

段ボール構造体を用いた緩衝包装の簡易設計法

張 奇*、斎藤 勝彦**、高橋 光***

Simplified Design Method of Cushioning Package using Structural Corrugated Board

Qi ZHANG*, Katsuhiko SAITO** and Hikaru TAKAHASHI***

製品を物流中の衝撃から守るため、緩衝包装が施される。緩衝材として使用されるものは、発泡プラスチック系と紙系の2種類に大別できる。発泡プラスチック系緩衝材を用いる場合は、実験データを基にしたクッションカーブを利用する緩衝包装設計法が確立している。一方、紙系緩衝材を用いた緩衝包装設計では、包装設計者は過去の経験をもとにトライ・アンド・エラーにより進めているのが現状である。そこで、本研究では紙系緩衝材の中で主流である段ボールに着目し、動的圧縮試験を1回行うだけで緩衝設計を行うことができる効率的な方法を考案した。当方法で設計したダミー包装品に行った試験値は設計値との差が5%以内であることを確認でき、その有効性を検証した。

Cushioning Package is designed to protect products from shock during transport. The cushioning material are roughly divided into two groups of expanded plastic cushioning material and paper cushioning material. The design method using expanded plastic cushioning material has been established applying cushion curve which is based on results of dynamic compression tests. However, because no efficient packaging-design method yet exists for paper cushioning material, packaging engineers must rely on previous experience and the so-called trial-and-error method to design packaging. Therefore, this study focuses on corrugated board, most widely used paper cushioning material, and develop a simplified design method which needs only one dynamic compression test. To verify the validity, we use this method to design cushioning package and confirm that the difference between experiment results and prediction results is less than 5% which can be considered as sufficient accuracy.

キーワード：包装、輸送、緩衝、段ボール、設計法

Keywords: Packaging, Transport, Cushioning, Corrugated Board, Design Method

*連絡者 (Corresponding author), 神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1), Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe, 6580022, Japan. TEL: 080-5379-8648, Email: kenandxx@hotmail.com

**神戸大学輸送包装研究室

***研究当時神戸大学海事科学部

1. 緒言

製品を物流中の衝撃と振動から守るため、緩衝防振包装が施される。緩衝材として使用されるものは、発泡プラスチック系（発泡ポリスチレン、発泡ポリエチレン等）と紙系（段ボール、パルプモールド等）の2種類に大別できる。

発泡プラスチック系緩衝材は、力学特性が比較的単純で実験データを基にしたクッションカーブを利用する緩衝包装设计法が確立している。先の研究¹⁾では、緩衝包装设计に加え、防振包装设计を同時にすすめる設計法を提案し、簡易的に防振包装设计を行うために振動シミュレーションを用いた設計法を提案した²⁾。

一方、環境適性に優れていることから、従来発泡プラスチック系緩衝材を使用していた包装品について、紙系緩衝材に変更する事例が増えている。しかしながら、紙系緩衝材の緩衝包装设计法は確立されているとは言い難く、包装設計者は過去の経験やいわゆるトライ・アンド・エラーの手法で作業を進める場合が多い。その理由のひとつは、紙系緩衝材は複雑な構造体にされることがほとんどで、その力学特性を把握するのが困難であるためである。先行研究³⁾では、段ボール構造体緩衝材に関する設計法が提案されているものの、事前に段ボールのフルート・

緩衝距離・包装品落下高さなど、緩衝効果に影響する要因ごとに多数回の動的圧縮試験が必要であり、実際の包装设计現場では、効率の良い緩衝包装设计法の確立が急務になっている。

そこで、本研究では紙系緩衝材の中で主流である段ボールに着目し、動的圧縮試験を1回行うだけで緩衝設計を行うことができる簡易的な設計法を考案した。また、ケーススタディーとして設計を行った包装物についてその有効性を検証した。

2. 段ボールスリーブ緩衝特性図を用いた構造体緩衝材の基本設計

段ボール構造体は、荷重の作用方向と、段ボールシート製造過程でのCD方向（Cross Direction）である段目方向（段ボールの最も強い方向）を同一にし、座屈塑性変形によって衝撃エネルギーを吸収させるように設計される場合が多い。

Fig.1 は、典型的な段ボール構造体緩衝材の衝撃作用後の局所的な様子を示しており、製品を受ける端部では、段ボールにはせん断力も加わっている。中川ら³⁾は、このような段ボール構造体緩衝材の基本設計（製品を受ける段ボール受圧長さと初期高さの決定）のために、スリーブ構造モデルを用いた緩衝特性に関する基礎

