発泡紙の圧縮変形におけるひずみ速度依存性と吸収エネルギー*

小林 秀 敏^{*1}, 臺丸谷 政志^{*1}, 田 中 健 一^{*2}

Strain-Rate Dependence and Absorbed Energy in Compressive Deformation of Paper Foam Board

Hidetoshi KOBAYASHI^{*3}, Masashi DAIMARUYA and Ken-ichi TANAKA^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, Muroran Institute of Technology,
27-1 Mizumoto, Muroran-shi, Hokkaido, 050-8585 Japan

In this study, the effect of loading rate on the strength and the absorbed energy of paper foam board was examined by a series of dynamic and quasi-static compression tests. For comparison, polystyrene foam board was also tested. In dynamic compression tests, a polyvinyl chloride (PVC) tube instead of an ordinary metal bar was used for the measurements of the load applied to the specimens, in order to relieve the impedance mismatch between stress bars and specimens. The absorbed energy up to a strain of 50% in compression tests of paper foam board is about 1.5 times greater than that of polystyrene foam board. It was also found that the absorbed energy obtained from dynamic tests for paper foam boards was about twice comparing with the results at quasi-static rates.

Key Words: Stress Wave, Impact Strength, Material Testing, Anisotropy, Paper Foam Board, Polyvinyl Chloride Tube, Strain-Rate Dependence, Absorbed Energy

1. 緒 言

包装用材料や食料品の容器・箱などには、従来、保温性や加工性等を考慮して発泡スチロール材が多用されていたが、廃棄された際の環境への負荷が非常に大きく、近年国際的に、有害なゴミ問題として表面化してきている。この対策として、日本では、2000年に容器包装リサイクル法が改正され、プラスチック製の容器や包装材もリサイクルの対象になった。これに伴い、発泡スチロールの使い捨てが抑制されるとともに、環境負荷の少ない素材に対する要求が高まってきている。そこで、脚光を浴びた素材が古紙である。日本における古紙のリサイクル率は約60%とかなり高く、森林資源の有効利用の観点からも古紙の利用は極めて重要である。また、生分解性があるため埋め立ても可能で、焼却しても環境にやさしいという特長がある。

紙材は水分の影響を顕著に受けるため、それを考慮した研究も多く、例えば、浸漬セルロースマットの圧縮性に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾や、クラフト紙の圧縮強

さに及ぼす吸脱水の影響に関する研究⁽³⁾が報告されている。また、緩衝材や補強材としての利用を目的に、ポリエチレンを用いた古紙の有効利用に関する研究⁽⁴⁾なども報告されている。近年では、耐水性を有する段ボール紙が開発され⁽⁵⁾、これまで発泡スチロールが独占市場であった生鮮食料品の容器にも、普及し始めている。

このように、紙は、段ボールやハニカムコア⁽⁶⁾などに加工されて構造材料として用いられるケースが多いが、紙そのものだけでは、発泡スチロールのようなクッション性に富む包装用緩衝材を成形することは困難である。そこで、抄紙時に添加剤を混入し発泡化する手法が考案され、一種の複合材である発泡紙(ペーパーフォームボード)が開発された⁽⁵⁾。発泡紙は、紙の繊維間に多数の微細なアクリル系の発泡粒子を吹き込んだ新素材であり、強度や衝撃吸収エネルギー等の機械的性質は未解明である。

本研究では、この発泡紙を緩衝材として利用するための基礎研究として、このボードと、比較のため従来の発泡スチロール材であるポリスチレンボードの2種類の材料について、引張試験を行い、それぞれの機械的性質を調べた。また、準静的圧縮試験および塩化ビ

* 原稿受付 2002年2月22日。

^{*1} 正員, 室蘭工業大学工学部(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)。^{*2} 室蘭工業大学大学院。

E-mail: kobayasi@mmm.muroran-it.ac.jp

ニル管を出力棒として用いた衝撃圧縮試験を行い、それぞれの材料の圧縮変形における荷重-変位挙動、吸収エネルギー等を求め、これらに及ぼす負荷速度の影響について検討した。

