“柔らかい”試験機による任意の高ひずみ速度下 での応力-ひずみ曲線の決定法とその応用*

竹山 寿夫**, 佐藤 裕久***, 戸部 俊美***
加藤 正名***, 高津 宣夫***

Some Experiments of Determinining Flow Stress Curves of Metals in Some Controlled Courses of High Strain-Rate with a “Soft” Testing-Machine

by Hisao TAKEYAMA, Yasuhisa SATO, Toshimi TOBE,
Masana KATO, and Nobuo TAKATSU

A modified split-Hopkinson-pressure-bar compression system which operates following a predetermined, constant or variable strain-rate course in specimen is developed and some of its applications are shown. Striker bars of nonuniform cross sections designed on the basis of the elastic-wave-propagation theory are used to generate desired shapes of incident loading pulse. It is shown that a striker bar having a shape of frustum of cone enables constant strain-rate testing throughout the deformation of specimen. The system is used to generate a nearly constant strain-rate in the specimens with different ratios of diameter to height. The dynamic stress-strain data free from the effect of friction between the specimen and tools are then obtained by extrapolating the results. The system is also applied to variable strain-rate tests to investigate the flow characteristics of metals and some examples are demonstrated.

Key Words: Plasticity, Material Testing, High Strain-Rate, Compression Testing, Stress-Strain Curves

1. 緒 言

高エネルギー速度加工(爆発成形, 圧縮ガス利用の高速度成形, 放電成形, 等)や高速加工(線引き, 薄板圧延, 等)においては, 被加工物のひずみ速度は相当大きいので, その材料の機械的性質は高ひずみ速度下で定められねばならない。しかし, 金属の変形応力は刻々のひずみとひずみ速度の値のみによって定まるのではなく, ひずみ速度の履歴の影響をも受ける。したがって, ひずみ速度の影響を正確に調べるためにはひずみ速度の制御できる試験装置が必要となる。

カムプラスチックメータは前もって定めた, 一定の, あるいは変化するひずみ速度の変形を, 試片に正確に与えることのできる便利な装置である。この種の試験機は, その工具系が試片に比べて十分硬く, また, その容量が試片に所定のひずみ速度で, かつ, 要求された変形を与えるに十分であるという意味で, “硬い”といえる。しかし, クロスヘッドの変位成分の中には試片や試験機の弾性変形が含まれており, したがって,

高ひずみ速度試験の場合によく用いられる円板状試片などの場合に, 正確にひずみを定めることは困難である。さらに, 試片のひずみ速度を増加させるために必要となる試験機運動部の加速に起因する慣性の効果を評価することも困難となってくる。実際, この試験機は, 構造上, 与え得るひずみ速度の上限は 300 s^{-1} 程度以下であるといわれ⁽¹⁾, また, 入手も困難である。

一方, 分割ホプキンソン棒(SHPB)利用の圧縮試験法は, 10^3 s^{-1} 程度のひずみ速度の試験を正確に行うことができ, 試作も容易であって, 従来より多用されてきた⁽²⁾⁽³⁾。この SHPB 法は工具の弾性変形を考慮して試片の変形特性を定めているという意味で “柔らかい”試験機であるといえる。また, 工具の慣性も弾性波の伝ばを考慮して評価されている。しかしながら, 試片の, あらかじめ定めたひずみ速度推移下での, 応力-ひずみ曲線を得ることは容易ではないと考えられていた⁽⁴⁾。それは, 試験中の試片の変形速度がその材料の固有の特性, すなわち変形に伴う変形抵抗の変化あるいはひずみ硬化, に依存して決まってしまうからである。

著者らはこの SHPB 法を改良して, 与えられた試片に対し, 希望するひずみ速度推移を負荷し得る方法を, 最近, 提案した⁽¹⁴⁾。その概要は後述するが, 変断

* 昭和 59 年 11 月 28 日 第 929 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 59 年 5 月 18 日。

** 正員, 神奈川大学工学部(〒221 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)。

*** 正員, 東北大学工学部(〒980 仙台市荒巻字青葉)。

面打撃棒を用いて負荷パルスの形を変える方法である。

本研究の目的は、この改良法が広範囲の高ひずみ速度推移の材料試験に応用できることを示し、これをひずみ速度推移の調節が可能な高ひずみ速度材料試験法として確立することである。

