

技術報告~~~~~

包装貨物等価落下試験における 試験有効範囲の拡張

川口 和晃*

Extension of Applicable Range for Equivalent Drop Test for Packaging

Kazuaki KAWAGUCHI*

JIS によると、衝撃試験機を用いた包装貨物落下試験法（以下、等価落下試験）では、包装貨物に入力する衝撃パルスの作用時間は 3ms 以下であることが望ましいとされている。これは、比較的長い作用時間の衝撃パルスの場合、試験する包装貨物の固有振動数によっては、等価落下試験が適用できないためであり、試験有効範囲に制限が存在することを示している。

そこで、本研究ではこの試験有効範囲を拡張するために、衝撃パルスの作用時間と包装貨物の固有振動数に影響されない新しい等価落下試験法について提案した。具体的には、等価落下試験の背景理論において、衝撃伝達率を近似する直線に補正係数を加えることで理論の再構築を行った。さらに、本提案法を実証するため、単純バネモデルによる数値計算により、自由落下と等価落下試験で発生する加速度波形を比較した。その結果、系の最大加速度と最大変位は、両試験で等価となることが確認されたが、速度変化は提案法のほうが大きくなることがわかった。また実用化検討のための実験検証を行ったところ、数値計算と同様に、最大加速度については自由落下と提案法で大差は見られなかったが、速度変化は提案法のほうが大きくなることが確認された。これより、本提案法は自由落下試験に比べて安全側の試験（すなわち自由落下試験よりも厳しい落下試験）となることがいえる。

According to JIS, the equivalent drop test by a shock machine should be configured a duration of inputted shock pulse with 3ms or less. This means that the equivalent drop test with the longer shock duration can't be applied to packaging with high natural frequency. In the other words, the testing limitation has been existed in the conventional method.

In order to extend the testing limitation, the new method that doesn't have any influences between the natural frequency of tested packaging and the shock duration of inputted shock pulse has been proposed. In the equivalence testing theory, a corrected factor of input velocity change was found by configuring a ratio of the shock transmissibility and an approximate line of the conventional theory. Then, this proposal method has been verified by the mathematical calculation with simple modeling with an analysis software that simulate the free-fall and the equivalent drop. As the result of this analysis, the peak acceleration and the peak displacement were confirmed to equivalent of both of tests. However, the velocity change using the proposal method became bigger than the free-fall test. Moreover, the experimental comparison with free-fall tester and the shock machine was conducted to

* 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.

demonstrate to apply for practical use. Peak acceleration of both was almost same, but the velocity change on the proposal method was bigger than free-fall test. These results mean that the same with the mathematical analysis, and the proposal method will be conducted the drop test with safety. Namely this method will become severe test for packaging comparing with the free fall test method

キーワード： 輸送包装、緩衝包装設計、自由落下試験、等価落下試験、衝撃試験機

Keywords： Distribution Packaging, Cushioning Design, Free-fall Test, Equivalent Drop Test, Shock Machine

1. 緒言

包装貨物を対象として、緩衝設計の衝撃吸収性能を評価するために落下試験が行われている。包装貨物落下試験方法には、衝撃試験機を用いた落下試験方法（以下、等価落下試験）があり、JIS Z0202¹⁾や ASTM D5487²⁾にその方法が規定されている。等価落下試験では、自由落下試験で設定される試験落下高さから得られる衝突速度に等しい速度変化を持つ衝撃パルスを包装貨物に入力することで、自由落下試験と等価な落下試験ができるとされている。このことは JIS Z0202 において、自由落下試験装置による自由落下方法と、等価落下試験方法のいずれかによって行うと明記されていることから理解できる。