2. 実験

2.1 試験材料 本研究には、厚さが共に約 2 mm の板状の発泡紙（王子製紙（株）製）と、発泡スチロールを用いた。発泡紙板から円盤を打ち抜き、それを板厚方向に引張荷重をかけ破断させたときの破断面の SEM 画像を図 1(a) に示す。発泡紙は、パルプ繊維内に直径約 10 μm のアクリル系の発泡粒子を抄き込み、イソブタンを主成分とするガスで発泡させたものであり、この図から、直径約 50 μm の発泡粒子が多数存在していることがわかる。一方、発泡スチロール板の表面の SEM 画像を図 1(b) に示す。この図から発泡スチロール板は、長さが約 400 μm 、幅が約 150 μm の楕円体のセルで構成されており、異方性を有することがわかる。そこで、このセルの長軸方向を L-方向、それに垂直な方向を W-方向とする。また、発泡紙板についても、ボード表面の目視によりパルプ繊維の並んでいる方向を L-方向、それに垂直な方向を W-方向として、両ボードの異方性の影響についても検討した。

Fig.1 A break section of (a) paper foam board and a surface of (b) polystyrene foam board.

2.2 引張試験 引張試験に用いた試験片形状を図 2 に示す。L-方向および W-方向の引張試験片は、試験部が 10 $\times$ 20 mm の短冊状試験片であり、板厚方向 (T-方向) の引張試験片は、直径 23 mm、厚さ 2 mm の円盤試験片である。L-方向および W-方向の引張試験は、図 2(a) の斜線部を万能材料試験機 (INSTRON, model 5566) のチャックで挟み、T-方向の引張試験は、試験片と同一直径の試験治具に接着し、その治具をチャックで挟んで、室温で試験した。ひずみ速度はいずれも、 $5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ である。

Fig.2 Specimens used for (a) L- and W-direction tensile tests, (b) T-direction tensile tests and (c) dynamic and quasi-static compression tests.

2.3 準静的圧縮試験 準静的圧縮試験に用いた試験片の形状は、図 2(c) に示すように、試験片の端面拘束の影響を抑え、変位の測定精度を向上させるために、5 枚重ねて使用した。準静的圧縮試験は万能材料試験機に圧縮試験用の治具を取り付け、 5×10^{-4} 、 7×10^{-3} 、 $1 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ の 3 つのひずみ速度で行った。試験片の荷重と変位は試験機からの出力（ロードセルの出力とクロスヘッド変位の出力）を用い、初期断面積、初期厚さから公称応力、公称ひずみを算出した。

2.4 衝撃圧縮試験 衝撃圧縮試験には、図 3 に示すように、高圧空気で加速されたフランジ付きの衝撃棒が、応力棒の片端に取り付けられた試験片に衝突する方式を採用した。円管や矩形管の衝撃軸圧縮試験では、荷重の測定装置として、応力棒の他に、特殊な形状のロードセル⁽⁷⁾や動特性を解析的に検定したロードセル⁽⁸⁾が利用されている。しかし、測定時間が十分に確保できれば、応力棒が簡便と考え、この方式を採用した。さらに、本研究で用いた紙材は、金属に比べて著しく強度が低く、スプリットホプキンソン棒法による衝撃試験を行う場合、従来の金属棒を用いると、インピーダンスの差が大きくなり、精度の高い応力波の測定が困難となる。そのため、最近では、金属棒に代えて PMMA⁽⁹⁾やナイロン棒が利用されているが、本研究では、縦弾性係数の小さい塩化ビニル管を応力

棒として用いた⁽⁶⁾。

衝撃棒には直径 19 mm, 肉厚 1.5 mm のアルミニウム中空管 (A6061) に, 直径 75 mm, 厚さ 10 mm のフランジを取り付け用い, その打ち出し速度は, およそ 7.8~8.9 m/s (ひずみ速度 $7\sim8 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$) であった。衝撃荷重を計測する応力棒には, 塩化ビニル製の中空管 (長さ 3000 mm, 外径 26 mm, 肉厚 3 mm) の片端に同一材でふたをしたものを用い, 試験片側の端面より 300 mm の位置に, 2 枚の半導体ひずみゲージを軸対称に貼り, その出力をブリッジボックスを通して, デジタルオシロスコープ (Nicolet 社 model 400) に記録した。また, 試験片の変形量の計測には, 光学式非接触変位計 (Zimmer 社 model 200X) を用い, 試験片端面に取り付けた白黒マーカーの境界の動きを捉えた。この変位計の応答性は, 本実験の速度範囲に対して十分であり, 測定範囲は $\pm 25 \text{ mm}$ あるので, 変形の全域を測定することが可能であった。

Fig.3 Arrangement for impact compression tests.

