発泡スチロールの衝撃による圧縮応力-ひずみ特性*

二 川 曉 美** 山 崎 真 治***

Dynamic Stress-Strain Properties of Styrofoams

by

Akemi FUTAKAWA and Shinji YAMASAKI

(Mitsubishi Electric Corporation, Central Research Laboratory, Amagasaki)

This paper presents the dynamic stress-strain properties of styrofoams. Two ballistic pendulums were used in this experiment. The specimens, which had been bonded on the end surface of the pendulum being impacted, were loaded by the impact pendulum. The acceleration-time curves induced in the impacted pendulum were measured. The dynamic stress and strain were calculated by integrating these acceleration-time curves numerically. The effects of the strain rates and the number of impact loadings on the dynamic properties of styrofoams were examined and the accuracy of the test result was also discussed. The results obtained are as follows:

- (1) The dynamic stress-strain properties of foamed plastics can be obtained with the accuracy of about 3 percent by this experimental method.
- (2) The strength and stiffness of styrofoams increase with increasing the strain rate up to about 20/sec, beyond which they start to decrease.
- (3) The stiffness of styrofoams is remarkably reduced by the first application of impact loading but does not change any more by its further successive applications.
- (4) At the strain rate of about 35~40/sec, styrofoams disintegrate in an explosive manner. Therefore, the styrofoams seem to have the critical deformation rate in the vicinity of this strain rate.

(Received May 1, 1972)

1 緒 言

プラスチック発泡体は機器や部材を振動や衝撃から絶縁する包装緩衝材料として広く用いられている。プラスチック発泡体に衝撃荷重が作用した場合、それは非常に複雑な変形挙動を示し、またその応力やひずみの外力に対する力学的応答も入力条件の相違によってかなり異なった様相を示す。したがって、プラスチック発泡体の衝撃荷重に対する動的特性を明らかにすることは、材料の基礎的特性を解明する観点で、また実用的には包装緩衝設計の観点で、種々の興味深い問題を含んでいる。

プラスチック発泡体の動的特性に関する研究は比較的少なく、わずかに S. J. Green¹⁾らのポリウレタンフォームの高速変形挙動に関する報告が散見されるにすぎない。とくに通常包装緩衝材料として広く用いられている発泡スチロールの動的特性に関する報告はほとんどないようである。

本研究では、上記の観点から、発泡スチロールに衝

撃荷重が作用した場合の動的圧縮応力-ひずみ特性を把握することを試みた。本稿では、まず二つの弾道形振子を用いた衝撃試験法の原理および圧縮応力とひずみの解析法について述べる。つぎに試料を端面に取り付けた被衝撃振子に生じる加速度変化の測定結果、およびこれより動的圧縮応力-ひずみ特性を解析し、この動的特性におよぼすひずみ速度や負荷の繰返し回数の影響について検討した結果を述べる。最後に本実験の精度について検討した結果を述べる。

2 実験方法の原理

本研究では、E. Volterra^{2,3)}らが報告している二つの弾道形振子による衝撃試験法を用いた。そこで以下に本実験法の原理および動的圧縮応力とひずみの解析法について述べる。

Fig. 1(a)は静止した被衝撃振子の端面に取り付けた試料に衝撃振子が速度 V で衝突した瞬間の状態を、またFig. 1(b)はその後時間 t を経過したときの両振子の位置をそれぞれ示したものである。本稿では、Fig. 1に示すように、試料に衝撃荷重を与える振子を衝撃振子、また試料を端面に取り付けて衝撃荷重を受ける振子を被衝撃振子と呼ぶことにする。Fig. 1に示すよう

* 原稿受理 昭和47年5月1日

** 正 会 員 三菱電機(株)中央研究所 尼崎市南清水字中野

*** 三菱電機(株)中央研究所 尼崎市南清水字中野

Fig. 1. Deformation of test specimen during interval of impact loading.

に、衝撃振子の質量を M_1 、被衝撃振子の質量を M_2 とし、また衝撃荷重を試料に負荷してから任意の時間 t が経過したときの両振子の位置を、Fig. 1 (a)に示す両振子の位置を基準として、運動方向に沿って測った距離 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$ で表わす。いま任意の時間 t における衝撃振子の被衝撃振子に対する相対的距離を $S(t)$ とすれば、これは

$$S(t) = X_1(t) - X_2(t) \quad (1)$$

で表わされる。

したがって、衝撃荷重の負荷前後における二つの振子の運動量保存関係と(1)式より、任意の時間 t における試料の変形の加速度は

$$\frac{d^2 S(t)}{dt^2} = -\frac{M_1 + M_2}{M_1} \frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} \quad (2)$$

