

1 試料による落下試験機を用いた衝撃強さ試験

川口 和晃 *

Shock Fragility Test using Drop Tester with Single Specimen

Kazuaki KAWAGUCHI*

適正包装設計のためには、衝撃強さ試験から得られる製品の許容加速度は必須である。しかしながら、許容加速度を得るための衝撃強さ試験方法は複数の試料数が必要であることや、実施できる衝撃試験装置が限定されていることから、広く実用されているとは言い難い。

ここでは、衝撃強さ試験方法の実施を容易にする目的で、試料数を1つとして、衝撃試験装置を落下試験機で代用する方法を検討した。具体的には、供試品を固定した簡易衝撃テーブルを作成し、床面に配置した複数の緩衝材に落下させる試験システムを考案した。許容加速度の特定は、あらゆる形状の衝撃パルスを用いることを想定し、発生した衝撃パルスにより得られる衝撃応答スペクトルを用いて試料の破損部位の固有振動数と限界加速度を特定したうえで、損傷境界曲線を算出することで決定する方法を採用し、その手順を明確にした。

Critical acceleration of product that determined by shock fragility test is essential parameter for optimized package design. However, this test is not spread in industrial area due to requiring many specimens and limited shock tester that can perform this test.

In this paper, the new testing method was considered to substitute shock machine to drop tester with single specimen to conduct shock fragility test easily. Experimentally the testing system that the quasi-shock table with the specimen can be dropped by drop tester towards cushioning material boards on the test floor was developed. Critical acceleration was identified from damage boundary curve derived by the natural frequency and limited acceleration of fragility part of specimen using shock response spectrum of measured shock pulse on quasi-shock table due to be applying any kinds of shock pulse shape. Moreover, the testing procedure of this proposal method was established.

キーワード： 包装設計、損傷境界曲線、衝撃強さ試験、落下試験機、許容加速度

Keywords： Package Design, Damage Boundary Curve, Shock Fragility Test, Drop tester, Critical acceleration

* 神栄テクノロジー株式会社, SHINYEI TECHNOLOGY CO.LTD. 〒650-0047 神戸市中央区港島 6-5-2
6-5-2, Minatojima-Minamimachi, Chuo-ku, Kobe, 650-0047, JAPAN
TEL:078-304-6795, FAX:078-302-1225, Email:k-kawaguchi@stc.shinyei.co.jp

1. 緒言

適切な緩衝包装设计のためには、内容品の許容加速度が必要となる。許容加速度を特定するためには、内容品の損傷境界曲線（以降、DBC）を把握しなければならず、その試験方法が JISZ0119（以降 JIS 法）に規定されている。そこでは、少なくとも 2 台以上の試料が必要となることと、台形波衝撃パルスが発生可能な専用試験機が要求されている。しかしながら、これら条件をすべて満足できる現場は少なく、実用面で課題がある。

これまでに、上記の課題を解決し、容易に許容加速度を特定する方法として、1 試料のみで正弦半波パルスを用いた方法¹⁾（以降、前回提案法）を提案したが、利用する試験機は JIS 法と同じく衝撃試験機のみであった。

そこで、許容加速度をさらに簡易に特定する手法を模索するため、衝撃試験機よりも現場に広く普及している包装貨物落下試験機を用いた方法を検討する。

2. 落下試験機による衝撃強さ試験

2.1 本提案における試験系

JIS 法や前回提案法では衝撃試験機が用いられ、そこでは衝撃試験機の衝撃台上に発生する衝撃加速度を基準として DBC が同定される。これは供試品での衝撃加速度計測では、加速度ピックアップを取り付ける箇所によって発生する衝撃パルスの形状が異なるため、本来

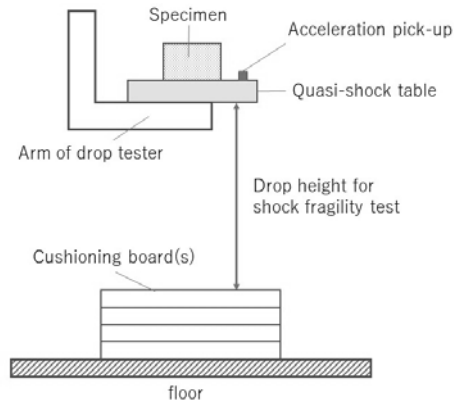


Fig.1 Graphical image of proposal testing system

発生した入力衝撃パルスが明確にできないことによる。

そこで提案法では、落下試験機であっても供試品全体に入力される衝撃加速度を得るため、供試品を固定できる疑似衝撃台を用い、衝撃パルス条件（最大加速度および速度変化）を簡易に変更できるよう、複数枚の緩衝材料を設置しておき、その上に落下させる試験系とした（Fig.1）。さらに緩衝材料の枚数を増減することで、発生する最大加速度が可変できる設計とした。