実験を行うことを提唱している。

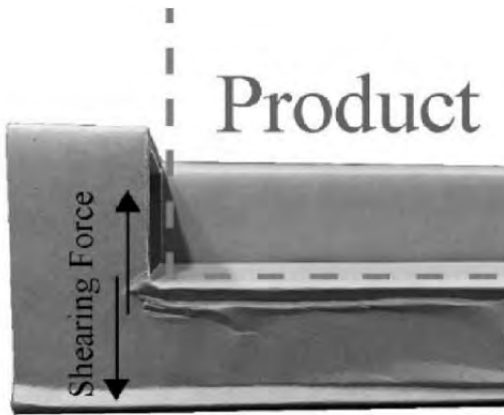


Fig.1 Example of cushioning pad and direction of shear force

そこでここでは、**Fig.1**のような緩衝材を設計するための基礎資料として、スリーブ構造モデルの緩衝特性を評価するための実験を行った (**Fig.2**)。試料は A フルートの両面段ボール、表裏ライナーの坪量は 210g/m^2 、中しんの坪量は 120g/m^2

であり、温度 23°C 湿度 50% に設定した恒温恒湿装置で 24 時間以上前処理している。試料の外寸法は $150\text{mm}\times 95\text{mm}\times 42\text{mm}$ (長さ \times 奥行 \times 高さ)、上下折り返し部の長さは 20mm である。また、緩衝材動圧縮試験装置 (神栄テストマシナリー(株) ACST-200) を使用し、自由落下させる重錘の落下高さは 60cm としている。重錘の質量は、 2.3kg 、 4.3kg 、 5.8kg 、 6.3kg 、 7.3kg とし、それぞれの質量ごとに 5 回の実験を行っている。さらに、**Fig.1**のような、せん断の影響を加味した緩衝体設計の基礎資料とするために、試料を鉄製ブロックの上に載せ、このとき、ブロックと接触している緩衝部の長さは、スリーブの長さ方向に、手前と奥にそれぞれ 100mm の合計 200mm である。

