

弾塑性波伝ば解析を利用した情報量規準に基づく動的構成式の決定*

立矢 宏^{*1}, 中井 智之^{*2}
放生 明廣^{*1}, 茶谷 明義^{*1}Determination of Dynamic Constitutive Equations Based on
an Information Criterion
by the Elasto-Plastic Waves Propagation AnalysisHiroshi TACHIYA^{*3}, Tomoyuki NAKAI,
Akihiro HOJO and Akiyoshi CHATANI^{*3} Kanazawa University, Dept. of Mechanical Systems Engineering,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667 Japan

Previously, we presented the determination method of a dynamic constitutive equation with strain-rate sensitivity from the results of an uniaxial longitudinal impact compression test. The proposed method could derive an appropriate strain-rate sensitive dynamic constitutive equation as a polynomial without consideration based on underlying material physics. However, the method needs a lot of test results over a wide strain-rate range. This paper presents the determination method of a dynamic constitutive equation from a few impact test results. The proposed method determines unknown coefficients involved in a polynomial that appears dynamic constitutive relations of a material by nonlinear least squares method. Furthermore, the proposed method determines the optimum degree of a polynomial constitutive equation by AIC (Akaike information criterion). This paper, further, presents the split Hopkinson pressure bar method using a stepped striker bar. The proposed method can obtain the relations between the dynamic stresses and strain-rates in a wide range from a single impact test.

Key Words: Dynamic Constitutive Equation, Strain-Rate Sensitivity, Impact, Information Criterion, AIC, Split Hopkinson Pressure Bar Method with a Stepped Striker Bar

1. 緒言

塑性加工時の加工パラメータの決定や衝撃荷重下における機械構造の変形を予測するために、材料の動的な変形挙動を表す、ひずみ速度依存性を有する動的構成式の確立が望まれる。そこで従来より、詳細な物理学の考察に基づき多数の構成式が提案されている⁽¹⁾。しかし、その式形は一般に複雑であり、また、式中の材料定数の決定も容易でない。

材料の変形挙動を表すことのみを目的とすれば、物理的考察を省き、基本的な材料試験の測定結果から、簡便な動的構成式が容易に得られる方が実用的である。そこで、著者らは先に一軸負荷衝撃圧縮試験の結果より情報量規準AIC⁽²⁾⁽³⁾を用いて複数の異なる動的構成式から最適な式を決定する方法を検討した⁽⁴⁾。その結果、AICを用いれば誤差の影響を考慮して、より真の値をよく表しうる簡便な構成式が容易に決定できることを確認した。しかし、同方法は、多数の測定結果を必要とし、また、得られた構成式による数値解と実際の現象との差が、構成式の決定に用いた測定結果の上限および下限付近で急激に増加するため、実際に構成式が適用可能な範囲は基となる測定範囲より狭くなるなどの問題点を有した。すなわち、同方法を用いて実用的な構成式

を得るためには、必要とするひずみ速度域よりさらに広い範囲において多数の衝撃試験結果を得る必要があった。

そこで、本論文では極少数の測定結果より、広いひずみ速度域で適用可能な動的構成式の形および式中の材料定数の決定を行う手法を検討する。すなわち、動的構成式中の未知の変数である材料定数を以前に提案した弾塑性波伝ば解析および非線形最小二乗法を利用する方法で決定し⁽⁵⁾、さらに、得られた複数の異なる構成式を情報量規準AICで比較する手法を検討する。また、広いひずみ速度域にわたる材料の変形挙動のデータが同時に測定可能な衝撃圧縮試験方法について提案する。本論文では以上の手法により単数の測定結果から精度のよい動的構成式が決定可能であることを示す。

2. 動的構成式の決定方法

2.1 AICを用いた構成式の決定法⁽⁴⁾の問題点 前報では動的構成式をMalvern形⁽⁶⁾として塑性ひずみ速度と過応力との関係を表す関数とし、取扱いが容易で様々な曲線を表しうる多項式形で表した。また、衝撃圧縮試験により過応力-塑性ひずみ速度関係を求め、同結果を、次数の異なる複数の構成式で直接最小二乗近似し、各式中のパラメータをそれぞれ求めた。さらに、得られた複数の構成式を比較して適切な式を決定した。構成式を比較するための評価量には情報量規準AIC

* 原稿受付 2000年10月18日。

^{*1} 正員、金沢大学工学部(〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)。^{*2} 学生員、金沢大学大学院。