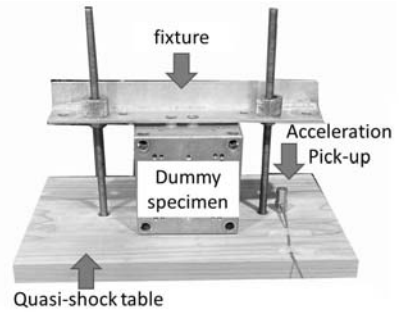
2.2 実証試験

前項の試験系が実用できることを確認するため、以下の内容で検証試験を行った。

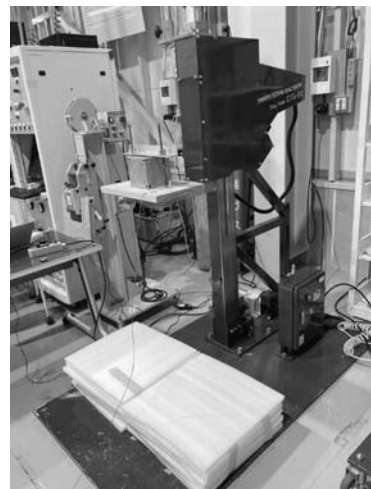
ここでは、ダミー供試品（質量 5kg のアルミブロック）を固定した疑似衝撃台（材質：木材、サイズ：350×250×20 mm、Fig.2(a)）と発泡ポリエチレン緩衝材板（発泡倍率 45 倍、厚み 20mm/枚）は 5 枚を用いた(Fig.2(b))。落下高さは 40cm、60cm、80cm とし、床面の緩衝材は 1 試験ごとに 1 枚ずつ減らしながら、落下高さ毎に合計 5 回の試験を行った。なお今回使用した機器類は以下である。

- ・包装貨物落下試験機 DTS-80
- ・加速度計測機器ショックマネージャ SM-500
（加速度計測設定：サンプリングレート 10 μ秒、フレーム長 8000、プレトリガ 20%）

試験結果として、疑似衝撃台に生じた衝撃パルスの最大値と速度変化を Fig.3 に示す。これより、DBC の特定に必要となる最大加速度と速度変化は、落下高さおよび緩衝材の枚数を変更するだけで容易に調整できることがわかる。また Fig.4 は、発生した衝撃パルスの一例（落下高さ 80cm、床面の緩衝材 2 枚）であるが、理想正弦半波パルスと比較するとノイズが大きい。



(a)



(b)

Fig.2 Experimental situation, (a) dropped specimen using quasi-shock table (b) whole testing system with drop tester

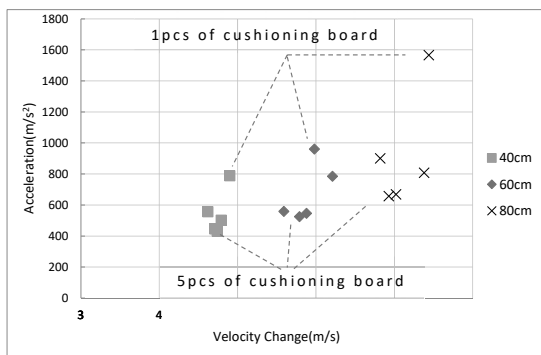


Fig.3 Test result from each drop height with proposal testing system

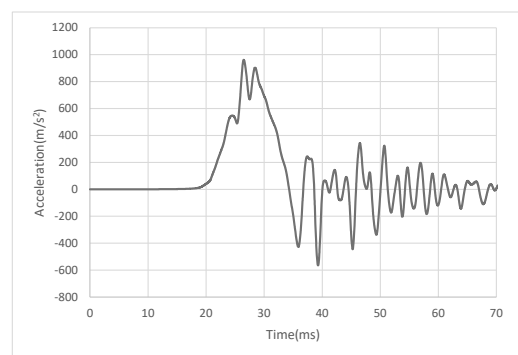


Fig.4 Example of experimental shock pulse at 80cm drop height

2.3 許容加速度の特定方法

ここでは、前項の試験系を用いて許容加速度を求める方法について述べる。

前回提案法では、入力衝撃パルスを正弦半波であると仮定し、その衝撃応答スペクトル（SRS）を用いて、破損部位の限界加速度 a_c と固有振動数 f_c を設定したうえで、DBCを描画し、許容加速度を特定した。しかしながら、前項で示したように、本試験系で生じる衝撃パルスは正弦半波に比べて複雑な形状になっていることから、前回提案法をそのまま流用できない。

