

段ボール構造体の緩衝設計技法の開発

佐藤幹彦^{*1}、中川幸臣^{*1}、水野金儀^{*1}

Development of the Design Method of Corrugated Fiberboard Cushion

Mikihiko SATO, Yukiomi NAKAGAWA and Kaneyoshi MIZUNO

Technical Consulting Division, AITEC^{*1}

前年度に収集したスリーブ状段ボール構造体の緩衝特性を利用して、段ボール構造体の緩衝材について評価を行った。また、製品支持部のせん断条件の有無で区別した薄板状段ボール構造体の緩衝設計技法を開発し、以下の結果を得た。

- (1) 段ボール緩衝材の設計を行う上で、製品支持部のせん断力が大きく影響を及ぼすことが分かった。
- (2) 開発した緩衝設計技法に基づいて設計したコーナパッドモデルで 60cm 落下の衝撃加速度を測定したところ、推定加速度に対して 5G 程度の誤差範囲となり良好な結果が得られた。

1. はじめに

再生可能資源である段ボールは、環境適合化の側面から緩衝材として使用する事例が増加している。一般に段ボール緩衝材は製品形状に合わせた切込みや折曲げなどの構造を持った薄板状構造体が多く見られる。しかし、その段ボール構造体の緩衝設計技法については過去の経験や試行錯誤の繰り返しに頼っており、形状が複雑になる傾向があるため設計者の熟練がなければ設計が困難である。そのため、段ボール構造体では緩衝設計技法が確立されておらず、緩衝設計の迅速化・合理化が強く望まれている。

本研究は、前年度に測定したスリーブ状構造体の緩衝特性¹⁾を利用して、ダミー木箱を対象に設計した緩衝モデル(折曲げなし構造、両側折曲げ構造)を評価した。また、緩衝設計の一般化を目指し、薄板状段ボール構造体の緩衝設計技法を開発した。さらに、開発した緩衝設計技法を評価するためにコーナパッドを作製して落下衝撃時の衝撃加速度を測定した。

2. 実験方法

2.1 ダミー木箱

段ボール構造体を使用する緩衝設計事例として重量 5kg 程度の家電製品がよく見られる。そこで、長さ 400mm × 幅 300mm × 高さ 100mm の家電製品を想定したダミー木箱を試作した。重量は 5.3kg、2.3kg の 2 種類とし、加速度ピックアップはコーナー付近のダミー木箱上面に取り付けた。

2.2 段ボール構造体緩衝モデル

前年度のスリーブ状構造体の緩衝特性を利用するた

め、写真 1 のような緩衝モデルを作製し、それぞれ折曲げなし緩衝モデル、両側折曲げ緩衝モデルとした。前年度の動的圧縮試験の結果から中央に切込みを入れることで最大衝撃加速度が 40G になるように製品支持部長さを設計した。製品支持部高さは 35mm である。

本研究で使用している段ボールは前年度と同じ材料であり、坪量はライナが表裏ともに 210g/m² で中芯は普通芯 120g/m² の A フルートとした。段ボール原紙の圧縮強さ(リングクラッシュ値)は、表裏ライナがそれぞれ 319N、314N、中芯が 84.1N であり、段ボールの平面圧縮強さ(フラットクラッシュ値)は 146kPa である。なお、緩衝モデルは 23 / 50%R.H. の温湿度環境に 24 時間以上放置した後、試験を行った。



折曲げなし緩衝モデル 両側折曲げ緩衝モデル

写真 1 段ボール構造体緩衝モデル

2.3 静的圧縮試験

箱圧縮試験機(島津製作所製 AG-10TAS)を用いて圧縮荷重を測定した。圧縮速度は 10mm/min とした。試験はスリーブを用いて緩衝モデルを固定してダミー木箱を設置した状態で上下方向に圧縮した。