2. SHPB 圧縮法における

ひずみ速度調節の概要

2.1 試片のひずみ速度、ひずみ、応力の計算法

図1に SHPB 法における工具と試片の配置を示す。入力、出力棒の間に短い円柱試片をはさむ。入力棒中の負荷パルスは打撃棒をゴム束により所定の衝突速度まで加速し、これを中心軸が一致するよう衝突させることによって得る。打撃棒が入力棒に衝突すると同時に、応力パルス(入射波、 σ_I)が入力棒の打撃端に発生しはじめ、入力棒内を伝ばし、その大きさを測定するためのひずみゲージ A の所を通過していく。この入射波が試片に到達し、一部が反射して打撃端のほうに戻っていき、残る部分は試片を通過して出力棒内を伝ばしていく。反射応力パルス(反射波、 σ_R)は再びゲージ A で測定され、一方、試片を通過し透過圧力棒に伝ばしていくパルス(透過波、 σ_T)は出力棒のゲージ B によって測られる。測定例を図2に示す。 σ_I 、 σ_R および σ_T は圧縮が正で、引張りが負である。

一次元の弾性波理論(以後、一次元理論と称す)を適用すると、試片接触端における粒子速度、変位および力を三つの工具・応力-時間関係 σ_I 、 σ_R および σ_T から定めることができる。著者らが必要な諸式は以下のとおりである。すなわち、

粒子速度：

$$\left. \begin{aligned} v_1(t) &= \frac{C_b}{E_b} \{ \sigma_I(t) - \sigma_R(t) \} \\ v_2(t) &= \frac{C_b}{E_b} \sigma_T(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

変位：

図1 実験装置概要(工具・試片)と配置

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= \int_0^t v_1(t') dt' \\ u_2(t) &= \int_0^t v_2(t') dt' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

力：

$$\left. \begin{aligned} F_1(t) &= A_b \{ \sigma_I(t) + \sigma_R(t) \} \\ F_2(t) &= A_b \sigma_T(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、入力、出力棒の試片接触端をそれぞれ1, 2で表し、時刻 t の原点を試片の圧縮開始時にとる。また、 E_b 、 C_b および A_b は、それぞれ、圧力棒の縦弾性係数、応力波伝ば速度および断面積である。

試片内の平均のひずみ速度、ひずみおよび応力は

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}(t) &= \frac{v_1 - v_2}{h_0} \\ &= \frac{C_b}{h_0 E_b} \{ \sigma_I(t) - \sigma_R(t) - \sigma_T(t) \} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \int_0^t \dot{\epsilon}(t') dt' \\ &= \frac{C_b}{h_0 E_b} \int_0^t \{ \sigma_I(t') - \sigma_R(t') - \sigma_T(t') \} dt' \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \frac{F_1 + F_2}{2A_0} \\ &= \frac{A_b}{2A_0} \{ \sigma_I(t) + \sigma_R(t) + \sigma_T(t) \} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

で表せる。ここに、試片の応力、ひずみは圧縮を正とする。また h_0 、 A_0 はそれぞれ、試片の初期高さおよび断面積である。

2.2 所定のひずみ速度推移を与える手続き 打撃棒が他の圧力棒と同材質、同一断面積を有する通常の SHPB 法では、長方形の入射波が得られる(図2参照)。しかし、このような一定振幅の負荷パルスを用いても試片のひずみ速度を一定にするような試験を実現することはできない。

従来の著者らの実験では、試片の両端に作用する力 F_1 と F_2 の差は、入射波の立ち上がり部のおよそ 20 μ s を除けば、例えば、約 4 % 以内にある⁽¹¹⁾。ここでは、

図2 入射、反射、透過波(σ_I 、 σ_R 、 σ_T)の例

これらの力が等しいと仮定することにする。

$$A_b\{\sigma_i(t) + \sigma_R(t)\} = F_1(t) \\ \equiv F_2(t) = A_b \sigma_T(t) \dots\dots\dots (7)$$

