

繰り返し衝撃を考慮した段ボール緩衝材の緩衝性評価

佐藤幹彦^{*1}、中川幸臣^{*1}、来川保紀^{*1}

Evaluation of Corrugated Fiberboard Cushion Considerd Repeated Shock

Mikihiko SATO^{*1}, Yukiomi NAKAGAWA^{*1} and Yasunori KITAGAWA^{*1}

Industrial Technology Division, AITEC^{*1}

落下高さ及び落下回数条件を数種類設定して、弱い負荷の繰り返し衝撃を与えた場合の段ボール緩衝材の緩衝特性を測定した。繰り返し衝撃による現象を現状の落下衝撃試験と比較して解析した。さらに、繰り返し衝撃の位置エネルギーの総和と緩衝材の変位量との相関を明らかにし、繰り返し衝撃を考慮した緩衝設計技法を考案した。従来、十分な安全領域の緩衝材高さを設定していた段ボール緩衝設計技法に対して、繰り返し衝撃による変位量当たりの累積エネルギーを適用することで、安全設計領域における緩衝材最低高さの推測が可能となった。

1. はじめに

従来の発泡プラスチック系包装材に代替して、段ボールやパルプモールドなどの紙系包装材の利用が増加している。しかし、発泡プラスチック系緩衝材の緩衝設計技法はすでに確立されている¹⁾のに対して、紙系緩衝材の緩衝設計では、紙素材特有の性質による課題がいくつか取り上げられている。その課題の一つに、繰り返し衝撃を考慮した設計及び評価が不十分である点が挙げられる²⁾。

現状では、落下高さ 60cm などの強い衝撃を角、りょう、面の各落下方向に 1 回ずつ与えて評価している³⁾。さらに、設計の現場では湿度の影響などを考慮して、十分な安全領域で設計することが多く、過剰包装の傾向になり易い。そのため、繰り返し衝撃を考慮した緩衝設計を行い、適正化を図る必要がある。

そこで、落下高さ及び落下回数を数種類設定して、弱い負荷の繰り返し衝撃を与えた場合の緩衝特性を測定した。それを現状の落下衝撃試験と比較して、繰り返し衝撃による現象を解析し、この点を考慮した緩衝設計技術を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試モデル

段ボール構造体緩衝材の簡易モデルであるスリーブ構造体⁴⁾を供試モデルとした。図 1 にスリーブ構造体の供試モデルを示す。段ボール緩衝設計では横方向より縦方向を使用する場合は圧倒的に多いため、段の方向は段の縦目で製品を受ける縦方向（スコア方向）とした。折曲げ構造は折曲げなしモデル、両側折曲げモデルとし、外

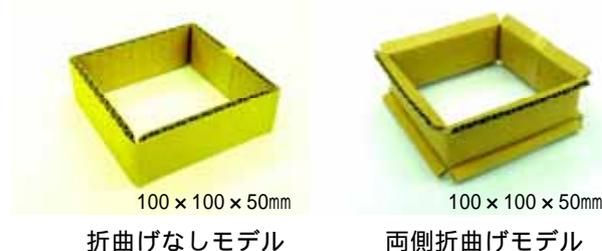


図 1 スリーブ構造体の供試モデル

側寸法は各々 100mm × 100mm × 50mm とした。

2.2 弱い衝撃の繰り返し負荷

落下衝撃試験機(ランスモント製モデル 23 クッションテスター)を使用して、各供試モデルに重錘を落下高さ 10cm あるいは 20cm から所定回数落下させて、弱い衝撃を繰り返し負荷した。なお、重錘質量は、落下高さ 60cm から落下させた時に設計衝撃加速度がいずれの供試モデルも 50G になるように、折曲げなしモデル 4.8kg、両側折曲げモデル 2.8kg に設定した。以後の各種落下衝撃試験において、重錘質量は各供試モデルで採用した質量とした。

2.3 繰り返し衝撃後の静的圧縮特性の測定

弱い衝撃を繰り返し負荷した後の供試モデルについて、万能試験装置(東洋ポールドウィン製 UTM-500 型)を用いて静的圧縮強度を測定した。圧縮速度は 10mm/min とした。