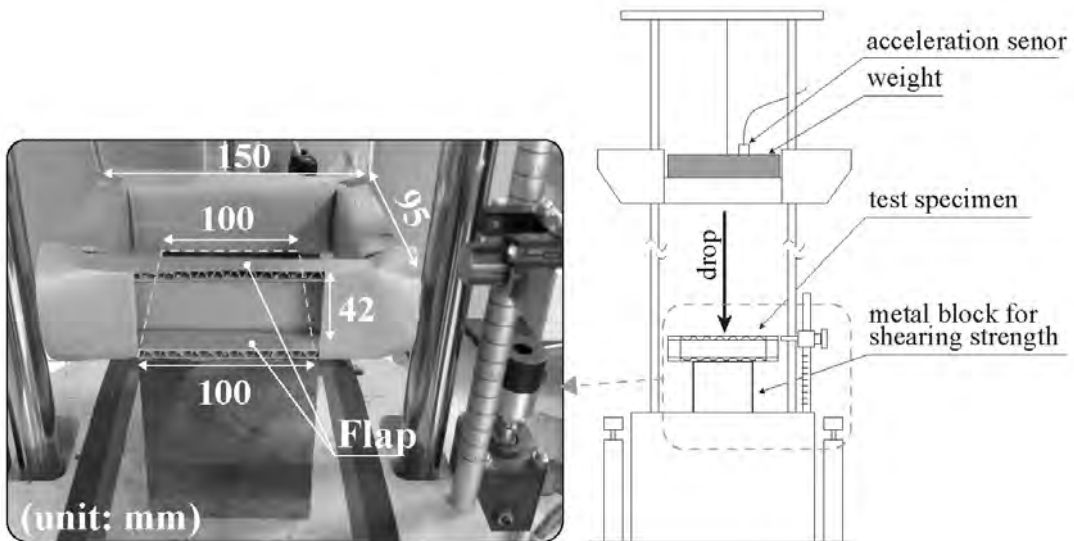


Fig.2 Tests pecimen and apparatus for dynamic compression test

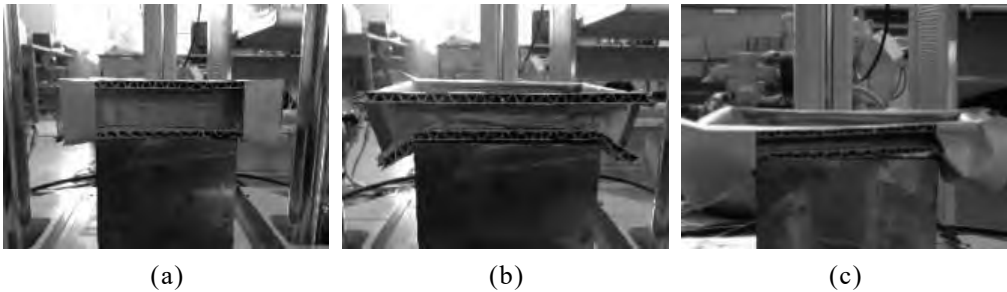
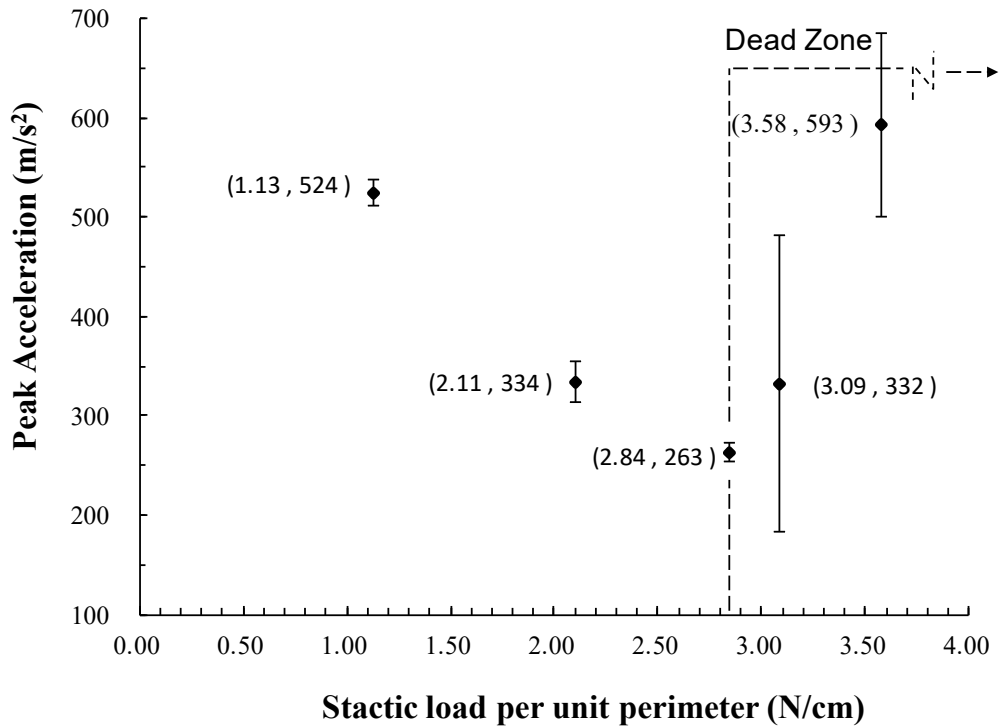


Fig.3 Result of dynamic compression test

Fig.3 に試料の動的圧縮試験結果を基に作成した緩衝特性図を示す。図の横軸は試料の単位受圧長さあたりの静的荷重の大きさで、重錘質量が 2.3kg、4.3kg、5.8kg、6.3kg、7.3kg で、試料の受圧長さは 20cm であるため、横軸の値はそれぞれ、1.13N/cm、2.11N/cm、2.84 N/cm、3.09 N/cm、3.58 N/cm である。また図の縦軸

は、重錘が落下し試料に衝突したときの加速度ピーク値 (PAcc) の 5 回計測平均値と、平均値±標準偏差の範囲をエラーバーで示している。

試料に動的圧縮が作用した後の写真 (a) は、単位長さあたりの静荷重が 1.13 N/cm の場合であり、加速度ピーク値が高く (524m/sec²)、このときの緩衝系は相対

的に硬すぎる。反対に写真(c)は、単位長さあたりの静荷重が 3.58 N/cm の場合であり、段ボールが座屈しきって底づきし、加速度ピーク値が高く (593m/sec^2)、その値も実験ごとに大きくばらつき、このときの緩衝系は相対的に柔らかすぎる。一方、写真(b)は、単位長さあたりの静荷重が 2.84 N/cm の場合であり、加速度ピーク値が最も低く (263m/sec^2)、緩衝機能としては適正な条件である。このような緩衝材の特性図を用いる場合、緩衝材の底づきを回避するために、緩衝曲線の極小点よりも高応力側で設計することは、加速度ピーク値も大きくばらつくので、適切ではない(Dead Zone)。

このような落下高さ別の段ボールスリーブ緩衝特性図を用いれば、最適条件より包装内容品の質量と落下高さ、および許容加速度から、製品が受ける段ボール構造体の長さを決定することができ、中川ら³⁾や著者ら⁴⁾により、その有効性が実験的に確かめられている。しかしながらこの方法は、段ボールのフルート・緩衝距離・包装品落下高さなど、緩衝効果に影響する要因について、多数回の動的圧縮試験をもとに多くの緩衝特性図をあらかじめ用意しておく必要があり、実用性の観点で問題が残されていた。