そこで本提案では、どのような衝撃パルスにも対応できるよう、発生した実測衝撃パルスをもとに解析されるSRSから a_c と f_c を決定する。DBC描画には実測パルスから求められる衝撃伝達率 T_r （入力衝撃パルス最大値に対する応答加速度最大値の比率）を用いることもできるが、包装貨物落下試験で内容品に発生する衝撃パルスの形状が不明な場合は、理想パルス（矩形波または正弦半波）の T_r を用いることで、より安全な許容加速度を得ることができる。なお、専用ソフトウェアでSRS解析を行う場合、応答バネマス系の減衰率を任意に設定できるが、ここでの破損部位の力学モデルは単純バネマス系のため減衰の項は含まないことから、減衰率は0となる。

各DBCから得られる許容加速度の傾向として、矩形波が最小値（製品にとって最も安全となるが緩衝材料コスト増加）となり、実測パルスが最大値（緩衝材料使用量・コストが最小となるが製品破損リスク増加）、正弦半波はその中間となる。ただし実測パルスSRSの形状によっては、上記の関係は逆転する場

合もある。いずれにせよ、どの許容加速度を選択するかは使用者の設計思想による。

2.4 提案法試験手順

これまでの内容を踏まえ、本提案法を用いる場合、以下のような手順で試験および算出を行う。なお各過程における基本的な考え方やおよび理論背景は前回提案法を踏襲する。

Step1 許容加速度試験

包装貨物落下試験の試験高さ h から算出される速度変化 ΔV_{test} を式(1)にて決定し、入力衝撃パルスが ΔV_{test} となる条件下で許容加速度試験を行う。

$$\Delta V_{test} = 2\sqrt{2gh} \dots (1)$$

ここで g は重力加速度である。

Step2 DBCパラメータの導出

2.1 許容速度変化の設定

本提案では試料数削減のため、許容速度変化試験をスキップするかわりに使用者が任意に設定する。このとき、緩衝設計に必要な許容加速度は、実際に内容品の生じる速度変化の範囲のみを考えればよいことと、許容速度変化は小さいほど、許容加速度は安全側に設定できることから、許容速度変化 ΔV_c の一例として式(2)とできる。

$$\Delta V_c = \sqrt{2gh} \dots (2)$$

式(2)は落下高さ h による包装貨物落下試験において、内容品に生じる速度変化範囲の中で最小値を意味する。したがって、これ以下の速度変化範囲での緩衝性能評価は、包装設計上は考慮不要となる。

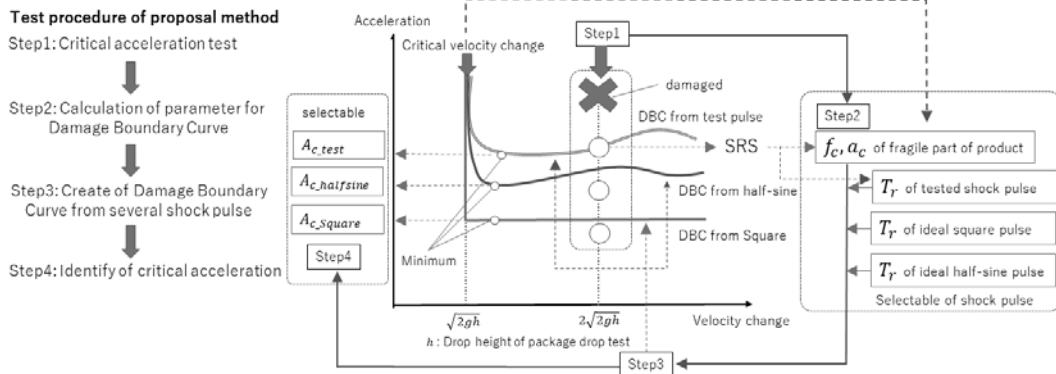


Fig.5 Test and analysis procedure for identification of critical acceleration using proposal testing system

