

技術報告~~~~~

衝撃応答解析を用いた緩衝包装設計評価方法

川口 和晃 *

Cushioning Performance Evaluation Method using Shock Response Analysis

Kazuaki KAWAGUCHI *

緩衝包装設計は、内容品の保護を確実にするため、包装貨物落下試験時に内容品に生じる衝撃加速度を、許容加速度以下にすることが要求されている。そのため、落下試験時に内容品に発生する衝撃波形を計測し、その最大値が許容加速度未満であれば緩衝包装設計は合格となり、許容加速度以上となる場合は、緩衝設計が見直されている。しかしながら、包装貨物落下試験時に内容品に生じる衝撃波形は様々な周波数を含む形状になることがほとんどであり、一概に最大値のみで内容品が破損するかどうかを判断することは困難である。さらに、衝撃波形を処理するデジタルローパスフィルタの設定によって最大値は容易に変化するため、合否判定を誤認する場合がある。

そこで、内容品に伝達する加速度を用いた緩衝性能評価方法について検討した。ここでは、内容品の損傷境界曲線から脆弱部の固有振動数を算出し、落下試験時の衝撃波形から得られる衝撃応答解析結果と、脆弱部の限界加速度を比較する。これにより、衝撃波形が内容品の破損に直結するかを定量的に判断できるとともに、デジタルローパスフィルタの設定に依存せず、安定した合否判定ができるようになる。

Protective package is always required that the peak acceleration of shock pulse on the package by drop test should be under the critical acceleration of product for safety. Hereby the protective performance can be judged by comparing between the peak acceleration of experimental shock pulse and the critical acceleration. Package should be redesign if the peak acceleration of experimental shock pulse is bigger than the critical acceleration. However, it is difficult to judge the cushioning performance by the peak acceleration since the experimental shock pulse is often complex waveform has various frequencies. Moreover this performance is sometimes misjudged due to the peak acceleration is influenced easily by applied digital low-pass filter.

In this paper, the new evaluation method for protective package has been proposed using the shock response analysis of experimental shock pulse on the critical natural frequency of the most fragile component that is derived by Damage Boundary Curve of the product. By comparing between the peak acceleration of shock response analysis and the critical acceleration of fragility component, the cushioning performance of package will be evaluated quantitatively on the product damage without the influence of digital low-pass filter.

キーワード : 緩衝包装設計、落下試験、評価手法、衝撃加速度、衝撃応答解析

Keywords : Protective Package, Drop Test, Evaluation Method, Shock Acceleration, Shock Response Analysis

* 神栄テストマシナリー株式会社, Shinyei Testing Machinery Co., LTD.

〒650-0034 兵庫県神戸市中央区京町 77-1 神栄ビル 5F, TEL:078-698-6963, FAX:078-332-1619,

Email:k-kawaguchi@stm.shinyei.co.jp.

1. 緒言

緩衝包装设计は、包装貨物流通時の落下衝撃事象から内容品を保護することが最優先事項とされる。ここで、内容品の保護を確実にするために、内容品の限界衝撃強度（損傷境界曲線¹⁾から得られる許容加速度）以下になるように緩衝設計が行われ、最終評価試験として、包装貨物落下試験にて設計妥当性が評価される。このとき、内容品に許容加速度以上の衝撃加速度が生じていないかを確認するため、加速度センサを用いた衝撃計測が行われている。内容品に発生した衝撃加速度最大値が許容加速度未満であれば緩衝包装设计は合格となり、許容加速度以上となる場合、内容品が破損すると判断され、緩衝設計が見直される。

しかしながら、包装貨物落下試験時に内容品に生じる衝撃波形は様々な周波数を含んだ複雑な形状になることがほとんどであり、一概に最大加速度のみで、内容品の破損に直結するかどうかを判断することは困難である。さらに、計測した衝撃波形を処理するためのデジタルローパスフィルタの設定値によって、最大加速度値は容易に変化するため、安定した合否判定が難しい場合もある。

Kipp²⁾は緩衝包装设计の評価において、衝撃応答スペクトルの利用を提案しているが、その具体的手法については言及されていない。Daum³⁾は、包装貨物落下試験で内容品に生じる衝撃波形は、デジタ

