

包装用緩衝材の動的及び静的特性評価

中嶋隆勝* 寺岸義春* 高田利夫* 野上良亮*

Evaluation by the Dynamic Property and the Static Property in Package Cushioning Materials.

Takamasa NAKAJIMA*, Yoshiharu TERAGISHI*, Toshio TAKADA*, Ryosuke NOGAMI*

The reduction of amounts of cushioning materials used for packaging is important in the point of view of reducing the amount of waste matters as well as reducing the packaging cost when we consider about the influence on the earth environment. But, then the accurate cushioning design which is based on accurate evaluation by cushioning properties must be performed.

In this study, at first we made the graphs of stress-strain curves by means of drop shock test and compression test. Then, we discussed about the difference between both properties and compared their accuracy. The main results obtained are as follows.

- (1) Noises on the signals of displacement measured by drop shock tests were cut by the digital-filter.
- (2) The shape of stress-strain curves were not affected by their drop height and their mass of weight.
- (3) There was obvious differences between dynamic stress and static stress. It was considered that the differences resulted from viscosity in materials.
- (4) It was clarified that dynamic evaluation is more accurate than static evaluation in terms of the accuracy of estimate as a result of predicting the maximum acceleration by means of the dynamic property and the static property.

Keywords : Package, Cushion design, Drop shock, Viscosity, Stress-strain curve, Cushioning property

包装用緩衝材の使用量削減は、地球環境に対する影響を考えるとそのコストだけでなくその総廃棄量を削減するという意味合いからも重要である。しかし、使用量を削減するためには正確な緩衝特性を把握した上での緩衝設計が必要である。本研究では、落下衝撃試験、圧縮試験によって応力-ひずみ線図を作成し、両特性の差及び精度について比較検討した。その結果わかったことを以下に示す。

- (1) 落下衝撃試験で計測された変位信号上にノイズが存在したが、デジタルフィルタによって取り除くことができた。
- (2) 動的応力-ひずみ曲線は落下高さ、重錘質量にほとんど影響されなかった。
- (3) 動的応力と静的応力に明らかな差が存在した。実験結果からその差は材料の粘性によるものだと考えられる。
- (4) 動的、静的特性を用いて重錘に発生する最大加速度の予測を行った結果、動的特性の方が精度に関して優れていることがわかった。

キーワード : 包装、緩衝設計、落下衝撃、粘性、応力-ひずみ曲線、緩衝特性

* 大阪府立産業技術総合研究所 (〒550 大阪府大阪市西区江之子島2-1-53) : Osaka Prefectural Industrial Technology Research Institute, 2-1-53, Enokosima, Nishi-ku, Osaka-shi, Osaka, 550

1. 緒 言

包装用緩衝材の使用量削減は、地球環境に対する影響を考えるとそのコストだけでなくその総廃棄量を削減するという意味合いからも重要であり、今後、改善していかねばならない課題である。現在、発泡プラスチックの再利用、紙製緩衝材の使用などの環境対策は盛んに試みられているが、その使用量の削減は包装貨物の耐衝撃強度を低下させることにつながりあまり積極的には取り組めない状況である。しかし、緩衝材の使用量を必要最小限に抑え、総廃棄量を減らすことはすべての材料に共通する根本的な課題である。技術的に見た場合、輸送環境の調査、製品強度の測定及び緩衝材の緩衝特性の把握を正確に行い、実際の包装形態に適した緩衝包装設計を精度よく行えば、これまで以上に信頼性の高い包装が十分に緩衝材の使用量を抑えた形態で実現できるはずである。

著者らはこれまでの研究において、包装仕様によって発生する制約条件を考慮した上で包装材料費、緩衝材使用量を最小化する設計手法の開発^{1) 2)}、発泡ポリエチレンの発泡状態のモデル化による、静的圧縮特性の評価³⁾などを行ってきた。本研究では、緩衝材の緩衝特性を正確かつ簡単に把握することを目的として、まず、落下衝撃試験、圧縮試験（以下、それぞれ動的試験、静的試験と記す）によって応力-ひずみ曲線を作成し、次に両特性の差及び精度について比較検討した。

2. 実 験

2.1 実験装置

動的試験では吉田精機製の緩衝材用落下衝撃試験機（CST-320S）を用いて緩衝材の動的圧縮特性を測定した。本試験機は、Fig. 1に示すようにしっかりとした基礎で固定された定盤の上に緩衝材を置き、上から重錘が落下し衝突する試験機となっている。また、そのときの重錘の変位と加速度が変位計、加速度計によって測定できるようになっている。

静的試験では島津オートグラフAG50kNを用い、圧縮速度を一定とし、静的圧縮特性を測定した。圧縮試験機は、Fig. 2に示すように制御機によって圧縮速度が制御され、そのときの変位と荷重がコンピュータに取り込めるようになっている。