この近似式を用いれば、以下のように、試片のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と応力 σ は、それぞれ、反射波 σ_R と透過波 σ_T に比例する。すなわち、次の諸式を得る。

$$\dot{\epsilon}(t) \doteq -\frac{2C_b}{h_0 E_b} \sigma_R(t) \dots\dots\dots (4)'$$

$$\epsilon(t) \doteq -\frac{2C_b}{h_0 E_b} \int_0^t \sigma_R(t') dt' \dots\dots\dots (5)'$$

$$\sigma(t) \doteq \frac{A_b}{A_0} \sigma_T(t) \dots\dots\dots (6)'$$

試片を所定のひずみ速度で変形させるために、SHPB 利用のひずみ速度制御試験法では、そのひずみ速度推移に対応する反射波が生ずるようにしなければならない。もちろん、反射波は、仮に同一の入射波が用いられていても、試片の寸法や機械的性質並びに試片・工具境界面の摩擦等の諸条件に依存して変化する。それゆえ、与えられた試片に対して、所期の形の反射波すなわちその試片の所定のひずみ速度推移を得るためには、その反射波を生じ得るように入射波形を変えねばならない。

本研究では、近似式(7)を利用して、以下に示すような手順に従い、試片に所定のひずみ速度推移を与え得る試験を実施する。

(1) 所与の試片に対し、所定のひずみ速度推移 $\dot{\epsilon}(t)$ 下における応力-ひずみ-ひずみ速度間の関係を、まず仮定する。第一近似としてその試片の準静的応力-ひずみ関係を用いてもよい。

(2) 試片に、与えられたひずみ速度推移 $\dot{\epsilon}(t)$ に沿うような、負荷を与え得る入射波推移の近似式 $\bar{\sigma}_i(t)$ を次のように予測する。

まず、 $\dot{\epsilon}(t)$ に比例する反射パルス $\sigma_R(t)$ が式(4)'を用いて得られる。次に、試片の応力推移の予想値 $\bar{\sigma}(t)$ は、 $\dot{\epsilon}(t)$ とこれを積分した $\epsilon(t)$ を用いて、手順(1)で仮定した応力-ひずみ-ひずみ速度関係から得られる。一方、式(6)'により透過波の予想値 $\bar{\sigma}_T(t)$ は試片応力 $\bar{\sigma}(t)$ に比例するので、近似入射波 $\bar{\sigma}_i(t)$ は式(7)を用いて

$$\bar{\sigma}_i(t) = \bar{\sigma}_T(t) - \sigma_R(t) \dots\dots\dots (7)'$$

のように決定できる。

(3) 予測した入射パルス $\bar{\sigma}_i(t)$ を生ずるような打撃棒の衝突速度と断面積分布とは、例えば一次元理論を用いて、近似的に求めることができる。

(4) この予測された変断面打撃棒を製作し、さらに手順(3)で評価した速度による打撃棒の入力棒への

衝突実験を行い、この結果が予想された入射波 $\bar{\sigma}_i(t)$ を生み出し得るかどうかを調べる。

(5) この打撃棒と衝突速度による実験を実施し、式(4)'より、所与の試片の、ひずみ速度-時間関係を求める。これにより、所期のひずみ速度推移が達成されているかどうかを調べる。

所定のひずみ速度推移下での応力-ひずみ曲線の決定精度を上げたい場合には、[手順(3)、(4)の繰返し操作を含めて]、上述の手順を繰返せばよい。ただし、この場合、手順(1)で仮定する応力-ひずみ-ひずみ速度の関係を、手順(5)で得られる結果に基づいて修正する必要がある。

3. 応 用

予測された入射パルスを得るために、著者らは一般に、上述のように変断面打撃棒を用いる。簡単のために、変断面打撃棒を次のような多段段付棒で近似することにする。すなわち、各セグメントは同一の長さを持つが、断面積が異なるようなものである。この打撃棒の断面分布を予測するために一次元理論を用いる。計算法の詳細は別の論文⁽⁵⁾に述べてある。