2.4 繰り返し衝撃後の動的圧縮特性の測定

弱い衝撃を繰り返し負荷した後の供試モデルについて、落下衝撃試験機を用いて、加速度ピックアップを取り付

^{*1}工業技術部 応用技術室

けた重錘を落下高さ 60cm から落下させ、衝撃解析装置（ランスモント製テストパートナー3）により衝撃加速度を測定して、動的圧縮特性を求めた。

2.5 繰り返し衝撃による変位量の測定

未使用の供試モデルに落下高さ 10、20、30、40、50 及び 60cm の落下衝撃試験を行い、変位量の推移を測定した。また、万能試験装置（インストロン 4466 型）を用いて、未使用の供試モデルに一定の荷重を繰り返し加えるサイクル試験（サイクル数 200 回）を実施し、各モデルの変位量を測定した。荷重は最大静的圧縮強度の約 80% の値を採用した。

3 . 実験結果及び考察

3.1 繰り返し衝撃後の静的圧縮特性

落下高さ 10cm の弱い衝撃を繰り返し加えた後の折曲げなしモデル及び両側折曲げモデルの静的圧縮特性を図 2、3 に示す。図 2 の折曲げなしモデルでは、繰り返し衝撃がない場合は初期領域で圧縮荷重の急激な上昇が

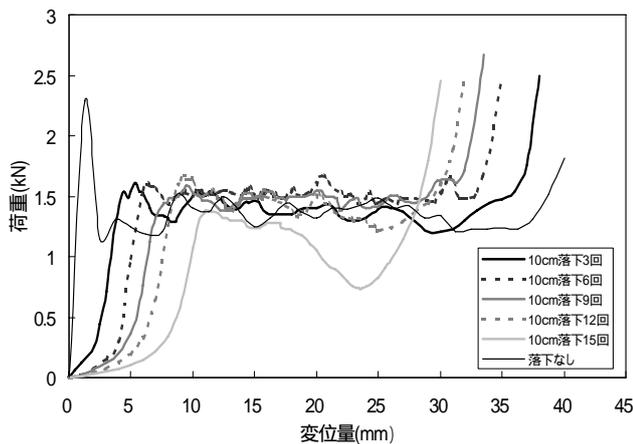


図 2 繰り返し衝撃後の静的圧縮特性
(折曲げなしモデル、10cm 落下)

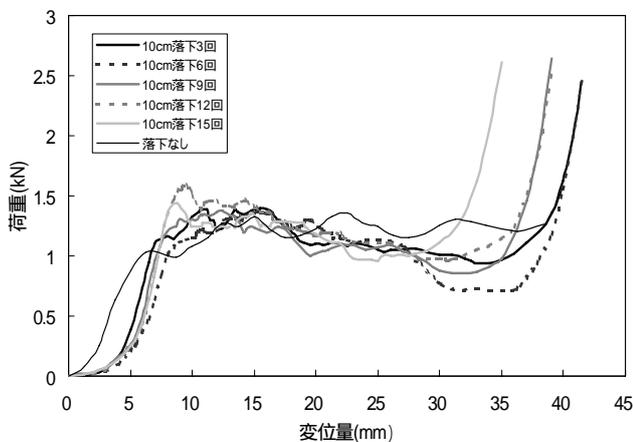


図 3 繰り返し衝撃後の静的圧縮特性
(両側折曲げモデル、10cm 落下)

見られたが、繰り返し衝撃を加えた場合はいずれの衝撃回数においても荷重の上昇は緩やかになり、最大圧縮荷重は 1.5kN 程度であった。しかし、グラフの曲線下部面積に相当する衝撃吸収エネルギーが繰り返し衝撃を加えることにより少しずつ減少していることから、繰り返し衝撃は静的圧縮特性に影響を及ぼすことが認められた。すなわち、静的強度を保持しながら繰り返し衝撃によって緩衝性が徐々に失われることを示している。それに対して、図 3 の両側折曲げモデルでは、繰り返し衝撃がない場合は変位量 15mm で最大圧縮荷重を示し、その後一定の荷重で推移したが、繰り返し衝撃を加えた場合はいずれの回数でも荷重は変位量 10mm で最大値を示してから少しずつ低下した。一方、衝撃吸収エネルギーにはあまり差がないなど、折曲げなしモデルとは異なる特性となった。なお、ここでは図示していないが、落下高さ 20cm の落下衝撃を加えた後の静的圧縮特性は、いずれのモデルでも落下高さ 10cm の場合とほぼ同様の傾向を示した。