E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

(Akaike Information Criterion)⁽²⁾⁽³⁾を用いた。

前報では、材料の過応力-塑性ひずみ速度関係が得られれば、以上の手法により、適切な動的構成式が決定可能であることを示した。しかし、過応力-塑性ひずみ速度関係を得るためには、衝撃圧縮試験で測定されたひずみの測定値に、多数のデータ処理を施す必要があり、測定値にばらつきが生じやすく、また、後述のように一度の試験で測定される弾塑性変形は狭い範囲に限られるため、構成式を決定するために十分な過応力-塑性ひずみ速度関係を得るには多数の試験を必要とした。また、過応力-塑性ひずみ速度関係を直接近似するため、測定結果におけるひずみ速度の上限および下限近傍において、それ以上および以下のひずみ速度域のデータ不足により近似精度が低下し、得られた構成式は、測定を行ったひずみ速度域より、狭い範囲に適用が限られるなどの問題点を有した。

2.2 弾塑性波伝ば解析による動的構成式の決定

本論文では、動的構成式の変数であるひずみ速度波形の測定値から、以下のように動的構成式を決定する。まず、図1に装置の概略を示す、ホプキンソン棒式の一軸負荷衝撃圧縮試験(HPB試験)を行い、入力棒に作用する衝撃端速度および試験片に生じるひずみ速度の変化を測定する。次に、動的構成式を仮定し、式中の未知の材料定数を決定する。すなわち、測定で得られた衝撃端速度を境界条件として、仮定した構成式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⁽⁷⁾で構成式中の材料定数を決定する。なお、弾塑性波伝ば解析の基礎式は一次元伝ば理論に基づく次式を用いる⁽⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + g(\sigma, \varepsilon_p, p_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

式中の x および t はそれぞれ、軸方向座標および時間を示す。 $v, \sigma, \varepsilon, \varepsilon_p, \rho$ および E はそれぞれ、変位速度、応力、全ひずみ、塑性ひずみ、密度および縦弾性係数を表す。ただし、応力およびひずみは圧縮を正とする。上式

の数値解は特性曲線法より容易に得られる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

著者らは以上の方法により、式形が明らかな動的構成式に含まれる未知の材料定数の値が決定可能であることを先に示した⁽⁵⁾。同手法は、衝撃圧縮試験において比較的容易に得られるひずみの時間変化から動的構成式を決定するため、データ処理による誤差の累積を抑え易く、また、式に含まれる未知の材料定数を非線形最小二乗法⁽⁷⁾で求めるため、非線形な動的構成式の決定も可能である。

なお、以前の報告ではひずみ波形を用いて動的構成式の決定を行ったが、本論文では上述のように、決定する動的構成式の直接の変数であり、さらに、HPB試験結果の測定値処理において数値積分を行わずに得られるひずみ速度波形を用いて構成式中の未知の材料定数を決定する。

動的構成式は前報⁽⁴⁾と同じく Malvern 形とし、塑性ひずみ速度を、塑性ひずみが ε_p である時の動的応力 $\sigma_d(\varepsilon_p)$ と静的応力 $\sigma_s(\varepsilon_p)$ の差である過応力 $\sigma_d(\varepsilon_p) - \sigma_s(\varepsilon_p)$ の関数として、次の多項式形で表す。

$$g(\sigma, \varepsilon_p, p_i) = \dot{\varepsilon}_0 \sum_{i=0}^m p_i \left(\frac{\sigma_d(\varepsilon_p) - \sigma_s(\varepsilon_p)}{\sigma_y} \right)^i \dots\dots\dots(2)$$

なお、 σ_y および m は、静的降伏応力および過応力に関する最高次数である。 p_i は測定結果より最小二乗法で決定する未知の材料定数である。なお、 $\dot{\varepsilon}_0$ を単位ひずみ速度 1 s^{-1} とし、各 p_i は無次元量とする。また、過応力が零の時、すなわち静的荷重下における塑性ひずみ速度を 10^{-4} s^{-1} とし、 p_0 はあらかじめ 10^{-4} とする。

本手法では、式(2)に示した構成式の次数 m を変化させ、決定すべきパラメータ p_i の数を変えて、複数の異なる動的構成式を決定する。一般に、測定値に基づき定式化される近似式は、式中のパラメータ数が増加するにつれ、測定値をより忠実に近似する。しかし、得られる式は、測定値に含まれる誤差までも同時に近似してしまう可能性があるため、適切な式形を決定するためには、測定値の誤差を考慮してパラメータ数を決定する必要がある。このような問題に対して、誤差の影響を考慮し、近似式の適切さを示す評価量として AIC が提案され、多数利用されている⁽¹⁰⁾。そこで、本論文でも上述のように情報量規準 AIC を用いて多項式

