

一般論文

段ボール緩衝構造の標準化による 設計曲線を用いた簡易設計法

山内 健司*、佐伯 崇洋*

Simplified Design Method using Design Curve by Standardization of Cardboard Cushion

Kenji YAMAUCHI* and Takahiro SAEKI*

製品を衝撃から保護するために緩衝包装が用いられており、その緩衝材の材料として環境負荷が低い段ボールが注目されている。しかし段ボールは緩衝構造の設計手法が十分に確立されておらず、短時間かつ試作が不要な設計手法が求められている。そこで本研究では、段ボール緩衝構造を標準化することで、設計曲線による簡易設計を可能とする手法を考案した。設計曲線を落下衝突シミュレーションにより推定し、落下試験で取得した実測データにより補正を施した。検証として、実際に製品包装の設計に適用して連続落下試験を実施し、実用可能であることを確認した。この手法は「設計の際に試作が不要である」「簡易な手計算のみで緩衝構造の主要寸法を算出することができる」という特徴があり、短時間で包装設計が可能である。

Cushioning Package is designed to protect products from shock, and cardboard is expected as cushion material which is superior in environmental appropriateness. However, packaging design method of cardboard is not established, and the design technique that does not need a long time and trial manufacture is demanded. Therefore, this study shows simplified design method using design curve by standardization of cardboard cushion. We estimated design curve by drop collision simulation and took revision by actual survey data which we acquired in drop test. For inspection, we applied this design method to a product package and confirmed that it was practicable. The characteristic of this method is “trial manufacture is demanded” and “Main dimensions are got by simple calculation” and we need short time.

キーワード：包装、輸送、緩衝、段ボール、設計法

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

*株式会社島津製作所(〒604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町 1), Shimadzu Co.1 Nishinokyo-Kuwararacho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, Japan, 連絡者(Corresponding author): 山内健司(Kenji YAMAUCHI), TEL: 075-823-1111, Email: ken_yama@shimadzu.co.jp

1. 緒言

輸送中の製品を衝撃から保護し、破損を防ぐために緩衝包装が用いられており、その緩衝材は発泡プラスチック系または紙系の材料が用いられることが多い。カーボンニュートラルの観点から注目されている紙系緩衝材の中でも段ボールはリサイクル率が極めて高く、環境負荷が低い材料である。しかし段ボールは緩衝構造の設計手法が十分に確立されておらず、包装設計においては経験やトライアンドエラーに頼らざるを得ず、費用と時間を要する。

この課題に対して 2007 年に設計法¹⁾が提案され、2017 年には効率のよい手法²⁾に改良された。この手法を用いることで 1 回の動的圧縮試験のみで得られる緩衝特性図から緩衝構造を設計することが可能となった。しかしケーススタディによる実証はなされているものの、実際に様々な製品の緩衝設計に用いるためには都度の実証実験が必要となり、動的圧縮試験のための時間や費用が必要であることは課題であった。

また、段ボールの FEM 解析技術についても研究の報告があり、段ボールを形成するライナーと中芯をシェル要素で詳細にモデル化する手法³⁾⁴⁾と、段ボールシートを単一素材と見なし簡易化してモデル化する手法³⁾⁵⁾がある。著者らは後者を用いて段ボール緩衝構造の落下衝突シミュレーションを行ってきた。しかし、緩衝構造が複雑で、かつ製品ごとに異なるため、モデル作成に時間を要するという問題があった。また「圧縮」「曲げ」だけでなく「せん断」を含む複雑な現象については解析の妥当性を保証することも困難であった。

製品包装の緩衝構造は短期間で設計することが求められるため、試作なしで設計可能な手法が求められる。一般的に発泡プラスチック系緩衝材に対しては、材料メーカーから入手可能な「最大加速度—静的応力線図」（以下、緩衝設計曲線とする）を用いて、試作なしで簡易的に設計することができる。段ボール緩衝材にこの手法を適用できない理由は、圧縮以外の現象が作用し、緩衝性能に影響するためであると考えられる。

