。

衝撃強度に関連して、非比例負荷や繰返し負荷時の挙動を解析出来る動的構成式が望まれるが、実験が困難であるために、この種の構成式についての検討はほとんどなされていない。

本研究は、2 段組合せ負荷装置を考案しそれによる引張り-ねじりの衝撃組合せ試験装置を提案、従来ほとんど実験例の無い、衝撃負荷-逆負荷を含む非比例負荷実験を可能にしている。

また、テンソルの角度を導入したひずみ速度依存型の構成式を過去に行われた様々なひずみ経路に関する静的実験結果に適用し、同構成式が様々な現象の解析に使用できる事を示している。ついで、これを上記衝撃試験機で得られた負荷-逆負荷等の実験に適用、試験時の応力ひずみ挙動の解析値と実験値と比較し両者が良く一致する事を示し、同構成式が様々な衝撃負荷現象の解析にも有効である事を示した。

以上、本研究は非比例負荷実験が可能な組合せ衝撃試験機を開発し、従来極めて困難とされてきたこの種衝撃試験を可能とすると同時に、新しい構成式について動的組合せ実験との比較を行いこれが十分実用できる事を示したものであり、本論文は博士（工学）に値すると判定する。