これまでに、筆者らは自由落下試験と等価落下試験では、包装内容品に発生する衝撃加速度に違いがあることを明らかにする³⁾とともに、等価落下の背景理論における力学モデルに減衰要素を追加し、新しい等価落下試験条件を導き、その有効性を実験的に確認した⁴⁾。さらに ZHONG ら⁵⁾は、上記の減衰モデルに摩擦を加えたモデリングを用いて、非線形挙動の緩衝材に対しても、等価落下試験を有効とする方法論の提案と検証を行っている。

またこの力学モデルを活用して、低い落下高さの試験データから目標落下高さの衝撃加速度を予測する落下試験方法 Hybrid Drop Test⁶⁾が考案され、実証試験により、その有効性が確認されている。

一方で、等価落下試験は、その背景理論から、入力衝撃パルスの作用時間によって、試験可能な包装貨物の固有振動数範囲が決まる。例えば、JIS Z0202 では等価落下試験を採用するとき、入力衝撃パルスの作用時間は 3ms 以下が望ましいとされている。これは、比較的長い作用時間の衝撃パルスでは、高い固有振動数を持つ包装貨物に対して、等価落下試験が適用できないためである。つまり、現行の等価落下試験方法では、使用する衝撃パルスの作用時間と、試験対象となる包装貨物の固有振動数において、試験制限がある。

そこで、本研究では、この試験有効範囲を拡張させ、どのような衝撃パルスの作用時間を用いても、あらゆる包装貨物に対して等価落下試験が実施できる方法について検討する。

2. 等価落下試験のための背景理論

2.1 等価落下試験の有効範囲

自由落下試験と等価落下試験において、両

試験で包装貨物内に発生する衝撃加速度が等価となるための試験条件は、式(1)となることが知られている³⁾。

$$\Delta V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

ここで、 ΔV は衝撃パルス速度変化、 g は重力加速度、 h は自由落下試験における試験落下高さである。

ここで、式(1)が成立する条件は、包装貨物を1自由度バネマス系と仮定した上で、Fig.1に示すように、この系に対する衝撃伝達率 T_r ⁷⁾を式(2)の範囲内において傾き 2π の直線と近似することである。

$$f_n \cdot D_e \leq \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$

$$\therefore D_e = \frac{2}{\pi} D$$

ここで、 f_n は、包装貨物の固有振動数、 D_e は入力衝撃パルスの有効作用時間、 D は入力衝撃パルスが正弦半波の場合の作用時間である。例えば、等価落下試験で入力する衝撃パルスが正弦半波で、その作用時間はJISが要求する3msとすると、式(2)より、等価落下試験の

有効範囲として、試験可能な包装貨物の固有振動数は最大で83Hzまでとなる。これはFig.1に明らかなように、式(2)以上の範囲では、近似直線と実際の T_r との間で乖離が大きくなるためであり、現状のJISの条件内でも、83Hz以上の固有振動数を持つ包装貨物に対しては、等価落下試験は適用できない。ここでは、上記の内容で実施される等価落下試験方法を従来法とする。

2.2 有効範囲拡張試験方法

減衰要素を考慮した等価落下理論⁴⁾では、等価落下試験におけるバネマス系の最大加速度は、 T_r と近似直線の比により補正する考え方が用いられた。これを応用することで、等価落下試験における試験有効範囲拡張について検討する。