3.2 繰り返し衝撃後の動的圧縮特性

落下高さ 10cm あるいは 20cm の弱い衝撃を繰り返し加えた後の折曲げなしモデル及び両側折曲げモデルの動的圧縮特性の推移を図 4 に示す。いずれの落下高さの場合も折曲げなしモデルは繰り返し衝撃により最大衝撃加速度が低下した。一方、両側折曲げモデルは、設計加速度 50G に対して最大衝撃加速度が 15G 程度増加するのが認められ、衝撃加速度の増加を設計上で考慮する必要がある。緩衝材が蛇腹状に潰れることにより試験前の状態より緩衝材支持部分の面積が増加したことが考えられる。また、いずれのモデルも最大衝撃加速度は、底つきが発生して急激に増加する直前まで、ほぼ一定値を示すことが分かった。これは紙系緩衝材特有の性質であり、落下高さ 20cm の繰り返し衝撃の場合で顕著であった。

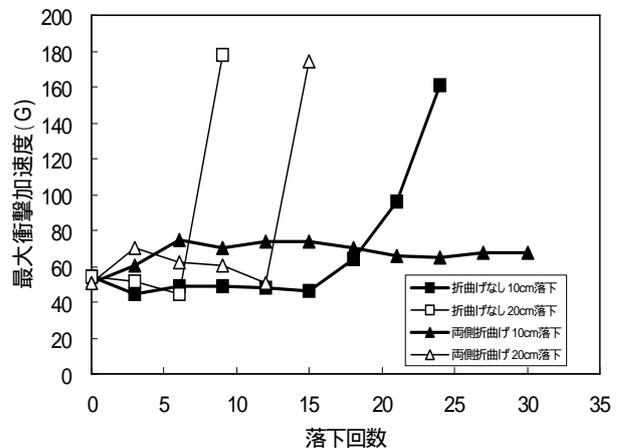


図 4 繰り返し衝撃後の動的圧縮特性

3.3 繰り返し衝撃による変位量

繰り返し衝撃の位置エネルギー（重錘質量×落下高さ×重力加速度）の総和を累積エネルギーとして、累積エネルギーと各モデルの変位量との相関を検討した。折曲げなしモデル及び両側折曲げモデルの変位量と累積エネルギーの関係を図5、6に示す。いずれの落下高さでも、変位量と累積エネルギーとの間にはほぼ比例関係が成立し、所定の変位量まで変形させるのに要する累積エネルギーは落下高さが低いほど大きくなった。これは、低い落下高さでは繰り返し衝撃の影響が小さいことを示している。

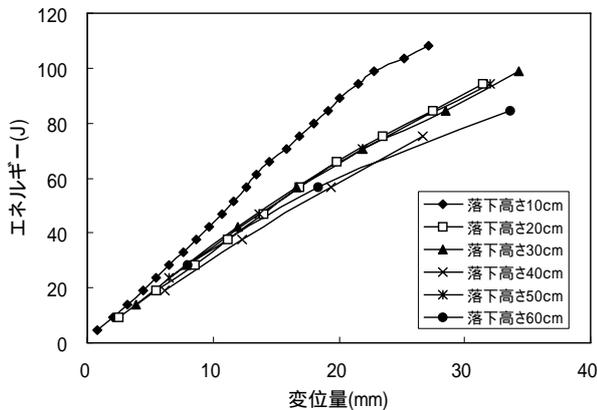


図5 累積エネルギーと変位量
(折曲げなしモデル、重錘質量 4.8kg)

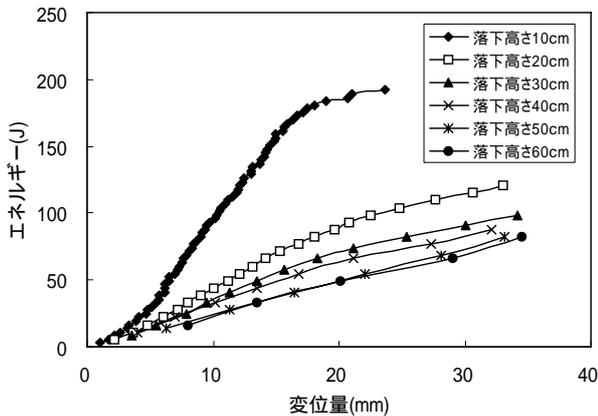


図6 累積エネルギーと変位量
(両側折曲げモデル、重錘質量 2.8kg)