2.2 f_c の特定

製品破損した 1 つ手前の衝撃パルスを SRS 解析した結果から a_c/f_c と f_c の関係を示し、式(3)から得られる a_c/f_c をもとに f_c を決定する。なお、前項にあるように SRS 解析時には減衰率は 0 とする。

$$\frac{a_c}{f_c} = 2\pi\Delta V_c \dots (3)$$

2.3 a_c の特定

2-2 で算出した実測パルスの SRS にて、 f_c 地点の応答加速度を a_c とする。

Step3 DBC の導出

Step2 で算出された a_c 、 f_c と、理想パルス (矩形波、正弦半波) の衝撃伝達率 T_r を式(4)に代入することで、DBC を描画する。このとき、試験で発生した実測パルスによる DBC を求める場合は、Step2 の SRS から T_r を式(5)で算出したのち、式(4)に代入する。

$$\begin{cases} A_{in}(x) = \frac{a_c}{T_r(x)} \\ \Delta V(x) = A_{in} \cdot D_e = \frac{a_c}{f_c} \cdot \frac{x}{T_r(x)} \dots (4) \\ \therefore x = f_c D_e \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_r(x) = \frac{a_{c,srs}(x)}{A_{in}} \\ x = f_c D_e = f_{c,srs} \frac{\Delta V}{A_{in}} \dots (5) \end{cases}$$

ここで A_{in} 、 ΔV 、 D_e はそれぞれ入力衝撃パルスの最大加速度、速度変化、有効衝撃作用時間である。 $f_{c,srs}$ 、 $a_{c,srs}$ はそれぞれ入力衝撃パルスの SRS 解析結果である固有振動数とその応答加速度を意味する。

Step4 許容加速度の特定

包装貨物落下試験の落下高さ h をもとに、包装貨物落下試験で内容品に発生し得る速度変化範囲 ΔV_{ff} を式(6)から算出し、Step3 で導出された DBC 上にプロットする。この範囲の中で最小値となる加速度を許容加速度とする。

$$\sqrt{2gh} \leq \Delta V_{ff} \leq 2\sqrt{2gh} \dots (6)$$

以上の流れを Fig.5 に図示する。

3. ケーススタディ

Table1 Experimental data by proposal testing system

No.	Acceleration (m/s ²)	Velocity Change(m/s)	Condition
1	567	6.67	OK
2	583	6.32	OK
3	735	7.00	OK
4	961	7.01	OK
5	1454	6.90	NG

ここでは 2.4 で示した手順を用い、2-2 の実測値をもとに許容加速度を特定するまでの計算事例を示す。与条件として、包装貨物落下試験の試験落下高さを 60cm とし、供試品の破損は 5 回目の試験で生じたと仮定する。

Step1 として式(1)より、 ΔV_{test} が 6.8m/s となる条件で許容加速度試験を行う。試験結果を Table1 に示す。なお、これは Fig.3 の 80cm の試験結果と同一である。

Step2 では ΔV_c および f_c と a_c を決定する。まず ΔV_c は式(2)から 3.43m/s となる。次に Table1 の No.4 の実測パルス(Fig.4)が SRS 解析した結果を Fig.6 に示す。これから求められる a_c/f_c と f_c の関係は Fig.7 となる。与条件と式(3)から a_c/f_c は 21.5 となり、これを Fig.7 に当てはめると f_c は 65Hz と決まる。これを受けて Fig.6 より f_c が 65Hz 時点の a_c は 1393m/s² となる。

Step3 では DBC を描画する。各衝撃パルス（矩形波、正弦半波および実測）の T_r を Fig.8 に示す。なお実測波の T_r は Fig.6 をもとに式(5)から算出した。これら T_r および a_c 、 f_c を式(4)

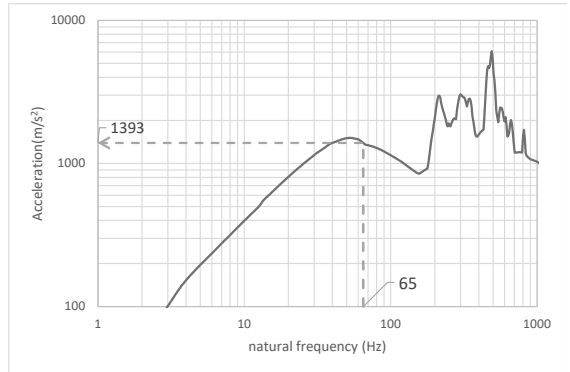


Fig.6 SRS derived from tested shock pulse

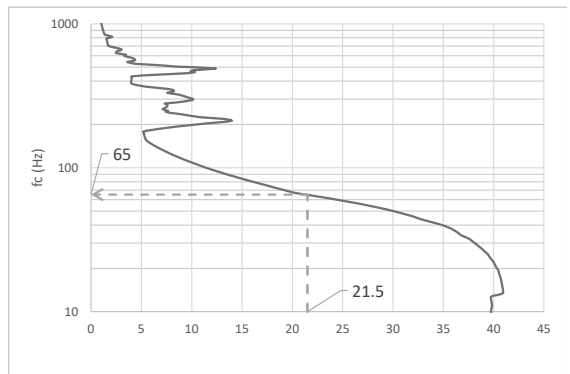


Fig.7 Relationship between f_c and a_c/f_c derived from experimental SRS(Fig.6)