そこで、圧縮現象が支配的となるように段ボール緩衝材の構造を標準化することで、緩衝設計曲線による簡易設計を可能とする手法を検討した。はじめに緩衝設計曲線を落下衝突シミュレーションにより推定し、落下試験で取得した実測データにより補正を施した。この緩衝設計曲線を用いて、目標通りの最大加速度となるような緩衝材の寸法を求めることが可能となる。さらに実際の製品用梱包に適用するために、連続落下試験に耐える段ボール緩衝構造を考案した。

本手法の検証として、試作した製品用の段ボール緩衝構造を ISO4180⁶⁾で規定されている条件での落下試験を実施し、最大加速度を設計値と比較した。

2. 実験方法

2.1 段ボール緩衝構造

一般的に、段ボール緩衝構造では「圧縮」「せん断」「曲げ」が複合的に起こる。本研究では設計曲線による簡易設計を可能とするために、衝撃加速度が大きくなる面落下の際に「圧縮」が支配的となる緩衝構造を考案した。実際の製品包装に用いる段ボール緩衝構造は、ISO4180⁶⁾や JIS Z 0200⁷⁾に規定されて

いる連続落下試験に合格するために複雑な構造となるが、まずは一方向の緩衝に絞った単純な構造で緩衝性能を評価するために構造(a)と構造(b)の2種類を考案した。(a)は底面の緩衝を想定した「センター合わせ型」(Fig. 1)、(b)は側面の緩衝を想定した「直角型」(Fig. 2)と称する。

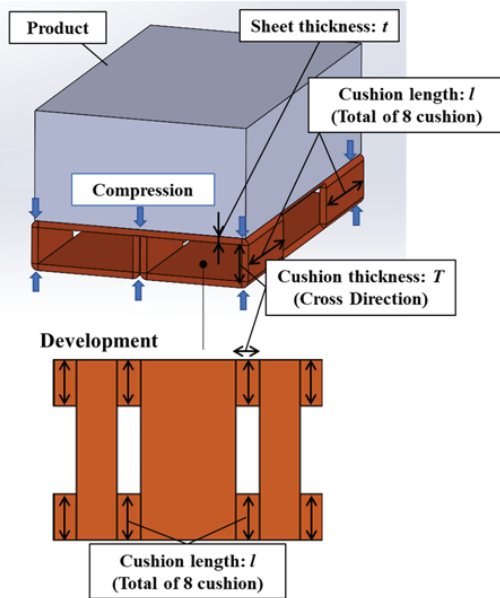


Fig. 1 Structure of cushioning pad (a)

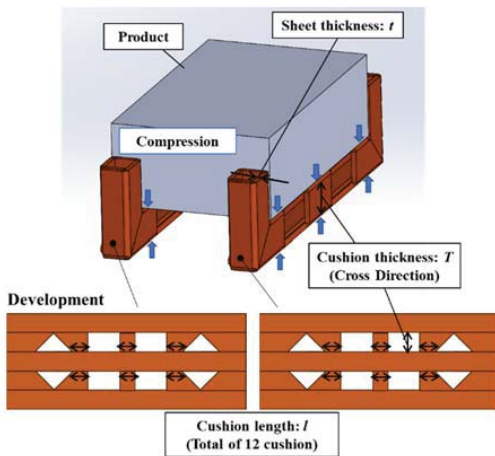


Fig. 2 Structure of cushioning pad (b)

支持部の圧縮方向は最も強い段目方向であるCD方向(Cross Direction)とし、製品の直下に存在することで圧縮が支配的となる構造とした。この支持部の厚さを「支持部厚さ(Cushion thickness) T 」、支持部の長さの合計を「支持部長さ(Cushion length) l 」、段ボールシートの厚さを「段ボールシート厚さ(Sheet thickness) t 」とする。

2.2 落下衝突シミュレーション

動的有限要素法プログラム LS-DYNA R11.2.2による落下衝突シミュレーションにより、Fig. 1とFig. 2に示した2種類の段ボール緩衝構造の緩衝設計曲線を推定した。