2.4 動的圧縮試験

落下試験機(ランスマント社製 MODEL PDT-56E) 落

^{*1} 技術支援部 応用技術室

下衝撃試験機（吉田精機製 CST-180 型）を用いて、落下高さ 60cm で衝撃加速度を測定し緩衝特性を評価した。

3. 実験結果及び考察

3.1 静的圧縮特性

表 1 に各緩衝モデルでの静的圧縮試験の結果を示す。推定強度は前年度のスリーブ状構造体の静的圧縮強度と段ボール構造体の周囲長から算出した値である。測定した静的圧縮強度は推定強度に対して、すべての緩衝モデルにおいて 3~6% 程度増加していた。原因として、製品モデル支持部の両端で段ボール構造体にせん断力が作用したことがあげられる。折曲げなし緩衝モデルでは製品支持部両端で破断していたのに対して、両側折曲げ緩衝モデルの場合は 10mm/min の圧縮速度では破断しないという違いが見られたが、静的圧縮強度はほぼ同じ値を示した。この結果から、前年度のスリーブ状構造体の基本特性を利用するには、せん断条件を考慮する必要があることが分かった。

表 1 緩衝モデルの静的圧縮特性

緩衝モデル	製品モデル重量	予想強度 (kN)	静的圧縮強度 (kN)			予想強度との比
			平均	最大	最小	
折曲げなし	5.3kg	1.98	2.07	2.11	2.00	104.5%
	2.3kg	0.87	0.90	0.94	0.85	103.4%
両側折曲げ	5.3kg	1.98	2.08	2.22	1.92	105.1%
	2.3kg	0.87	0.92	0.95	0.88	105.7%

3.2 動的圧縮特性

ダミー木箱に段ボール外装箱等を設置し包装品状態にして、60cm 落下時の緩衝特性を測定した。段ボール外装箱の緩衝性の影響を少なくするため、外装箱底面の段ボ

表 2 緩衝モデルの動的圧縮特性（落下高さ：60cm）

緩衝モデル	製品モデル重量	落下回数	最大加速度 (G)			作用時間 (ms)	変位量 (mm)		底つき発生回数
			平均	最大	最小		左側	右側	
折曲げなし	5.3kg	1回目	49.6	54.8	44.5	14.8	11.2	12.4	2.8 回目
		2回目	76.3	94.4	63.9	11.2	21.2	21.4	
	2.3kg	1回目	47.1	53.5	40.9	14.2	9.0	11.2	2.6 回目
		2回目	51.2	73.7	32.8	12.8	18.6	21.4	
両側折曲げ	5.3kg	1回目	48.1	53.0	41.2	13.4	5.8	5.4	6.0 回目
		2回目	60.6	64.9	53.9	11.5	8.8	8.4	
	2.3kg	1回目	49.7	52.7	45.8	12.4	2.8	2.8	8.6 回目
		2回目	60.5	71.6	49.4	11.4	5.6	5.6	

表 3 製品支持部両端に切込みを入れた緩衝モデルの動的圧縮特性（落下高さ：60cm）

緩衝モデル	製品モデル重量	落下回数	最大加速度 (G)			作用時間 (ms)	変位量 (mm)		底つき発生回数
			平均	最大	最小		左側	右側	
両側折曲げ	5.3kg	1回目	40.5	46.0	37.4	12.7	5.2	6.0	4.4 回目
		2回目	57.5	60.3	54.6	11.9	9.6	9.8	
	2.3kg	1回目	41.9	43.8	37.2	13.9	4.2	4.6	6.6 回目
		2回目	48.5	58.8	37.1	13.2	8.0	8.4	

ールの段はすべて潰した後に試験を行った。緩衝モデルの動的圧縮試験の結果を表 2 に示す。

いずれの緩衝モデルでも一回目落下の最大加速度の平均値が設計加速度 40G より 10G 程度増加していた。その原因としては、製品支持部両端にせん断力が作用している点、左右の緩衝モデルが製品を均等に支持しなかった点があげられる。しかし、後者は最大加速度が減少する可能性もあり、今回の結果からはせん断力による影響が大きいと考えられる。また、1 回目落下ではどの緩衝モデルでも最大加速度に大差は見られないが 2 回目落下から違いが生じている。特に折曲げなし緩衝モデルでは緩衝性が失われ底つきが発生する場合もあり、折曲げなし構造のみで緩衝設計するのは危険であることが分かった。