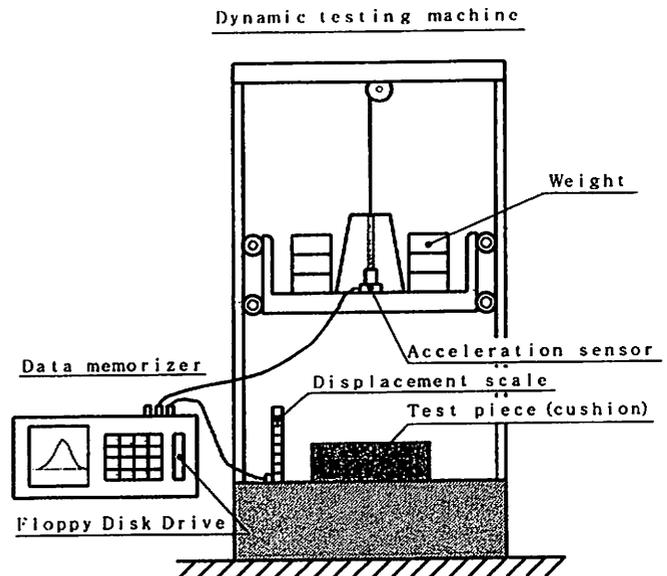


Fig. 1 Shock testing system

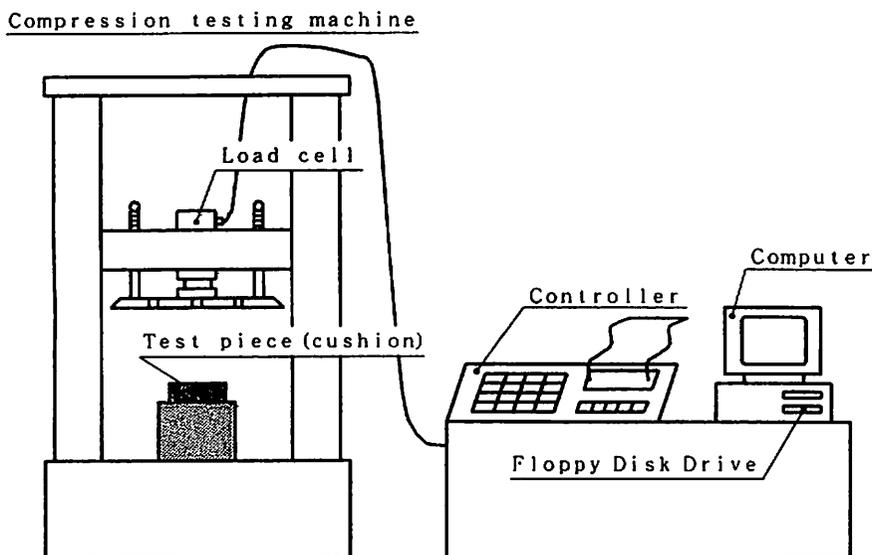


Fig. 2 Compression testing system

2.2 計測データのノイズの除去

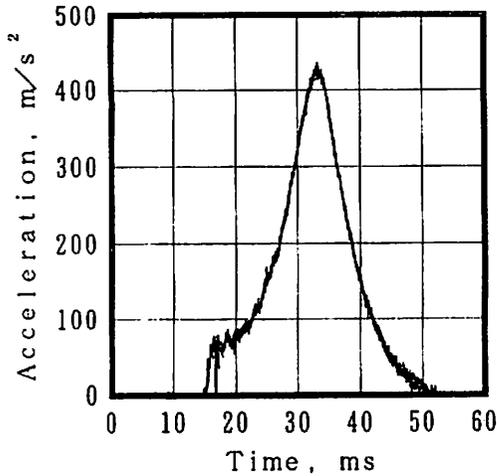
加速度計及び変位計からの信号（以下、加速度波、変位波と記す）はフィルタをかけていない状態のまま、 $10\ \mu\text{s}$ のサンプリングタイムで記録計に入力するようにした。これは、あとで加速度波、変位波に含まれているノイズの状態を確認するためであり、その結果を Fig. 3 (a),(b) に示す。

動的試験によって測定された加速度波、変位波には、Fig. 3 からわかるようにノイズが多く含まれている。このような状態のまま、緩衝設計のための緩衝特性として用いた場合、多くの誤差を発生する可能性があり、適当なフィルタをかけノイズをうまく除去する必要がある。ここでは、本ノイズの特性に合ったフィルタリングができるように、デジタルフィルタ（演算処理によるノイズの除去法）を作成し、ノイズの除去を行った。