3・1 一定ひずみ速度試験 一例として、直径 19.4 mm、高さ 10 mm のアルミニウム(JIS-A 1070)について、まず、一定ひずみ速度試験を取り上げ、これを実施する。なお、試片は 350°C、1 時間の焼なまし材である。圧力棒はステンレス鋼(JIS-SUS 304)製のセンタレス研削棒であり、打撃棒の材質は圧力棒と同材質か、あるいは、黄銅製である。

前章で述べた手順に従うと、一定ひずみ速度試験用打撃棒として、多段段付棒の断面分布が定められることになるが、セグメントが多い場合の多段段付棒の加工は繁雑である。一方、計算により予測される段付打撃棒のプロフィールはテーパ丸棒(または円すい台状棒)に近いので、段付棒の代わりに円すい台状棒を用いてもよさそうである。実際、円すい台状打撃棒を入力棒に衝突させる実験で得た入射パルスは計算で求められた予測入射パルスをほぼ再現することができた⁽⁵⁾。

アルミニウムを用いた実験結果の例として、図3に応力-ひずみ、ひずみ速度-ひずみの曲線を示す。これらの実験では、ただ1本の黄銅製円すい台状棒を用いている。図3から、200~320 s⁻¹のひずみ速度範囲で、一定ひずみ速度試験が実現できている。すなわち、手順(1)にて仮定する応力-ひずみ曲線の第一近似として準静的応力-ひずみ曲線を用いたにもかかわらず、2・2節に述べた手続きを繰返し操作することなく、1

本の打撃棒によりある範囲内で一定ひずみ速度試験が実現できた。このことは注目に値するが、常に可能であるとは限らない。

3.2 高ひずみ速度における円板状試片の変形応力の決定 高ひずみ速度成形に用いられる板金の機械的性質は高速引張試験を実施して決定できると考えられていた。しかし、この種の試験は、ひずみ速度が増加するとともに、試片内の応力および変形の不均一性、あるいは、くびれを伴う不安定変形のため、小さなひずみ範囲に限られる。Kolsky は、はじめて、SHPB 法を用いて非常に薄い試片の動的な機械的性質を決定しようとした⁽⁶⁾。このような動的圧縮試験で問題となる摩擦効果の正しい評価は困難である⁽⁷⁾が、摩擦のために生ずる、変形応力の見かけの増加分は外そう(挿)法を適用することにより取り除くことができる^{(8)~(11)}。

ここでは、一例として、厚さ 2.25 mm、直径 18 mm でひずみ速度 500 s^{-1} における OFHC 銅の応力-ひずみ曲線を求めることにする。試片の高さを変えて(直径/高さ)比を変化させる外そう法を適用する。試片の初期の直径/高さ (D_0/h_0) 比は 2, 4, 6, 8 であり、試片は 600°C 、1 時間の真空焼なまし処理を行った。潤滑剤は L_i 系万能形グリースである。

図3 アルミニウム (JIS-A 1070) の一定ひずみ速度下での応力-ひずみ曲線⁽⁵⁾

一様断面棒を用いる従来の SHPB 法による一定振幅入射波の実験では、例えば、板厚 2.25 mm の試片のひずみ速度が 1000 s^{-1} から 200 s^{-1} まで推移する。一方、改良 SHPB 法による(すなわち、負荷パルスの形状を変える)と各寸法比の試片のひずみ速度推移はほぼ一定であり、また、使用した試片の全部についてひずみ速度の範囲を 650 s^{-1} から 450 s^{-1} の間に収めることができた。

実験データの整理は次のように行う。まず、摩擦効果を含んだ平均変形応力とひずみとの関係を、 D_0/h_0 比をパラメータとしてプロットする。次に、縦軸にその平均応力を取り、横軸に刻々の直径/高さ (D/h) 比を取り、ひずみをパラメータとしてプロットし直す。

OFHC 銅の各寸法比に対し 3 個の試片について行った実験結果を平均したものを図 4 に示す。図中の各曲線を $D/h=0$ の値まで外そうすると、この際のひずみおよびひずみ速度における摩擦の影響のない真の変形応力が求められる。

厚さのさらに薄い円板試片の場合には、重ね板圧縮における外そう法⁽¹²⁾を、改良 SHPB 法に適用して、例えばひずみ速度一定の応力-ひずみ曲線を定めることができると思われる。