次に、未使用の各モデルに一定の静的荷重を繰り返し加えるサイクル試験を実施した。図7、8に、折曲げなしモデルの場合 1.8kN、両側折曲げモデルの場合 1.0kN の荷重を負荷したサイクル試験における変位量の推移を示す。左から 1、5、10、100、200 サイクルの荷重-変位曲線である。1 サイクル目の変位量は折曲げなしモデルで約 1mm、両側折曲げモデルで約 6.5mm であった。

それに対して、200 サイクル後の変位量はそれぞれ 0.5mm、1.0mm 程度を示し、ほとんど変位しないことが分かった。最大静的圧縮強度を超えない範囲では、各モデルは座屈せずに強度を保持している。このことから、著しく低い落下高さの繰り返し衝撃では段ボールの復元力が作用していると考えられる。

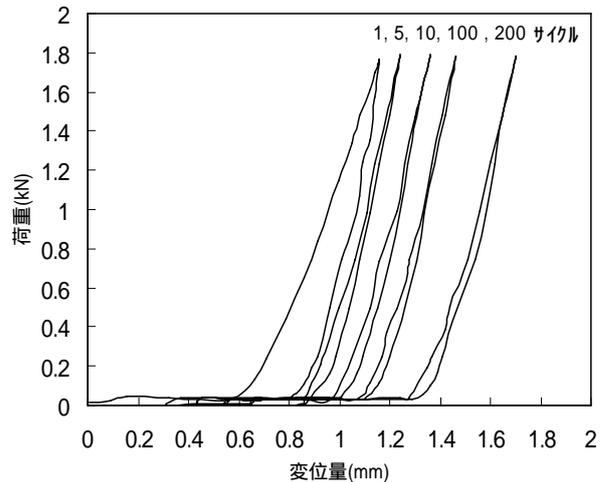


図7 サイクル試験における荷重 変位曲線
(折曲げなしモデル、繰り返し荷重 1.8kN)

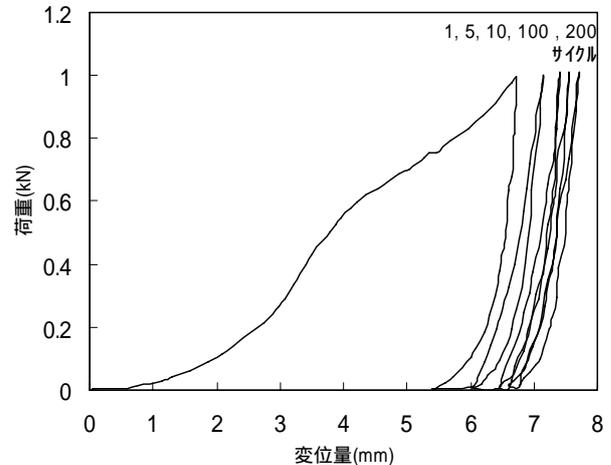


図8 サイクル試験における荷重 変位曲線
(両側折曲げモデル、繰り返し荷重 1.0kN)

ここで、各モデルにおいて、図5、6の各落下高さにおける変位量当たりの累積エネルギー、つまり、比例関係にある直線勾配を算出した。図9に折曲げなしモデル、図10に両側折曲げモデルの場合の結果を示す。落下高さが高くなるほど、変位量当たりの累積エネルギーの値は小さくなり、折曲げなしモデルは 2.5J/mm、両側折曲げモデルは 2.0J/mm に収束することが分かった。これらは、段ボールの復元力がほとんど作用しない落下高さの

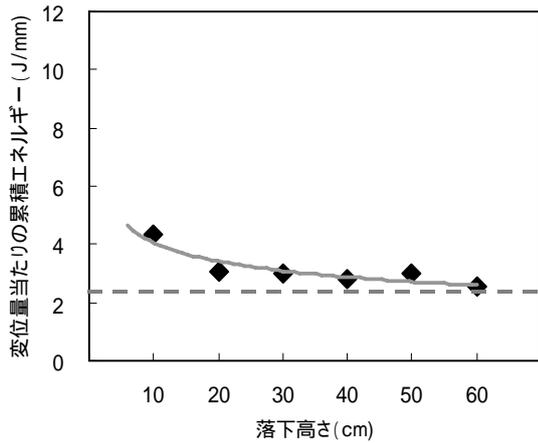


図9 変位量当たりの累積エネルギー
(折曲げなしモデル、重錘質量 4.8kg)