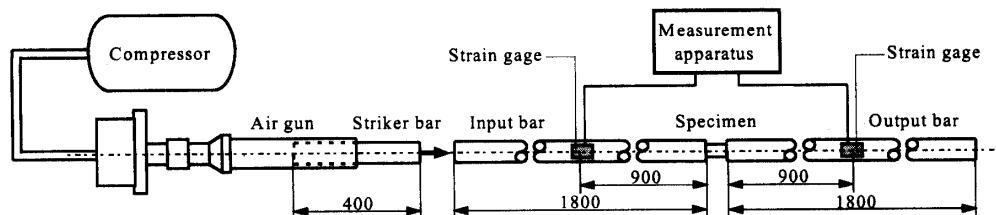


Fig.1 Experimental apparatus (unit: mm)

形である動的構成式の次数を決定する。

AICは次式で定義される⁽²⁾⁽³⁾モデル間の相対的な適切さを表す評価量で、その値が最小となるモデルが最も適切であることを示す。

$$AIC = -2 \times MLL + 2 \times N_p \dots \dots \dots (3)$$

MLLおよび N_p は、モデルの最大対数尤度およびパラメータ数である。測定結果に含まれる誤差が偶然誤差のみとすればAICは次式となる⁽¹¹⁾。

$$AIC = n \ln 2\pi\hat{\sigma}^2 + n + 2K \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 n はデータ数、 $\hat{\sigma}^2$ は近似式と測定結果の残差二乗和をデータ数で除した残差分散、 K はモデルの自由パラメータ数であり、式(2)に対する自由パラメータ数 K は次式となる。

$$K = m + 1 \dots \dots \dots (5)$$

実際に提案する手法によりひずみ速度波形の測定値を用いた動的構成式の決定を数値シミュレーションおよび実験で検討した結果⁽¹²⁾、適切な次数の動的構成式の決定が行えた。しかし、広いひずみ速度域にわたり適用可能な動的構成式を得るためには、ひずみ速度域の異なる複数の試験より得られる結果を用いる必要があることも確認された。

3. ひずみ速度波形測定法の検討

3.1 従来の手法による測定 動的構成式を決定する

ための、材料の弾塑性変形挙動は前述のように図1に示すホプキンソン棒式衝撃圧縮試験機を用いて測定する。同装置では、エアガンで打撃棒を加速発射し、入力棒を打撃して出力棒との間に挟まれた試験片の左端に衝撃負荷を加える。入力棒および出力棒にはひずみゲージを貼付し、ひずみ-時間関係を測定する。測定値より次式を用いて⁽⁹⁾試験片に生じる全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、ひずみ ϵ および応力 σ を算出する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{C_0}{l_s} (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) \\ \epsilon &= \frac{C_0}{l_s} \int (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) dt \\ \sigma &= \frac{AE}{2a} (\epsilon_I + \epsilon_R + \epsilon_T) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

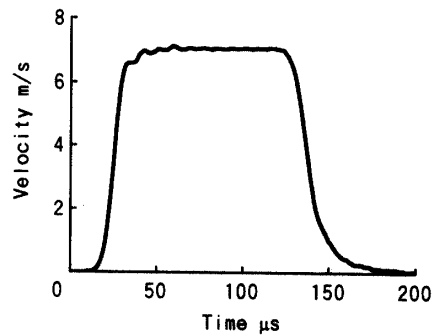
ここで、 C_0 および l_s は、入出力棒中の弾性波の伝ば速度および試験片の長さを示し、 A および a はそれぞれ入出力棒および試験片の断面積を示す。 ϵ_I および ϵ_R は入力棒に貼付されたひずみゲージで測定される入射および反射ひずみであり、 ϵ_T は出力棒に貼付されたひずみゲージで測定される透過ひずみである。本試験では、入力棒および出力棒とともに、長さ1800mm、直径20mm、打撃棒を長さ400mm、直径20mmの、いずれも断面形状が一定なS55C製丸棒とし、端面に焼き入れ処理を施した。

試験片には、表1に化学組成を示すSS400納入材を用い、長さ10mm、直径9mmの円柱状に機械加工し、さらに、両端が長手方向に対して直角となるように研削仕上げを施した。また、試験時には試験片両端に二硫化モリブデンを塗布して摩擦の軽減をはかった。