ルフィルタ設定により変化することを示し、それによる包装サイズとコストへの影響について考察しているが、内容品に対する衝撃波形の取り扱いについては述べていない。

ここでは、内容品に生じた衝撃波形が破損に直結するかどうかを、より合理的に判断するための新しい緩衝包装设计評価方法を検討する。

2. 従来評価法

内容品の機械的衝撃強度は、許容速度変化 ΔV_c と許容加速度 A_c からなる損傷境界曲線（Damage Boundary Curve, DBC）

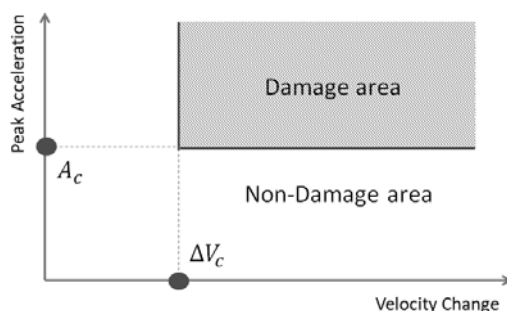


Fig.1 Damage Boundary Curve

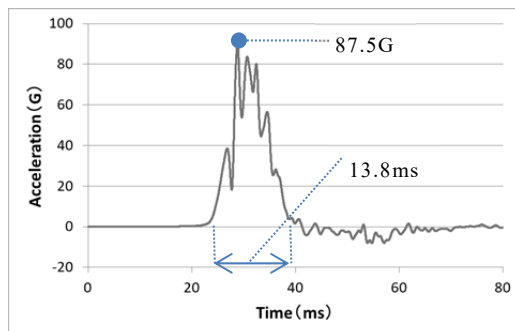


Fig.2 Example of shock pulse on package
by drop test

として知られる (Fig.1)。ここで緩衝包装设计には、包装貨物落下試験時、内容品に生じる最大加速度が A_c 以下となる設計が要求される。

Fig.2 は、包装貨物を落下高さ 80 cm から自由落下させたときに包装内容品に発生した、上下方向の衝撃波形の一例である (デジタルローパスフィルタのカットオフ周波数 (f_{LPF}) 500Hz)。このように、実際の包装貨物の落下衝撃波形は様々な周波数成分を含む。

ここで、内容品の A_c が 80G の場合、図中の最大加速度は 87.5G であるため、この緩衝設計は不合格となり、再設計が必要と判断される。しかしながら、Fig.2 の衝撃波形がオーバーしている範囲は、衝撃波形の一部の周波数成分であり、これが A_c を超えたとしても、内容品の損傷に直結するかどうかは判断できない。さらに Fig.3 は、Fig.2 の衝撃波形に対し、適用した f_{LPF} 毎の衝撃波形の最大値の変化

を示している。JISZ0235⁴⁾によると、 f_{LPF} の推奨設定値 f_{LPF} は、衝撃波形の作用時間 D より、式 1 のように決定できる。

$$f_{LPF} \geq \frac{5}{2D} \cdots 1$$

Fig.2 の場合、式 1 より f_{LPF} は 182Hz 以上とすればよいが Fig.3 を見ると f_{LPF} 以上でも数値は安定しない。これより、 A_c が 80G の場合、 f_{LPF} が 400Hz より小さければ合格となり、400Hz 以上の場合は不合格と判断されてしまう。このように、加速度最大値を用いた評価では、同じ衝撃波形でも f_{LPF} の設定値によって、合否判定が異なる場合がある。以上から、衝撃波形の最大値のみで、緩衝設計の妥当性を正しく評価できるかには疑問がある。

そこで、より定量的かつ安定した評価を行うため、内容品の破損の有無から緩衝設計の合否を判定する方法について検討する。

3. 提案評価法

3.1 衝撃応答解析による評価

ここでは落下試験で生じた衝撃波形と、衝撃応答解析により算出した応答加速度を比較することで、内容品の損傷を判定する手法について検討する。

まず、内容品の DBC は、内容品にある脆弱部が破損する条件 (固有振動数 f_c の脆弱部に生じる加速度 a_{sr} が、限界加速度 a_c を超えるとき) から得られる¹⁾。言い換えると、DBC が既知であれば、脆弱部