2.2.1 段ボールシートのモデル化

先行研究⁵⁾を参考に、段ボールシートを均一な素材と見なして、シェル要素によりモデル化する手法を用いた。本研究で対象とした段ボール材料は、ライナーにK6原紙を用いたABフルート(以下K6Wとする)と、ライナーにK5原紙を用いたAフルート(以下K5Aとする)の2種類である。これらの物性値取得のため、万能試験機(AG-100kND:島津製作所)を用いた圧縮試験と三点曲げ試験を実施した。段ボール試料の前処理として、ISO4180で規定されている通り恒温恒湿槽で温度23℃、相対湿度50%の環境下に4時間以上静置した。材料試験に用いた試料の寸法と試験方向はTable1に示す通りで、試験速度は10 mm/minとした。ここで、CD方向と直行する平面内の方向をMD方向(Machine Direction)、CD方向とMD方向の間の方向を45°方向とした。Fig. 3は圧縮試験、Fig. 4は三点曲げ試験の様子である。Fig. 5はK5Aの

CD 方向の圧縮試験で取得した荷重変位線図である。Fig. 6 は K5A の CD 方向を長手方向とした三点曲げ試験で取得した荷重変位線図である。すべての材料試験の結果を模擬できるように材料物性値のパラメータを合わせ込んだ。

Table 1 Test sample

Cardboard type	K6W, K5A
Sample size of Compression test (m)	0.03 × 0.09
Sample size of Bending test (m)	0.062 × 0.35
Compression Test direction	CD Direction MD Direction
Bending Test direction	CD Direction MD Direction 45° Direction

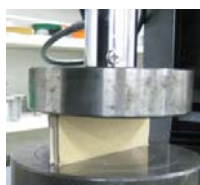


Fig. 3 Compression test

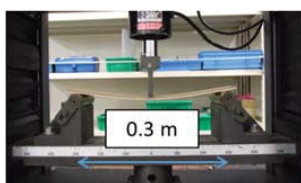


Fig. 4 Bending test

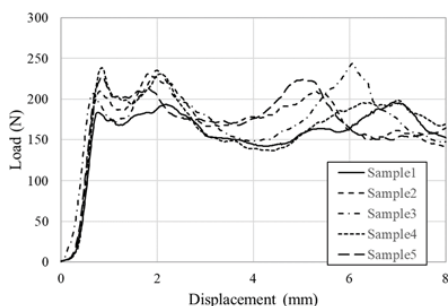


Fig. 5 Load-Displacement curve of K5A Cross Direction in Compression test

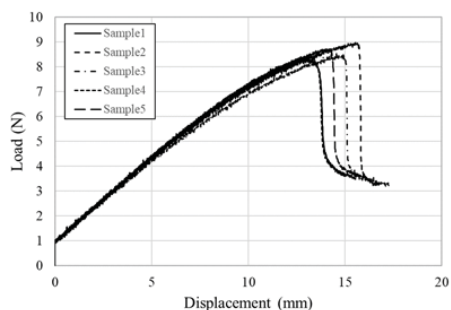


Fig. 6 Load-Displacement curve of K5A Cross Direction in Bending test

2.2.2 シミュレーションモデル

Fig. 7 は解析モデルの例である。製品と地面を剛体とし、Table2 の条件で落下衝突シミュレーションを行い、製品に生じる最大加速度を求めた。緩衝構造(a)と(b)で、支持部に加わる静的応力が同じ条件では最大加速度が同程度になることが試算によって分かったため、計算対象を (a)のみとした。ここで CD 方向の圧縮が起こっている支持部の受圧面積は、段ボールシート厚さ t [m] と支持部長さ l [m] の積であるため、静的応力 σ [kPa] は式(1)から求められる。 M [kg] は製品質量、 g [m/s²] は重力加速度である。静的応力 σ [kPa] が 7~81 kPa となるように製品質量と支持部長さを調整した。