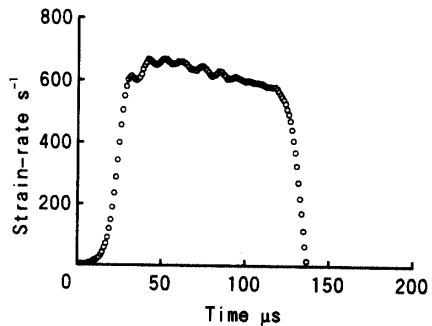
以上の条件下で測定された入力棒に作用する衝撃端速度波形および同速度波形に対して試験片に生じたひずみ速度波形の測定例を図2(a)および(b)に示す。なお、入力棒に作用する衝撃端速度波形は、入射ひずみ ϵ_I から一次元伝ば理論に基づき求めた。

Table 1 Chemical compositions of the specimen (mass %)

C	Si	Mn	P	S
0.1	0.2	0.5	0.022	0.028



(a) Impact velocity



(b) Strain-rate wave

Fig.2 Measured values by HPB method

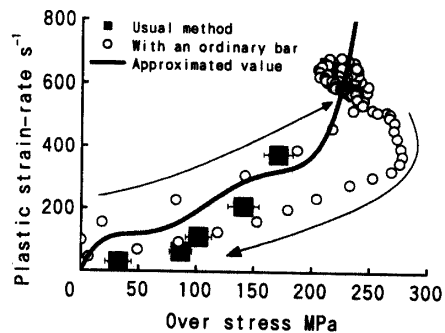


Fig.3 Relationship between the over stress and plastic strain-rate

打撃棒が断面形状一定の丸棒である場合、試験片には図2(a)に示すようなステップ状の衝撃端速度が作用する。その結果、試験片は図2(b)に示すように、ほぼ一定のひずみ速度で変形する。このときの過応力-塑性ひずみ速度関係を図3に○で示す。また、比較のため、衝撃端速度を変化させてHPB試験を複数行い得られた過応力-塑性ひずみ速度関係を同図中に■で示す。ただし、■の値は、各ひずみ速度域における複数の測定結果の平均値を、横棒はその標準偏差を示す。なお、塑性ひずみ速度は、動的応力の測定値を縦弾性係数で除し、さらに時間で数値微分した弾性ひずみ速度成分を式(6)より得られる全ひずみ速度から除くことにより求めた。

過応力に対して塑性ひずみ速度は、図3中の矢印が示す方向の経路をたどり、瞬間的に最大値近傍に達した後、ほぼ一定値となり、その後瞬間的に減少する。したがって、過応力-塑性ひずみ速度関係を示す測定値は試験時の最大塑性ひずみ速度の近傍に集中する。■で示した測定結果も、最大となる塑性ひずみ速度の大きさを種々に変化させた複数の試験より、最大値近傍の過応力-塑性ひずみ速度関係を求めて示した結果である。■で示した測定結果との比較からも、単数のHPB試験からは、塑性ひずみ速度の最大値近傍における過応力-塑性ひずみ速度関係を把握可能となるが、それ以下のひずみ速度域における関係の把握は困難であることが確認される。

以上のように、通常のHPB試験では、ひずみ速度が零から瞬間的に最大値近傍に達するため、広いひずみ速度域にわたる過応力および塑性ひずみ速度の十分な情報が含まれないことがわかる。

3.2 多段形打撃棒を用いた衝撃圧縮試験 一度の実験で同一の試験片より、広いひずみ速度域にわたる弾塑性変形挙動を表す測定値が得られれば、広いひずみ速度域に適用可能な動的構成式をより簡便に得ることが期待できる。前節で示したこれまでの試験方法では、衝撃端速度と同時に試験片中の塑性ひずみ速度も急激に上昇、減少するため、各ひずみ速度域における変形挙動を十分に測定できない。

低ひずみ速度域から、高ひずみ速度域までにわたる弾塑性変形挙動の十分な情報を含む測定結果を得るた

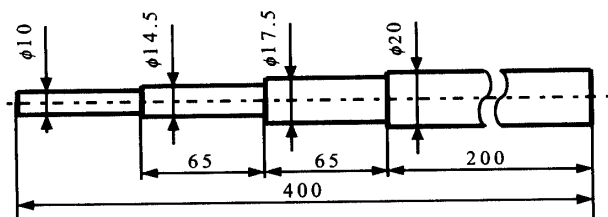
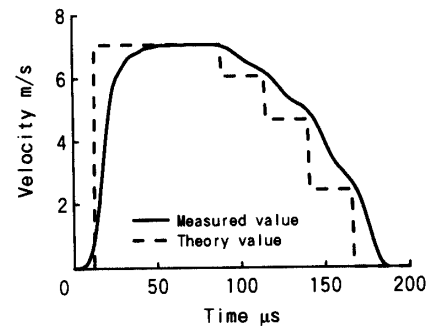


