

最適緩衝設計手法の応用

第2報：段差を有する製品への適用

中嶋隆勝* 寺岸義春* 高田利夫* 野上良亮*

The Application of the Optimum Cushioning Design Method for Packaging

The 2nd Report : The Application to the Product with a Step

Takamasa NAKAJIMA*, Yoshiharu TERAGISHI*,
Toshio TAKADA*, Ryosuke NOGAMI*

We developed the optimum cushioning design method for the product with a step. In addition, we investigated how the step of a product influenced the optimum shape of cushion by the simulation of this optimum cushioning design method. The main results obtained are as follows :

- (1) The optimum shape of cushion II (the cushion at the convex side of product) isn't influenced by the length of the step.
- (2) The area of cushion I (the cushion at the concave side of product) decreased with the length of the step monotonously while the cushion is stable for the buckling. And while the cushion is the shape of limitation of buckling, it increased monotonously.
- (3) Both of the volume of cushions and the cost of package materials leveled off with the length of the step while the cushion is stable for the buckling. And they increased with the length of step monotonously while the cushion is the shape of limitation of buckling.
- (4) In minimizing the thickness of cushion, even if the product has a small step, the area of cushion I, the volume of cushions and the cost of packaging materials can be reduced.

Keywords : Package, Optimum cushioning design, Dropping shock, Step, Strength of product, Cushion, Environment of transportation

段差を有する製品に対する最適緩衝材設計手法を開発した。また、製品の段差が緩衝材の最適形状などにどう影響するかを本手法による設計のシミュレーションによって調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 凸側緩衝材の最適形状は段差の大きさにあまり影響されない。
- (2) 凹側緩衝材の受け面積は、緩衝材の形状が座屈条件の限界に達するまでは段差が大きくなるにつれて単調に減少するが、座屈する限界となった後は単調に増加する。
- (3) 緩衝材の使用量及び包装材料費は、凹側緩衝材が座屈する限界の形状となるまでは段差が大きくなっても変化しないが、座屈する限界となった後は段差が大きくなるにつれて単調に増加する。
- (4) 緩衝材の厚さを最小化した場合、少しでも段差があれば、凹側緩衝材の受け面積、緩衝材の使用量、包装材料費は削減できる。

キーワード：包装、最適緩衝設計、落下衝撃、段差、製品強度、緩衝材、輸送環境

* 大阪府立産業技術総合研究所（〒550 大阪府大阪市西区江之子島2-1-53）: Osaka Prefectural Industrial Technology Research Institute, 2-1-53, Enokojima, Nishi-ku, Osaka-shi, Osaka, 550

1. 緒言

流通過程において使用される包装材料を適正な量に削減することは、企業の利潤追求の目的だけでなく、環境保護、省資源などの観点から重要な課題である。

著者らは、緩衝材の使用量を適正化するための研究^{1)~4)}を行ってきた。前報⁴⁾では、突起物を有する製品についての最適緩衝設計手法を報告した。

本研究では、前報⁴⁾同様に従来の緩衝設計理論⁵⁾に基づき、テレビなどのように段差を有する製品について、設計の制約条件(製品強度、製品の受け部の面積など)を満足する範囲内で、最適化の目標(緩衝材の厚さの最小化、緩衝材の使用量の最小化、包装材料費の最小化)を達成するような緩衝材の形状が決定できる最適緩衝設計手法を開発した。また、本手法による設計のシミュレーションによって、製品の段差が緩衝材の最適形状などに及ぼす影響について検討した。

2. 最適緩衝設計手法

2.1 設計変数及び最適化目標

実際に緩衝材を設計する際、輸送環境や製品強度だけではなく、製品の形状などを考慮して、緩衝材の詳細な寸法を決定しなければならない。しかし、ここでは簡単化のため前報⁴⁾と同様、最も緩衝特性に影響を与える緩衝材の厚さ t と面積 A のみを設計変数とした。

また、前報⁴⁾と同様、緩衝材の厚さ、緩衝材の総使用量、包装材料費(緩衝材と外装段ボールの材料費の和とした。)を最適化の目標(目的関数)とし、これらのうち1つを選択

できるようにした。

2.2 設計仕様

本設計手法で考えた落下衝撃のモデルを Fig. 1 に示す。ここで、本システムに入力が必要な仕様を以下のように設定した。

- (1) 輸送環境のレベル(落下高さ)
- (2) 緩衝材の特性(応力-ひずみ線図)
- (3) 緩衝材の許容ひずみ(ϵ_a)
- (4) 製品の許容衝撃加速度(α_a or G_a)
- (5) 製品の受け部の強度(σ_a)
- (6) 製品の外寸法、質量
- (7) 段差(X)
- (8) 製品の受け部の面積(A_a)
- (9) 緩衝材、段ボールの単価