$$\sigma = \frac{Mg}{tl} \times 10^{-3} \quad (1)$$

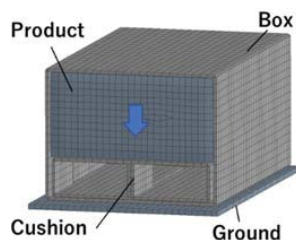


Fig. 7 Drop test simulation model

Table 2 Parameters of simulation

Cardboard type	Drop height h [m]	Cushion thickness T [m]	Static stress σ [kPa]
K5A	0.8	0.06	7, 10.5, 14, 17.5, 21, 22.7
K5A	0.8	0.1	7, 10.5, 14, 17.5, 21, 22.7
K5A	0.6	0.06	9.1, 15, 22.5, 30, 32.5, 37.5
K5A	0.6	0.1	15, 22.5, 30, 32.5, 37.5
K5A	0.45	0.06	12.5, 18.8, 25.1, 26.3, 31.3, 33.3, 36.8, 39.5, 52.6, 65.8
K5A	0.45	0.1	12.5, 18.8, 25.1, 26.3, 31.3, 39.5, 52.6, 65.8
K6W	0.6	0.06	13.4, 20.1, 22, 26.9, 33.1, 44.1

2.3 落下試験

落下衝突シミュレーションで推定した緩衝設計曲線を、実測値を基に補正するため、Table.3 の条件で落下試験を実施した。各条件のサンプル数を N とした。Fig. 8 は試験の様子である。製品の代わりに木箱の中に金属ブロックを入れたダミーを用いた。

段ボール緩衝材の前処理として、ISO4180 で規定されている通り恒温恒湿槽で温度 23℃、相対湿度 50 % の環境下に 4 時間以上静置した。DTS-80 (神栄テストマシナリー) を用いて落下試験を行い、加速度の測定には加速度センサ MODEL-2462 (昭和測器)、コントローラ SMH-12 (神栄テストマシナリー) を用いた。加速度のサンプリング周波数は 100 kHz、ローパスフィルタのカットオフ周波数は 250 Hz とした。また、落下試験の前後それぞれに緩衝材の支持部厚さ 3 か所を定規で測定し、平均値の差分から「圧縮厚さ (Compression length) x 」を算出した。

Table 3 Parameters of drop test

Cardboard type	Drop height h [m]	Cushion thickness T [m]	Static stress σ [kPa]	Number of samples N [-]
K5A	0.8	0.08	9.8	6
K5A	0.6	0.1	15	10
K5A	0.8	0.04	16.6	6
K5A	0.8	0.035	16.6	6
K5A	0.6	0.1	22.5	5
K5A	0.8	0.045	22.5	6
K5A	0.6	0.1	30	15
K5A	0.8	0.08	34.8	6
K5A	0.45	0.045	34.8	6
K6W	0.6	0.03	32	6
K6W	0.45	0.0225	32	6
K6W	0.6	0.045	40	6
K6W	0.45	0.045	40	6
K6W	0.6	0.06	67.9	6
K6W	0.45	0.045	67.9	6