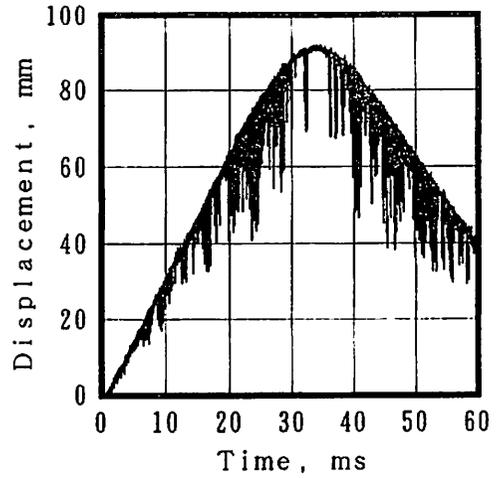
本試験に使用した加速度計の応答範囲が約 2000Hz であることから、加速度波に現れた

ノイズは単純移動平均法⁴⁾ によって作成した 2000Hz のローパスフィルタを用いて除去した。一方、変位波について見ると、基本波形から負の方向に微少な時間間隔でノイズが発生している。この場合、通常のフィルタを用いたノイズの除去では、本来の曲線を取り出すことができず、ノイズに大きく影響されたものになってしまう。そのため、ここでは、移動平均法を本ノイズの特徴に合うように改良し、ある時間間隔（ここでは、 2000Hz のフィルタとするため 0.5ms とした）にサンプリングしたデータの中から最大のデータをその時間間隔の中心に位置する時刻のデータとして採用する操作を逐次時間系列に沿って行う独自のデジタルフィルタを作成し、変位波形のノイズの除去を行った。Fig. 4 (a),(b) に示す加速度波及び変位波はノイズの除去を行った後のものである。

静的試験では計測された荷重、変位どちらにも目立ったノイズは存在せず、静的応力-

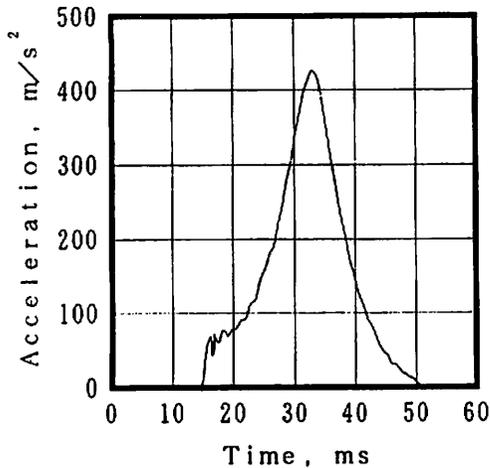


(a) Acceleration wave

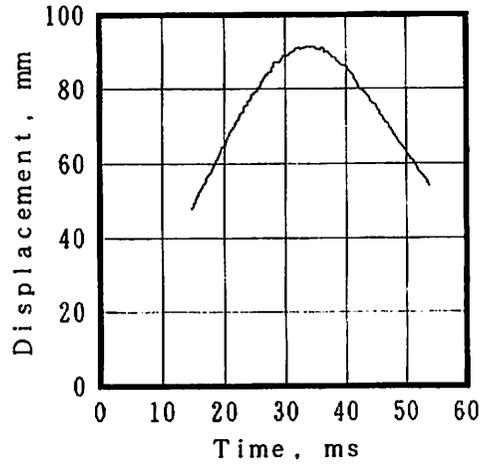


(b) Displacement wave

Fig. 3 Results of dynamic test without passing through any filters.



(a) Acceleration wave



(b) Displacement wave

Fig. 4 Results of dynamic test noises of which are cut by the filter.

ひずみ曲線も十分滑らかな曲線となった。このため、静的試験結果については全くノイズの除去は行わなかった。

2.3 応力、ひずみの算出

落下衝撃試験機の重錘に発生する加速度は緩衝材の反力によって生じるものである。このことと、ニュートンの運動方程式（力＝質量×加速度）から、緩衝材に加えられる荷重

は重錘の質量に重錘に発生した加速度を掛け合わせることによって計算することができる。これより、動的応力は荷重を緩衝材面積で割ることによって求められる。

衝撃試験機に備え付けの変位計によって、変化していく緩衝材の厚さが計測できる。このため、ひずみは緩衝材の初期厚さで厚さの変形量を割ることによって算出することができる。

静的試験では直接、荷重と緩衝材の変形量を計測できるようになっている。このため、静的応力は荷重を緩衝材面積で割り、ひずみは緩衝材の初期厚さで割ることによって算出することができる。

2.4 試料と試験条件

Table 1 に示すように、材質、成形方法、発泡倍率の異なる5種類の発泡体を実験試料として用いた。ただし、試料A、D、Eについては、前処置を行った試料も作成し、それぞれ、A'、D'、E'として、その他の試料と区別した。前処置は、24℃65%RHの雰囲気中で、100kgの静荷重を24時間加え続け、その後十分なひずみ回復を行うこととした。試料の形状は、底面が正方形の直方体とし、その1辺の長さを100mm、厚みを50mmとした。

Table 1 Material of sample

| Symbol | Material | Expansion ratio | 100kg, 24hours |
|--------|-------------------|-----------------|----------------|
| A | | ×25 | — |
| A' | Polyethylene foam | ×25 | ○ |
| B | | ×15 | — |
| C | | ×60 | — |
| D | Polystyrene foam | ×46 | — |
| D' | | ×46 | ○ |
| E | Polyethylene foam | ×25 | — |
| E' | | ×25 | ○ |