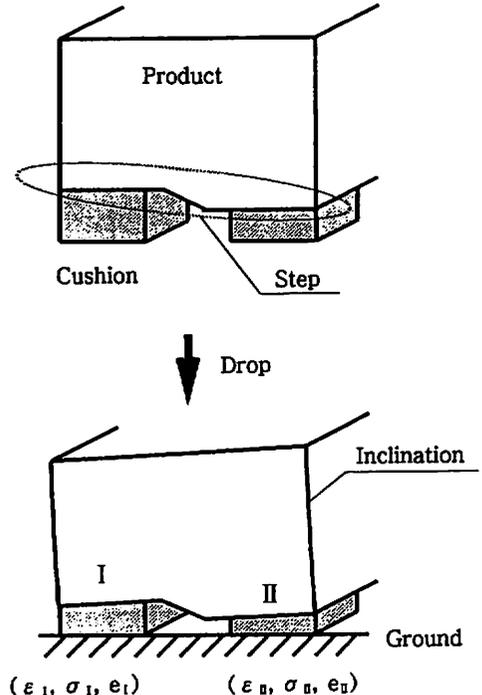


Fig. 1 Illustration of drop collision modeling of a packaged cargo of product with step

ここで、(6) 製品の寸法及び (9) 緩衝材、段ボールの単価は包装材料費を最適化する際、包装材料費を算出するために用いた。また、製品の重心は製品の中央部にあるとした。

2.3 プログラムの概要

本システムでは、最適緩衝設計手法²⁾を改良して、最適設計寸法を次のような手順で決定した。

ここで、製品の段の凹側と凸側に取り付ける緩衝材をそれぞれ凹側緩衝材、凸側緩衝材とする。また、Fig. 1のように凹側をI、凸側をIIで表す。

まず、凹側緩衝材、凸側緩衝材の最大ひずみ ε 、最大応力 σ 、単位体積当たりの吸収エネルギー e がそれぞれ $(\varepsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 、 $(\varepsilon_2, \sigma_2, e_2)$ になるような緩衝材の形状すなわち厚さと面積の組み合わせにどのようなものが存在するかを調べる (Fig. 2の上下グラフの双曲線①及び⑤)。次に、設計の制約条件を満足する範囲を調べる (Fig. 2の上グラフの②③④及び下グラフの⑥⑦⑧の範囲)。これらが重なった部分がそれぞれの緩衝材の設計可能な寸法の集合となる (Fig. 2双曲線①及び⑤の太線上)。しかし、凹側緩衝材の厚さは凸側緩衝材の厚さに比べて段差分厚くなければならない。すなわち、次式が成立しなければならない。

$$t_1 = t_2 + X$$

ここで、 X は段差を表す。

よって、それぞれの緩衝材の厚さはFig. 2の上下グラフの中間に位置する棒グラフの斜線で示した範囲にななければならない。

Fig. 2で示した①～⑧の制約条件の内容は次のとおりである。

①及び⑤上の点は、緩衝材が落下衝撃エネルギーを完全に吸収した時の緩衝材のひずみ、応力、単位体積当たりの吸収エネルギーがそれぞれ $(\varepsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 、 $(\varepsilon_2, \sigma_2, e_2)$ となるような緩衝材の形状を表す。また、この曲線は緩衝材が吸収する全エネルギーと落下エネルギーとが等価であることから導き出される。そのエネルギーの等価式は次式である。

$$Ate = MgH$$

ここで、 M は製品の質量、 g は地球の重力加速度、 H は落下高さである。

②及び⑥は製品に発生する衝撃加速度が製品の許容衝撃加速度以下となる制約条件であり、次式で表される。

$$\frac{A\sigma}{M} < a_c$$

③及び⑦は緩衝材が座屈しないという制約条件であり、次式⁹⁾で表される。

$$A > \left(\frac{4}{3}t\right)^2$$

ただし、受け面の形状は正方形に近いものとする。

④及び⑧は緩衝材の面積が製品の受け部の面積以下となる制約条件であり、次式で表される。

$$A < A_c$$

これらの制約条件を満足する範囲の中で設計の目的関数を最も満足する点が、最大ひずみが ε_1 、 ε_2 となる範囲内の緩衝材の最適形状である。目的関数を緩衝材の厚さまたは