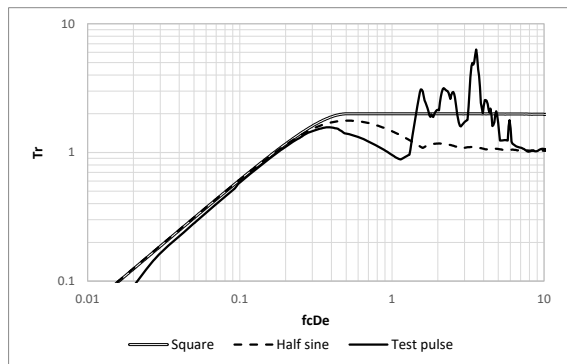


Fig.8 Shock transmissibility T_r of each shock pulse

に代入することで、Fig.9 のようにそれぞれの衝撃パルスの DBC が得られる。ここでは参考として実験値(Table1)との関係性も示した。

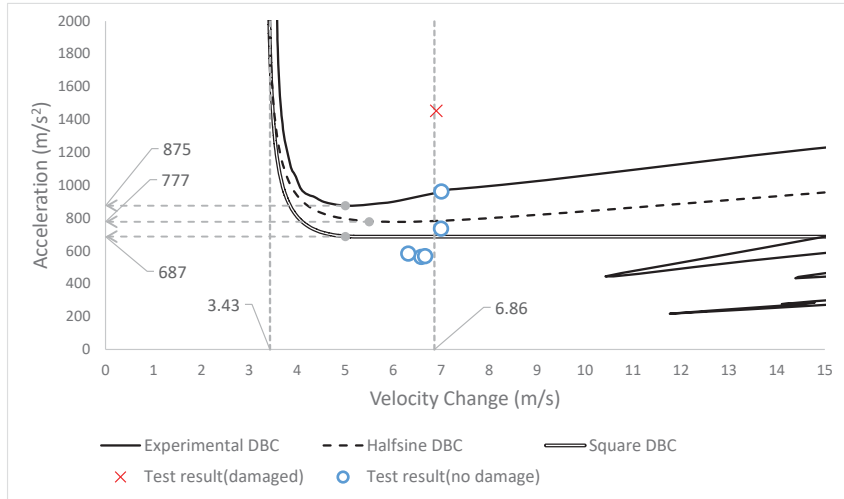


Fig.9 Derived DBCs with identified critical acceleration of each shock pulse

Step4 は各 DBC から許容加速度を特定する。式(6)より今回考慮すべき ΔV_{ff} は 3.43m/s から 6.86m/s となる。この範囲における各 DBC の最小値は、矩形波が 687m/s²、正弦半波では 777 m/s²、実測パルスの場合は 875 m/s² のように得られる (Fig.9)。

4. 結語

衝撃強さ試験は、衝撃試験機を用いた方法が主流である。ここでは、より簡便に衝撃強さ試験を行うことを目的とし、落下試験機を用いる方法を検討した。

具体的には、供試品に入力される衝撃パルスの形状をより正しく把握するため、疑似衝撃台を用いた試験系を考案しながら、その実用性を実機にて評価した。ここでは最大加速度および速度変化は落下高さと同量材量の枚数変更により簡易に調整できることは確認できたが、発生する実測衝撃パルスは理想パルスの形状と乖離することがわかった。そこで衝撃パルスの形状に関わらず DBC を導出しながら、許容加速度を特定するため、実測衝撃

パルスの SRS を用いて DBC を導出する方法を考案した。さらに実験値から実際に許容加速度を特定するまでの具体的計算例を示した。

今後の課題として、本提案では破損部位が単純バネマス系であることが前提となっていたため、今後は減衰を考慮した力学モデルに基づく DBC が導出できれば、より現実に近い許容加速度の特定が期待される。

なお、ここで提案した試験系は、衝撃パルスの正確性や安定性よりも運用簡易性を優先していることから、より正確な許容加速度を特定したい場合は、JISZ0119 に基づく衝撃強さ試験方法を利用することが望ましい。

<参考文献>

- 1) 川口和晃、1 試料による正弦半波衝撃パルスを用いた簡易衝撃強さ試験方法の提案、日本包装学会誌 29(4), p.299, (2020)

(原稿受付 2022 年 10 月 31 日)

(採録受理 2022 年 12 月 20 日)