せん断力の作用を実証するために両側折曲げ緩衝モデルにおいて製品支持部両端に切込みを入れ、せん断力の影響を少なくしたモデルで評価した。その動的圧縮試験の結果を表 3 に示す。結果は設計加速度 40G に近い値を示しており、せん断力の影響が大きいことを確認した。ただ、せん断力が作用しないため強度は弱くなり底つきが早く発生した。

3.3 せん断条件を考慮したモデルでの緩衝性評価

前年度に測定したスリーブ状構造体の緩衝特性はせん断条件のない場合であるため、せん断条件を考慮したモデルでの緩衝性評価が必要である。そこで、図 1 のように落下衝撃試験機の重錘底面に角材（長さ 100mm × 幅 100mm）を取付け、せん断力が作用する場合でのスリーブ状構造体（150mm × 50mm × 35mm）の動的圧縮特性を測定した。緩衝特性線図を図 2、両側折曲げ構造でのせん断条件の有無による比較を図 3 に示す。図 3 よりせん断条件

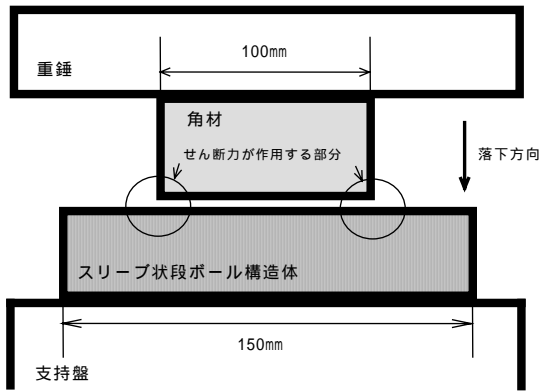


図1 せん断条件を考慮した場合の落下衝撃試験

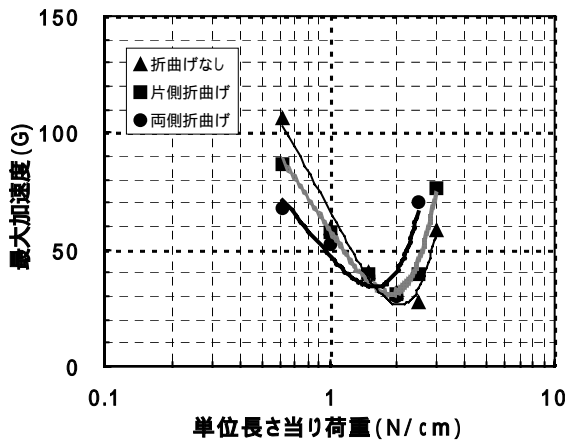


図2 せん断条件のある場合の緩衝特性線図

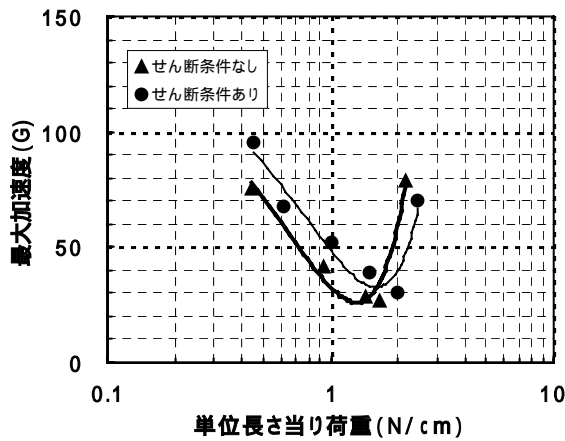


図3 せん断条件の有無による緩衝特性の比較
(両側折曲げ構造)

の有無で緩衝特性が異なっており、特に緩衝設計が必要となるグラフの底から左側の範囲(単位長さ当り荷重が1.3N/cm以下)でせん断条件がある場合は15G程度の最大加速度の増加が見られる。また、図2で前年度の緩衝特性とは異なり、両側折曲げ構造よりも折曲げなし構造の方がグラフの底で最大加速度の値が低く緩衝性が向上している。しかし、折曲げなし構造が圧壊することにより緩衝性向上が起こっているため緩衝材として使用する