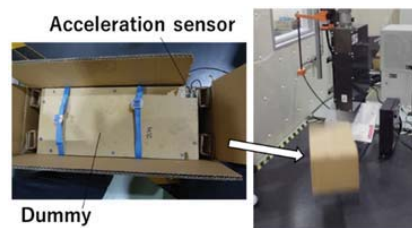


Fig. 8 Free drop test

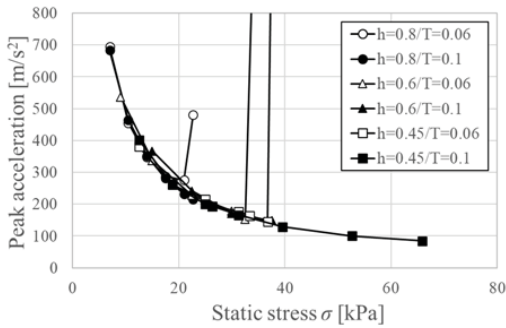


Fig. 9 Peak acceleration-Static stress plot of K5A cushioning pad

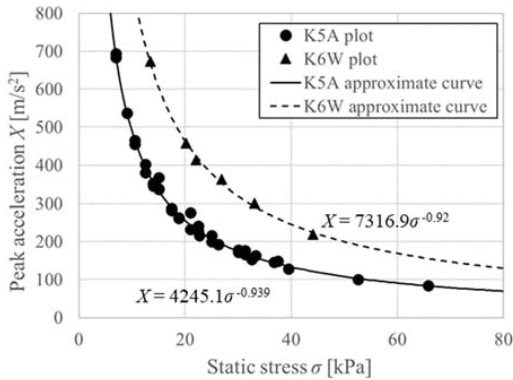


Fig. 10 Design curve of peak acceleration estimated by simulation

3. 結果

3.1 落下衝突シミュレーションの結果

Fig. 9 は落下衝突シミュレーションによって得られた K5A の緩衝設計曲線である。落下高さ h と支持部厚さ T が変化しても、支持部が完全に潰れ切って最大加速度が急増したもの（以降、底当たりと呼ぶ）を除けば、最小二乗法による累乗近似により段ボール種類ごとに Fig. 10 のような一本の緩衝設計曲線が求まることが分かった。発泡プラスチック系緩衝材は落下高さと緩衝部厚さが変化すると別の曲線となるため、一本の曲線で表現できることは段ボール緩衝材の強みである。

ただし Fig. 9 から読み取れるように、底当たりが起こる条件は落下高さ と 支持部厚さによって異なる。落下高さごとに適切な支持部厚さを設計する方法が別途必要となる。

3.2 支持部厚さの設計手法

底当たりする条件に影響するパラメータは加速度波形、落下高さ h [m]、支持部厚さ T [m]、圧縮厚さ x [m] である。底当たりしない条件は $T > x$ であるため、 x を求める必要がある。段ボール緩衝材を用いたときに製品に生じる加速度波形は、概ね台形波であることが知られている⁸⁾。簡略化のために加速度波形が Fig. 11 に破線で示した理想的な矩形波形を描くと仮定すると、製品は梱包が地面に衝突した瞬間から速度が 0 になるまでの間は一定の加速度で減速する等加速度運動となり、式 (2) が成り立つ。これは一般的に用いられる緩衝係数の関係式 (3) において、緩衝係数 $C = 1$ のときと同じ式である。緩衝係数 C の導出式 (4) において、応力 σ がひずみ ε によらず一定の値となり、 ε が 1 に至るまで圧縮する場合に $C = 1$ となり等しくなる。 v [m/s] は地面に衝突する直前の速度、 τ [s] は衝突後に速度が 0 となるまでに要した時間、 X [m/s²] は最大加速度、 g [m/s²] は重力加速度である。Fig. 12 はこの関係をグラフに表したものであり、これを支持部厚さ設計曲線と呼ぶ。

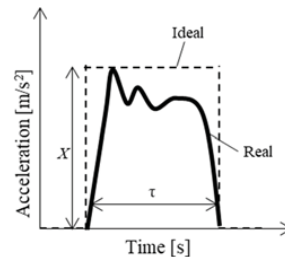


Fig. 11 Impact acceleration of free drop

この設計曲線を用いれば、最大加速度の目標値から $T > x$ となるような支持部厚さを決定することができる。この関係は段ボールの種類によらず共通である。ただし、実際には理想の矩形波形とはならず、圧縮厚さは **Fig. 12** より大きくなるため、実測データから実用可能な安全率を求めて用いる。

$$T > x = \frac{1}{2}v\tau = \frac{1}{2}v \cdot \frac{v}{X} = \frac{(\sqrt{2gh})^2}{2X} = \frac{gh}{X} \quad (2)$$

$$T = C \frac{gh}{X} \quad (3)$$

$$C = \frac{\sigma}{\int_0^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (4)$$