落下高さ、重錘質量を変化させた試験条件をH1～H4、M1～M5とし、その詳細をTable 2に示した。試料Aに対して全試験条件での動的試験を行った。

作成した全種類の試料に対して動的試験、静的試験を行った。このとき、試料B以外は

試験条件M2で、試料Bについては試験条件M3で動的試験を行った。また、静的試験ではすべて圧縮速度を100mm/minとし、ひずみがおおよそ90%に達するまでの圧縮特性を測定した。

Table 2 Test condition

| Symbol | Drop height (cm) | Mass of weight (kg) |
|--------|------------------|---------------------|
| H1 | 20 | |
| H2 | 40 | 11.6 |
| H3 | 60 | |
| H4 | 80 | |
| M1 | | |
| M2 | | 15.6 |
| M3 | 60 | 19.6 |
| M4 | | 23.6 |
| M5 | | 27.6 |

3. 結果

3.1 動的応力-ひずみ曲線

落下高さを一定として、重錘の質量を変化させたときの応力-ひずみ曲線をFig. 5に示す。この場合、落下高さが一定であるため、重錘が緩衝材と衝突するときの速度が一定となる。そのため、発生する粘性力もほとんど同じとなり、応力-ひずみ曲線は重錘の質量が変化してもほとんど同一のものとなると考えられる。Fig. 5を見るとやはり最大ひずみの値は異なるがM1からM5まで同じ軌跡を通過してひずみが増加している。ここで最大ひずみの値が異なるのは、重錘質量の違いから吸収しなければならないエネルギーがさまざまな値となるためである。

Fig. 6は重錘の質量を一定とし、落下高さを変えた場合の応力-ひずみ曲線である。

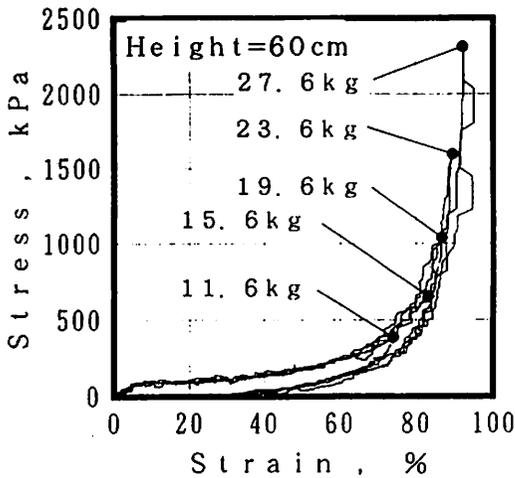


Fig. 5 Relationship between dynamic stress-strain curve and mass of weight.

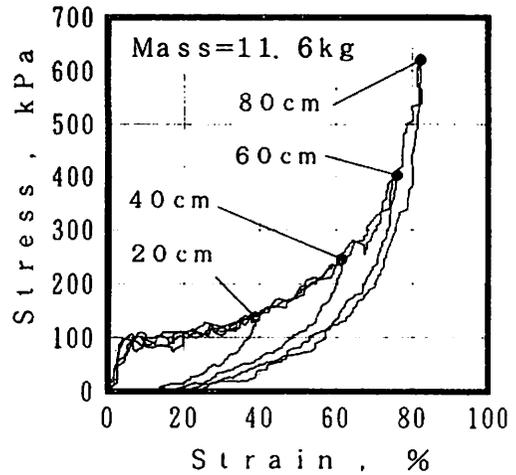


Fig. 6 Relationship between dynamic stress-strain curve and drop height.

Fig. 5の場合と異なり、落下高さすなわち衝突速度が異なるため、緩衝材の持つ粘性が応力に影響する割合にも差が現れてくるはずである。しかし、Fig. 6を見るとFig. 5と同様に同じ軌跡を描いてひずみが増加している。落下高さの範囲20~80cmを緩衝材のひずみ速度に換算すると $0.04\sim 0.08\text{ms}^{-1}$ である。この範囲では動的応力に明白な差が現れないのではないかと考えられる。これらより、大きなひずみを生ずる試験条件で動的試験を行えば、落下高さ、重錘の質量を変えなくても、緩衝材の緩衝特性が把握できることがわかる。

3.2 動的、静的応力-ひずみ曲線

供試した全種類の試料に対して動的試験、静的試験を行った。それらの結果をFig. 7に示す。試料Aの応力-ひずみ曲線について見ると、2つの曲線は似通った形状となっているが、Fig. 5、Fig. 6での曲線の一致に比べると比較的大きな差が存在する。特にひずみが