包装貨物を単純1自由度バネマス系としたとき、自由落下試験で発生する最大加速度 A_{ffmax} は、式(3)で得られる。

$$A_{ffmax} = \omega_n \cdot \sqrt{2gh} \quad (3)$$

このとき、 ω_n は系の固有角振動数である。

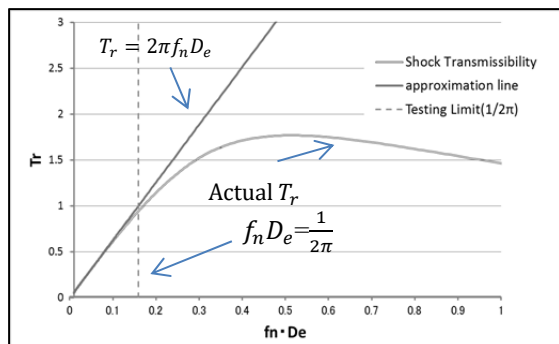


Fig.1 Shock transmissibility of half-sine pulse and the approximation line

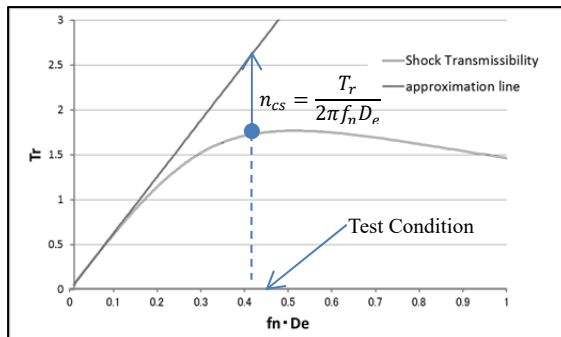


Fig.2 Shock transmissibility of half-sine pulse and an approximation line with n_{cs}

次に、速度変化補正係数 n_{cs} は、 T_r と傾き 2π の近似直線の比として次式が得られる。

$$n_{cs} = \frac{T_r}{2\pi f_n D_e} = \frac{A_{csmax}}{A_{in} \cdot 2\pi f_n D_e} \quad (4)$$

A_{in} は入力衝撃パルスの最大加速度である。

これにより、等価落下試験で得られる系の最大加速度 A_{csmax} は、式 4 を整理することで式(5)となる。

$$A_{csmax} = n_{cs} \cdot \omega_n \cdot \Delta V_c \quad (5)$$

ΔV_c は入力衝撃パルスの補正速度変化である。

以上より、系に発生する最大加速度値が両試験で等価となるための試験条件は、式(3)と式(5)より、式(6)となるように、速度変化を制御すればよい。

$$\Delta V_c = \frac{\sqrt{2gh}}{n_{cs}} \quad (6)$$

Fig.2 に示すように、 n_{cs} は系の T_r と近似直線の乖離を補正する係数となるため、式(6)を用いれば、式(2)の範囲に関係なく、 T_r の全ての領域において等価落下試験が可能となる。ここでは、本方法を提案法とする。

3. 数値解析

ここでは、前章で提案した提案法の妥当性を数値解析により評価する。

評価方法は 1 自由度バネマス系による自由落下試験を想定した衝撃加速度を基準とし、等価落下試験を想定した数値解析（従来法、提案法）で算出される衝撃加速度と比較する。

3.1 自由落下解析

前章と同様に包装貨物を 1 自由度バネマス系と仮定し、自由落下と等価落下により解析的に得られる衝撃加速度波形を比較する。系の変位の符号は上向きを正とする。

ここで、系が自由落下し、床面に衝突したときの質量部に発生する衝撃加速度 A_{ffmax} 、速度変化 ΔV_{ff} 、バネ最大変位 D_{ffmax} はそれぞれ式(3)、式(7)、式(8)で得られる。固有振動数の設定は、 D_e を 1.91ms($D = 3$ ms)に固定したとき、 $f_n \cdot D_e$ が 0.1 から 0.5 まで 0.1 刻みになるように設定した。個々の数値は Table4 に示す。試験落下高さは 80 cm とする。

$$\Delta V_{ff} = 2\sqrt{2gh} \quad (7)$$

$$D_{ffmax} = -\frac{\sqrt{2gh}}{\omega_n} \quad (8)$$

Table1 Parameter of mathematical analysis

at $f_n D_e = 0.3$

Item	Value
Peak input shock pulse of pre-test	1000m/s ²
Peak response shock pulse of pre-test	1522m/s ²
T_r	1.522
D_e	1.91ms
f_n	157.1Hz
n_{cs}	0.808
ΔV_c	4.90m/s
$A_{csmax,p}$	3908.1m/s ²
$\Delta V_{cs,p}$	8.86m/s
$D_{csmax,p}$	4.01mm