のは不適切であり、このグラフを利用して設計する場合注意が必要である。

3.4 エネルギー密度と単位長さ当り最大荷重

エネルギー密度は発泡プラスチック系材料やブロック系緩衝材で利用される概念であるが、薄板状段ボール構造体でもこの値の適用を試みた。この場合のエネルギー密度は薄板状段ボールで単位体積当りの衝撃吸収エネルギーがどの程度であるのかを示している。ここで次式による値をエネルギー密度 E_D (J/cm^3)²⁾ とする。

$$E_D = W_h / (l \times h \times t)$$

W_h : 製品の位置エネルギー (J)

l, h, t : 緩衝材製品支持部の長さ、高さ、厚さ (cm)

また、製品質量と衝撃加速度との積を最大衝撃力とし、緩衝材製品支持部長さ当りで換算した値を単位長さ当り最大荷重とする。試験結果に基づきせん断条件の有無により区別してエネルギー密度と単位長さ当り最大荷重の相関を表したものを図4、5に示す。グラフが立ち上がっている部分で底づきが発生しているため、それよりもエネルギー密度が小さい範囲で緩衝設計する必要がある。製品支持部長さが決まれば上式から製品支持部高さを求めることができる。

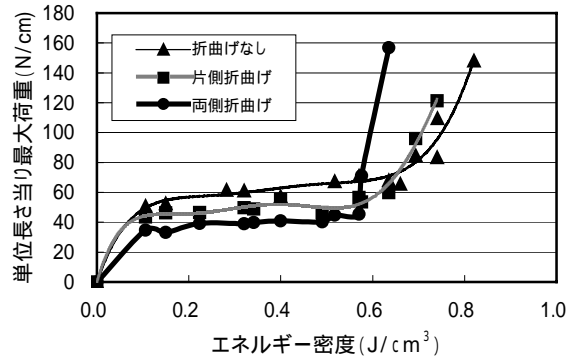


図4 エネルギー密度 - 単位長さ当り最大荷重線図(1)
(せん断条件がない場合)

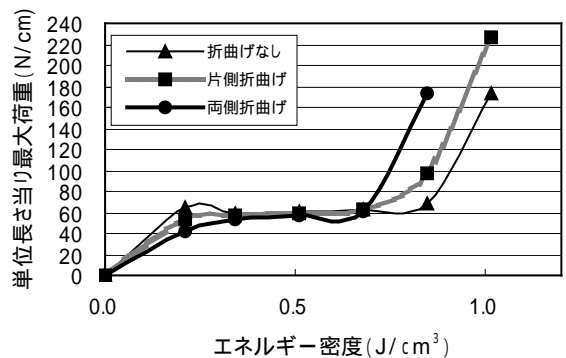


図5 エネルギー密度 - 単位長さ当り最大荷重線図(2)
(せん断条件がある場合)

3.5 段ボール構造体の緩衝設計技法について

この緩衝設計技法は製品支持部のせん断応力の有無により区別する手法となっている。そして、製品支持部での段ボール構造体の長さ及び高さ、折曲げ構造の有無が設計の基本となる。製品支持部の長さは最大加速度 - 単位長さ当り荷重線図により、高さは単位長さ当り最大荷重 - エネルギー密度線図²⁾により算出する。開発した緩衝設計技法を以下に示す。

- 手順1：包装品の基礎条件を確認する。製品質量(kg)、製品の許容加速度(G)、想定落下高さ(cm)を把握する。
- 手順2：段ボール緩衝材をどのような構造にするかあらかじめ構想する。すなわち、各折曲げ構造の割合とせん断条件の有無を決定する。
- 手順3：せん断条件の有無で区別し製品の許容加速度から製品支持部長さを求める。せん断条件がある場合は図2、ない場合は図6（前年度に測定したスリーブ状構造体の緩衝特性線図）より適切な単位長さ当り荷重を求め製品支持部長さを算出する。
- 手順4：せん断条件の有無で区別し製品支持部の最低高さを求める。せん断条件がある場合は図4、ない場合は図5から製品支持部の最低高さを算出する。さらに、製品突起物等を考慮して製品支持部高さを決定する。