10%~50%の範囲のあたりでその差が顕著である。その他の多くの試料についても同様の傾向が存在した。

次に曲線の滑らかさについて注目してみると、静的応力-ひずみ曲線にはA/D変換によって生じる小さな階段状になっている部分が存在するが、あまり目立った曲線のみだれは存在しない。一方、動的応力-ひずみ曲線では、大きな曲線のみだれが存在する。これは加速度波、変位波上のノイズがフィルタリングの後なお存在するために起きたものと考えられる。

4. 考 察

動的試験と静的試験とで発生する応力に差が認められた。この要因として試験時の室温の差、緩衝材が持つ粘性の影響、動的弾性率と静的弾性率の違い、測定器の誤差などが考えられる。4.1、4.2では、緩衝材の粘性が応力の差に影響していると仮定し、実験結果が

らその仮定の妥当性について検討した。また、4.3では、動的、静的両特性を用いて、重錘が緩衝材に衝突したときに重錘に発生する加速度の最大値を予測し、実験結果と比較検討した。

4.1 粘性の応力-ひずみ曲線に与える影響

動的、静的試験によって得られた応力-ひずみ曲線 (Fig. 7を参照) について見ると、ひずみが10%~50%のあたりでは、ほとんどの試料について明らかな応力の差が存在するが、ひずみが70%~80%のあたりでは、静的応力と動的応力が多少ずれている結果も存在するがその他は大體一致している。このことは、緩衝材が持つ粘性が、動的応力と静的応力の差にある程度影響していると考えられることによつてうまく説明することができる。

ひずみ速度が大きいほど粘性力は大きくなる。動的試験では、重錘が緩衝材に衝突する瞬間にひずみ速度が最大となり、その後は緩衝材によつて重錘が持つ運動エネルギーが吸収されるとともに減少していく。すなわち、応力-ひずみ曲線を考えた場合、ひずみが小さいほど粘性力は大きく、ひずみが大きくなるにしたがって重錘の速度は減少し粘性力はなくなっていく。そのため、応力-ひずみ曲線では、実験結果のように低ひずみでは動的応力と静的応力の差が大きく、ひずみが最大になるにしたがって動的応力と静的応力の差が小さくなる。

4.2 応力とひずみの位相差から見た粘性の効果

粘性の高い緩衝材ほど動的応力と静的応力に大きな差が生じる。また、粘性の高い材料

では、動的圧縮を行った場合、応力とひずみの位相に大きな差が生じる。すなわち、応力とひずみの位相差と動的応力と静的応力の差の間に正の相関関係が存在するはずである。このことを実験に用いたすべての試料について調べた。

加速度波の周期を T とすれば重錘が緩衝材に衝突してから最大ひずみに達する時間は $T/4$ となる。また、加速度が最大となった時点から変位が最大となるまでの時間的ズレを ΔT (Fig. 8を参照) とすると、加速度波と変位波の位相差は応力とひずみの位相差 δ に等しく次式で求まる。

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$$

また、動的応力と静的応力の差 $\Delta\sigma$ は静的応力 σ で無次元化し、動的応力、静的応力はともにひずみが40%の時の値とした。

δ と $\Delta\sigma/\sigma$ の相関図をFig. 9に示す。その結果、 δ と $\Delta\sigma/\sigma$ の間に正の相関関係 (相関係数 $r = 0.867$) が存在することがわかった。

以上、4.1及び4.2より粘性体の持つ特徴的な現象を実験結果から確認することができた。このことから、動的応力と静的応力の差には緩衝材の粘性によるものがある程度影響していると考えられる。

4.3 発生する最大加速度の予測

動的試験と静的試験ではその圧縮速度の違いによつて発生応力に差が生じることがわかった。これは、動的評価方法と静的評価方法とではその予測精度に差があることを意味する。ここでは、動的応力-ひずみ曲線、静的応力-ひずみ曲線を用いて動的試験時の重錘