3.2 等価落下解析

等価落下試験で発生する系の衝撃加速度波形および変位波形の解析は、系の衝撃応答を数値解析できるソフトウェア（神栄テストマシナリー社製、ショックマネージャ SMS500）を利用した。これは任意の衝撃パルスを様々な固有振動数を持つ系に加えたとき、その衝撃応答（加速度、変位、速度変化）を数値解析できる機能を有する。

まず、従来法における等価落下試験条件は式(1)から得られる。試験落下高さは自由落下試験と同様に 80 cmを代入することで、 ΔV は 3.96m/s^2 となる。このとき、作用時間 D は 3ms となる正弦半波パルスを系に入力することで、その応答加速度の最大値 A_{csmax_c} 、速度変化 ΔV_{cs_c} 、バネ最大変位 D_{csmax_c} が数値解析できる。

次に提案法の数値解析は、 ΔV_c 導出のために以下の手順で行う。

①プレテスト：速度変化の小さい衝撃パルスを系に加え、入力と応答パルスを得る。ここでは、入力衝撃パルスの条件は最大加速度 1000m/s^2 、作用時間 D は 3ms とした。

②パラメータ算出：①で得た入力と応答加速度の最大値の比から T_r を求め、式(4)から n_{cs} を算出する。試験落下高さは 3.1 と同様、80 cmを採用し、式(5)から ΔV_c を計算する。

③本試験：系に対して、 ΔV_c となる正弦半波パルスを入力し、応答加速度の最大値 A_{csmax_p} 、速度変化 ΔV_{cs_p} 、最大変位 D_{csmax_p} を得る。このとき、作用時間は①と同様(3ms)とする。

計算例として、 $f_n \cdot D_e = 0.3$ の場合に得られる各パラメータ計算結果および本試験で得られる試験結果を Table1 に示す。

3.3 数値比較

Table2 に、従来法と自由落下、Table3 に提案法と自由落下における、それぞれの $f_n \cdot D_e$ について得られた数値計算結果と、その誤差 E を示す。 E は式(9)から算出した。

$$E_{a,d,v} = \frac{X_{cs_a,d,v} - X_{ff_a,d,v}}{X_{ff_a,d,v}} \times 100 \quad (9)$$

ここで添え字の a は加速度、 d は変位、 v は速度変化であり、 X_{cs} には等価落下試験（従来法、提案法）で得られた各数値、 X_{ff} には自由落下で得られた各数値を入力する。

これより、従来法では $f_n \cdot D_e$ が大きくなるにつれて最大加速度、速度変化、バネ最大変位の全ての項目で、自由落下よりも数値が小さくなる。このように従来法では過小評価の落下試験となるため、等価落下試験としては不適となることは明らかである。

一方で、提案法は数値解析上の解析誤差が見られるものの、最大加速度、最大変位ともに両試験に差はなく、すべての $f_n \cdot D_e$ で、等価な結果が得られている。ただし、提案法の速度変化は $f_n \cdot D_e$ が大きくなるにつれて増加傾向にある。Fig.3 に自由落下と提案法で系の質量部に発生する時系列衝撃加速度波形例

($f_n D_e = 0.3$) を示す。これより、提案法で発生する衝撃加速度は最大値に達するまでに時間を要することがわかる。これは等価落下試験で発生する系の最大加速度値を、自由落

下試験で発生する最大加速度と同値とさせるためには、従来よりも大きな速度変化の入力が必要となることを示しており、これらが、系に発生する速度変化を増加させる要因とな

Table2 Result of mathematical verification between conventional method and free-fall