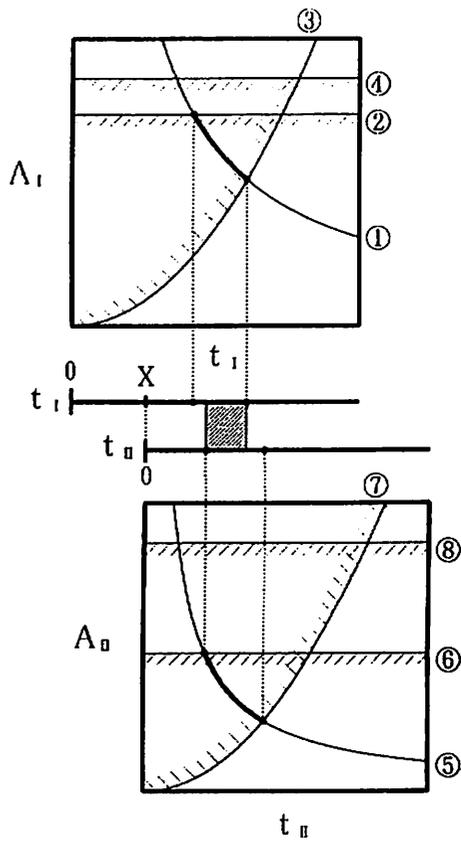
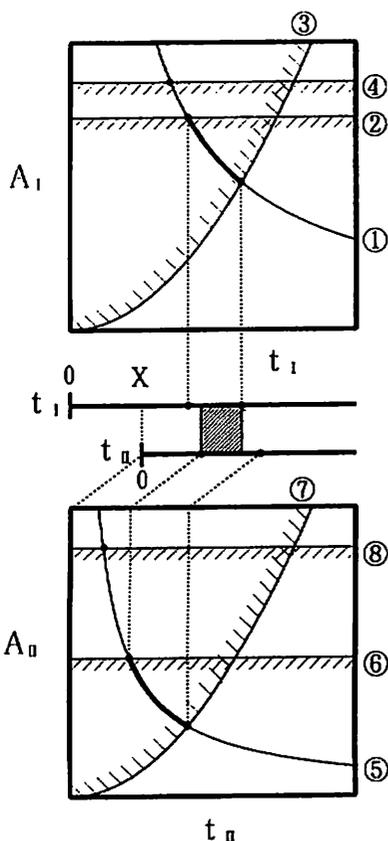


Fig. 2 Design feasible region under the restraints. The upper and lower graphs show the restraints about cushion I and cushion II, respectively. And the middle bar graphs show the design feasible thickness of cushion I and that of cushion II.

Fig. 2 Design feasible region under the restraints. The upper and lower graphs show the restraints about cushion I and cushion II, respectively. And the middle bar graphs show the design feasible thickness of cushion I and that of cushion II.

包装材料費とした場合、目的関数が最小となる点は緩衝材の厚さが最小となる点である。なぜならば、曲線①及び⑤上の点であれば緩衝材の体積はすべて等しいため、緩衝材の厚さが最小となる時、必要となる段ボールの量が最小化され包装材料費が最小となるためである。

上記の理由から、緩衝材の使用量を最小化した場合の最適解は多数存在する。そのため、2番目に優先される最適化の目標として

緩衝材の厚さの最小化を設定することによって、最適解を決定できるようにした。

以上の作業をさまざまな $(\epsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 及び $(\epsilon_2, \sigma_2, e_2)$ に対して行うことによって、すべての緩衝材の最大ひずみに対する最適設計寸法が決定できる。

ただし、次の2つの制約条件を満す範囲内で $(\epsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 及び $(\epsilon_2, \sigma_2, e_2)$ を変化させなければならない。

(1) 緩衝材に発生する最大応力が製品受け

部の強度 σ_a 以下でなければならないという
制約条件

$$\sigma \leq \sigma_a$$

(2) 緩衝材の最大ひずみが緩衝材の許容ひずみ以下でなければならないという制約条件

$$\varepsilon \leq \varepsilon_a$$

これは緩衝材の劣化がひどくならないために設定した条件である。

制約条件によっては、緩衝材の厚さを最小化した場合、凹側緩衝材には多数の最適解が存在する。その時、凹側緩衝材の最適解を唯一に決めるため2番目に優先される最適化の目標として緩衝材の体積の最小化を設定した。

以上の手順をFig. 3に示す。

3. シミュレーション

本シミュレーションで用いたすべての設計仕様を以下に示す。ただし、段差が緩衝材の最適形状や包装材料費などにどのように影響するかを調べるため、さまざまな段差に対して設計のシミュレーションを行った。

- (1) 落下高さ：60cm (底面落下)
- (2) 緩衝材：発泡ポリエチレン45倍
- (3) 緩衝材の許容ひずみ：75%
- (4) 製品の許容衝撃加速度：588m/s² (60G)
- (5) 製品の受け部の許容応力：1.0MPa
- (6) 製品の外寸法：800×600×600mm
- (7) 製品の質量：40kg
- (8) 製品の受け部の面積：1200cm²
- (9) 緩衝材の数：底面に4個 (2種類の緩衝材の厚さを段差に合わせる。)

