応力・ひずみ特性検討用落錘法の簡易化

西村 圭央* 上野 拓** 佐藤 直樹***

平野 雅将*** 千葉 大輔*** 箱山 裕司***

佐藤 裕久***

Simplification of Drop Weight Method to Obtain Stress-Strain Characteristics

Keiou NISHIMURA, Taku UENO, Naoki SATOH,

Masayuki HIRANO, Daisuke CHIBA, Yuji HAKOYAMA

and Yasuhisa SATO

(Received on June 16, 2005)

A new drop weight tester system was developed to obtain compression stress-strain curves of the aluminum alloy A2024(JIS) and PMMA (polymethyl methacrylate) at a medium strain rate of approximately 100 s^{-1} . To evaluate the strain rate or the strain of the specimen it has been necessary to measure the motion parameters, i.e., velocity or displacement, of the tup and anvil. In this new method, the velocity and displacement of the tup and anvil, which were in contact with both end surfaces of the specimen were computed on the basis of the equations of motion of the tup and anvil, respectively. The differential equation, in which the measured dynamic force versus time characteristics were contained, was integrated by the Runge-Kutta method using Microsoft Excel. For the aluminum alloy A2024, stress was not markedly affected by strain rate. On the other hand for PMMA the stress was affected significantly by strain rate.

Key words: material testing, drop weight tester, dynamic stress-strain curves, constant strain rate, extrapolation method, A2024, PMMA

1. 緒言

従来、やや大型の落錘は金属の高速鍛造に利用されてきた^{1)~4)}。近年、小型の落錘が FRP など複合材料の強度評価用⁵⁾、あるいは、各種構造材料のエネルギー吸収能評価用⁶⁾などとしても利用されるようになってきている。これらにおいては、発生する衝撃荷重を高精度で測定する必要がある。我々は以前、落錘による円柱状試験片の衝撃圧縮試験用ロードセルの準静的荷重による検討を行った。その結果、試験片の変形に伴う接触面積の変化、ならびに試験片設置位置のずれなどに伴う負荷条件変化の測定圧縮荷重に及ぼす影響を 1.7% 以内に収め得る事を明らかにした⁷⁾。

一方、落錘法により各種材料の高ひずみ速度下での応力・ひずみ曲線を決定するのに、変位計または速度計が不

可欠とされてきた。しかし、本研究では運動計測システムなしで数値解析により、高ひずみ速度の応力・ひずみ曲線を決定する。さらに、タップの落下高さに対応して得られる種々のひずみ速度の応力・ひずみ曲線群を内挿操作により一定ひずみ速度の応力・ひずみ曲線を求める。これを三種類の、高さに対する直径の比を有する試験片について実施した後、三種類の一定ひずみ速度下の応力・ひずみ曲線から、外挿操作により工具と試験片との接触面摩擦の影響がない、純粋に一軸応力状態の応力・ひずみ曲線を決定する。すなわち、得られる曲線は、ひずみ速度履歴の影響が多少含まれるとはいうものの、ほぼ一定ひずみ速度で、かつ一軸応力状態の応力・ひずみ曲線である。

2. 実験

2. 1 実験装置

本研究で使用した落錘装置の概略を Fig.1 に示す。タップ上部のトリガ差込口にトリガを挿入した後、ウインチにより、タップを所定の高さまで巻き上げる。トリガを引き

* 東北大学大学院 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02

** 東北学院大学大学院 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

*** 東北学院大学工学部 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

抜くことによりタップが落下する。

直径 40mm, 高さ 40mm のアンビル突起部上面に試験片を設置するが, このロードセルでもある突起部に 4 枚の半導体ひずみゲージ (共和電業製 KSP-2-E4) を使用し, これらでブリッジ回路を構成している⁷⁾。

3 種類の (直径 D_0 / 高さ h_0) 比の試験片について, 様々の高さからタップを落下させ, 生じたブリッジ出力電圧をデジタルオシロスコープ (岩崎通信機製 DS-8812 : 500k サンプル/s) に記録しデータ解析をする。

Fig.1 Outline of drop weight tester and measurement system.

Fig.2 Forces acting on and velocities of the end surfaces of the specimen under dynamic compression.