包装用緩衝材の動的及び静的特性評価

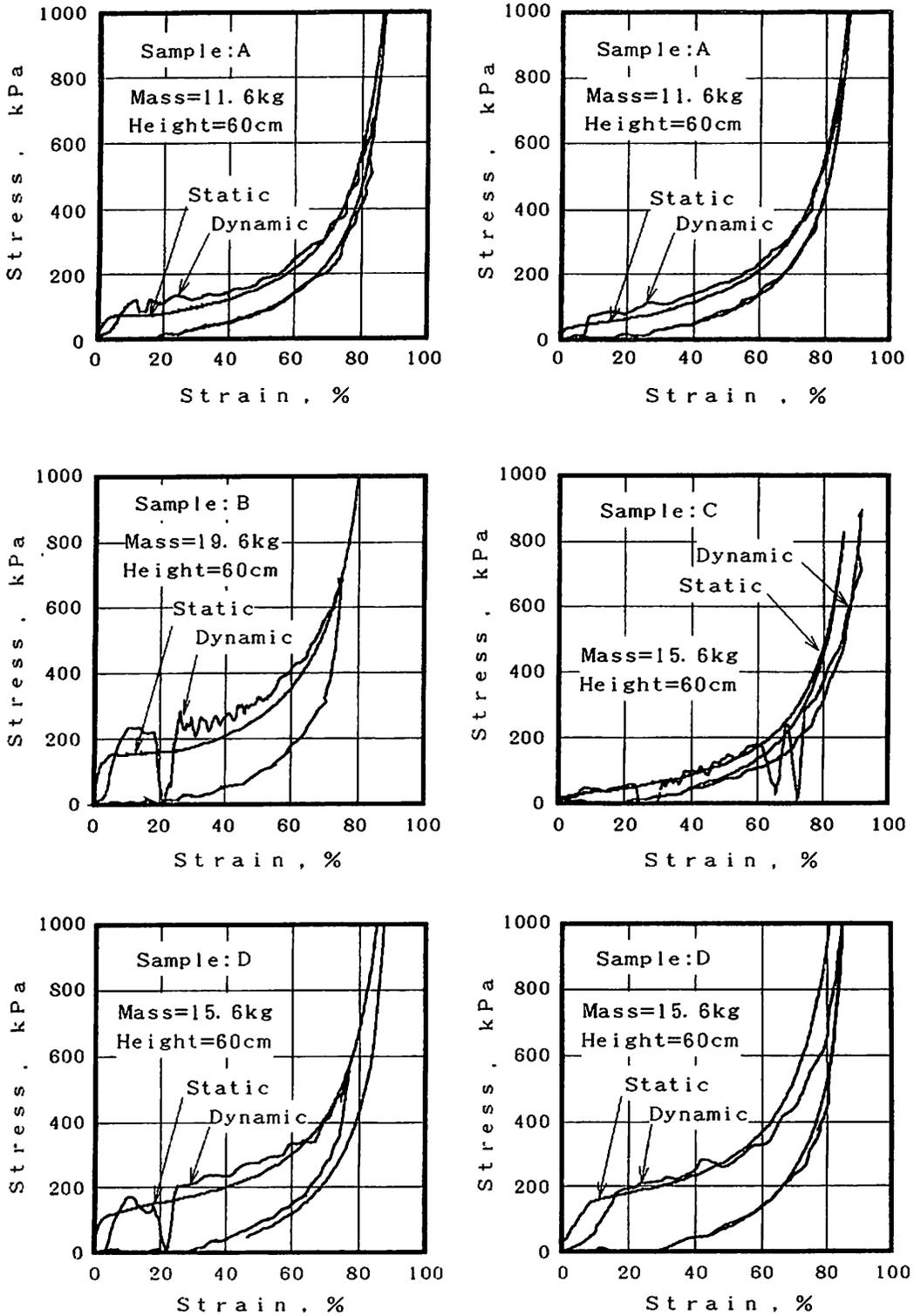


Fig. 7 Dynamic stress-strain curve and static stress-strain curve.

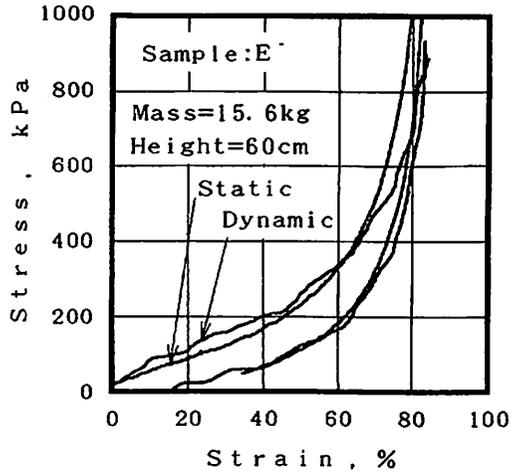
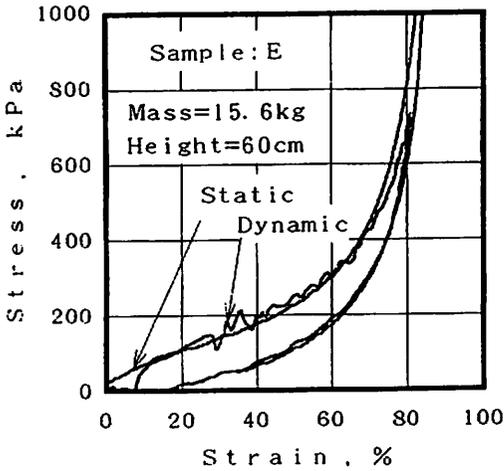


Fig. 7 Dynamic stress-strain curve and static stress-strain curve.

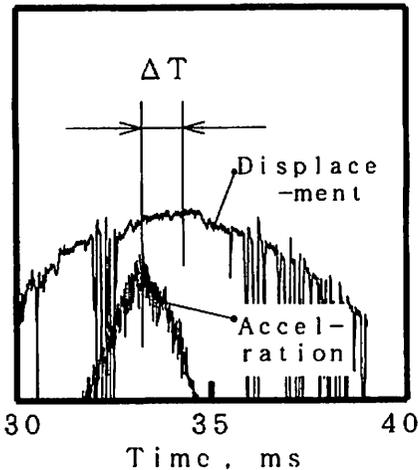


Fig. 8 Time lag between the peak of acceleration wave and that of displacement wave.