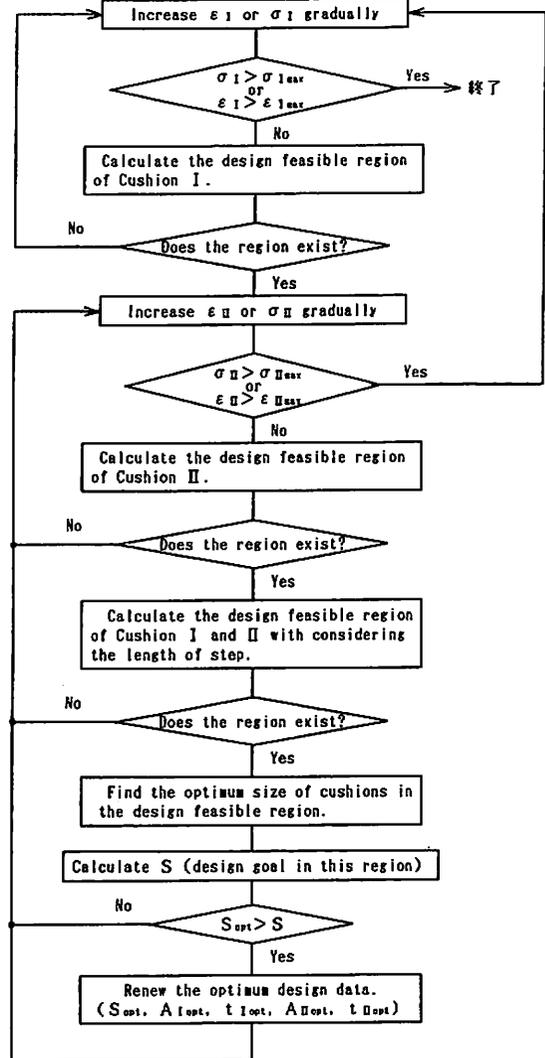


Fig. 3 Algorithm for finding the optimum design size of cushions

- (10) 包装材料費を最小化する際、緩衝材、段ボールの単価をそれぞれ3200円/m³、100円/m²とした。

4. 結果と考察

4.1 緩衝材の厚さについて

Fig. 4より、緩衝材の厚さ及び使用量、包

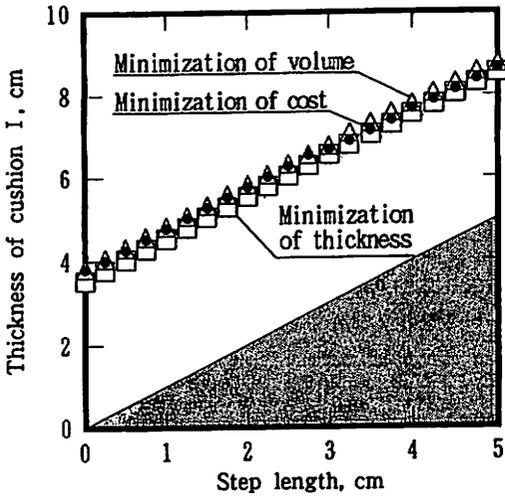


Fig. 4 Relationship between the thickness of cushion I and the step length calculated from the simulation results

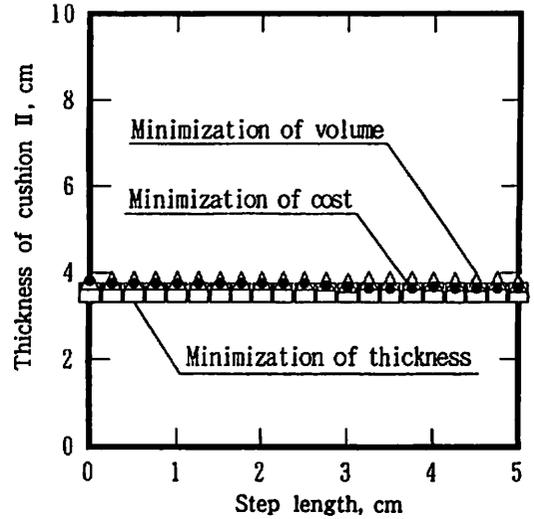


Fig. 5 Relationship between the thickness of cushion II and the step length calculated from the simulation results

装材料費のうちどれを最小化した場合でも、凹側緩衝材の厚さは段差が大きくなるにつれて単調に増加する傾向があった。また、Fig. 5より、緩衝材の厚さ及び使用量、包装材料費のうちどれを最小化した場合でも、凸側緩衝材の厚さは段差が大きくなってあまり変化しない傾向があった。