Item	Value				
$f_n D_e$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$D_e(\text{ms})$	1.91				
$f_n(\text{Hz})$	52.4	104.7	157.1	209.4	261.8
$\Delta V(\text{m/s})$	3.96				
$A_{ffmax_c}(\text{m/s}^2)$	1302.7	2605.4	3908.2	5210.9	6513.6
$A_{csmmax}(\text{m/s}^2)$	1273.8	2372.6	3156.2	3550.3	3664.9
$E_a(\%)$	-2.2	-8.9	-19.2	-31.9	-43.7
$D_{ffmax_c}(\text{mm})$	-12.0	-6.0	-4.0	-3.0	-2.4
$D_{csmmax}(\text{mm})$	-11.8	-5.5	-3.2	-2.1	-1.4
$E_d(\%)$	-2.4	-8.9	-19.3	-31.4	-43.7
$\Delta V_{ff}(\text{m/s})$	7.92				
$\Delta V_{cs_c}(\text{m/s})$	7.83	7.57	7.16	6.64	6.07
$E_v(\%)$	-1.1	-4.5	-9.6	-16.1	-23.4

Table3 Result of mathematical verification between proposal method and free-fall

Item	Value				
$f_n D_e$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$D_e(\text{ms})$	1.91				
$f_n(\text{Hz})$	52.4	104.7	157.1	209.4	261.8
n_{cs}	0.977	0.910	0.808	0.681	0.563
$\Delta V_c(\text{m/s})$	4.05	4.35	4.90	5.81	7.04
$A_{ffmax}(\text{m/s}^2)$	1302.7	2605.4	3908.2	5210.9	6513.6
$A_{csmmax_p}(\text{m/s}^2)$	1302.8	2605.5	3908.1	5210.9	6513.6
$E_a(\%)$	6×10^{-5}	2.2×10^{-5}	-1.6×10^{-5}	0	0
$D_{ffmax}(\text{mm})$	-12.0	-6.0	-4.0	-3.0	-2.4
$D_{csmmax_p}(\text{mm})$	-12.0	-6.0	-4.0	-3.0	-2.4
$E_d(\%)$	0	0	0	0	0
$\Delta V_{ff}(\text{m/s})$	7.92				
$\Delta V_{cs_p}(\text{m/s})$	8.01	8.31	8.86	9.75	10.78
$E_v(\%)$	1.1	4.9	11.9	23.1	36.2

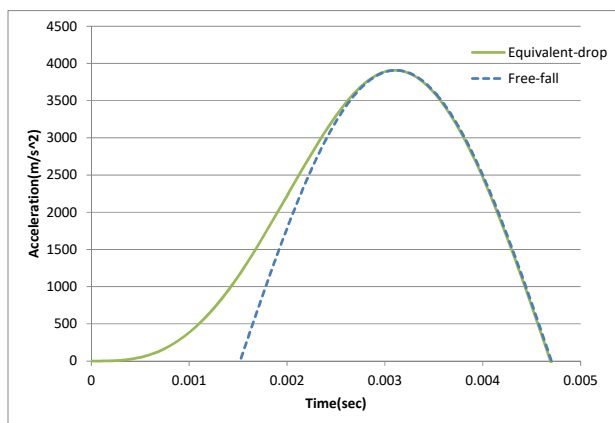


Fig.3 Analytical shock pulse of proposal method and free-fall at $f_n D_e = 0.3$

る。このことは Table3 内、 ΔV_c が $f_n \cdot D_e$ によって増加することからも理解できる。このように、提案法では、 $f_n \cdot D_e$ が従来法の有効範囲比べて乖離が大きいほど、系に発生する速度変化は、両試験で差が生じる。

以上より、包装貨物の固有振動数が既知である条件下で提案法を用いれば、 $f_n \cdot D_e$ に依存せず、自由落下試験と等価落下試験で発生する最大加速度および最大変位は等価となることが確認できた。ただし、提案法の速度変化は自由落下試験に比べて大きくなることに注意する必要がある。これは損傷境界曲線理論⁸⁾の観点から、緩衝設計にとってより安全側での試験を意味する。