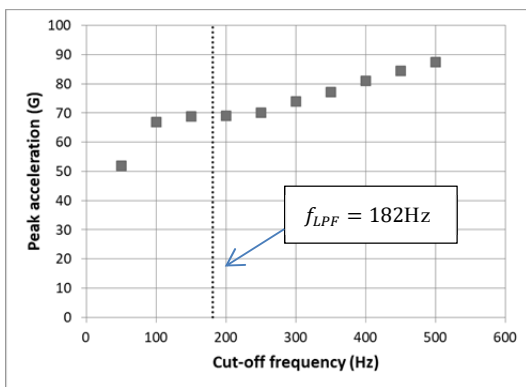


Fig.3 Influence of digital low-pass filter on peak acceleration of shock pulse by drop

における a_c と f_c は、式 2、3 から算出できる。なお、ここで内容品の許容加速度を得るための入力衝撃波形は、JISZ0119¹⁾にのっとり、矩形波とした。

$$a_c = 2A_c \cdots 2$$

$$f_c = \frac{a_c}{2\pi\Delta V_c} = \frac{A_c}{\pi\Delta V_c} \cdots 3$$

次に、包装貨物落下試験時に内容品の衝撃波形から衝撃応答⁵⁾(Shock Response, SR)を算出する。SR とは、ある 1 自由度のバネマス系に任意の衝撃波形が入力されたとき、系の応答加速度を数値解析するものである。したがって、実測衝撃

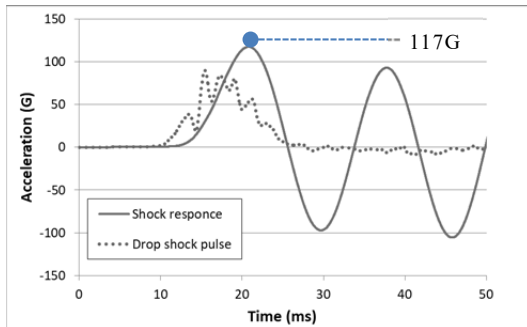


Fig.4 Example of shock response analysis by drop shock pulse

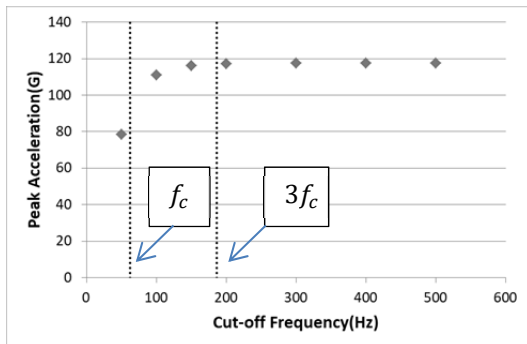


Fig.5 Influence of digital low-pass filter on peak acceleration of shock response

波形から f_c における SR を算出し、その最大値 a_{sr} と a_c を比較することで、実測衝撃波形が内容品の破損に影響するかが容易に判断できる。

具体例として、内容品の A_c と ΔV_c がそれぞれ、80G、4m/s であるときを考える。これを式 2、3 に代入すると、 a_c は 160G、 f_c は 62Hz となる。包装貨物落下試験にて内容品に発生した衝撃波形を Fig.2 とし、62Hz における SR 解析を行った結果を Fig.4 に示す。これより、 a_{sr} は 117G となり、 a_c よりも下回っていることから、Fig.2 の衝撃波形は内容品の破損に影響せず、合格と判断できる。

また、Fig.5 は f_{LPF} 毎の a_{sr} である。これより、 f_{LPF} が低すぎると、 a_{sr} が小さくなる範囲が確認できるが、 f_c の 3 倍以上の f_{LPF} を適用することで a_{sr} は安定する。したがって、落下試験で生じた衝撃波形に、 f_c の 3 倍以上のローパスフィルタ処理を行った上で、 a_{sr} を算出すれば、合否判定に差異が生じることはない。

このように、衝撃波形の最大値でなく、SR 解析を用いることで、内容品の損傷を定量的かつ安定した評価が期待される。

3.2 衝撃応答スペクトルによる評価

内容品の DBC が既知であれば、3.1 の方法により、内容品の破損評価が行える。しかしながら、一般的な内容品は A_c のみ設定されており、DBC が未知（すなわち、 ΔV_c が不明）である場合が多い。ここでは、