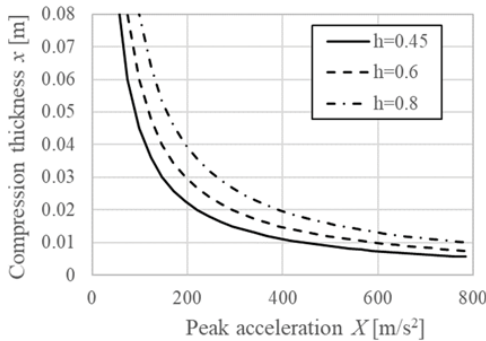


Fig. 12 Compression length in ideal acceleration

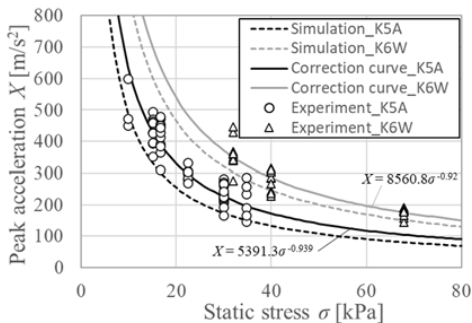


Fig. 13 Design curve of peak acceleration after experimental correction

3.3 落下試験による設計曲線の補正

推定した緩衝設計曲線と支持部厚さ設計曲線について、それぞれ落下試験による実測結果に基づいて補正した。緩衝設計曲線を **Fig.13** に示す。なお、実測結果が **Table.3** に記した N よりも少ないことは、加速度センサの固定不足や外箱の累積損傷により正しく測定できなかったデータを棄却したことによる。

落下試験でダミーに生じた最大加速度の測定結果はシミュレーションの結果より大きい傾向となったため、**Fig. 10** 内の式 $X = a \times \sigma^b$ の比例定数 a について最小二乗法を用いて補正した。最大加速度は補正した曲線に対して $\pm 25\%$ 程度ばらつくことが分かった。

設計の際は以下の手順で緩衝設計曲線を用いる。

- (1) 製品に生じる最大加速度の目標値を決定する。このとき、ばらつきの程度を考慮しておく。
- (2) 製品質量と、使用する段ボール種類を決定する。
- (3) 使用する段ボール種類の補正された緩衝設計曲線から静的応力を読み取る。
- (4) 式(1)を用いて、静的応力が(3)で読み取った値となる支持部長さを求める。

次に、実測した緩衝材の支持部の圧縮厚さを用いて、支持部厚さ設計曲線に適用する安全率を求めた。支持部厚さ設計曲線は落下高さごとに異なるため、本稿では例として落下高さ 0.45 m の場合を扱い、その結果を **Fig. 14** に示す。横軸の目標加速度 4 条件 (177、192、288、353 m/s^2) は、静的応力から **Fig. 13** の Correction curve に対応する加速度を読み取った値であり、各々の条件にて支持部の圧縮厚

さを実測した。目標加速度ごとの平均値 \bar{x} と不偏分散 s^2 を求め、99.7%信頼区間である $\bar{x}+3s$ を算出した。3条件すべてでこれを満たすように、式(2)に安全率 S をかけた式(5)を支持部厚さ設計曲線とした。安全率の値は落下高さ 0.45 m のとき 1.98 となった。

$$T > x = S \frac{gh}{X} \quad (5)$$

設計の際は以下の手順で支持部厚さ設計曲線を用いる。

- (1) 最大加速度の目標値を決定する。
- (2) 製品質量と、適用する落下試験の規格を決定する。これにより落下高さが決定する。
- (3) (2)で決定した落下高さの支持部厚さ設計曲線（落下高さ 0.45 m の場合は Fig. 14）から支持部の圧縮厚さを読み取る。
- (4) 支持部厚さを圧縮厚さより大きい範囲（Fig. 14 の斜線部）で決定する。

「最大加速度の目標値」「適用する落下試験の規格」「製品質量」「使用する段ボール種類」が決まれば、上で述べた緩衝設計曲線と支持部厚さ設計曲線の二つを用いることで、適切な支持部長さと支持部厚さを求めることができる。

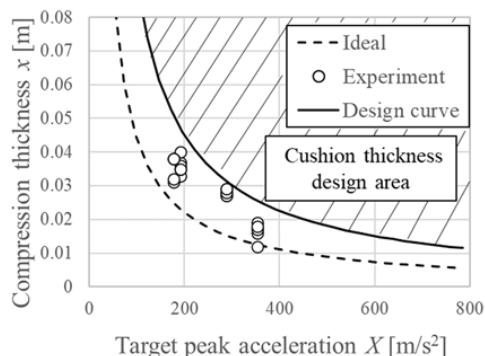


Fig. 14 Design curve of cushion thickness when drop height is 0.45 m

4. 考察

4.1 段ボール緩衝材の特徴

段ボール緩衝構造の緩衝設計曲線は、同じ段ボール種類するとき、底当たりしない範囲においては、落下高さと支持部厚さが変わっても同じ緩衝設計曲線になるという特徴があることが Fig. 9 と Fig. 10 から分かった。この事実は、段ボールの反力が底当たりしない範囲ではほぼ一定であるという先行研究²⁾と整合する。