なお、ここでは D を固定し、 f_n を変数とした検討について述べたが、 f_n を固定し、 D を変数とした場合でも、これまで同様の結果が得られることを確認できている。

4. 実験検討

4.1 試験手順

提案法を実用化するためには、包装貨物の固有振動数が既知であることが前提となる。ここでは、固有振動数が未知である場合における具体的試験手順を検討する。

包装貨物の固有振動数探索は、振動試験機による掃引試験で検出することが一般的であるが、ここでは、より簡便に試験することを目的に、衝撃試験機のみを利用した試験手順について検討を行う。手順は以下の通りである。

①準備：加速度ピックアップを包装内容品の剛性箇所に取り付ける

②プレテスト：内容品が破損しない程度の速度変化の衝撃パルスを印可し、入力および応答加速度を記録する。入力する速度変化は、たとえば衝撃試験機の下限值を採用する。

③パラメータ算出：②で得た応答加速度波形の作用時間の 2 倍の逆数から f_n を算出する。 T_r は入力および応答加速度の最大値の比から算出する。これらより ΔV_c を求める。

④本試験： ΔV_c の衝撃パルスを包装貨物に入力する。このとき、作用時間は②と同等とする。

4.2 実証試験

ダミー包装品を用いて、実際に自由落下試験機と等価落下試験機（提案法）を行い、内容品に発生する衝撃加速度と速度変化を比較した。

4.2.1 試験条件

ダミー包装品 (Fig.4) は Table4 の条件で作成した。

試験条件は自由落下試験での試験落下高さ 80 cm、落下方向は底面のみ連続 5 回とした。

等価落下試験で利用する衝撃パルスの作用時間の設定は既存試験範囲外とするため、15ms とし、4.1 の手順に従い、 ΔV_c を算出した。手順②、③で得られた各パラメータを Table5 に示す。使用した試験装置は、自由落下試験装置 (DTS80、神栄テストマシナリー製、Fig.5)

Table4 Dummy packaging for experimental verification

Item	Details
Box Size	340×340×340 mm
Mass	4kg
Contents	Wooden Box Size:300×300×300mm
Cushioning Material	MEF Corner-pad M6, Expanded ratio:30 Thickness:40mm
Accelerometer	3 axis accelerometer was installed in the wooden box. PCB Piezotronics,356B20



Fig.4 Dummy carton box

と、衝撃試験装置 (ASQ500、神栄テストマシナリー製、Fig.6) を用い、加速度計測は加速度計測システム (ショックマネージャ SM500) で、計測設定はサンプリングレート 10 μ s、デジタルローパスフィルタのカットオフ周波数は 500Hz とした。また、得られた加速度は 3 軸合成値で比較を行った。

Table5 Parameter of experimental verification for proposal method

Item	Value
Input shock pulse in pre-test	$A_{in} = 133.2\text{m/s}^2$ $D = 15.19\text{ms}$ $\Delta V = 1.12\text{m/s}$
Response shock pulse in pre-test	$A_{csmax} = 185.2\text{m/s}^2$ $T = 14.76\text{ms}$
f_n	33.9Hz
D_e	9.68ms
$f_n \cdot D_e$	0.328
T_r	1.390
n_{cs}	0.675
ΔV_c	5.86m/s



Fig.5 Free-Fall Tester



Fig.6 Shock Machine

4.2.2 結果と考察

自由落下試験と提案法で得られたダミー貨物内部の最大加速度および速度変化の5回平均値および誤差E（式(9)より算出）を Table6 に示す。これより、提案法における最大加速度は自由落下試験よりも4.7%大きく、速度変化は35.7%大きくなった。Fig.7 に自由落下試験と提案法における衝撃波形例を示す。これらは両試験の結果が数値解析と同様の傾向にあり、試験手順が本提案法を実施するに有効であることが示唆された。

Table6 Peak acceleration and velocity change of each test with E value

	Peak Acceleration	Velocity change
Free-fall	938.8m/s ²	6.16m/s
Proposal method	982.9 m/s ²	8.36m/s
E	4.7%	35.7%