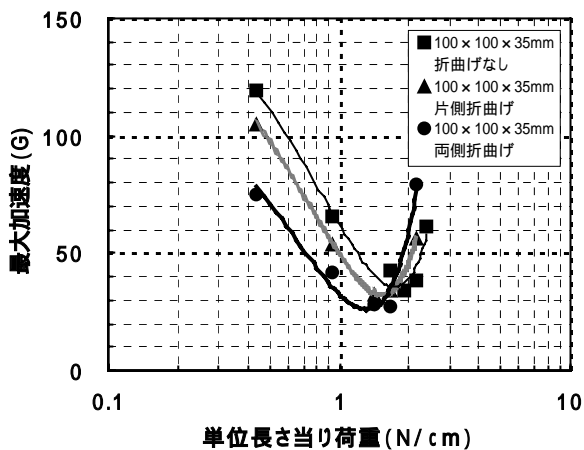


図6 スリーブ状構造体の緩衝特性線図

3.6 緩衝設計技法の評価

今回開発した緩衝設計技法を評価するためにせん断条件のある片側折曲げ、両側折曲げ構造を50%ずつ含む写真2のようなコーナーパッドを作製した。緩衝設計技法に基づき設計加速度40Gで算出するとコーナーパッド1個当りの片側折曲げ、両側折曲げ構造の長さが5.1cm、最低高さが2.6cmである。この寸法で設計シグミー木箱を用いて落下高さ60cmの落下衝撃試験で評価した。衝撃加速度は設計加速度40Gに対して5G程度の誤差範囲にな



写真2 コーナーパッド

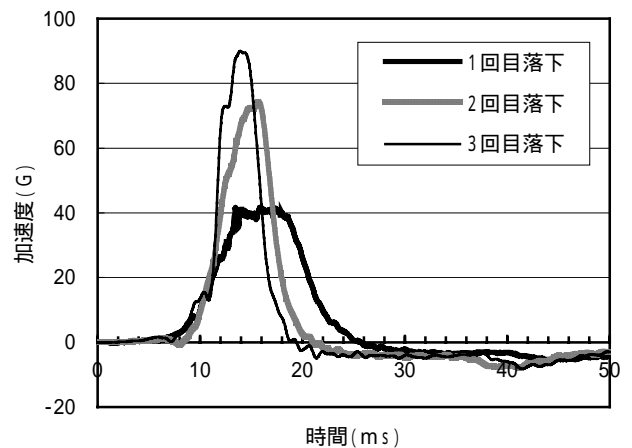


図7 落下衝撃時の衝撃波形

り良好な結果が得られた。また、実測した1～3回目落下の衝撃波形を図7に示す。2回目落下から最大加速度が増加し、緩衝性を失い底づきが発生しているのが波形から読み取れる。このことから、最低高さの算出についても有効であることを実証した。

4. 結び

段ボール緩衝設計は、加工がしやすいという利点から複雑な構造になる傾向にある。そのため、設計者にしか分からない設計ノウハウ等が多く存在し、段ボール緩衝設計を非常に難しいものになっている。今回の研究では開発した緩衝設計技法の評価として簡易なコーナーパッドを用いているが、さらに実際に流通している段ボール緩衝設計事例で評価する必要がある。そして、今後データを蓄積し緩衝設計技法をより一層確立することが目標である。データが蓄積されれば、それに基づいて緩衝設計することが可能であり、段ボール緩衝設計の効率化に寄与することが期待できる。

文献

- 1) 佐藤幹彦、中川幸臣、室田修男：愛知県産業技術研究所研究報告，1，17(2002)
- 2) 中川幸臣、加藤久也、小林兼弘：愛知県工業技術センター研究報告，34，13(1998)