Fig. 5 に示した CD 方向の圧縮試験で得られた荷重変位線図においても、降伏した後はほぼ一定の反力で圧縮変形が進むという特徴を読み取ることができる。実際に緩衝構造が圧縮される際は降伏後の圧縮がほとんどの割合を占めており、降伏前の特性の影響は十分小さいと考えられる。

4.2 連続落下試験による検証

実際の製品包装に適用するためには、規格⁶⁾⁷⁾で定められた連続落下試験においても構造を保つことができ、いずれの面落下方向においても CD 方向の圧縮が支配的となる必要がある。これを満たす構造として、Fig. 15 に示す段ボール緩衝構造 A および B を考案した。これらの緩衝構造と緩衝設計曲線による設計手法は特許出願済⁹⁾である。Fig. 16 のように x、y、z の各軸方向の落下に対してそれぞれ CD 方向 Axis x、y、z の圧縮で緩衝できるように段ボールシートの折り方を工夫しており、かつ圧縮部を製品の直下に収めることでせん断が起こらない構造とした。A は上下とも 1 枚の段ボールシートから製作できるため低コストとなる。B は下側を 2 枚の段ボールシートから

製作するため大型の製品に適用することができる。

設計曲線を用いて段ボール緩衝構造を設計し、落下試験で実際に発生する最大加速度を設計値と比較した。最大加速度の目標値を $392.4 \text{ m/s}^2 (= 40 \times 9.81 \text{ m/s}^2)$ 、適用する落下試験の規格を ISO4180、製品質量を 12.8 kg、使用する段ボール種類を K6W とした。このとき支持部長さは Fig. 13 の緩衝設計曲線から 0.555 m、支持部厚さは落下高さ 0.6 m 用の支持部厚さ設計曲線から 0.033 m 以上が必要と算出されたため 0.035 m とした。

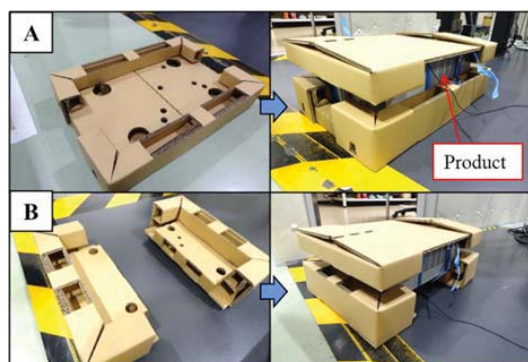


Fig. 15 Standard cardboard cushion

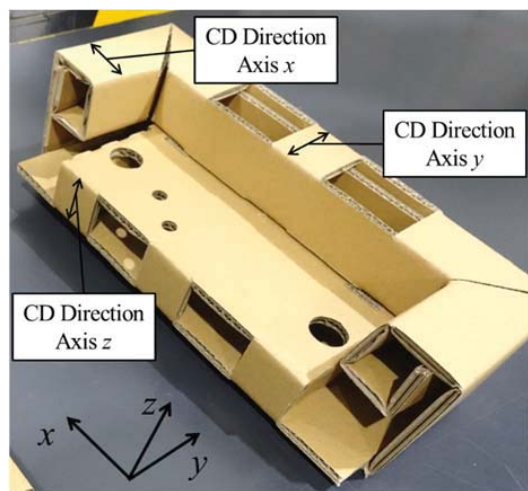


Fig. 16 Compression direction

Table 4 Peak acceleration of the drop test

	No.	Bottom (m/s ²)	Back (m/s ²)	Left (m/s ²)
A	1	433.6	416.9	623.9
	2	410.1	425.8	509.1
	3	398.3	468.9	575.8
B	1	299.2	396.3	371.8
	2	301.2	453.2	521.9
	3	304.1	395.3	500.3