3. 段ボール構造体緩衝材の特性評価

前節では、段ボールスリーブ緩衝特性図より構造体緩衝材の基本設計が可能であるものの、緩衝特性図を得るための簡易的な方法が望まれている現状を述べた。そこでここでは、いろいろな重錘質量、重錘落下高さ、段ボールスリーブクッション高さ、フルートの組み合わせで動的圧縮試験を行い、得られた動的変位反力特性から、動的圧縮試験を 1 回行うだけで簡易的に段ボールスリーブ緩衝特性図が得られることを述べる。ただし、以下で述べる実験で用いた試料は、前節で用いた材料と同じであり、その方法も同様である。

Fig.4 は、A フルートのクッション高さ 42mm、重錘質量 8.3kg で落下高さを変化させたときの、動的変位反力特性を示す。ここに、動的圧縮試験により得られた同時刻の変位と、加速度値に重錘質量を乗じた反力の関係を図示している。これより、落下高さが低い場合は、底づきせず変位とともにほぼ一定の反力を示し、変位が 32mm (クッション高さ 42mm から A フルートの厚み 5mm の 2 倍を減じた値) あたりから反力が急上昇し底づきし始めていることがわかる。

Fig.5 は、A フルートの重錘質量 8.3kg、落下高さ 80cm で、クッション高さが

32mm と 42mm の場合を比較している。これより、両方の場合とも底つきしており、底つきするまでの反力の大きさは、**Fig.4** で得られた結果とほぼ同じ、クッション高さが 32mm の場合で変位が 22mm (クッション高さ 32mm から A フルートの厚み 5mm の 2 倍を減じた値) あたりから底つきし始めている。

Fig.6 は、クッション高さ 42mm、重錘質量 8.3kg、落下高さ 80cm で、A フルートと B フルートの場合を比較している。これより、両方の場合とも底つきしており、底つきするまでの反力の大きさは、**Fig.4** および **Fig.5** で得られた結果とほぼ同じ、B フルートの場合で変位が 36mm (クッション高さ 42mm から B フルート

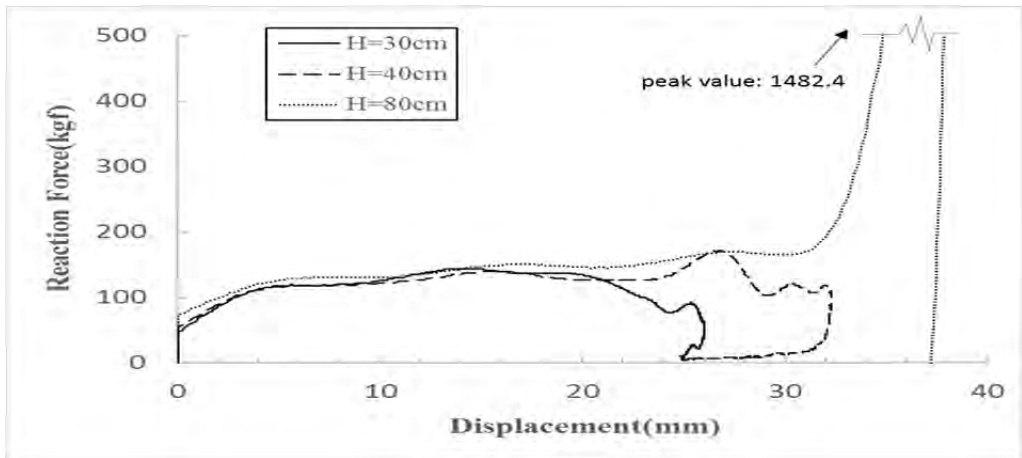


Fig.4 Comparison of different drop height using A-Flute when T=42mm, weight=8.3kg

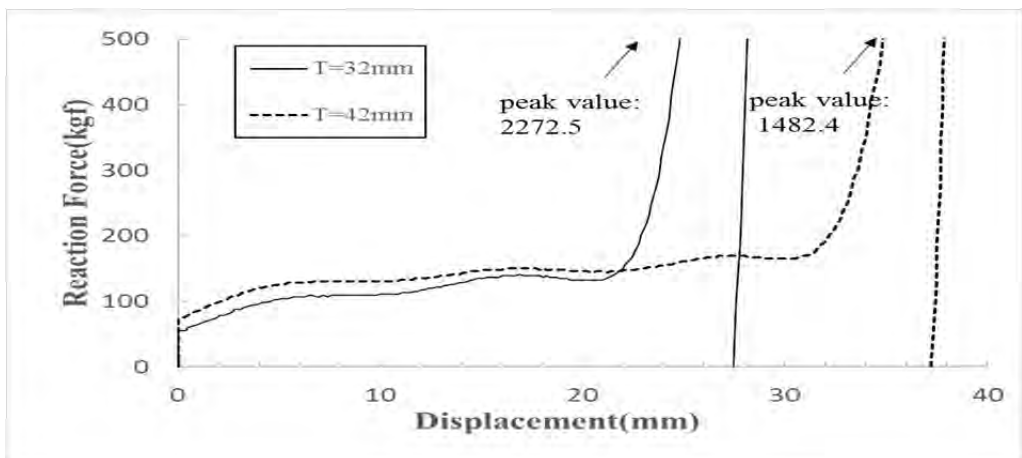


Fig.5 Comparison of different cushioning thickness using A-flute when H=80cm, weight=8.3k