で表わすことができる。

この結果から、被衝撃振子の加速度変化を実験的に求め、 $S(0)=0$ 、 $dS(0)/dt=V$ の初期条件のもとで、測定した加速度変化を用いて(2)式を2回数値積分すれば、試料の変形量 $S(t)$ が求まることになる。

つぎに、動的圧縮応力とひずみの解析法について述べる。試料の変形量 $S(t)$ が求まると、任意の時間 t におけるひずみ $\epsilon(t)$ は

$$\epsilon(t) = \frac{S(t)}{l_0} \quad (3)$$

で求まる。ただし l_0 は試料のもとの厚さである。

またこの時点で試料に生じる動的圧縮応力 $\sigma(t)$ は

$$\sigma(t) = \frac{M_2}{A} \frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} \quad (4)$$

で求まる。ただし A は試料の断面積である。

以上の手順で求めた任意の時間 t における動的圧縮応力 $\sigma(t)$ とひずみ $\epsilon(t)$ を対応させると、動的圧縮応力-ひずみ曲線上の1点が定まる。したがって、この操作を任意の各時間 t に対して繰り返すと、1本の動的圧縮応力-ひずみ曲線を求めることができる。

3 実験装置と実験方法

3・1 供試試料

供試材料は比重 0.013、厚さ 30 mm の発泡スチロール板で、これより 50φmm の円板状の試料を切り出

した。本研究ではこれらの試料を以下に述べる静的および動的圧縮試験に供した。

3・2 静的圧縮試験

動的圧縮応力-ひずみ特性と静的なそれとを比較するために、0.001/sec の定ひずみ速度で圧縮試験を行ない、供試試料の静的圧縮応力-ひずみ特性を調べた。

3・3 動的圧縮試験

3・3・1 実験装置 本研究に用いた実験装置の概略を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示すように、本実験装置の本体は水平に吊した二つの弾道形振子で構成した。両振子の直径は試料と同じ 50φmm とし、その長さは試料に最高80%の圧縮ひずみを生ぜしめることができるように 1 m とした。

Fig. 2. Schematic diagram of experimental equipment.

測定装置は被衝撃振子の中央部に取り付けられた抵抗線ひずみ計形加速度計、動ひずみ計、ブラウン管オシログラフおよびトリガ回路で構成した。加速度計には測定する加速度変化の周波数の10倍以上の固有振動数(375 Hz)を有するものを選定した。トリガ回路は近接スイッチおよびリレー回路で構成し、衝撃振子が試料に衝突する直前に近接スイッチより信号を取り出して、ブラウン管オシログラフを単掃引させた。

3・3・2 実験方法 Table I に本実験で選定した衝撃振子の落下高さを示す。また同表には衝撃振子が試料に衝突する速度 V 、およびこの速度を試料の厚さ l_0 で除して得られる初ひずみ速度 ϵ_0 も併記した。なお本実験では衝突速度 V は直接測定しなかった。これ

Table I. Test conditions.

Predetermined height h (cm)	Impact velocity V (cm/sec)	Initial strain rate ϵ_0 (1/sec)
1.5	54.2	18.1
3.0	76.7	25.6
4.5	93.9	31.3
6.0	109.0	36.1

は予備実験で速度測定を行なった結果、Table I に示す衝撃振子の落下高さを Fig. 2 に示すオートカセットメータで $\pm 0.01 \text{ mm}$ の精度範囲に設定すると、 $V = \sqrt{2gh}$ (g は重力の加速度) で求まる速度と約 1% の精度範囲で一致し、再現性も良好であったことによるものである。

実験では、まず衝撃振子を Table I に示す落下高さに設定し、つぎに発射装置により衝撃振子を自由落下させて、静止した被衝撃振子の端面に取り付けた試料に衝撃荷重を負荷し、このとき被衝撃振子に生じる加速度変化をブラウン管オシログラフで記録した。また衝撃荷重が繰返し作用した場合の動的圧縮応力-ひずみ特性の変化の状況を調べるために、衝撃振子の落下高さを 3.0 cm に保って同一試料に衝撃荷重を 2 ～ 3 回繰返し作用させて同様の実験を行なった。

4 実験結果

Fig. 3(a), (b) に初ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_0 = 18.1/\text{sec}$ と $\dot{\epsilon}_0 = 25.6/\text{sec}$ の場合の、また Fig. 4(a), (b) に初ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_0 = 25.6/\text{sec}$ に保って同一試料に衝撃荷重を 2 回ないし 3 回負荷した場合の被衝撃振子の加速度変化を測定した結果の一例を示す。

Fig. 3. Acceleration-time curves induced in impacted pendulum on initial strain rates.