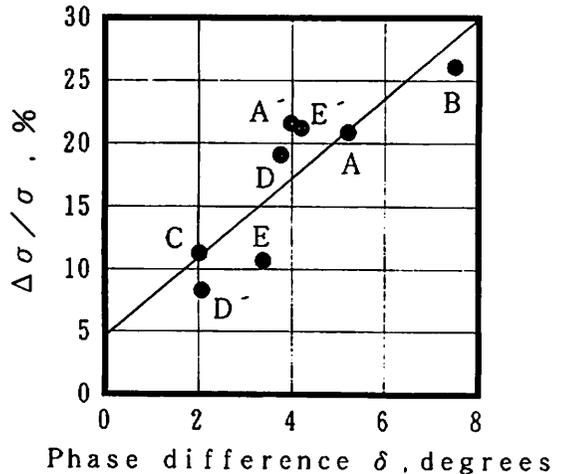


Fig. 9 Mutual relation between phase difference δ and $\Delta\sigma/\sigma$.

に発生する加速度の最大値の予測を実際に行い、予測精度の違いを確認する。その結果を Fig. 10、Fig. 11 に示す。

ここで、Fig. 10 は試験条件 H1~H4 に対して行った予測結果であり、Fig. 11 は試験条件 M1~M4 に対して行った予測結果である。ただし、試験条件 M3、M4 では、落下の衝撃エネルギーが静的応力-ひずみ曲線のひずみの範囲を越えるため、動的評価のみを行うこと

にした。

Fig. 10、Fig. 11 より、最大加速度の予測だけでなく最大ひずみの予測まで動的評価の方がよい精度で予測できることが確認できた。これは、静的応力-ひずみ曲線ではひずみ速度による粘性力の分応力が低く見積もられるため落下衝撃エネルギーを吸収するのにより多くのひずみが必要となる。このため、最大ひずみが実際以上に大きく見積もられ、その

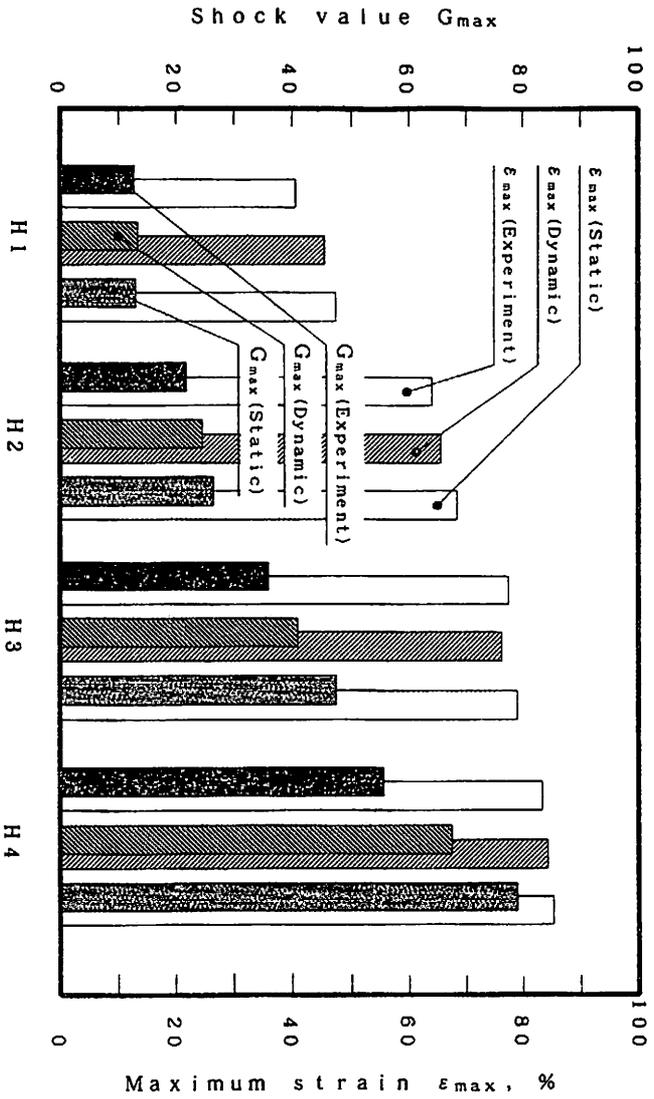


Fig 10 Comparison between dynamic evaluation and static evaluation on the test conditions H1~H4.