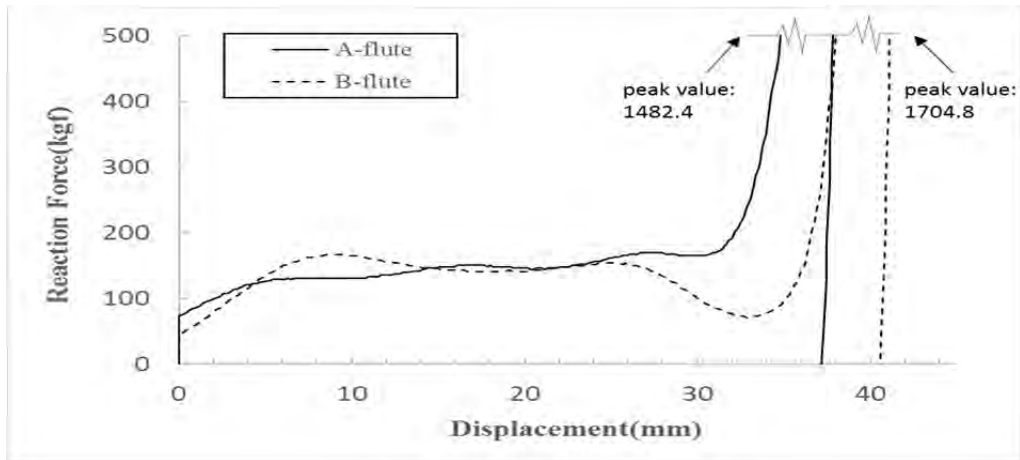


Fig.6 Comparison of different flutes when T=4.2cm, H=80cm, weight=8.3kg

の厚み 3mm の 2 倍を減じた値)あたりから底づきし始めている。

したがって、以下のようなことが言える。

(1) フルートに関わらず、段ボールスリーブが底づきしない変位領域での反力はほぼ一定であり、その値は段ボールの動的座屈荷重である。

(2) 段ボールスリーブが底づきするのは、クッション高さからフルートの厚みの 2 倍を減じた変位とみなせる。

なお以上の特性は、図で示した実験条件以外でもあてはまることを確認している。

4. 緩衝包装設計方法の簡便化 (Fig.7)

ある落下高さ H から質量 m の包装品が落下する場合の位置エネルギー E は、g を重力加速度とすれば、 $E=mgH$ である。

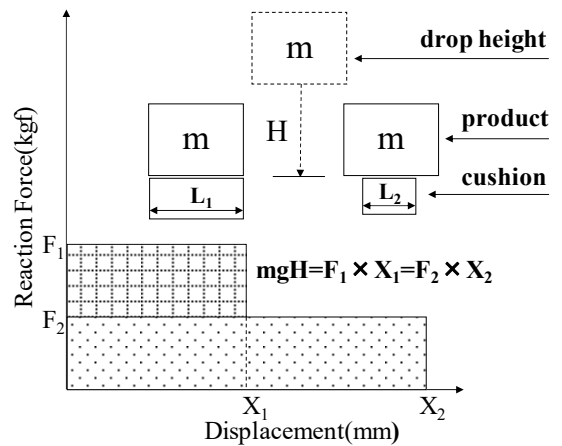


Fig.7 Relationship of L and F in corrugated board cushioning

段ボール構造体緩衝材によってそのエネルギーを吸収するとき、前節で得られた「底付きしないかぎり段ボール構造体緩衝材の反力は一定」という性質を利用すれば、 $E = mgH = F_1 \cdot X_1 = F_2 \cdot X_2$ という関係が成り立つ。ただし、包装内容品

を長さ L_1 の構造体緩衝材で受ける場合の最大変位は X_1 、一定反力は F_1 であり、長さ L_2 の構造体緩衝材で受ける場合の最大変位は X_2 、一定反力は F_2 としている。

また、底づきする直前の限界変位 X_{max} は、前節で得られた性質より $X_{max}=T-2t$ 、ここに、 T はクッション高さ、 t は使用する段ボールシートの厚さである。このときの反力 F は最小となり、 $F_{min}=mgh/(T-2t)$ が成り立つ。さらに反力の大きさ、すなわち段ボールスリーブの座屈荷重は、受圧長さ L に比例することはよく知られている。