Fig. 4. Acceleration-time curves induced in impacted pendulum on number of impact loading with 25.6/sec strain rate.

Fig. 3(a), (b) より、被衝撃振子に生じる加速度の最大値は初ひずみ速度の増加とともに増大することがわかる。また同一試料に同一初ひずみ速度で 2 回衝撃荷重を負荷した場合には、Fig. 3(b) と Fig. 4(a) を比較すれば明らかなように、被衝撃振子に生じる加速度変化の立ち上りは著しく低下し、また加速度の最大値は若干増大する傾向がみられる。しかし、さらに同一条件で 3 回衝撃荷重を作用させた場合には、Fig. 4(a), (b) から明らかなように、被衝撃振子に生じる加速度変化

は 2 回目のそれとそれほど大きな差異を生じないことがわかる。

5 検 討

5・1 動的圧縮応力-ひずみ特性の性質

Fig. 5 と Fig. 6 は、被衝撃振子に生じる加速度変化の測定結果および(2)～(4)式より求めた動的圧縮応力-ひずみ曲線である。以下にこの結果にもとづいて動的圧縮応力-ひずみ特性の性質について検討する。

Fig. 5. Stress-strain diagrams on initial strain rates.

Fig. 6. Stress-strain diagrams on repeated impact loadings.

5・1・1 初ひずみ速度の影響 Fig. 5 は初ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_0 = 18.1/\text{sec}$ から $\dot{\epsilon}_0 = 36.1/\text{sec}$ の範囲で求めた動的圧縮応力-ひずみ曲線である。初ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_0 = 25.6/\text{sec}$ までの範囲では、初ひずみ速度の増加とともに動的圧縮応力-ひずみ曲線の立ち上りは増大する。しかし、初ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_0 = 31.3/\text{sec}$ 以上では、初ひずみ速度が増加すると逆に動的圧縮応力-ひずみ曲線の立ち上りは低下する傾向がみられる。

5・1・2 衝撃荷重の負荷回数の影響 Fig. 6 は初ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_0 = 25.6/\text{sec}$ に保って、同一試料に衝撃荷重を 1 ～ 3 回負荷した場合の動的圧縮応力-ひずみ曲線である。衝撃荷重を 1 度作用させると試料に永久ひずみが生じるが、衝撃荷重の繰返し作用によって動的特性の変化する様子をは握し易くするために、同

図ではおのおのの衝撃荷重の負荷時点を基準にして、いずれも原点をそろえて整理した。

衝撃荷重を1度負荷すると、発泡スチロールを構成するセルに座屈や破壊が生じるため、Fig. 6 にみられるように、衝撃荷重を2回負荷した場合の動的圧縮応力-ひずみ曲線の立ち上りは1回目のそれに比較して著しく低下し、また試料に生じる圧縮応力およびひずみの最大値は増大する。しかし、衝撃荷重の負荷回数が3回目の動的圧縮応力-ひずみ曲線は衝撃荷重を2回負荷した場合のそれとほとんど差異がみられないので、この結果から3回目の衝撃荷重の負荷に伴って発泡スチロールを構成しているセルの座屈や破壊がそれほど進行していないことがわかる。

5・1・3 静的特性と動的特性の比較 Fig. 5の動的圧縮応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度が変化する状態で求めたものである。そこでつぎに静的特性と動的特性を比較するために、定ひずみ速度での動的圧縮応力-ひずみ曲線を求めるを試みる。

衝撃後任意の時間 t における試料の変形速度は、(2)式を1回数値積分すると求まるので、このときのひずみ速度 $\dot{\epsilon}(t)$ は

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{l_0} \frac{dS(t)}{dt} \quad (5)$$

で求まる。

したがって、任意の時間 t における動的圧縮応力 $\sigma(t)$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}(t)$ を対応させると、動的圧縮応力-ひずみ速度曲線上の1点が定まる。この操作を各時間 t に対して繰返すと、Fig. 7 に破線で示す動的圧縮応力-ひずみ速度曲線を得る。Fig. 7 の1本の破線は Fig. 5 の1本の動的圧縮応力-ひずみ曲線と対応している。この曲線上にひずみが10~60%の範囲で10%ごとに等ひずみ曲線を求めるとFig. 7 の実線のようになる。Fig. 7 より定ひずみ速度での動的圧縮応力-ひずみ曲線を求めた結果をFig. 8 に示す。Fig. 8 には0.001/sec の定ひずみ速度での静的圧縮応力-ひずみ

Fig. 7. Relationship between stress and strain rate.

Fig. 8. Stress-strain diagrams on strain rates.