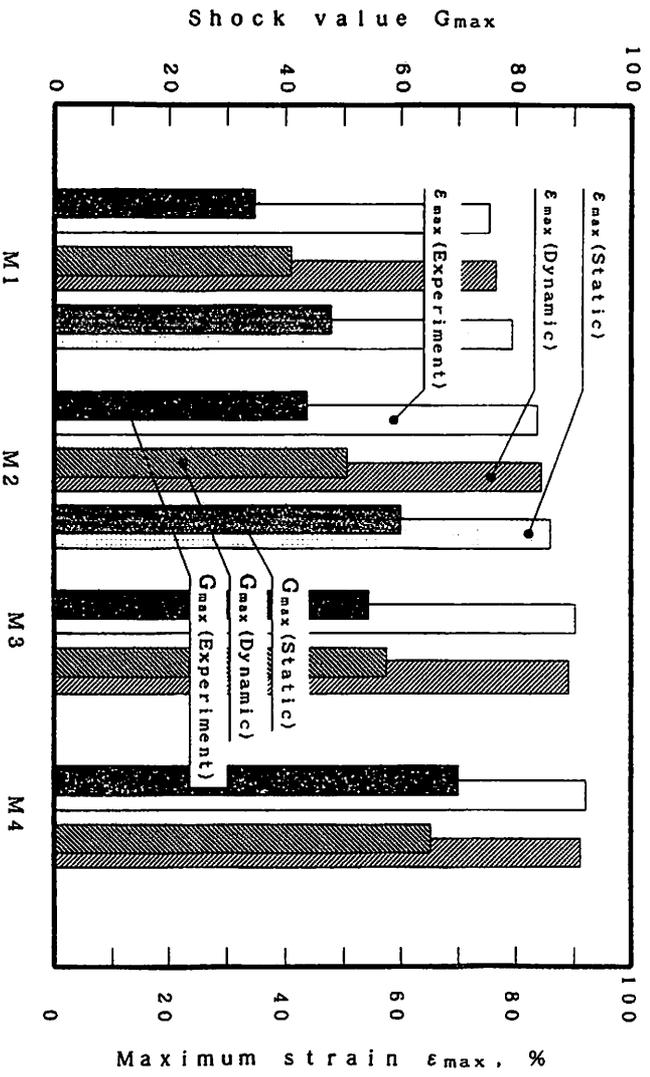


Fig 11 Comparison between dynamic evaluation and static evaluation on the test conditions M1~M4.

結果、最大加速度も大きく見積もられてしまうのだと考えられる。

また、ほとんどすべての試験条件において、実験による最大加速度が動的及び静的予測よりも小さな値となっている。この理由として、重錘が落下する際の摩擦などによる落下エネルギーの損失などが考えられる。

5. 結 論

動的試験、静的試験によって包装用緩衝材の動的、静的特性評価を行い、両特性の比較検討を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 動的試験を行ったときに変位波に含まれるノイズは、主に基本波形に対して負の方向に延びており、移動平均法を改良したデジタルフィルタによって取り除くことができた。しかし、今後より精度の高い測定を行うためには、ノイズの原因を分析してあまりノイズが発生しないような試験方法を検討する必要がある。

(2) 落下高さ、重錘の質量を変えることによって条件を数種類設定し、動的応力-ひずみ曲線を作成した。その結果、ひずみの増加時、すべての曲線がほぼ同一の軌跡を描いた。これは動的応力-ひずみ曲線の形状が落下高さ、重錘の質量にはあまり影響されないということを意味する。このことから、動的特性のデータベースを作成する際、さまざまな落下高さ、重錘の質量に対して試験を行わなくても、落下高さと重錘質量を適当に1条件設定し、動的試験を行うだけで必要な動的特性が得られることがわかる。

(3) 動的応力と静的応力を比較した結果、衝

突の前半での応力の差は大きい、衝突後半での応力の差は小さいという傾向が認められた。また、応力とひずみの位相差 δ と、ひずみが40%での動的応力と静的応力の差の静的応力に対する割合 $\Delta\sigma/\sigma$ との間に、正の相関関係(相関係数 $r=0.867$)が存在することがわかった。これらの結果から、動的試験による応力-ひずみ曲線と、静的試験による応力-ひずみ曲線の間に生じた応力の差には緩衝材の粘性による影響が一部存在していると考えることができる。

(4) 動的特性及び静的特性を用いて、実際の落下によって発生する最大加速度を予測した結果、動的特性の方がよい精度で予測できることがわかった。

謝 辞

緩衝材用落下衝撃試験機の使用に際し、親切にご指導頂いた三洋電機株式会社商品安全センター包装物流課高岡明男氏に感謝の意を表します。

<文 献>

- 1) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、日本包装技術協会、第29回全日本包装技術研究大会要旨集、p.158 (1991)
- 2) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、工業技術連絡会議製品科学連合部会、第24回包装研究発表会要旨、p.78 (1992)
- 3) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、材料、41 (460)、28 (1992)
- 4) 南茂夫、“科学計測のための波形データ処理”、CQ出版社、p.88

(原稿受付 1992年12月24日)

(審査受理 1993年4月6日)