従って、まず Fig.2 に示すような、段ボールスリーブを用いた動圧縮試験を、座

屈しつつも底づきしない程度の重錘質量 $m(\text{TEST})$ 、落下高さ、クッション高さの条件で 1 回実施し、そのときの最大（ほぼ一定の）加速度値 $\text{PAcc}(\text{TEST})$ を求める。次に、緩衝特性図を簡便に作成するために、単位受圧長さあたりの静的荷重が $m(\text{EST})/L$ のときの、最大加速度値 $\text{PAcc}(\text{EST})$ を、 $\text{PAcc}(\text{EST}) = \text{PAcc}(\text{TEST}) \cdot m(\text{TEST}) / m(\text{EST})$ によって求める。以上の手順に従って、Fig.8 のように黒丸で示された 1 回の動圧縮試験によって、段ボールスリーブ緩衝特性図を作成できる。Fig.8 には、単位受圧長さあたりの静的荷重の値 1.13N/m 、最大加速度値 524m/sec^2 の実験値をもとに、 2.11N/m と 2.84N/m のときの最大加速度値を予測した結果を

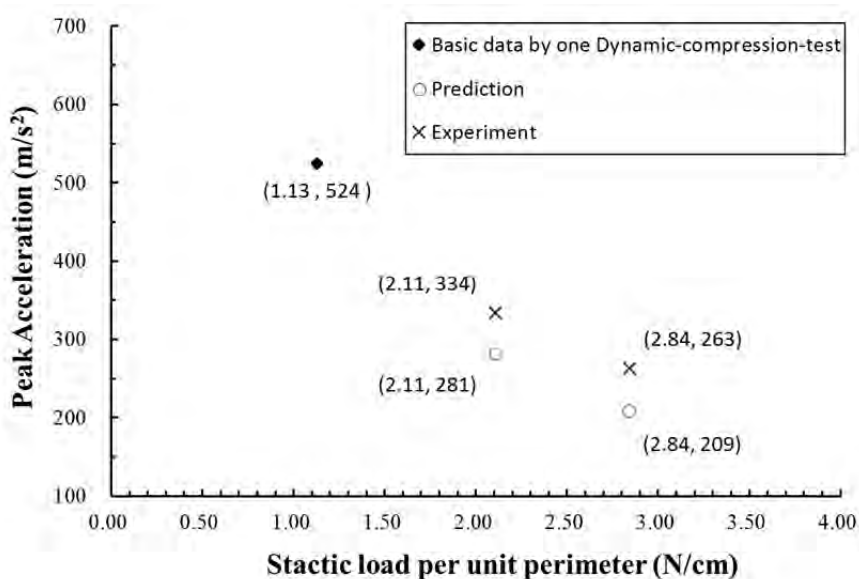


Fig.8 Result of dynamic compression curve combined with predicted acceleration

○印で示している。予測は、実験結果と比較すると、約2割程度過小評価している。ただし、実験による最大加速度のばらつきは平均値の約2割程度はばらつくので、ここでは予測精度としてはおおむね満足できると判断した。

よって、段ボール構造体緩衝材の基本設計法をまとめると、以下のような手順となる。

許容加速度が α_{\max} 、質量 m 、落下高さ h を緩衝設計の与条件とするとき、

(1) 包装内容品から受ける静的荷重 (mg) を、緩衝特性図の横軸である段ボール構造体緩衝材受圧部に作用する単位長さあたりの静的荷重値で除すことにより、受圧部長さを決定する。

(2) 緩衝すべき位置エネルギー (mgh) を、包装内容品へ作用させられる許容反力 (製品質量に許容加速度を乗じた値) で除すことで、緩衝材の座屈変位を求め、その値にフルート厚さの2倍を加えることで、クッション高さの最低値を決定する。

5. ケーススタディー

ここで提案した設計法の有効性を検証するために、緩衝包装した製品ダミーの自由落下試験を行った。製品ダミーは、加速度計測装置 (DER-1000:神栄テスト

マシナリー株) を内蔵した質量 8.9kg (静的荷重 87.22N) の木製であり (Fig.9)、許容加速度を 300m/sec^2 (許容反力 2670N) と想定する。



Fig.9 Dummy Product

いま、落下高さ条件を 60cm (位置エネルギー 52.332J) に設定し、Fig.8 で示される緩衝特性図より、加速度 300m/sec^2 以下である、単位受圧長さあたりの静的荷重値を、 2.11N/cm および 2.84N/cm として、緩衝設計する。