2. 2 試験片

試験片の基本寸法は直径約 14mm, 高さ 約 5mm の円柱状である。工具と試験片との境界面摩擦の影響を除去するため, 以前我々が分割ポピキンソン棒法で提案した, 動的

圧縮試験における外挿法^{8) 9)} に準じた方法を適用する。そのため, 試験片の初期直径 / 高さ (D_0 / h_0) 比を 3 種類: 14 / 15, 14 / 10, 14 / 5 を選んだ。高さ 10mm, 15mm の試験片は高さ 5mm の試験片を縦に, エポキシ系接着剤 (商品名: アラルダイト) で 2 個か 3 個接着したものである。

試験片としてはアルミニウム合金 (JIS: A2024P-T351) およびアクリル (polymethyl methacrylate: PMMA; クラレ社製パラグラス) を購入して使用した。以下各々単に, A2024 および PMMA と呼ぶことにする。

2. 3 試験片に作用する圧縮荷重の推移

(1) 試験片に作用する荷重と試験片両端の速度 Fig.2 にタップとアンビルとで圧縮中の試験片と, その両端の工具の運動諸量を示す。時刻 t の原点 $t=0$ はタップが試験片に接触した瞬間としている。

図のように, タップとアンビルが試験片に作用する圧縮荷重を各々 $f_1(t)$, $f_2(t)$ とし, また, タップとアンビルの試験片接触端の粒子速度を各々 $v_1(t)$, $v_2(t)$ とする。その時, 試験片の圧縮公称の応力 σ , ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$, ひずみ ϵ は次式で表せる。

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}(t) &= \frac{f_1(t) + f_2(t)}{2 A_0} \\ \dot{\epsilon}(t) &= \frac{v_1(t) - v_2(t)}{h_0} \\ \epsilon(t) &= \frac{x_1(t) - x_2(t)}{h_0}\end{aligned}\quad (1)$$

ここに, 左辺の諸量にバーが付いているのは, これらが見かけの値であることを示すものである。端面摩擦の影響などを除去し, 試験片内部が一様な一軸応力状態となって初めて, 真の公称応力, 公称ひずみ速度, 公称ひずみとなり, バーを取り除くことができる。

(2) ロードセルによる圧縮荷重の測定⁷⁾ アンビルの一部である突起部ロードセルの上面に, 両端面に薄くカップグリースを塗布した試験片を載せて, これを落下タップにより圧縮する。このロードセルの校正曲線 (荷重・出力電圧曲線) は上述したように, 一般に, (i) 試験片の変形に伴う試験片とロードセルとの接触面積の変化, および, (ii) 試験片の設置位置の実験毎に異なる中心位置からのずれの程度などの影響を受ける。この影響を小さくするには我々の従来の研究で, 特にひずみゲージをロードセル付け根にできるだけ近づけて接着するなどの工夫が有効である事が分かっている。この工夫により, 応力値に換算してそれらの影響を 1.7% 以下にすることが出来た⁷⁾。

(3) 試験片両端荷重 $f_1(t)$, $f_2(t)$ の相違⁷⁾ と平均荷重 我々は以前, 試験片圧縮中のアンビル側の荷重 $f_2(t)$ の他, タップの突起部ロードセル (直径 40mm, 高さ 40mm) も同時に使用した実験の結果から, タップ側の荷重 $f_1(t)$ の方が $f_2(t)$ より小さくなることを示した⁷⁾。同一のアンビルに比し, タップの大端部長さのみ 3 種類 (直径 140mm で, 長さ 100, 180, 250mm) 変えた実験で, この差: $f_2(t) - f_1(t)$ は大端部長さが大きくなるほど減少する。大端部長さが 250mm の場合その差の荷重値に対する割合は約 3~4% 程度である⁷⁾。このため本研究では, 250mm のタップを使用する。

以後, 試験中のタップの受ける荷重及びアンビルの受け

荷重をともに平均荷重 $f(t)=[f_1(t)+f_2(t)]/2$ に等しいものと仮定する. これによりタップ荷重を 2%程度大きく, また, アンビル荷重を 2%程度小さく評価することになる.

3. 試験片のひずみ速度とひずみの解析法

試験片のひずみ速度及びひずみの推移は式(1)のように表せるので, 試験中の $v_1(t)$, $x_1(t)$ などタップに関する諸量はタップの運動方程式から, また $v_2(t)$, $x_2(t)$ などアンビルに関する諸量はアンビルの運動方程式から計算する.

