

論文

# 減衰の影響を考慮した包装貨物等 価落下試験の実験的検証

川口和晃\* 斎藤勝彦\*\*

## Experimental Verification of Equivalent Drop Testing with Damping for Packaged Freight

Kazuaki KAWAGUCHI\* and Katsuhiko SAITO\*\*

衝撃試験装置を用いた包装貨物落下試験は、自由落下試験と必ずしも等価にならないことが指摘されている。その理由として、包装貨物を1自由度バネ-マスモデルと仮定していたことが考えられ、包装貨物モデルを減衰モデルに変更した新しい等価落下理論が提案された。これによって衝撃落下試験における衝撃台上的速度変化を修正する係数が導かれ、2つの試験結果がより等価になることが示唆された。

ここでは、新しい方法による衝撃落下試験と自由落下試験を行い、包装内容品に発生する加速度の等価性を評価する。緩衝材に発泡倍率の異なる3つの緩衝材を使用したところ、全ての緩衝材において従来の試験法に比べ、新しい試験法による結果が自由落下試験による結果と、より等価になることを確認した。

It has been confirmed that the composite peak accelerations by the controlled shock test using the shock machine in the several drop height are larger than the results by the free fall test. The cause is the problem by the conventional equivalent drop theory. Then the assumption of package freight has modified from the conventional linear spring mass model to the attenuation model included the modification coefficient of the input velocity change on the shock table. The coefficient estimated by the dynamic compression test suggests that the controlled shock test used by the proposed model can be possible to carry out more equivalent than the test using the conventional model. Some experiments are carried out to verify the effect of the proposed equivalent model with damping.

キーワード：緩衝包装、落下試験、衝撃試験、等価落下、減衰モデル

Keywords : Cushioning Package, Drop Test, Shock Test, Equivalent drop, Attenuation Model

\* 神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程 〒651-2241 神戸市西区室谷2-2-7  
Shinyei Technology Co.,LTD. 2-2-7, Murotani, Nishi-ku, Kobe, 651-2241, Japan

\*\* 神戸大学大学院海事科学研究科 〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1  
Kobe University, Graduate School of Maritime Sciences, 5-1-1, Fukae-minami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

## 1. 緒言

近包装貨物落下試験には、自由落下試験装置を用いた自由落下試験と衝撃試験装置を用いた衝撃落下試験の2種類がある。ここで、自由落下試験とは包装品を自由落下させる試験であり、衝撃落下試験は衝撃台に包装品を固定し、正弦半波の衝撃パルス（衝撃作用時間が3ms程度以下で速度変化が自由落下速度と等しい）を衝撃台に発生させることで包装品に自由落下と同じ影響を与える試験とされている。

Li et.al.<sup>1)</sup>は、衝撃落下試験における衝撃台に発生させる速度変化を自由落下速度と一致させるために、衝撃台から緩衝体への落下高さの設定をどのようにすればいいかを、種々の自由落下高さについて実験的に求めている。

さて、包装品の緩衝機能を確認するための落下試験の方法を推奨しているJIS規格<sup>2)</sup>によると、これら2つの落下試験のうち、いずれか1つの方法で行えばよいとされている。このことは衝撃落下試験と自由落下試験において、包装内容品に対する影響が等価であること、すなわち内容品に発生する衝撃加速度が同値である必要がある。しかしながら、自由落下試験では包装品の落下時の水平度を完全にすることが実施上不可能であるために、実際には衝撃落下試験では内容品に大きめの加速度が加わる傾向にある<sup>3)</sup>。

著者ら<sup>4)</sup>は、「包装貨物評価試験」として行われている落下試験の2種類の方法である、自由落下試験と衝撃落下試験の等価度を実験的に確認した結果、両試験で得られる包装内容品に作用する加速度の最大値は必ずしも一致しないことを明らかにしている。そこ

では、天面を除く5面の面落下試験を行った結果、それぞれの面でいくぶんかの差はあるものの、衝撃落下試験が自由落下試験よりも大きな加速度が発生することを例示している。さらに、自由落下試験と衝撃落下試験で発生した加速度から落下姿勢を求めた結果、自由落下試験は衝撃落下試験に比べて、より崩れた姿勢で落下するため、加速度が分散してしまい、自由落下試験で発生する加速度が小さくなることを明らかにしている。