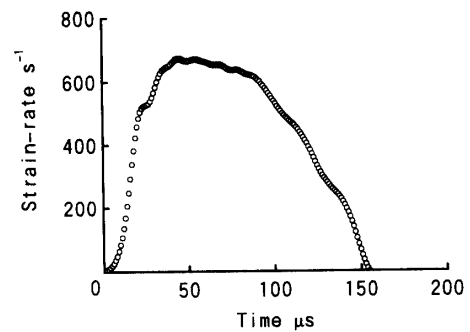
Fig.4 Stepped striker bar (unit: mm)

めには、時間に対する変化が緩やかな衝撃端速度を入力棒に与えればよいことが予想される。種々の方法を検討した結果、本論文では図4に示す多段形の丸棒を打撃棒としてHPB試験を行う。

図4に示す多段形の打撃棒を用い、断面積がより大きな方の端面で入力棒を打撃する場合、一次元伝ば理論によれば入力棒に作用する衝撃端速度波形は図5(a)に破線で示すように、最大値から零まで段階的に変化する。実際に3:1と同一な試験片および実験条件下で、図4に示す多段形打撃棒を用いHPB試験を行った結果、図5(a)に実線で示す衝撃端速度波形を得た。図5(a)より、実際の試験では波形の立ち上がりに時間を有するため、結果として、より緩やかな波形となっている。同試験に



(a) Impact velocity



(b) Strain-rate wave

Fig.5 Measured values with stepped bar

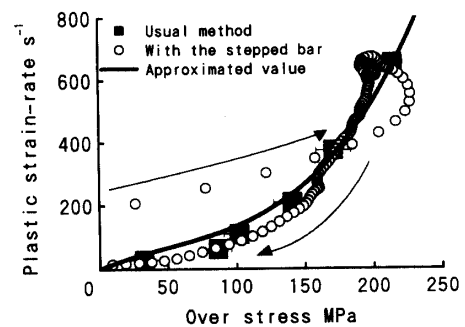


Fig.6 Relationship between the over stress and plastic strain-rate

Table 2 Conditions of simulation model

	Material	Length (mm)	Diameter (mm)	Young's modulus (GPa)	Density (kg/mm ³)	Yield strength (MPa)
Input bar	Steel	450.0	20.0	206.0	7.9x10 ⁻⁶	15100.0
Output bar	Steel	450.0	20.0	206.0	7.9x10 ⁻⁶	15100.0
Specimen	Steel	10.0	9.0	206.0	7.9x10 ⁻⁶	404.0

において試験片に生じたひずみ速度波形を図5(b)に示す。断面形状が一定である丸棒を打撃棒とした図2(b)の結果に比べ、ひずみ速度が緩やかに減少することがわかる。

以上の測定結果から過応力-塑性ひずみ速度関係を求め図6に○で示す。比較のため、複数の衝撃圧縮試験より得た過応力-塑性ひずみ速度関係を、図3と同じく図6中に示す。図3では、最大ひずみ速度近傍でのみ○および■で示す測定値が一致していたが、多段形の打撃棒による測定結果を用いた図6では、広いひずみ速度域にわたり両測定値がよく一致している。すなわち、多段形打撃棒を用いることにより、単数の試験から広いひずみ速度域に適用可能な動的構成式を決定するための十分な測定結果を得ることが期待できる。

4. 測定値による動的構成式の決定

4-1 AICによる動的構成式の決定 ひずみ速度依存性を考慮した動的構成式を、3章で述べた多段形打撃棒を用いたHPB試験による測定値を用いて決定する。すなわち、2章で述べたように、図5(a)に実線で示す衝撃端速度波形を境界条件とし、特性曲線法によるHPB試験のシミュレーション⁽⁹⁾を行い、試験片に生じたひずみ速度波形が、図5(b)に示すひずみ速度の測定結果に一致するように式(2)中の未知の材料定数を非線形最小二乗法⁽⁷⁾で決定する。