3. 1 タップの運動の解析

Fig.3 のように, 質量 M_1 ($=31.6\text{kg}$) のタップに作用する外力は下向きの重力 M_1g と試験片からの上向きの力 $f(t)$ のみであるから, 初期条件: $v_1(0)=v_0$, $x_1(0)=0$ を用いると次のようなタップの運動方程式 (2) を得る.

$$M_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = M_1 g - f(t) \quad (2)$$

ここに, g は重力の加速度 ($=9.8 \text{ m/s}^2$) である. 両辺を M_1 で除し時間 t で積分して次式を得る.

$$v_1(t) = \frac{dx_1}{dt} = v_0 + gt - \frac{1}{M_1} \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (3)$$

再度 t で積分してタップの変位 x_1 を得る.

$$x_1(t) = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2 - \frac{1}{M_1} \int_0^t \left(\int_0^\tau f(\tau) d\tau \right) dT \quad (4)$$

3. 2 アンビルの運動の解析

タップの場合と異なり, アンビルの下面には厚さ 30mm の衝撃吸収用ゴム (硬度: Hs60; 呼び寸法: 30×250×250) を敷いてあるので上向きのゴムの反力 $K x_2(t)$ をも考慮する必要がある.

Fig.3 に示してあるように, 質量 M_2 ($=47.2\text{kg}$) のアンビルに作用する外力は, 下向きの重力 M_2g と試験片からの $f(t)$ の他に緩衝ゴム反力: $K x_2(t)$ が上向きに作用するので式 (5) を得る.

$$M_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = M_2 g + f(t) - K x_2 \quad (5)$$

両辺を M_2 で除し, 以下下付添え字: 2 を省略して整理すると次式を得る.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{K}{M} x = g + \frac{f(t)}{M} \quad (6)$$

この 2 階の常微分方程式をルンゲ・クッタ法¹⁰⁾により数値積分するため,

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (7)$$

と置くと式(6)は次式となる.

$$\frac{dv}{dt} = g + \frac{f(t)}{M} - \frac{K}{M} x \quad (8)$$

式(7)と(8)をルンゲ・クッタ法により, 時々刻々のアンビルの速度: $v=v(t)$ 及び変位: $x=x(t)$ を数値計算した.

なお緩衝用ゴムのばね定数 K は, 先ずこのゴムの線形弾性体と仮定し, これを片持ちばりとして自由振動させた時の固有振動数を実験的に求め, ヤング率を推定した後, 求めたばね定数 ($K=3 \times 10^8 \text{ N/m}$) を第 1 近似値として用いた. この第 1 近似を使用して, 最終的に式(1)から定まる最終ひずみ量 ϵ_c は, マイクロメーターにより実測した最終ひずみ量 ϵ_m とは一般に異なる. そこで, 両者 ϵ_c と ϵ_m とが十分

に近い値となるまで, 具体的には相対差: $|(\epsilon_c - \epsilon_m)/\epsilon_m|$ が 0.03 以下となるまで, K の値を変えて演算を繰り返した.

Fig.3 Forces acting on tools and coordinates x_1 and x_2 extending perpendicularly downward.

4. 動的塑性曲線の決定と検討

材料特性としての, 一軸応力状態の応力・ひずみ曲線(または塑性曲線)のひずみ速度依存性を検討するには, 各ひずみ速度にて, ひずみ速度一定の応力・ひずみ曲線を求めることが望ましい¹¹⁾. 本章では, ひずみ速度 100 s^{-1} 程度で, 先ず, ひずみ速度一定の平均応力・ひずみ曲線を定める. 次に外挿法を適用して, 工具・試験片間の接触面摩擦の影響を取り除き, ひずみ速度一定の動的な応力・ひずみ曲線を求める.

4. 1 応力・ひずみ曲線とひずみ速度・ひずみ曲線

式(1)を用いて得た, 平均の公称応力・ひずみ曲線ならびに, それに対応する公称ひずみ速度・ひずみ曲線の例を Fig.4 に示す. (a)は A2024 についての結果で, 試験片高さが 15mm, タップ落下高さ L が (i)0.07m, (ii)0.26m, (iii)0.44m, (iv)0.7m の場合の結果である. 応力・ひずみ曲線は実験データを用いた計算点で示しているために, これらが太い実線で示されているように見える. 一方, ひずみ速度・ひずみ曲線は細い実線で示してある. これら 2 種類の曲線を示している横座標は同一(ひずみ)で, 縦軸は 1 つが平均公称応力(MPa), 他 1 つが公称ひずみ速度 s^{-1} を示しているが, 数値は共通である.