このような場合の評価方法について検討する。

まず、内容品の ΔV_c が実用上、取りうる範囲を考える。その下限値は DBC 試験のための衝撃試験機の制御範囲から 2m/s、上限値は実際の落下試験で計測された衝撃波形の速度変化 ΔV_{test} となる。これを式 3 に代入することで、内容品の f_c の範囲が得られる (式 4)。

$$\frac{A_c}{\pi \Delta V_{test}} \leq f_c \leq \frac{A_c}{2\pi} \quad \dots 4$$

次に、実測衝撃波形から得られる衝撃応答スペクトル⁵⁾ (SRS) を利用する。SRS とは、様々な固有振動数 f_n をもつ複数の 1 自由度のバネ系に対し、ある衝撃波形が入力されたとき、個々のバネ系にどのような加速度が伝達するかを予測する衝撃解析手法であり、横軸に系の f_n 、縦軸を系に伝達する最大加速度 $a_{srs}(f_n)$ で表現される。したがって、落下試験で得られた衝撃波形を SRS 解析し、 $a_{srs}(f_c)$ と a_c を比較することで、3.1 と同様に、内容品破損するかどうか判断できる。より厳密な評価を行う場合は、 ΔV_{test} と A_c からなる矩形波を SRS 解析して得られる $a_{c_srs}(f_c)$ を算出し、 $a_{srs}(f_c)$ を比較する。 $a_{c_srs}(f_c)$ とは、実際の落下試験で内容品が損傷する条件を、DBC から時系列衝撃波形に置き換え、その衝撃波形から算出される SRS であり、脆弱部が破損するときの限界加速度を意味する。すなわち、

$a_{srs}(f_n)$ と $a_{c_srs}(f_c)$ を比較し、 $a_{srs}(f_n)$ が大きければ、内容品が破損すると予想されるため緩衝設計は不合格となり、小さい場合、内容品は安全に保護されていると