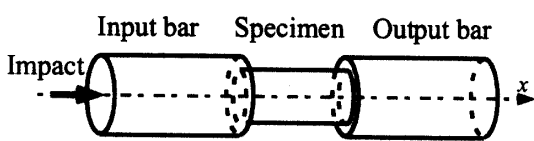


Fig.7 Simulation model

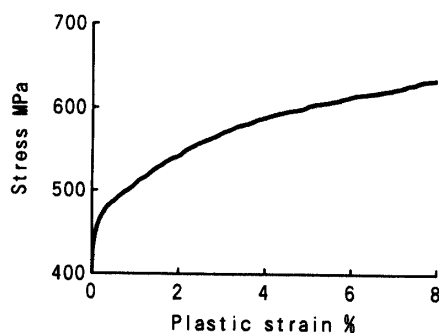


Fig.8 Relationship between static stress and plastic strain

構成式中の未知の定数を決定するための弾塑性波伝ば解析に用いた試験装置のモデルを図7に、実際の試験装置および試験片を基に決定したシミュレーションにおける入・出力棒および試験片の諸元を表2に、試験片の静的応力-塑性ひずみ関係を図8に示す。試験片の縦弾性係数、降伏応力および静的応力-塑性ひずみ関係は、HPB試験に用いた試験片と同一材料を直径9mm、長さ12mmの円柱状に加工した試験片を用い静的圧縮試験より得た。なお、試験装置とモデルとでは入・出力棒の長さが異なるが、計算を行った範囲では反射波の影響を受けないため、試験片両端に作用する負荷の状態は同一とみなせる。

式(2)中の m の値を2から8まで変化させて以上の処理をそれぞれ行い、次数の異なる複数の動的構成式を得た。得られた各動的構成式によるひずみ速度波形と、図5(b)に示す測定値との残差分散およびAICの次数に対する変化を表3に示す。なお、式(6)によるHPB試験の測定値処理では、応力波頭が試験片内を約3往復すれば、試験片内の応力状態を均一と見なせ、精度良い結果が得られるので⁽⁹⁾、本報ではひずみ速度波形の立ち上がりから10 μ sec間の測定値を無視し、構成式中のパラメータを決定した。

表3より、残差分散は次数とともに減少することに対し、AICは3次で最小値を示している。したがって、動的構成式の形を式(2)において m を3とした式形として決定する。決定された動的構成式中のパラメータを表4に、同式による過応力-塑性ひずみ速度関係を図6に実線で示す。図6より、決定した動的構成式は広いひずみ

Table 3 Changes of AIC and residual variance to the degree

Degree	Residual variance	AIC
2	166.066	1158.788
3	152.125	1148.074
4	151.816	1149.779
5	148.987	1149.052
6	148.925	1150.991

Table 4 Values of the parameters

P_0	P_1	P_2	P_3
0.0001	750.61	-2327.072	6036.963

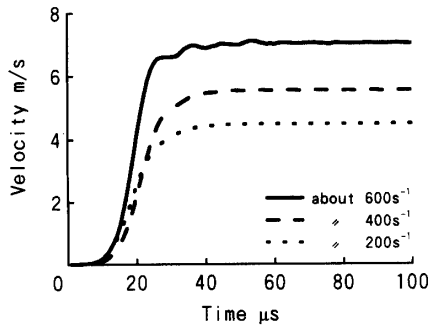


Fig.9 Impact velocity

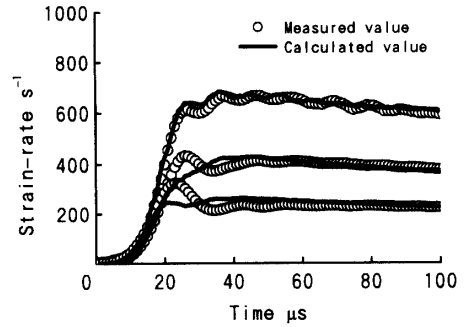
速度域にわたり測定結果と良く一致していることが確認される。

4.2 適用可能なひずみ速度域の検討 決定された動的構成式による試験片の弾塑性挙動のシミュレーションを行い、同式が広いひずみ速度域にわたり適用可能であることを示す。

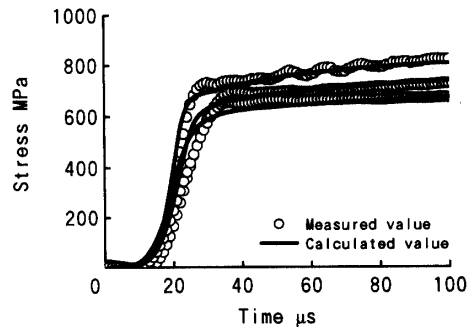
まず、断面形状が一定な丸棒を用いた通常のHPB試験により、ひずみ速度域が 200s^{-1} 、 400s^{-1} および 600s^{-1} 近傍となる衝撃圧縮試験を行い、入力棒に作用した衝撃端速度、試験片に生じたひずみ速度波形、応力波形、塑性ひずみ波形および試験片の応力-塑性ひずみ関係を求め、それぞれ図9、図10(a),(b),(c)中の○および図10(d)中の細線で示した。なお、図10(d)にはひずみ速度が約 10^{-4}s^{-1} である静的な応力-塑性ひずみ関係を併せて示した。次に、図9に示す衝撃端速度を境界条件とし図7に示すモデルにおいて、多段形の打撃棒を用いたHPB試験の結果より決定した動的構成式を用い、特性曲線法による弾塑性波伝ば解析を行った。解析より得られたひずみ速度波形、応力波形および塑性ひずみ波形を図10(a),(b)および(c)中に実線で、各ひずみ速度域における応力-塑性ひずみ関係を図10(d)中に、それぞれ指定した太線で示す。