3.3 ひずみ速度急変試験 変形応力-ひずみ線図に及ぼすひずみ速度とその履歴の影響を明確にするために、試片のひずみ速度を急変させる試験を実施してみることも重要である⁽¹³⁾。この場合、ひずみ速度は独

図4 OFHC 銅の真の変形応力を外そう法により得るためにひずみをパラメータとして描いた平均応力-(直径/高さ)比の関係(潤滑剤: L_i 系万能形グリース)

図 5 OFHC 銅試片について、指定された種々のひずみ速度経路に沿うように実施された試験結果

立な変数でなければならないから、実験者がそれを制御しなければならない。

上述の改良 SHPB 法を用いて、例えば、ひずみ速度を急激に低下させた場合の金属の応答を求めることができる。前節の OFHC 銅 (D_0/h_0 比は 2) の場合の例を図 5 に示す。ひずみ速度を急激に低下させる試験例において、初めのひずみ速度を 800 s^{-1} に設定したが、実験結果はこの値に達していない。この目標値と実験値の相違は、2・2 節に述べた手順 (3), (4) の繰返し操作を省略したこと起因していると思われる。

4. 結 言

本研究において、希望する高ひずみ速度推移で試片を圧縮試験できる改良 SHPB 法の広範囲の応用例を示すことができ、これを“柔らかい”試験機利用の高ひずみ速度材料試験法として確立できたものとする。この改良法は、高分子材料や複合材料あるいは高温下の金属材料などについて、高ひずみ速度下で変形応力を正しく求めたい場合にも用いることができる。

また、本文中で触れなかったが、変形が大きい場合

に妥当な対数ひずみ速度の制御も上述と同様の考え方で実施可能である。なお、試片と工具の断面積が大きく違う場合には試験結果を評価する際に注意する必要がある⁽¹⁵⁾。

“柔らかい”試験機を用いてひずみ速度制御試験を実施する場合には、最終的に求めたい材料特性を、試験に先立って、仮定しなければならないという難点を持っており、したがって、繰返し操作がどうしても必要である。しかしながら、繰返し操作に適用される試行錯誤法は、最近、急速に進歩している種々の計算機および周辺装置等を含めた関連機器により、その高速処理が可能となってきた。

終わりに、本研究は、服部報公会工学研究奨励助成金(昭和 48 年度)、武田科学振興財団研究助成金(昭和 49 年度)、文部省科学研究費補助金〔昭和 52 年度一般研究(C)255027〕などをも用いて実現できたことを記し、感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) Thomason, P. F., ほか 2 名, *Proc. 9th Mach. Tool Des. and Res. Conf.*, (1968), 287, Birmingham.
- (2) Campbell, J. D., *Materials Science and Engineering*, 12 (1973), 3.
- (3) Holzer, A. J., *Trans. ASME, Ser. H*, 101 (1979), 231.
- (4) Lindholm, U. S., *J. Mech. Phys. Solids*, 12 (1964), 317.
- (5) 佐藤・竹山, 塑性と加工, 24 (昭 58), 744.
- (6) Kolsky, H., *Proc. Phys. Soc.*, B 62 (1949), 676.
- (7) Holzer, A. J., *Ann. CIRP*, 29-1 (1980), 135.
- (8) Cook, M. and Larke, E. C., *J. Inst. Met.*, 71 (1945), 371.
- (9) Sturgess, C. E. N. and Bramley, A. N., *Proc. 11th Mach. Tool Des. and Res. Conf.*, (1970), 803, Birmingham.
- (10) 佐藤・竹山, 塑性と加工, 22 (昭 56), 1023.
- (11) 佐藤・竹山, 文献(10)の 1236 ページ.
- (12) 福井・ほか 3 名, 東京大学理工学研究所報告, 8-3 (昭 29), 135.
- (13) Lipkin, J., ほか 2 名, *J. Mech. Phys. Solids*, 26 (1978), 251.
- (14) 佐藤・竹山, 塑性と加工, 23 (昭 57), 252.
- (15) 佐藤・竹山, 機講論, No. 800-9 (昭 55-7), 17.