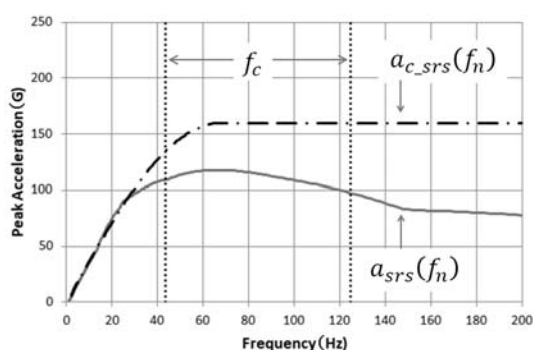


Fig.6 Damage evaluation using SRS analysis

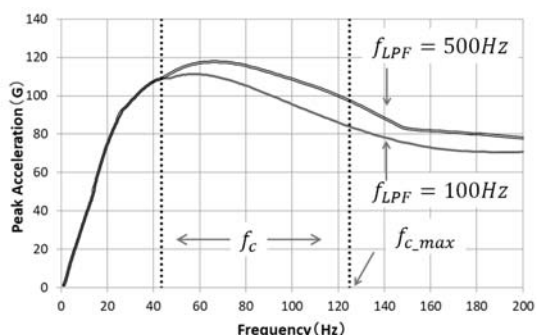


Fig.7 Influence of low-pass filtering on SRS

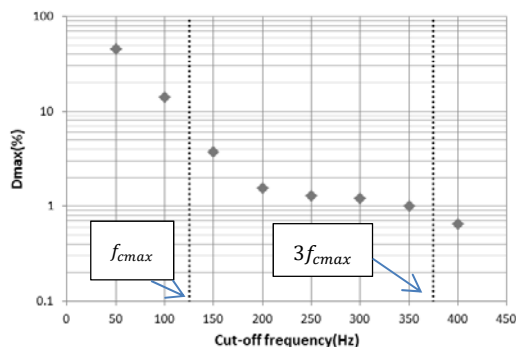


Fig.8 Relationship between max. damping ratio and cut-off frequency

判断できる。

具体例として、内容品の A_c が 80G、落下試験の試験高さ h が 80 cm の場合を考える。緩衝包装設計後、落下試験を行ったとき、内容品に生じた衝撃波形は **Fig.2** とする (ΔV_{test} は 5.75m/s)。式 4 にこの与条件を代入すると、 f_c が取りうる範囲は 43Hz から 125Hz となる。ここで、**Fig.2** の衝撃波形から得た $a_{srs}(f_n)$ と、脆弱部が限界加速度となる衝撃波形 (ΔV_{test} が 5.75m/s、 A_c が 80G となる矩形波) の $a_{c,srs}(f_n)$ および、 f_c の範囲を **Fig.6** に示す。これより、 $a_{srs}(f_c)$ は $a_{c,srs}(f_c)$ より下回っていることから、**Fig.2** の衝撃波形は内容品の破損に影響せず、緩衝包装設計は合格と判断できる。

Fig.7 は **Fig.2** を用いて、 f_{LPF} を 100Hz、500Hz に設定したときに得られる $a_{srs}(f_n)$ である。このように f_{LPF} の設定によっては f_c の範囲で加速度が減衰してしまう。そこで、 $a_{srs}(f_n)$ に対する f_{LPF} による減衰影響範囲を定量的に確認する。ここでは、 f_{LPF} が 500Hz で得られた $a_{srs,500}(f_c)$ を基準とする。次に、 f_{LPF} を任意に設定し、 $a_{srs}(f_c)$ を算出したのち、式 5 から加速度減衰比率 $D_r(f_c)$ を計算する。最後に、 $D_r(f_c)$ の中で最大値を、最大減衰比率 D_{rmax} とする。 D_{rmax} は、その値が大きいほど、 $a_{srs}(f_n)$ がローパスフィルタの影響を大きく受けていることを意味する。

$$D_r(f_c) = \left| \frac{a_{srs}(f_c) - a_{srs,500}(f_c)}{a_{srs,500}(f_c)} \right| \times 100 \dots 5$$

上記の処理を、 f_{LPF} を 50Hz から 400Hz まで 50Hz 刻みで実施した結果を **Fig.8** に示す。

これより、 f_{LPF} が大きいほど、ローパスフィルタの影響は小さくなり、 f_{LPF} が f_{cmax} (式 4 から得られる f_c の上限周波数)の 3 倍のとき、 D_{rmax} は 1%以下となる。この値は、緩衝包装設計を評価する上では誤差範囲とみなせる。したがって、本手法を利用する場合、 f_{LPF} の設定を f_{cmax} の 3 倍以上に設定すれば、合否判定がローパスフィルタに影響されることはない。

4. 結論

これまでの緩衝包装設計において、衝撃計測による設計評価は、衝撃波形の最大値のみを評価対象としていた。これでは、内容品に損傷を与えるかどうかを正確に判断できず、またローパスフィルタの設定値により緩衝性能を見誤る可能性があった。

そこで、内容品の損傷条件から緩衝設計を判断する方法として、内容品に生じる衝撃波形から SR/SRS 解析を用い、内容品の脆弱部の限界加速度と比較する評価手法を考案した。これにより、緩衝包装設計において内容品の破損を定量的に把握でき、かつローパスフィルタの設定

に関わらず、安定した合否判定ができるようになる。

以上より、緩衝設計評価時に本手法を用いれば、適正包装設計に貢献することが期待される。

＜参考文献＞

- 1) JISZ0119:2002, 包装及び製品設計のための製品衝撃強さ試験方法
- 2) William I Kipp, “Developments in Testing Products for Distribution”, Packag. Technol. Sci., 13, 89-98, (2000)
- 3) Matthew P. Daum, “Shock Pulse Filtering Evaluation on Package Size and Cost”, Journal of Applied Packaging Research, Vol.6 No.2, Article 3, (2014)
- 4) JISZ0235:2002, 包装緩衝材料-評価試験方法
- 5) 斎藤勝彦、”実務者のための力学的輸送包装設計ハンドブック”、テクノシステム(株)出版、p.123, (2018)

(原稿受付 2019 年 3 月 5 日)

(審査受理 2019 年 6 月 11 日)