一方、輸送包装試験において、実際の輸送局面と室内試験を等価とするための背景理論として、製品や包装貨物を質量部と線形バネで構成される1自由度の単純バネモデルに置き換えられることがあり、中嶋ら<sup>5)</sup>は、製品衝撃強さ試験において単純なモデルに置き換えた背景理論を基にした室内試験の結果が現場を再現できないことを指摘し、その解決策を提案している。

また著者ら<sup>6)</sup>は、等価落下背景理論のモデルを、1自由度バネ-質量モデルから、減衰を加えたモデルに変更して等価落下背景理論を構築し、それに基づいた衝撃落下試験を行えば、自由落下試験とより等価な試験ができることを示唆している。

そこで本研究では、減衰等価落下背景理論に基づく衝撃落下試験が、従来の方法による衝撃落下試験よりも自由落下試験とより等価な結果を得ることができることを実験的に明らかにするとともに、減衰等価落下背景理論を用いれば、衝撃落下試験で計測された衝撃台の衝撃入力パルスと内容品の衝撃応答パルスから、そのときの衝撃落下試験での等価な自由落下高さを換算することができることを述べる。

## 2. 減衰モデルによる等価落下背景的理论

ここでは自由落下試験と衝撃落下試験による結果を等価とするための、減衰モデルを用いた背景的理论について述べる。

まず、包装品を1自由度減衰モデルと仮定したとき、自由落下試験でモデルの質量部に発生する最大加速度  $A_{ffmax}$  は、式(1)で表される。

$$A_{ffmax} = n_{ff} \omega_n V \quad (1)$$

$$\therefore n_{ff} = \left\{ \frac{2\zeta^2 - 1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right\} \cdot \exp \left[ \frac{-\zeta^2}{2\sqrt{1 - \zeta^2}} \right]$$

但し  $n_{ff}$  は減衰モデルによる自由落下修正係数、 $\omega_n$  は減衰を考慮しない場合の固有角周波数、 $V$  は自由落下衝突速度、 $\zeta$  は減衰率である。

次に衝撃落下試験において、正弦半波加速度が入力されたときの減衰モデルの応答加速度は理論的に算出でき<sup>6)</sup>、入力加速度と応答加速度の比によって、減衰を考慮した場合の衝撃伝達率  $Tr$  を導く。ここで従来の等価落下理論で用いられてきた近似である  $2\pi f_n D_c$  と  $Tr$  の比を  $n_{cs}$  と置くことにより、衝撃落下試験で発生する最大加速度  $A_{csmax}$  は式(2)で表わすことができる。

$$n_{cs} = \frac{Tr}{2\pi \times f_n \times D_c}$$

$$\therefore A_{csmax} = n_{cs} \omega_n V_c \quad (2)$$

ここで、 $f_n$  はモデルの減衰なし場合の固有周波数、 $D_c$  は有効衝撃作用時間、 $V_c$  は衝撃台上の速度変化である。以上より、減衰を考慮したモデルにおける両試験の等価条件は、

衝撃落下試験において速度変化修正係数  $n_{ff}/n_{cs}$  が必要となる。但し、速度変化修正係数を導出するためには、減衰モデルの固有周波数、減衰率が既知である必要がある。

$$V_c = \frac{n_{ff}}{n_{cs}} V \quad (3)$$

## 3. 落下試験

落下試験は、従来の方法及びここで提案した新しい方法による衝撃落下試験と、自由落下試験を行い、包装品内部に発生する加速度を比較する。ここで、Fig. 1 は今回の試験で使用した質量2.7kgの包装箱の内部であり、3軸加速度ピックアップを固定した木箱を、コーナーパッド緩衝材で固定している。また、緩衝材特性の差による速度変化修正係数の値を確認するために、緩衝材は発泡ポリエチレン (EPE) の発泡倍率の異なる3種類 (25倍、35倍、45倍) を用いた。