これらの傾向から、製品の段差が大きくなって、貨物の外寸法はあまり変化しないことがわかる。そのため、製品の段差の大小は、段ボール使用量や倉庫などでの貨物の保管スペースなどにはあまり影響しないと考えることができる。

4.2 緩衝材の受け面積について

Fig. 6より、緩衝材の厚さ及び使用量、包装材料費のうちどれを最小化した場合でも、凹側緩衝材の面積は、段差が約3cmまでは段差が大きくなるにつれて単調に減少する傾向があるが、段差が約3cmを越えて大きくなる

と、凹側緩衝材の面積は単調に増加する傾向があった。

また、Fig. 7より、緩衝材の厚さまたは緩衝材の使用量を最小化した場合、凸側緩衝材の面積は、段差が大きくなってほぼ一定の値となる傾向があった。一方、包装材料費を最小化した場合、凸側緩衝材の面積は、段差が大きくなるにつれて、厚さを最小化した時の面積に近づく傾向があった。

4.3 緩衝材の最大ひずみについて

Fig. 8より、緩衝材の使用量または包装材料費を最小化した場合、段差が約3cmになるまで、凹側緩衝材の最大ひずみはほぼ一定の値を保つ傾向があった。また、同図より、段差が約3cmを越えて大きくなるにつれて凹側緩衝材の最大ひずみは単調に減少する傾向があった。この理由は以下のとおりである。

段差が約3cmの時、凹側緩衝材の形状はちょうど座屈の限界となる。一般に、段差が大

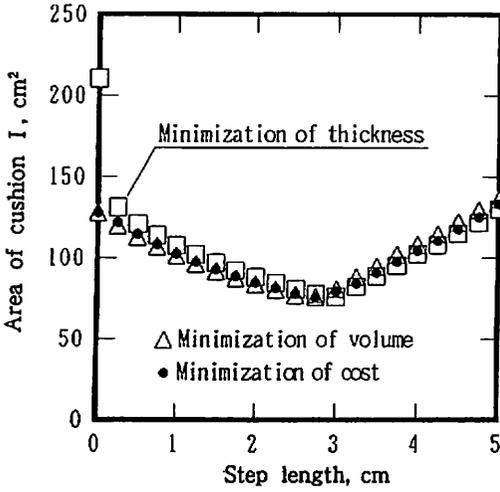


Fig. 6 Relationship between the area of cushion I and the step length calculated from the simulation results

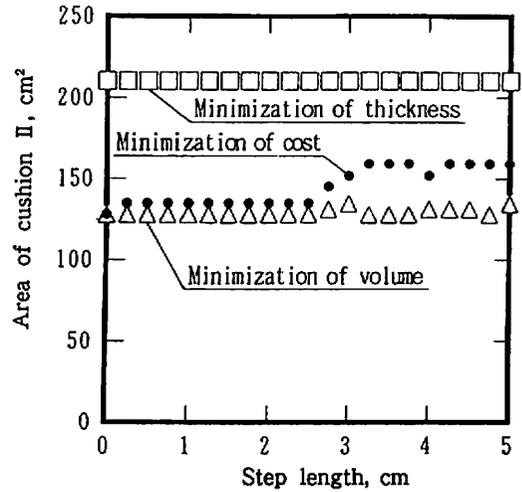


Fig. 7 Relationship between the area of cushion II and the step length calculated from the simulation results

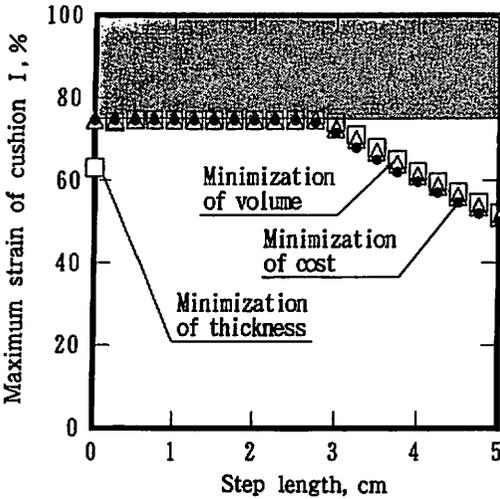


Fig. 8 Relationship between the maximum strain of cushion I and the step length calculated from the simulation results

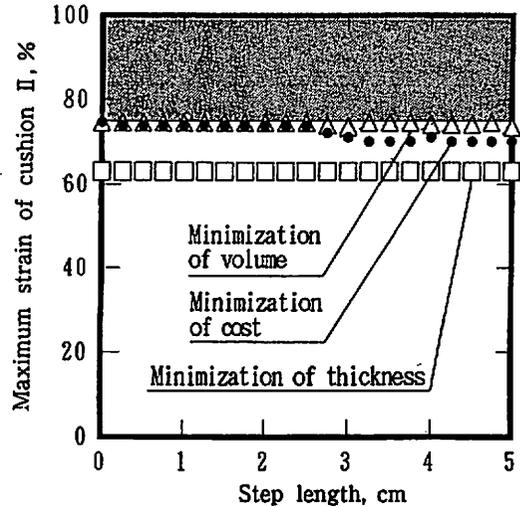


Fig. 9 Relationship between the maximum strain of cushion II and the step length calculated from the simulation results