図10において解析結果と測定値を比較すれば、決定した動的構成式は各ひずみ速度域において機械材料の変形挙動を良く表しており、同式が広いひずみ速度域にわたる動弾塑性数値解析の構成式として適用可能であることが確認できる。

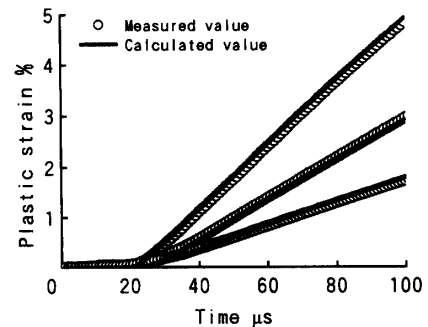
4.3 決定された式形の妥当性 4.2と同様な検討を、4.1で得られた2次から8次の構成式を用いて行い、AICにより決定した式形の妥当性を確認する。すなわち、図9に示す衝撃端速度を境界条件として、各動的構成式を用いたHPB試験のシミュレーションを行い、塑性ひずみ波形および応力波形を求める。得られた解析結果と、図10(b)および(c)に示した測定値との残差分散を求め、構成式の次数に対する変化を図11に示す。図



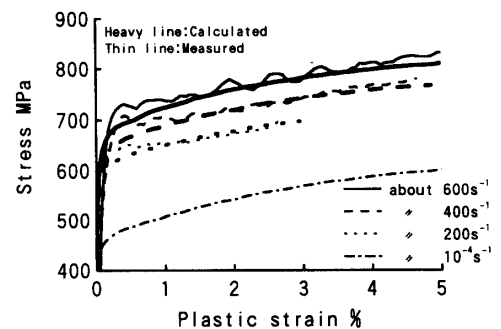
(a) Strain-rate waves



(b) Dynamic stress waves

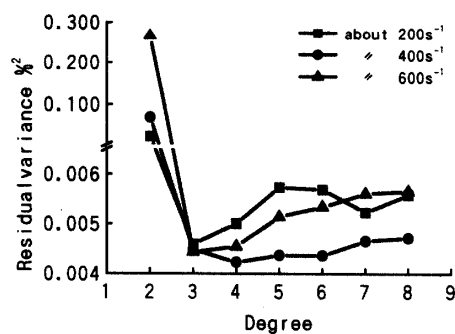


(c) Plastic strain waves

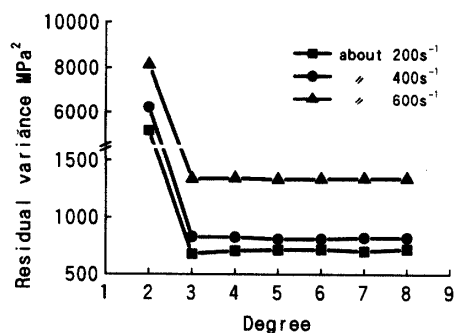


(d) Stress-plastic strain curves

Fig.10 Calculated values by the decided constitutive equation from the results with the stepped striker bar and measured ones



(a) Plastic strain waves



(b) Stress waves

Fig.11 Relationship between the degree and residual variances

11より、塑性ひずみ波形および応力波形ともに測定値と解析値の残差分散はAICが最小となる3次で収束し、それ以上の次数ではほぼ一定、または増加する場合もあり、AICにより適切な構成式形が決定されていることが確認される。以上のように、構成式の次数をある大きさ以上に増加させても、表しうる変形挙動の精度は向上せず、また、式が基となる測定値の誤差なども近似するなどの影響により、精度の低下も生じる。

4.4 従来の試験法による結果との比較 以上で示した、多段形の丸棒を用いたHPB試験より決定された動的構成式と、断面形状一定な丸棒を用いた従来のHPB試験による測定値より決定された式とを比較する。