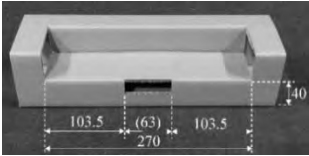
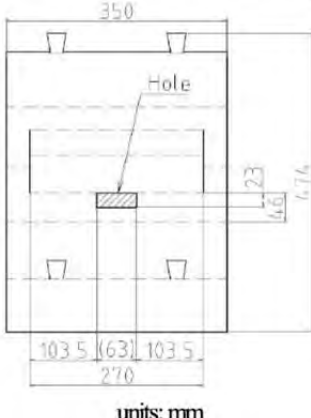
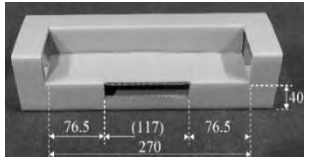
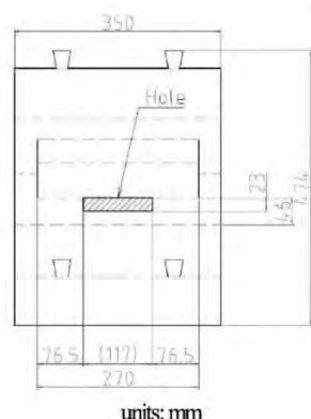
Table1 は、設計したクッションパットの写真、展開図面および受圧長さの算出根拠を示している。受圧長さの調整はクッションパッドの中部にある Hole にて行い、クッションパッドのを組み立て後十分な構造体強調を確保するため高さ方向に 23mm 残している。Type(a)は緩衝材受圧部の単位長さあたりの静的荷重が 2.11N/cm 、Type(b)は 2.84N/cm の場合である。Type(a)の場合、設計上での座屈変位は、 $21\text{mm}(52.332\text{J} / (8.9\text{kg} \times 281\text{m/sec}^2) \times 10^{-3})$ 、

Type(b) では、 $28\text{mm}(52.332\text{J} / (8.9\text{kg}\times 209\text{m}/\text{sec}^2)\times 10^{-3})$ であり、両タイプとも A フルートのクッション高さを 40mm としているので、設計上は底づきには至らない。(Type(a)で 9mm 、Type(b)で 2mm の余裕をみている。)

Fig.10 は、製品ダミーに設計試作した

クッションパットを施した状態を示し、Fig.11 は、緩衝包装した製品ダミーを A フルード段ボール箱に入れ、落下試験を行っている状況である。ただし、段ボール箱の底面フラップを事前にハンマーで潰しておくことで緩衝効果をなくしている。

Table1 Method of calculating the bearing length of corrugated cushion pad (Product dummy weight=8.9kg)

Type	Cushion pad	Drawing of cushion pad	Calculating bearing length
(a)	 <p>Bearing length excluding the hole $10.35(\text{cm})\times 2 = 20.6(\text{cm})$</p>	 <p>units: mm</p>	<p>Bearing length of 2 cushion pads $87.22(\text{N})/2.11(\text{N}/\text{cm})\div 4 = 1.4(\text{cm})$ Bearing length of each cushion pad $41.4(\text{cm})/2 = 20.6(\text{cm})$</p>
(b)	 <p>Bearing length excluding the hole $7.65(\text{cm})\times 2 = 15.3(\text{cm})$</p>	 <p>units: mm</p>	<p>Bearing length of 2 cushion pads $87.22(\text{N})/2.84(\text{N}/\text{cm})\div 3 = 0.6(\text{cm})$ Bearing length of each cushion pad $30.6(\text{cm})/2 = 15.3(\text{cm})$</p>