2・5 塩化ビニル管の応力波伝播試験 応力波が塩化ビニル管を伝播するとき, 塩化ビニルの粘性のために応力波は減衰する。塩化ビニル管を応力棒として利用するためには, 伝播中の応力波の変化を予め把握しておく必要がある。そこで図 4(a) に示すように, 長さ 1400 mm の中央にひずみゲージ G0 が貼られたステンレス製の入力棒と, ふたをした端面から 300, 750, 1200 mm の 3 ヶ所にひずみゲージ G1, G2, G3 が貼られた塩化ビニル管を並べ, ステンレス棒の端面に鋼球を衝突させて, 応力波伝播試験を行った。G0~G3 の各ゲージで計測された応力波形の一例を圧縮応力を正にとって図 4(b), (c) に示す。

図 4(b) から, G0 から計測される入射波は, 概ね半波長の正弦波を描いているが, 反射引張波には, 図中 C で示すわずかな圧縮波が付随することがわかる。ま

た図 4(c) から, 塩化ビニル管に透過した応力波は, 伝播するにつれて次第に減衰し, 持続時間は長くなっていくことがわかる。

この減衰を定量的に見積もるために G1 での測定波形のピーク値で G2, G3 のピーク値を除して減衰率 R_{pk} を求め, 数回の実験結果をまとめて示すと図 5(a) を得る。また, 図 5(b) は, 各波のピーク値の 30% のところで計測した持続時間の比 $R_{0.3}$ を, 図 5(c) は, G1-G2 間および G2-G3 間の応力波の平均伝播速度を総平均値で除した速度比 R_v を示している。この図からピーク値は 1 m あたり約 26% 減少し, 持続時間については 1 m あたり約 23% 増加することがわかる。これら R_{pk} と $R_{0.3}$ の変化を考慮して, G1 の波形の振幅を 1.08 倍, 時間を 0.93 倍し求めた塩化ビニル管端面での応力波形を図 6(a) に示す。比較のため, 入力棒で計測された入射波および反射波から求めた透過波 (グレーの波形) からノイズ成分を除いた波形を図 6(b) に実線で示す。両波形は, 概ね良い一致を示していることから, 図 5 から得られた補正係数を用いた補正を行えば, 塩化ビニル管へ入射する応力波を推定できると考えられる。また, 塩化ビニル管を伝播する応力波の伝播速度 C_0 は, この測定範囲では概ね一定と考えられ, その平均値は $C_0 = 1617 \text{ m/s}$ であった。この塩化ビニル管の密度は, $\rho_{PVC} = 1.39 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と測定され, 外径 48 mm, 肉厚 4 mm, 長さ 50 mm の

Fig.4 Experimental setup for wave propagation test and typical stress waves measured by strain gauges.

Fig.5 Results of stress wave propagation tests through PVC tube : (a) Peak value ratio, (b) Duration ratio and (c) Velocity ratio.

Fig.6 Stress waves at boundary surface obtained from (a) transmitted wave on PVC tube and from (b) incident and reflected waves on steel rod.

塩化ビニル管の横圧縮試験⁽¹⁰⁾より得られた縦弾性係数は、 $E_{PVC} = 3.76 \text{ GPa}$ であるから、 $C_0 = \sqrt{E_{PVC} / \rho_{PVC}}$ を用いて C_0 を計算すると、 $C_0 = 1650 \text{ m/s}$ となり、実験値と概ね一致している。この C_0 と応力測定ゲージの位置、応力棒の長さを考え合わせると、約 $3300 \mu\text{sec}$ の測定時間が確保できることがわかる。

3. 実験結果および考察

3.1 発泡紙の機械的性質 得られた2つのボードの引張試験結果を表1に示す。表中の E , σ_T , ϵ_{pk} , ρ , σ_T/ρ , E/ρ は、それぞれ、縦弾性係数、引張強さ、一様伸び、密度、比強度および比剛性である。これより、発泡紙板は発泡スチロール板に比べ、密度が約4.8倍あるものの、強度も剛性も格段に大きく、比強度は0.8～1.0倍、比剛性は1.4倍～3.7倍あり、

発泡スチロール材の代用品として十分な機械的性質を有していると考えられる。さらに強度や剛性に関して、発泡紙板のL-方向とW-方向との異方性は約2倍と小さいが、T-方向と他の2方向との異方性は、極端に大きいことがわかる。なお、発泡スチロール板のT-方向の引張試験は、ポリスチレン自体が接着剤と化学反応し、治具と接着できなかったため、実施できなかった。

Table 1 Mechanical properties and density of paper foam and polystyrene foam boards.