きくなれば、凹側緩衝材の最適形状はより座屈しやすい形状になる傾向がある。このため、段差が大きくなれば、緩衝材を座屈しないような形状にするために、緩衝材の面積を増やさなければならない。よって、段差が大

きくなるにつれて、凹側緩衝材の体積は単調に増加し、それによって、単位体積当たりの吸収エネルギー（緩衝材のひずみエネルギー）、最大ひずみ、最大応力は単調に減少する。

Fig. 9より、緩衝材の厚さまたは緩衝材の使用量を最小化した場合、凸側緩衝材の最大ひずみは、段差が大きくなってもほぼ一定の値となる傾向があった。この傾向は、凸側緩衝材の形状が段差が大きくなっても変化しないことから理解できる。

また、Fig. 9より、包装材料費を最小化した場合、凸側緩衝材の最大ひずみは、段差が大きくなるにつれて、厚さを最小化した場合の凸側緩衝材の最大ひずみに近づく傾向があった。

4.4 緩衝材の使用量について

Fig. 10より、緩衝材の使用量または包装材料費を最小化した場合、段差が0から約3cmまでの範囲では、段差が変化しても緩衝材の使用量はほぼ一定の値を保つが、段差が約3cm以上の範囲では段差が大きくなるにつれて緩衝材の使用量は単調に増加する傾向があった。

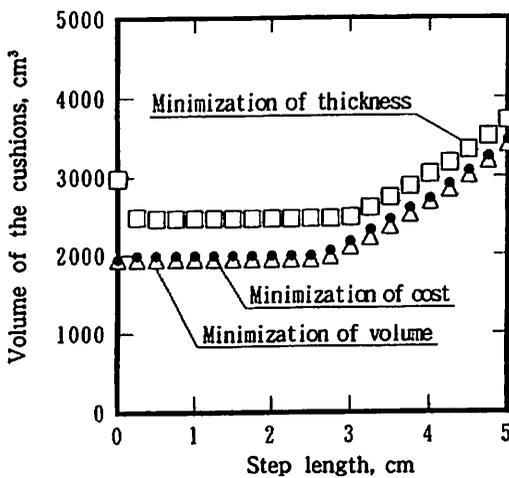


Fig. 10 Relationship between the volume of the cushions and the step length calculated from the simulation results

以上の傾向の理由は、Fig. 8及びFig. 9の段差と最大ひずみの関係から理解できる。

緩衝材の最大ひずみと単位体積当たりの吸収エネルギーとの間には一対一対応の関係がある。また、製品の落下エネルギーが一定であるため、緩衝材の体積は緩衝材の単位体積当たりの吸収エネルギーに反比例する。これらのことから、緩衝材の最大ひずみが増加すれば緩衝材の使用量は減少し、緩衝材の最大ひずみが減少すれば緩衝材の使用量は増加する傾向を示すことがわかる。ここで、Fig. 8及びFig. 9から、凹側及び凸側緩衝材の体積の増減について考えると、緩衝材の使用量に上記の傾向が存在することがわかる。

4.5 包装材料費について

Fig. 11より、緩衝材の使用量または包装材料費を最小化した場合、段差が0から約3cmまでの範囲では、包装材料費はほぼ一定の値を保つ傾向があった。また、段差が約

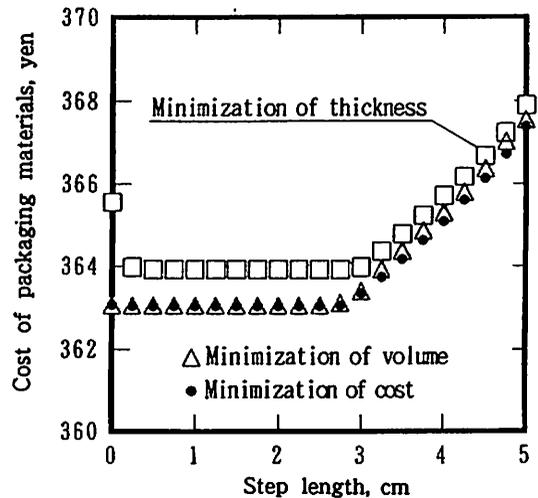


Fig. 11 Relationship between the cost of packaging materials and the step length calculated from simulation results