### 3.1 速度変化修正係数の導出

減衰を考慮した等価落下モデルを用いるためには、減衰モデルの固有周波数と減衰率を何らかの方法で算出し、速度変化修正係数を導いておく必要がある。ここでは、緩衝材評

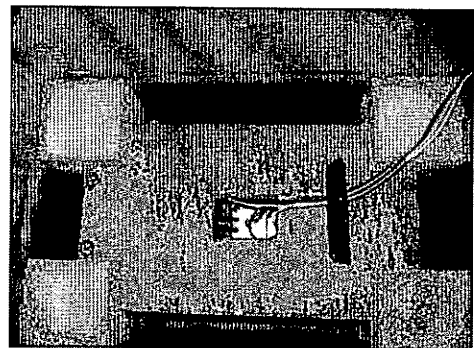


Fig. 1 Dummy Packaged Freight

価試験（動的圧縮試験）による導出方法について述べる。

Fig. 2は落下試験で用いたダミー箱の緩衝体を切り取った緩衝体とダンボールを動圧縮させている状況であり、Fig. 3にそのときの重錘に作用する加速度時系列波形の例を示す。これより、試験時に発生する加速度ピーク値  $A_{ffmax}$  とピークまでの経過時間  $\gamma$  を、式(4)に代入し、角周波数  $\omega_n$  と減衰率  $\zeta$  について連立方程式を解くことによって算出する。

ここで緩衝材評価試験の落下高さは落下試験と同条件（30cm、40cm、60cm、80cm）とし、同条件での試験回数を10回とする。ここで得られたデータから、各パラメータを算出した結果をTable. 1に示す。これより、速度変化修正係数の値は全ての落下高さで1より

も小さい、つまり今回の条件においては、従来の方法で衝撃落下試験方法を行なった場合、自由落下試験に比べて発生する加速度は大きくなることを示唆している。

$$A_{ffmax} = n_{ff} \cdot \omega_n \cdot v_{ff0}$$

$$4\gamma = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \tag{4}$$

$$n_{ff} = \left| \frac{2\zeta^2 - 1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right| \exp \left( \frac{-\zeta^2}{2\sqrt{1-\zeta^2}} \right)$$

### 3.2 試験方法

3.1で求めた速度変化修正係数を用いた場合の新しい方法と用いない従来の方法による衝撃落下試験での発生加速度を自由落下試験で発生する加速度と比較した。試験落下高さはJIS-Z-0200に基づき、30cm40cm60cm80cm

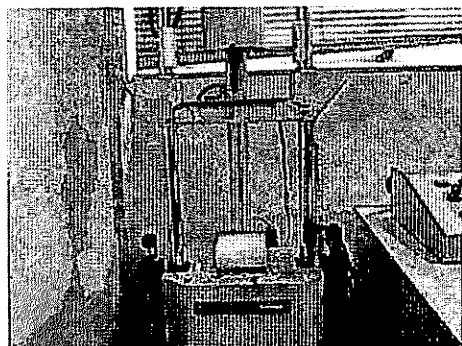


Fig. 2 Dynamic Cushion Tester

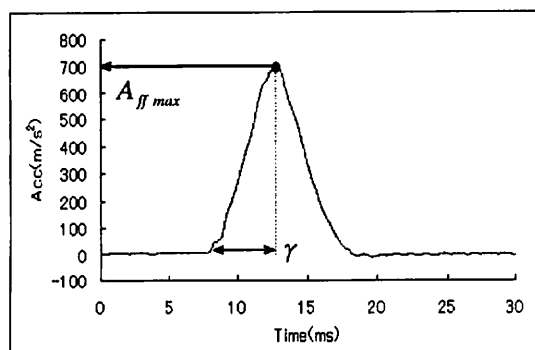


Fig. 3 Acceleration waveform

Table. 1 Modification Coefficient of the EPE cushions

Drop Height (cm)	EPE 25	EPE 35	EPE 45
30	0.875	0.864	0.910
40	0.889	0.901	0.911
60	0.865	0.876	0.901
80	0.884	0.894	0.910