	E	σ_T	ϵ_{pk}	ρ	σ_T/ρ	E/ρ
	MPa	MPa	%	kg/m ³	MNm/kg	MNm/kg
paper						
L-dir.	480	6.09	2.8	185	0.033	2.595
W-dir.	200	3.58	4.8		0.019	1.081
T-dir.	1.07	0.075	8.6			
polystyrene						
L-dir.	70.0	1.56	11.8	38.4	0.041	1.823
W-dir.	11.0	0.74	15.5		0.019	0.286

3.2 衝撃圧縮試験の出力波形 発泡紙板の衝撃圧縮試験より得られた出力波形の一例を図7に示す。図の実線は、変位計から得られた変位-時間曲線であり、この波形の傾きから、試験片の負荷速度が、およそ 8.5 m/s であることがわかる。図の破線は、塩化ビニル管のゲージG1(図4(a))で測定された荷重-時間曲線であり、この波形に補正係数(荷重:1.08, 時間:0.93)を乗じ、試験片の荷重-時間挙動を推定した。これらの曲線から荷重-変位曲線を算出し、さらには試験片の初期断面積や初期厚さを考慮し、公称応力-公称ひずみ曲線を求めた。また、発泡スチロール板についても、同様の波形が得られた。

3.3 応力-ひずみ曲線 準静的圧縮試験と衝撃圧縮試験から得られた発泡紙板と発泡スチロール板の公称応力-公称ひずみ曲線をそれぞれ図8、図9に

Fig.7 Typical oscilloscope records of displacement and impact load obtained from impact tests.

示す。引張試験結果から容易に推測できるように、発泡紙板の方が同一ひずみに対する応力は大きい、両材料ともよく似た曲線を示し、まず低応力域に線形弾性域が現れる。この圧縮変形におけるT-方向の縦弾性係数 E_c は、発泡スチロールでは $E_c = 0.39$ MPa、発泡紙では $E_c = 1.24$ MPa であり、発泡紙の方が発泡スチロールに比して約4倍大きいことがわかる。

一般に、発泡スチロール材には、線形弾性域に続いて、セル壁の非線形弾性座屈⁽¹¹⁾による崩壊が続くプラトー領域が現れると言われている。一方、発泡紙では、静的試験の変形初期と後期で中断した試験片の内部観察から、変形初期では発泡粒子の崩壊は余り多くなく主に繊維間の隙間が埋まり、変形後期で多くの発泡粒子が崩壊していると考えられ、この段階でプラトー領域が現れる可能性も考えられる。しかし、本実験では、両材料とも準静的な試験速度範囲において、変形初期から応力は滑らかな上昇し、荷重がほぼ一定となる明確なプラトー領域は現れな

かった。このことから、実際の変形においては、発泡スチロールのセルサイズやセル壁形状のばらつき、発泡紙の発泡粒子サイズや繊維間の分散状況などにより、荷重がほぼ一定となることはなく、プラトー領域と急激な応力の上昇を示す緻密化領域との境界を、厳密に決定するのは困難と思われる。

3・4 ひずみ速度依存性 前節に示した応力-ひずみ曲線から、発泡紙板も発泡スチロール板も、応力値が試験速度の増加に伴い増加することがわかる。そこで、 $\epsilon = 30\%$ および $\epsilon = 50\%$ における応力 σ_{30} 、 σ_{50} をひずみ速度を横軸にとって図10、図11に示す。どちらの材料とも、 $\epsilon = 30\%$ での応力値は、静的から動的にわたって概ね直線的に増加しているが、 $\epsilon = 50\%$ での応力値は直線上にはのらず、衝撃圧縮試験結果の値が、準静的圧縮試験結果に比べ、はるかに大きくなっていることがわかる。このことから、発泡紙板の圧縮

Fig.8 Stress-strain curves of paper foam board obtained from quasi-static and impact compression tests.

Fig.10 Relation between stress and strain rate of paper foam board.

Fig.9 Stress-strain curves of polystyrene foam board obtained from compression tests.

Fig.11 Relation between stress and strain rate of polystyrene foam board.