(b)は PMMA についての結果で, 試験片高さが 15mm, タップ落下高さ L が (i)0.09m, (ii)0.14m, (iii)0.22m, (iv)0.3m の場合の結果である. この場合も, 応力・ひずみ曲線は太い実線で示されているように見えるが, (a)と同様な理由による. 同様にひずみ速度・ひずみ曲線は細い実線で示してある. これら 2 種類の曲線を示している横座標は同一 (ひ

ずみ)で、縦軸は1つが平均公称応力 (MPa)、他の1つが公称ひずみ速度 s^{-1} を示しているが、数値は共通である。

4.2 ひずみ速度一定の応力・ひずみ曲線

上述のように、Fig.4に示された曲線は、(1)接触面摩擦の影響を含み、さらに、(2)ひずみ速度やその履歴の影響を含んでいる。塑性曲線のひずみ速度の影響を正しく評価するためにはこれらの影響を除去する必要がある。そこで本節では、A2024 と PMMA 両者について、3種類の高さ h_0 の試験片に対し、様々のタップ落下高さ L で得た実験曲線群から、内挿によりひずみ速度一定の応力・ひずみ曲線を定める。

Fig.4(a) Mean stress vs. strain curves and strain-rate vs. strain curves for A2024 of 15mm in height (L =falling height of tup).

Fig.4(b) Mean stress vs. strain curves and strain-rate vs. strain curves for PMMA of 15mm in height (L =falling height of tup).

Fig.5 は A2024 についての一定ひずみ速度下の応力・ひずみ曲線である。Fig.4(a)のような実験曲線において、例えば高さ 15mm の試験片に対し、ひずみ速度 $100s^{-1}$ に対応するひずみ ϵ_{100} をひずみ速度・ひずみ曲線から求め、既に求めていた応力・ひずみ曲線から ϵ_{100} に対応する応力 σ_{100} を求める。Fig.4(a)のような実験曲線を多く求めておけば、多くのプロット点のある Fig.5 のような一定ひずみ速度の応力・ひずみ曲線が得られる。

Fig.6 は Fig.5 を得たのと同様の方法で、PMMA について

ひずみ速度 $100s^{-1}$ での、一定ひずみ速度の応力・ひずみ曲線である。この場合、工具・試験片間の接触面摩擦の影響を考えると、同一ひずみにおける応力値は、試験片高さが大きいほど小さくなると考えられるが、⁸⁾⁹⁾ Fig.6 では必ずしもその傾向を有してはいない。これは実験誤差による可能性もあるが、後述するように、PMMA の実験では緩衝ゴムのばね定数 K の適切な値からのずれの影響もあろう。

Fig.5 Mean stress-strain curves at constant strain-rates 80, 100, 120 (s^{-1}) for A2024 of 15mm in height.

Fig.6 Mean stress-strain curves for PMMA at constant strain-rate [$100(s^{-1})$] for various ratio of diameter to height.

Fig.7 Relation between D_0/h_0 and mean stress for various values of mean strain for A2024 when lubricated with grease at constant strain-rate $100(s^{-1})$.

4. 3 端面摩擦の影響を除くための外挿結果

横軸に試験片の高さに対する直径の比: D_0/h_0 をとり, 縦軸に平均応力をとって, ひずみをパラメータとして, 4.2 節の実験曲線をプロットしなおす^{8) 9)}. そして, $D_0/h_0=0$ における応力を直線外挿によって求め, 一軸応力状態における一定ひずみ速度応力・ひずみ曲線を与える応力値を決定できる.

Fig.7 に A2024 試験片について, ひずみをパラメータとした平均応力と直径/高さ (D_0/h_0) 比との関係を示している. 直線外挿により, 比 $D_0/h_0=0$ における応力, すなわち, 摩擦の影響のない応力が得られることを示している.

Fig.8 Effects of strain-rate on the uniaxial stress-strain curves for A2024.

Fig.9 Effects of strain-rate on the uniaxial stress-strain curves for PMMA.