3cmを越えて大きくなると、包装材料費は単調に増加する傾向があった。

上記の傾向は、緩衝材の使用量と段差の関係と同じである。この理由は以下のとおりである。

包装材料費は段ボールの材料費と緩衝材の材料費の合計と定義している。段ボールの材料費は、貨物の大きさによって決まる。しかし、段差の大きさが変わっても、凸側緩衝材の厚さがあまり変化しないため、貨物の大きさは変化しない。よって、段差が変化した時、段ボールの材料費は変化せず、包装材料費と緩衝材の使用量は同じ傾向で変化することがわかる。すなわち、包装材料費と段差との関係は、緩衝材の使用量と段差との関係と同じ傾向を示す。

4.6 落下衝撃による製品の傾き

凹側と凸側との緩衝材の変形量の差によって製品に傾きが生じる。両緩衝材の最大ひずみが同じであれば、段差が大きくなるにつれて、緩衝材の厚さの差は大きくなり、それによって、製品の傾きも大きくなる。

Fig. 12より、緩衝材の厚さ及び使用量、包装材料費のうちどれを最小化した場合でも、段差が0から約3cmまでの範囲では、段差が大きくなるにつれて、製品の傾きは単調に増加し、段差が約3cmを越えて大きくなると、製品の傾きは単調に減少する傾向があった。この理由として以下のことが考えられる。

凸側緩衝材の厚さ及び最大ひずみは段差が大きくなっても一定の値となる。このため、凸側の緩衝材の変形量は、段差が大きくなっても一定の値である。

一方、凹側緩衝材の厚さは段差が大きくな

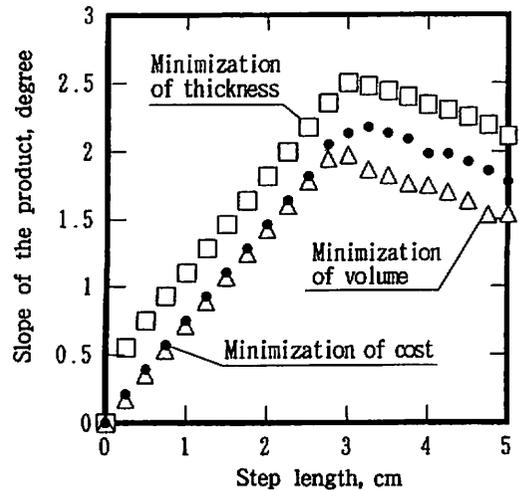


Fig. 12 Relationship between the slope of the product and the step length calculated from the simulation results

るにつれて単調に増加する。また、凹側緩衝材の最大ひずみは段差が0から約3cmの範囲ではほぼ一定の値となり、その後、段差が大きくなるにつれて単調に減少する。そのため、凹側緩衝材の変形量は段差が0から約3cmの範囲では段差が大きくなるにつれて単調に増加するが、段差が約3cmを越えて大きくなると、凹側緩衝材の最大ひずみが減少する分、変形量は単調に減少する傾向を示す。よって、製品が凹側に傾く角度は、段差が0から約3cmまでの範囲では、段差が大きくなるにつれて単調に増加し、段差が約3cmを越えて大きくなると単調に減少する。

また、Fig. 12より、緩衝材の厚さを最小化した場合の方が、緩衝材の使用量や包装材料費を最小化した場合よりも、製品の傾きが大きくなる傾向があった。この理由は以下のとおりである。

緩衝材の変形量は緩衝材の最大ひずみと緩衝材の厚さとの積である。Fig. 8より、凹側緩衝材の最大ひずみは、最適化の目標を変え

でも、ほとんど同じ値となった。また、Fig. 9より、凸側緩衝材の最大ひずみは、厚さを最小化した場合の方が、緩衝材の使用量や包装材料費を最小化した場合よりも小さな値となった。一方、Fig. 4及び Fig. 5より、凹側及び凸側緩衝材の厚さは、最適化の目標を変えてもあまり大きな差が現れなかった。これらのことから、どの最適化を行っても凹側緩衝材の変形量にあまり大きな差は現れず、凸側緩衝材の変形量は、厚さを最小化した場合の方が、緩衝材の使用量や包装材料費を最小化した場合よりも小さくなることわかる。よって、製品凹側への傾きは厚さを最小化した場合の方が緩衝材の使用量や包装材料費を最小化した場合よりも大きな値となる。

本シミュレーション結果では、製品の傾きは、最大でも2.5度程度と比較的小さな値であった。そのため、貨物を底面落下した場合、製品の傾きによる貨物の転倒の可能性は十分に低いと考えられる。

4.7 最大衝撃加速度について

発生する最大衝撃加速度は、凸側ではほとんどの場合、許容衝撃加速度の限界値となった。一方、Fig. 13より、凹側では段差が大きくなるにつれて、発生する最大衝撃加速度は単調に減少する傾向があった。