標準ダンボール緩衝構造 A、B の 2 種について、落下高さ 0.6 m から ISO4180 に基づく 11 方向（底面、後面、左面、下方向 4 稜、下方向 4 角）の連続落下試験を実施した。サンプル数は 3 とした。稜落下と角落下の加速度は面落下より小さいため、代表として面落下（底面、背面、左側面）のときの最大加速度を Table 4 に示す。連続落下でも最大加速度は概ね目標値 $\pm 25\%$ となることが分かった。

ただし、左側面落下の最大加速度の一部が、目標値 $+25\%$ を上回った。この原因は製品のゴム足やねじ頭などの突起が緩衝時に緩衝構造に引っ掛かり、CD 方向の圧縮が支配的とならなかったためと考えられる。設計の際の注意点として、製品の突起部が引っ掛からないように逃がし穴を十分大きくするなど注意が必要である。

5. 結論

本論文では段ボール緩衝構造について、面落下の緩衝メカニズムを CD 方向の圧縮が支配的となるように標準化することで、設計曲線による設計を可能とする手法を提案した。また、実際に製品包装の設計に適用して連続落下試験を実施し、実用可能であることを確認した。この手法は「設計の際に試作が不要である」「簡易な手計算のみで緩衝構造の主要寸法を算出することができる」という特徴が

あり、極めて短時間で包装設計が可能である。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) CD 方向の圧縮が支配的となる段ボール緩衝構造の緩衝設計曲線は、落下高さ h と支持部厚さ T が変化しても、底当たりしない範囲では、段ボール種類ごとに一本で表現できることを明らかにした。
- (2) 段ボール緩衝構造が底当たりしない条件を設計するために、落下高さごとの支持厚さ設計曲線を用いる手法を考案した。
- (3) 緩衝設計曲線は、シミュレーションで推定した曲線を実測結果で補正することで取得した。支持厚さ設計曲線は、手計算で推定した曲線を実測結果で補正することで取得した。
- (4) 連続落下試験においても構造を保つことができ、いずれの面落下方向においても CD 方向の圧縮が支配的となるような標準段ボール緩衝構造を考案した。
- (5) 実際に設計曲線を製品包装の設計に適用して試作・連続落下試験し、実用可能であることを確認した。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、実験用緩衝材の設計製作へのご協力、ならびに種々のご助言をいただいた島津ロジスティクスサービス株式会社の皆様に深く感謝を申し上げます。

- 2) 張奇, 斎藤勝彦, 高橋光, 段ボール構造体を用いた緩衝包装の簡易設計法, 日本包装学会誌, **26(6)**, p. 331 (2017)
- 3) 三上英一, 茨木孝昌, 小林孝男, 小高功, 有限要素法による段ボールシートの垂直強さの解析, 日本包装学会誌, **13(4)**, p. 243 (2004)
- 4) 中川幸臣, 丹羽一邦, 包装設計の FEM 解析における段ボールのモデル化の検討, 日本包装学会誌, **14(5)**, p. 317 (2005)
- 5) 中川幸臣, 構造解析ソフトを利用した段ボールのシミュレーションについて, 包装技術, **48(11)**, p. 844 (2010)
- 6) ISO 4180 (2009), Packaging -- Complete, filled transport packages -- General rules for the compilation of performance test schedules
- 7) JIS Z 0200 (2013), 包装貨物-性能試験方法一般通則
- 8) 堀口翔伍, 斎藤勝彦, 正弦半波による 1 試料での製品衝撃強さ試験, 日本包装学会誌, **29(6)**, p.437 (2020)
- 9) 山内健司, 佐伯崇洋, 田中修, 南あゆみ, (株式会社島津製作所, 島津ロジスティクスサービス株式会社), 特願 2022-119794

(原稿受付 2023年4月27日)

(採録受理 2023年8月16日)

<参考文献>

- 1) 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**, p. 261 (2007)