4. 4 A2024 および PMMA の動的塑性曲線

Fig.8 及び Fig.9 に, A2024 及び PMMA の一軸応力状態におけるひずみ速度一定の簡易化落錘法により得た応力・ひずみ曲線を示す. また, 比較のために油圧式万能試験機を使用して, 接触面摩擦除去のための外挿法を組み込んだ, 準静的圧縮試験により得た一軸応力状態の応力・ひずみ曲線を示してある. Fig.8 (A2024) の準静的曲線のひずみ速度は, 約 $1.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であり, Fig.9 (PMMA) の準静的曲線のひずみ速度は約 $4.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であった.

また, 何れも本研究の方法で得た動的曲線のひずみ速度は各々, 80, 100, 120 s^{-1} である. 両図より, ひずみ速度が毎秒数十程度変化した位では, 応力・ひずみ曲線は殆どひずみ速度の影響を受けていない. しかし, 準静的試験から落錘試験へ, 換言すると, ひずみ速度の変化が 10^5 から 10^6 s^{-1} 程度変化すると, 材料によって顕著な違いが生じている.

Fig.8 の A2024 においては, ひずみ速度が 10^6 s^{-1} も増大しても, 応力あるいは応力・ひずみ曲線は殆ど変化しないことが明らかである.

一方, Fig.9 の PMMA においては, ひずみ速度が $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 程度増大すると, ひずみ 5% 時の応力は約 3 倍に変化している. すなわち, アクリルでは応力あるいは応力・ひずみ曲線のひずみ速度依存性が大きいといえる.

4. 5 考察

変位計や速度計を使用することなく, 動的応力・ひずみ曲線を定め得ることが分かった. しかし, 緩衝ゴムのばね定数 K が真に定数であるとはいえず, データ解析における繰り返し演算を必要とした. K 値の自動決定法については今後の課題であると考えている.

なお, A2024 については比較的容易に最適な K 値を決定することができたが, PMMA の場合には時間的な問題もあって, 適切な K 値を決定することが困難な場合もあった. Fig.4 の(a)と(b)とを比べても分かるように, A2024 に比べ PMMA の方が, データ解析結果から, 最終ひずみを定めることが困難であった. この種の現象は高分子によく見られるもので, さらに検討を要する.

5. 結 言

近年, 衝撃材料試験法として, ホプキンソン棒 (SHPB) 法が以前より多用されている¹¹⁾. この傾向は, 現在でも変わりはないようである. その理由の一つに, 工具ひずみの測定システムが荷重計に利用できることは勿論, 粒子速度計としても使えるというところにある.

一方, 落錘システムなどのように, 一回の実験で大きなひずみを与えることや, 実験場所が比較的小さくて済むなど, 捨てられない魅力をも有する試験法もある.

本研究において, 変位や速度を測定することなく, 運動方程式を数値的に解くという考えにより, 落錘法を簡易化することができた.

参 考 文 献

- 1) 松浦裕次: 機誌, **62**(1959), 1387-1391.
- 2) Slater, R.A.C., Johnson, W. & Aku, S.Y.: Int. J. Mech. Sci., **10**(1968), 169-186.
- 3) Samanta, S.K.: Int. J. Mech. Sci., **11**(1969), 433-453.
- 4) 上野拓・佐藤裕久: 2003 年度精密工東北支部講演, (2003), 301-302.
- 5) Choi, H.Y. & Chang, F.-K.: J. Compos. Mater., **26**-14(1992), 2134-2169.
- 6) Ujihashi, S., Matsumoto, H., Adachi, T. & Taga, K.: JSAE Review, **13**-3(1992), 77-79.
- 7) Sato, Y.: Advanced Technology of Plasticity 1993, Vol.II, (Wang, Z.R. and Yuxin, He eds.), (1993), 1343-1348, International Academic Publishers.
- 8) 佐藤裕久・竹山寿夫: 塑性と加工, **22**-249(1981), 1023-1029.
- 9) 佐藤裕久・竹山寿夫: 塑性と加工, **22**-251(1981), 1236-1243.
- 10) 例えば, 平田光穂・須田精二郎・竹本宣弘: パソコンによる数値計算, (1982), 83-97, 朝倉書店.
- 11) 佐藤裕久・竹山寿夫: 機講論, No.800-9(1980), 17-22.