この傾向の原因は、凹側では段差に応じて緩衝材の厚さを増加しなければならず、十分に厚さや体積を削減できないため、緩衝効果としては過剰になったためと考えられる。

4.8 段差がない場合との比較

Fig. 6、Fig. 8、Fig. 10、Fig. 11の緩衝材の厚さを最小化した場合の最適設計結果

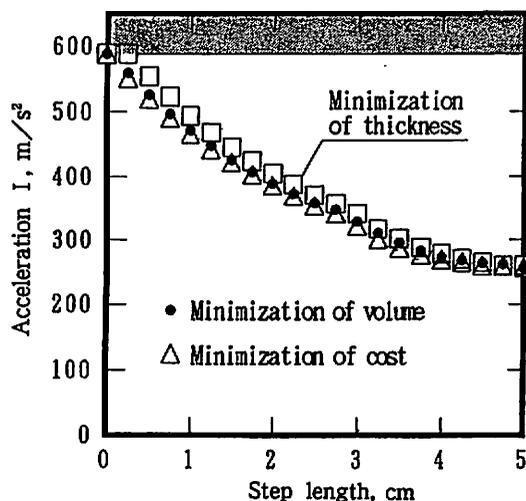


Fig. 13 Relationship between the maximum acceleration at the part I of the product and the step length calculated from the simulation results

(□) では、段差がない時と段差が0.5cmの時を比較すると、段差が0.5cmの時の方が凹側緩衝材の最大ひずみは大きな値となり、凹側緩衝材の受け面積、緩衝材の使用量、包装材料費は小さな値となる傾向があった。これより、緩衝材の厚さを最小化した場合、少しでも段差があれば、凹側緩衝材の受け面積、緩衝材の使用量は削減できることがわかる。

緩衝材の厚さを最小化した場合の最適設計結果において、段差がない時と比較して、段差が0.5cmの時の方が、最大ひずみが大きくなる理由は次のとおりである。

段差がない場合すべての緩衝材の厚さは最小化されているが、段差があれば凹側の緩衝材の厚さは、段差分厚くなるため厚さの最小化条件が緩和される。そのため、第2の最適化として使用量の最小化がなされる。凹側緩衝材の使用量の最小化は、すなわち、凹側緩衝材の単位体積当たりの吸収エネルギーの最大化であり、凹側緩衝材の最大ひずみも最大

化される。よって、段差ができれば、凹側緩衝材の最大ひずみは急激に大きくなる。

5. 結 論

段差を有する製品に対する緩衝材の最適な形状を決定する設計手法が開発できた。また、製品の段差が緩衝材の最適形状などにどのように影響するかを本手法による設計のシミュレーションを行うことによって確認できた。その結果、得られた主な結論を以下に記す。

(1) 緩衝材の厚さまたは使用量を最小化した場合、凸側緩衝材の形状は、段差の大きさにあまり影響されない傾向があった。

(2) 凹側緩衝材の受け面積は、緩衝材の形状が座屈条件の限界に達するまでは段差が大きくなるにつれて単調に減少するが、緩衝材が座屈する限界となった後は、段差が大きくなるにつれて単調に増加する傾向があった。

(3) 緩衝材の使用量及び包装材料費は凹側緩衝材が座屈する限界の形状となるまでは、段差が大きくなってもあまり変化しないが、座屈する限界の形状となった後は、段差が大きくなるにつれて、共に単調に増加する傾向があった。

(4) 衝撃時の緩衝材の変形量が異なれば、貨物内部の製品に傾きが発生する。その傾き

は、凹側緩衝材が座屈する限界の形状となるまでは、段差が大きくなるにつれて単調に増加する。しかし、凹側緩衝材が座屈する限界の形状となった後は、製品の傾きは、段差が大きくなるにつれて、単調に減少する傾向があった。一方、傾きの最大値は約2.5度であった。このため底面落下での貨物の転倒の可能性は十分に低いと考えられる。

(5) 緩衝材の厚さを最小化した場合、少しでも段差があれば、緩衝材の受け面積、緩衝材の使用量は削減できることがわかった。

<引用文献>

- 1) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、材料、41 (460), 28 (1992)
- 2) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、日本機械学会論文集C編、59 (558), 624 (1993)
- 3) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、2 (2), 85 (1993)
- 4) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、3 (3), 141 (1994)
- 5) 豊田実、“新包装技術便覧1” (星野茂雄ら編)、日本生産性本部、p.1264 (1971)
- 6) Harris, C. H. and Crede, C. E., “Shock and Vibration Handbook 3”, McGraw-Hill, p. 41, 39 (1961)

(原稿受付 1994年 7月29日)

(審査受理 1994年12月 1日)