図2(b)に示す、ひずみ速度域が 600s^{-1} 近傍となる、断面形状一定な丸棒を用いたHPB試験による結果から、4.1で述べた手順により動的構成式を決定した。決定した動的構成式の過応力-塑性ひずみ速度関係を図3に実線で示す。図3より、従来のHPB試験による測定値から決定した構成式の過応力-塑性ひずみ速度関係は、図6に実線で示した多段形の丸棒を用いた結果に比べて不安定な曲線となっている。これは、従来のHPB試験による測定値には、広いひずみ速度域にわたる過応力および塑性ひずみ速度の十分な情報が含まれないため、情報の不足するひずみ速度域において適切な動的構成式の推定が行えないためである。同式を用いて図9に示す衝撃端速度を境界条件として、各ひずみ速度域における応力-

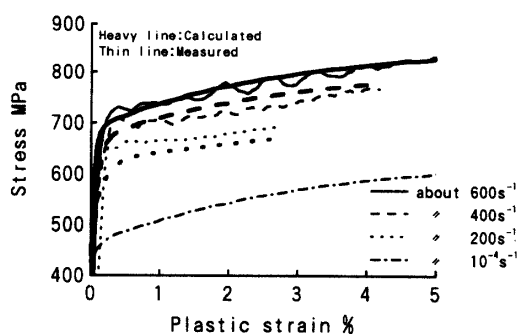


Fig.12 Calculated values by the decided constitutive equation from the results with an ordinary striker bar and measured ones

塑性ひずみ関係を弾塑性波伝ば解析により求めた。得られた結果を、実際の測定値と併せて図12に示す。なお、参考のためひずみ速度が約 10^{-4}s^{-1} である静的な場合の測定結果も図12中に示した。解析結果は測定結果に対し、基となる測定値のひずみ速度域である 600s^{-1} 近傍において、図10(d)に示した結果とほぼ同程度の精度となっている。しかし、他のひずみ速度域では、多段形の打撃棒を用いたHPB試験の測定値による結果に比べて、解析結果と測定結果に差が生じていることがわかる。

以上の結果より、本論文で提案する多段形打撃棒による衝撃圧縮試験を行えば、単数の測定値から適用可能なひずみ速度域が広く、精度の良い動的構成式の決定が可能となることがわかる。

5. 結 言

本論文では、少数の衝撃圧縮試験の結果から、広いひずみ速度域にわたり適用可能となる動的構成式を決定するための検討を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) ホプキンソン棒式の軸負荷衝撃圧縮試験において、打撃棒を多段形の丸棒とすれば、通常の断面積一定の打撃棒を用いた試験に比べ、広いひずみ速度域にわたり、材料の弾塑性変形挙動が精度良く測定できることを示した。

(2) 多段形の打撃棒による衝撃圧縮試験の結果より、弾塑性波伝ば解析および非線形最小二乗法によって動的構成式中の未知の材料定数を求め、さらに、得られた複数の異なる構成式を情報量規準AICで比較して適切な式形を決定する手法を検討した結果、少数の測定値から、材料の過応力-塑性ひずみ速度関係を表す構成式が得られることを示した。

(3) 提案する手法により決定した動的構成式を用いて、複数のひずみ速度域における弾塑性波伝ば解析を行い、得られた構成式が広いひずみ速度域に適用可能であることを確認した。

文 献

- (1)中桐滋, 実時間依存の構成式とその問題点, 塑性と加工, **29-325**(1988), 107-112
- (2)赤池弘次, 情報量規準 AIC とは何か, 数理科学, **153**(1976), 5-11
- (3)坂本慶行・石黒真木夫・北川源四郎, 情報量統計学, 共立出版, (1983), 42-64
- (4)立矢宏・三谷芳史・放生明廣・茶谷明義, 情報量規準による動的構成式の決定, 機論, **64-627, A**(1998-11), 2876-2882
- (5)放生明廣, 立矢宏, 茶谷明義, 非線形最小二乗法による動的構成式の推定, 機論, **59-563, A**(1993), 1720-1725
- (6)例えば林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, 日刊工業新聞社, (1988), 59-60
- (7)中川徹・小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, (1982), 95-124
- (8)例えば日本塑性加工学会編, 高エネルギー速度加工, コロナ社, (1993), 26-35
- (9)例えば村上碩哉・室田忠夫・神馬敬, 金属材料の縦衝撃によるひずみ速度効果の測定精度, 機論, **39-318, 1**(1973), 556-564
- (10)例えば赤池弘次・北川源四郎, 時系列解析の実際II, 朝倉書店, (1995), 95-113
- (11)文献(3)の133ページ
- (12)Tachiya, H.・Mitani, Y.・Hojo, A.・Chatani, A., Study on the determination method for dynamic constitutive equations with strain-rate sensitivity, Proc. 3rd Int. Sym. on Impact Engineering, (1999), 501-507