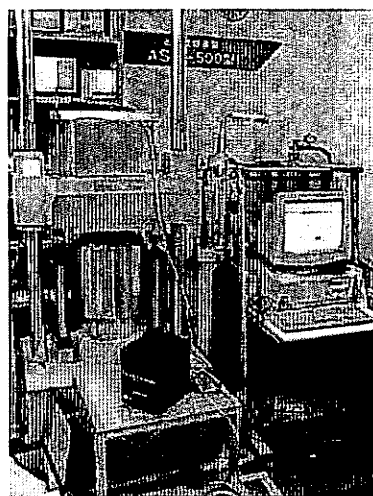


Fig. 4 The Shock Machine

とし、それぞれの落下高さで落下回数は50回、落下方向は底面方向のみとする。

#### 4. 試験結果と考察

Fig. 6 は、発泡倍率45倍の緩衝材を用いた場合の試験結果である。縦軸に衝撃落下試験での加速度、横軸に自由落下試験での加速度

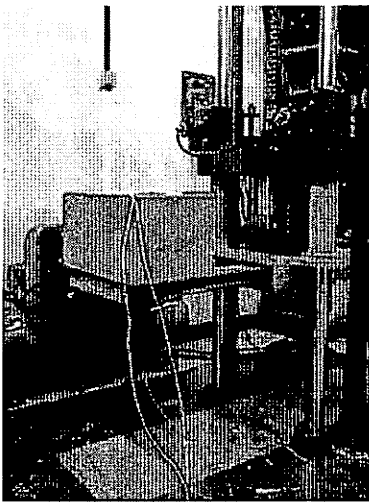


Fig. 5 The Free Fall Tester

とし、各落下高さで発生した3軸合成加速度ピーク値の50回平均値を図示している。また図中の直線は各落下高さで包装品に発生した加速度の50回平均値の近似直線である。実線が新理論による結果、破線が従来理論による結果を表しており、この近似直線のnの値によって、全体としてどちらの試験結果がどの程度大きいかを知ることができる。さらに図中の加速度平均値の十字線分は加速度データ50回分の標準偏差であり、長ければ長いほど、その試験で発生する加速度にばらつきが大きいことを意味する。

この結果から、従来の方法による衝撃落下試験と自由落下試験では、衝撃落下試験が11.7%も加速度が大きくなったのに対し、新理論を用いた等価落下試験では1.5%の精度で試験が行なうことができることがわかる。また結果のばらつきは自由落下試験で大きく、姿勢が安定していないことが原因と思われる。Table. 2は緩衝材の違いによる等価度指標(n)値であり、全ての緩衝材で従来法

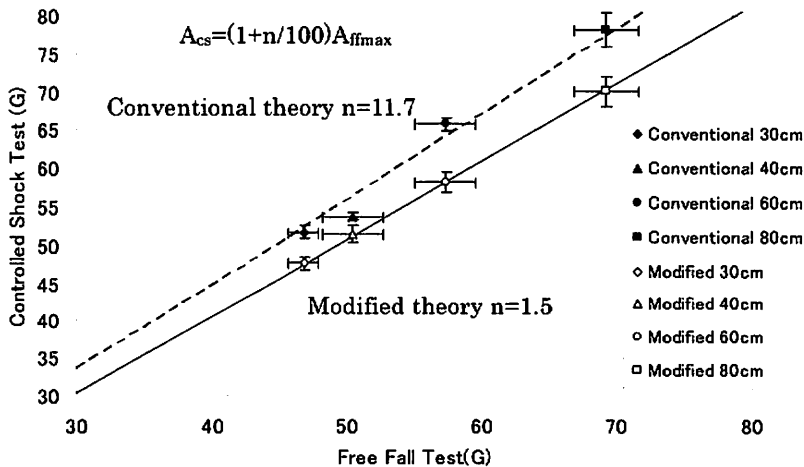


Fig. 6 Comparison between Controlled Shock and Free Fall(EPE45)

Table. 2 Equivalent Rate (n) on several Cushions

Expansion ratio	Conventional	Modified
25	11.7	-0.2
35	10.5	2.6
45	11.7	1.5

よりも新しい方法での結果がより等価精度が向上していることが明らかである。

### 5. 衝撃落下試験と等価な落下高さを導出する方法

減衰を考慮した等価落下理論を活用するためには、包装貨物の固有周波数と減衰率が必要であることは、上述の通りである。そこで3.1では、緩衝材評価試験で得られる加速度波形から各パラメータを算出する方法を採った。一方、実用的には衝撃落下試験と等価な落下高さを正確に見積もることの方がより重要であろう。そこで、ここでは衝撃落下試験時に包装内容品の応答加速度を計測することによって、等価落下高さを導出する方法を提案する (Fig. 7 参照)。