変形では、変形前半よりも変形後半に著しいひずみ速度依存性が現れることがわかる。発泡紙においては、前節で述べたように変形後半では、発泡粒子の崩壊が多いことから、発泡粒子の崩壊荷重の速度依存性が一つの要因とも考えられるが、詳細は今後の検討課題としたい。また、 $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ の準静的な試験速度範囲であっても、わずかに速度依存性を示すこともわかる。

3・5 単位体積当たりの吸収エネルギー 一般に、単位体積当たりの吸収エネルギーは、応力-ひずみ線図において、曲線と横軸 ε に囲まれる部分に相当し、緻密化が開始するひずみまでの総面積で表される。しかし、本研究においては、緻密化開始点が不明瞭であったため、試験片が、50% ひずみまでに吸収されるエネルギー量を吸収エネルギー W と定義した。準静的圧縮試験および衝撃圧縮試験結果から算出された単位体積当たりの吸収エネルギーと、ひずみ速度の関係を図12に示す。どちらの材料とも、衝撃圧縮試験から得られた吸収エネルギーは、準静的圧縮試験から得られたそれに比べ、約2倍になっており、吸収エネルギーに関しても、比較的大きいひずみ速度依存性を示していると思われる。さらに、発泡紙板と発泡スチロール板を比べると、発泡紙板の方が、約1.5倍程度吸収エネルギー量が大きく、発泡スチロール材に替わる緩衝材として十分適していると考えられる。

4. 結 言

発泡紙（ペーパーフォームボード）と発泡スチロール（ポリスチレンボード）の2種類の材料について、引張試験を行い、それぞれの機械的性質を調べた。また、準静的圧縮試験および塩化ビニル管を出力棒

Fig.12 Absorbed energy per a unit volume obtained at dynamic and static rates.

として用いた衝撃圧縮試験を行い、それぞれの材料の圧縮変形における荷重-変位挙動、吸収エネルギー等を求め、これらに及ぼす負荷速度の影響について実験的に検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 発泡紙は発泡スチロールに比べ、密度は約4.8倍あるが、強度も剛性も格段に大きく、比強度は0.8~1.0倍、比剛性は1.4~3.7倍、また、 $\varepsilon = 50\%$ までの吸収エネルギーは静的・動的負荷のいずれにおいても約1.5倍あり、発泡スチロール材の代替品として十分な機械的性質を有していると考えられる。

(2) 予め応力波の伝播試験等を行い振幅の減衰率など応力波の伝播様式が明らかであれば、塩化ビニルのような剛性の小さい高分子材料を出力棒として用い、衝撃荷重を計測することは十分可能であり、特に、発泡紙のような変形抵抗の小さい試料の衝撃試験に、非常に有効であることが確認できた。

(3) 発泡紙も発泡スチロールも $\varepsilon = 30\%$ や 50% のひずみでの応力値は、ひずみ速度の増加に伴い増加し、ひずみ速度依存性を示す。また、 $\varepsilon = 5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ の準静的な試験速度範囲であっても、わずかに速度依存性を示す。

最後に、発泡紙に関し種々の御助言を頂いた王子製紙(株)の藤本理氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Hoering J.F., Ellis E.R., Jewett K.B., Ceckler W.H. and Thompson E.V., Dynamic Compression of Paper: II. Compression Behavior of Saturated Cellulose Mats., *J. Pulp Pap. Sci.*, **9:5** (1983), 140-145.
- (2) Ellis E.R., Jewett K.B., Ceckler W.H. and Thompson E.V., Dynamic Compression of Paper: III. Compression Equation for Cellulose Mats., *AIChE Symp. Ser.*, **80:232** (1984), 1-7.
- (3) Fellers C. and Braenge A., The Impact of Water Sorption on the Compression Strength of Paper., *Pap. Raw. Mater.*, **2** (1985), 529-539.
- (4) 桜井, 伊藤, 渡辺, 横山, 紙製緩衝材・補強材の開発(第1報) マイクロ波加熱によるPEラミネート系古紙の有効利用, 静岡県富士工業技術センター報告, No.3 (1993), 23-38.
- (5) 王子製紙(株) HP URL (<http://www.ojipaper.co.jp>)
- (6) 小林, 臺丸谷, 小林, ペーパーハニカムコアの動的及び静的圧縮試験と吸収エネルギー, 機論, **63-616**, A (1997), 2580-2585.
- (7) 芳野, 石川, 三村, 谷村, 薄肉アルミニウム円管の動的座屈挙動, 機講論(M&M'96), (1996), 351-352.
- (8) 宇治橋, 十河, 松本, 足立, 薄肉断面部材の衝撃圧潰によるエネルギー吸収能, 材料, **42-483** (1993), 1427-1431.
- (9) 中川, 関口, 坂本, 衝撃荷重を受ける印刷機インクロール皮膜用軟質ゴムの圧縮特性評価, 機論, **64-621**, A (1998), 1363-1368.
- (10) 小林, 臺丸谷, 塩崎, 矢部, セラミックス円管の引張試験と横圧縮試験, 機論, **61-588**, A (1995), 1797-1803.
- (11) Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular Solids-Structure & Properties.*, (1988), 122, Pergamon Press.