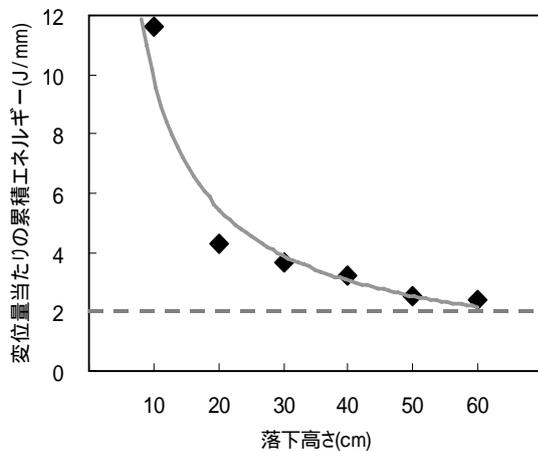


図10 変位量当たりの累積エネルギー
(両側折曲げモデル、重錘質量 2.8kg)

高い落下衝撃時の値であり、これらの値を採用することにより、より安全側の緩衝設計が実現できる。一方、落下高さ 10cm の場合は、変位量当たりの累積エネルギーが他の落下高さの場合より大きく、特に両側折曲げモデルの場合に顕著であり、図 7、8 で見られた段ボールの復元力が作用したことが分かる。

3.4 繰り返し衝撃を考慮した緩衝設計について

考案した段ボール緩衝設計技法は、緩衝材が有する変位量当たりの累積エネルギーから緩衝材最低高さを算出する手法である。折曲げなしモデル 2.5J/mm、両側折曲げモデル 2.0J/mm の値を適用すれば、落下高さから容易に緩衝材最低高さを求めることができる。例えば、落下高さ 60cm の衝撃に対する最低高さを算出すると、次のと

おりである。周囲長 400mm (100×100mm) のスリーブ構造体で、重錘質量を折曲げなしモデル 4.8kg、両側折曲げモデル 2.8kg とした場合、折曲げなしモデルが $4.8\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2$ (重力加速度) $\times 0.6\text{m}$ (落下高さ) / $2.5\text{J/mm} = 11.3\text{mm}$ 、両側折曲げモデルが $2.8\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2$ (重力加速度) $\times 0.6\text{m}$ (落下高さ) / $2.0\text{J/mm} = 8.2\text{mm}$ である。繰り返し衝撃の落下高さの変動を輸送環境データレコーダ等の計測で求めれば、緩衝材最低高さの把握が可能である。

一方、落下高さ 10cm 以下の繰り返し衝撃は、段ボールの復元力により緩衝材の劣化への影響が少ないため、設計から除外できると考えられる。今後は、実輸送で弱い繰り返し衝撃の影響を測定して、段ボール緩衝設計で適用外となる繰り返し衝撃の範囲を検討する予定である。

4. 結び

本研究の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 繰り返し衝撃による累積エネルギーの大きさと緩衝材変位量との相関を明らかにした。
- (2) 従来、任意の高さを設定していた段ボール緩衝設計技法に対して、変位量当たりの累積エネルギーを適用することで、安全設計領域での緩衝材最低高さの推測が可能となった。
- (3) 低落下高さにおける衝撃(例えば、10cm 落下)では、段ボールの復元力の効果があり、他の条件より大きな衝撃吸収エネルギー量を確認することができた。特に、両側折曲げモデルでは、その効果が顕著であった。

以上の結果より、繰り返し衝撃による累積エネルギーを適用した段ボール緩衝設計技法を考案した。この技法を使用することにより、製品質量、落下高さの条件が変更になっても対応できるため、現状の緩衝設計技法と比べてより一層適正化を図ることができる。

文献

- 1) 水口眞一ほか：輸送・工業包装の技術，P563 (2002)，フジ・テクノシステム
- 2) 水口眞一ほか：輸送・工業包装の技術，P163 (2002)，フジ・テクノシステム
- 3) 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 (2004)
- 4) 中川幸，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)