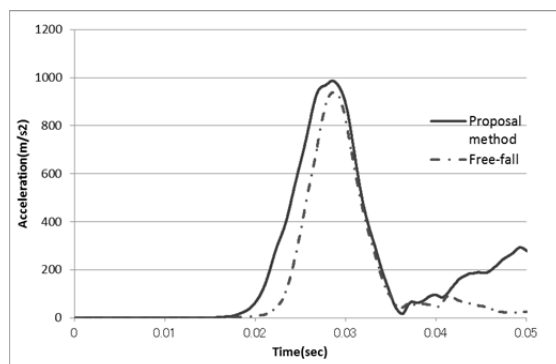


Fig.7 Experimental shock pulse by proposal method and by free-fall

5. 結論

本研究では、現行の包装貨物のための等価落下試験には、入力衝撃パルスの作用時間と試験可能な包装貨物の固有振動数の関係上、試験有効範囲に制限があることを示し、どのような包装貨物の固有振動数と衝撃パルス作用時間の組み合わせにおいても、等価落下試験を可能にする新しい試験方法を提案した。具体的には、背景理論において、衝撃伝達率と近似曲線の乖離を補正する係数を用いて、入力速度変化を補正することで、試験有効範囲の拡張理論を提示した。

また本提案内容の妥当性検証として、自由落下と等価落下を模擬する数値解析を行ったところ、従来法では発生する最大加速度、最大変位、速度変化の値は自由落下よりも小さくなり、過小評価の試験となることから、等価落下試験には適応できないことを確認した。一方で提案法は、最大加速度、最大変位については $f_n \cdot D_e$ に影響されず、従来法と等価な

結果が得られた一方で、速度変化は $f_n \cdot D_e$ が大きくなるほど、従来法との乖離が大きくなることがわかった。すなわち、本提案法は自由落下試験と完全に同等の結果は得られないものの、緩衝包装設計の観点からすれば安全側の試験を行えることとなる。言い換えれば、本提案法は、自由落下試験よりも緩衝設計をより厳しく評価することになる。

また本研究では、提案法の実用化に向け、具体的な試験手順について実験的に検討した。自由落下試験機と衝撃試験機による試験比較の結果、内容品に発生する最大加速度における両試験の誤差は約 5%となり、等価性が見られたものの、速度変化は等価落下試験が自由落下試験よりも 35%大きくなり、実証試験でも数値解析と同様の傾向にあることが確認できた。よって、今回の試験手順は提案法に適応できる。

今後の課題として、貨物の固有振動数の算出手順の見直しおよび力学モデルの高度化が考えられる。また今回の実証試験は 1 ケースのみであったため、複数条件（緩衝材料の種類、試験条件など）からの評価が必要である。

<参考文献>

- 1) JIS Z0202-1994, 包装貨物-落下試験方法
- 2) ASTM D5487-16, Standard Test Method for Simulated Drop of Loaded Containers by Shock Machines
- 3) 斎藤勝彦, 川口和晃, 日本包装学会誌, 13(5), 39(2004)
- 4) 川口和晃, 斎藤勝彦, 日本包装学会誌, 17(1), 39(2008)
- 5) Chen ZHONG and Katsuhiko SAITO, Journal of Packaging Science & Technology, Japan, 21(4), 281(2012)
- 6) Chen ZHONG, Katsuhiko SAITO, Kazuaki KAWAGUCHI and Hiroshi SETOUE, Packaging Technology and Science, 26(2), 67(2013)
- 7) 斎藤勝彦, 長谷川淳英”輸送包装の基礎と実務”幸書房, p.18(2008)
- 8) 斎藤勝彦”包装学基礎講座<9>輸送包装の科学”日本包装学会, p.71(2004)

(原稿受付 2017 年 6 月 19 日)

(審査受理 2017 年 9 月 3 日)