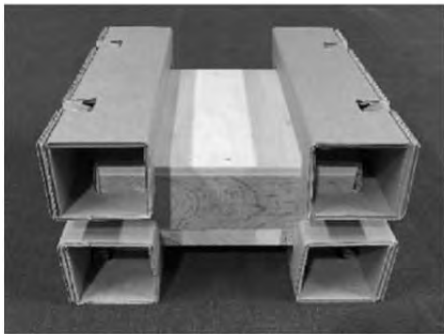


Fig.10 Dummy Package



Fig.11 Free fall test

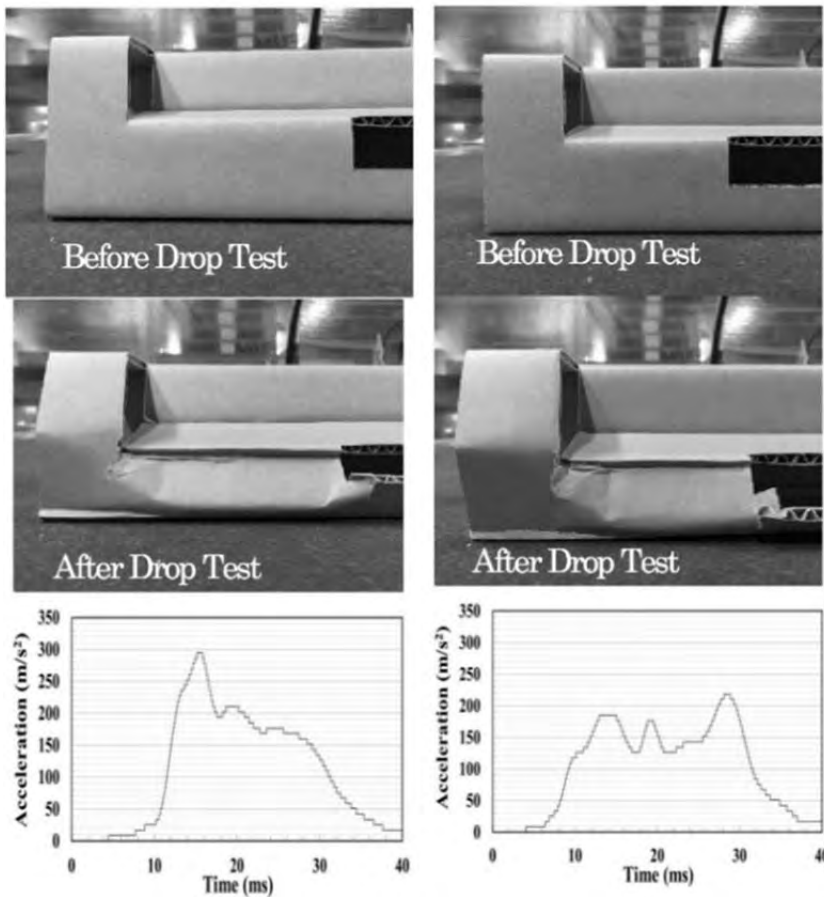


Fig.12 Top two rows show photographs of cushioning pads before and after free-fall drop test. Bottom row shows corresponding shock waves

落下試験前後のそれぞれのクッションパットの形状と計測された加速度時系列（ローパスフィルタ 300Hz）を Fig.12 に示す。Table2 には、type(a)と type(b)にそれぞれ 1 回の落下試験を行った最大加速度の計測値と設計値（緩衝特性図の縦軸値）を比較している。これらより、クッションパットの座屈によりエネルギーが吸収され、最大加速度の値も設計値とほぼ同程度（いずれのタイプも設計値より 5%低い）であり、緩衝設計の実務上十分な精度であると判断できる。

Table2 The results of actual tests and prediction

	PAcc of free-fall-drop-test(A) (m/s ²)	PAcc of prediction(B) (m/s ²)	(B-A)/A (%)
type (a)	295	281	-5%
type (b)	219	209	-5%

6. まとめ

段ボール構造体を用いた緩衝包装は、製品の形状によって多種多様に設計されるが、その基本は、段ボールの座屈によりエネルギーを吸収させるもので、受圧部の長さとかクッション高さの設計が基礎となる。本研究では、段ボールスリーブに対して 1 回の動的圧縮試験のみで得られる緩衝特性図より受圧部の長さとかクッ

ション高さを設計できることを提案した。また、その方法により緩衝包装設計した包装ダミーに自由落下試験を行うことで、本設計法が十分に実用的であることを例示した。これにより、従来包装設計現場では過去の経験やトライ・アンド・エラーに頼っていた設計プロセスを根本的に改善し設計効率を向上させることが可能である。ただしここでは、段ボール構造体の簡易包装設計法が論理的に的確であることをケーススタディにより実証しており、様々な構造形式(組み立て方)での段ボール緩衝材についてさらに検討をすすめるとともに、その有効性についても定量的に検証すべきである。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、実験用試料・試験設備をご提供いただいたティ・エス・ケイ株式会社には深く感謝を申し上げます。

<引用文献>

- 1) 張奇、斎藤勝彦、長岡克樹、ハイブリッド緩衝防振包装設計の提案、日本包装学会誌、**23** (6) , 417 (2014)
- 2) Qi Zhang, Katsuhiko Saito and Katsushige Nagaoka, Proposal of Hybrid Damping Package Design,

Journal of Applied Packaging Research,
8(3), 61(2016)

- 3) 中川幸臣、斎藤勝彦、段ボール構造体を用いた緩衝包装に関する一考察、日本航海学会論文集、**116**, 261(2007)
- 4) Qi Zhang, Katsuhiko Saito and Katsushige Nagaoka, Damping Package Design Using Structural Corrugated Board, Journal of Applied Packaging Research, **9**(3), 19(2017)

(原稿受付 2017年8月16日)

(採録受理 2017年9月15日)