曲線も破線で併記した。

Fig. 8で静的特性と動的特性を比較すると、ひずみが10~60%の範囲では、同一ひずみに対して動的圧縮応力は静的圧縮応力の約1.2~1.6倍になっていることがわかる。またひずみ速度が $\dot{\epsilon}=10/\text{sec}$ と $\dot{\epsilon}=20/\text{sec}$ に対する動的圧縮応力-ひずみ曲線はほとんど差異がないが、ひずみ速度が $\dot{\epsilon}=30/\text{sec}$ になると、動的圧縮応力-ひずみ曲線の立ち上りは若干低下する傾向がみられる。

5・1・4 限界のひずみ速度 つぎに発泡スチロールの変形に及ぼすひずみ速度の影響について検討することを試みる。

Fig. 9は圧縮応力をパラメータとしてFig. 7をひずみ速度とひずみの関係で書き直した結果である。Fig. 9よりひずみ速度が35~40/sec付近で発泡スチロールの変形が急激に増大することがわかる。このひずみ速度で試料に衝撃荷重が作用すると、試料は一樣に変形せず、破裂音を伴って飛散して破壊する現象がみられる。この結果から、このひずみ速度付近に供試発泡スチロールの限界のひずみ速度が存在し、このひずみ速度以上では供試発泡スチロールは緩衝材料として実用に供し得ないと考えられる。

Fig. 9. Relationship between strain rate and strain.

5・2 動的圧縮応力-ひずみ曲線の精度

本検討で求めた動的圧縮応力-ひずみ曲線の精度をエネルギー保存則の観点から検討することを試みる。

動的圧縮応力-ひずみ曲線とひずみ軸の間に囲まれる部分の面積は、試料の単位体積当たりの衝撃吸収エネルギーを表わすので、まずこの部分の面積を数値積分で求め、任意の時間 t までに試料全体が吸収したエネルギー Q_1 を求め、またこの時間 t において衝撃振子と被衝撃振子の有する運動エネルギーの和 Q_2 を求める。一方、衝撃振子が試料に衝突する直前に有していた運動エネルギー Q_0 を求める。Table II は $\dot{\epsilon}_0=25.6/\text{sec}$ の場合を例に、以上の手順により $(Q_1+Q_2-Q_0)/Q_0$ を求めた結果である。Table II より各時間 t についてこの値は約 3% 以下の範囲にばらついていることがわかる。したがって、本実験で求めた動的圧縮応力-ひずみ曲線の精度は約 3% 程度であると考えられる。この実験精度に大きな影響を及ぼす因子としては、圧縮応力とひずみの数値計算の過程で介入する作図および

プロットの読み取り誤差が考えられる。

6 結 論

二つの弾道形振子を用いた衝撃試験法で、発泡スチロールの動的圧縮応力-ひずみ特性を調べ、これにおよぼすひずみ速度や衝撃荷重の負荷回数の影響や本実験の精度について検討した。本研究で得られた結果を要約すればつぎのようになる。

(1) 本検討で適用した二つの弾道形振子による衝撃試験法で、プラスチック発泡体の動的圧縮応力-ひずみ特性を約 3% の精度で求めることができる。

(2) 供試発泡スチロールは 20/sec 以下のひずみ速度範囲では、ひずみ速度の増加とともにその強度および剛性は増大する傾向がみられるが、それ以上のひずみ速度範囲では逆にそれらは低下する。

(3) 供試発泡スチロールに衝撃荷重を 1 度負荷するとその剛性は著しく低下するが、さらに同一試料に同一エネルギーの衝撃荷重を 2 ～ 3 回繰返して作用させた場合にはその剛性はほとんど変化しない。

(4) 35 ～ 40/sec 付近のひずみ速度で衝撃荷重を負荷すると、供試発泡スチロールは急激な変形を伴って破壊し、このひずみ速度付近に実用的な限界のひずみ速度が存在すると考えられる。

(昭和42年9月8日 第11回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Green, S. J., F. L. Schierloh, R. D. Perkins, and S. G. Babcock, *Experimental Mechanics*, 9, 3, 103 (1969).
- 2) Volterra, E., R. A. Eubanks, and D. Muster, *SESA Proceedings*, 13, 1, 85 (1955).
- 3) Volterra, E., and C. S. Barton, *SESA Proceedings*, 16, 1, 157 (1958).

Table II. Comparison of total energy during interval of impact loading with initial kinetic energy.

Time t (msec)	Total energy Q_1+Q_2 (kg cm)	$\frac{(Q_1+Q_2)-Q_0}{Q_0} \times 100$ (%)
0	101.9	—
4	100.0	1.96
8	101.9	0.0
12	103.3	-1.27
16	101.1	0.88
20	99.6	2.35
24	100.8	1.18
28	100.7	1.28