まず、加速度ピックアップを製品の剛性部に取り付け、衝撃落下試験を行い、入力加速度と応答加速度を計測する。このとき発生した応答加速度波形の衝撃作用時間の2倍の逆数をモデルの固有振動数とする。次に衝撃台に発生した入力加速度波形に対して、求めた固有周波数と任意の減衰率に対するSR解析<sup>7)</sup>を行い、応答加速度ピーク値とSR解析の加速度ピーク値とを比較し、その値が最も近いときの減衰率を採用する。さらに式(2)に入力/応答加速度、固有振動数を代入し $n_{cs}$ を求める。続いて減衰率と式(4)から $n_{ff}$ を算出する。最後に衝撃落下試験結果から式(5)によって、

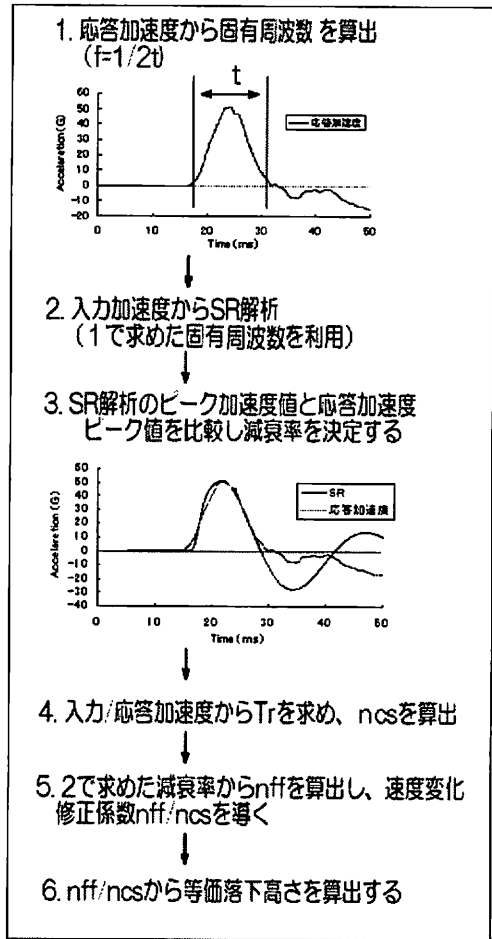


Fig. 7 Flow Chart for Equivalent Drop Height using Modified Theory

自由落下試験に相当する落下高さを導くことが可能となる。

$$V = \sqrt{2gh} = \frac{n_{cs}}{n_{ff}} V_c$$

$$\therefore h = \frac{1}{2g} \left[ \frac{n_{cs}}{n_{ff}} V_c \right]^2 \quad (5)$$

Table. 3は以上の方法による、減衰を考慮した背景理論による衝撃落下試験での結果を用いて、そのときの等価な自由落下高さを導出したものである。ただし、表の値はそれぞれの実験条件での50回の平均値である。これ

Table 3 Equivalent Drop Height by the Modified Controlled Shock Test

Set-up drop height	EPE 25	EPE 35	EPE 45
30cm	34.5	31.9	36.7
40cm	38.2	45.7	47.4
60cm	60.9	56.8	68.8
80cm	75.2	72.3	80.1

より等価自由落下高さは設定自由落下高さに近い値であることが確認できる。したがって、衝撃落下試験の結果を解釈するときの等価自由落下高さは、ここで提案した方法で考慮すべきである。

## 6. 結論

「包装貨物評価試験」として行われている落下試験の2種類の方法である、自由落下試験と衝撃落下試験の等価度を実験的に確認した結果、両試験で得られる包装内容品に作用する加速度の最大値は必ずしも一致しないことが指摘されている。このような両試験の等価度が十分でない理由として、等価落下背景理論の不十分さが影響していると考え、それについて検討を加えた。

等価落下背景理論のモデルは、一自由度バネ-質量モデルから、減衰を加えたモデルに変更し、新しい等価落下背景理論を構築した。さらに、減衰を考慮した新しい背景理論に基づいた衝撃落下試験を行えば、自由落下試験とより等価な試験ができることを示唆した。

さらに、減衰モデルを用いた新しい等価落下理論を実験で検証したところ、従来法よ

りも等価精度の高い試験が行うことができることを実証できた。また、衝撃落下試験に対する等価自由落下高さを求める方法についても提案し、実験によってその精度を確認した。

以上のことより、従来の落下試験方法では2つの試験による結果にはどうしても差が出てくるため、少なくとも現状の包装貨物落下試験を行う上では、実施された結果を評価する際には、以上のような問題点について注意しておく必要がある。

## <参考文献>

- 1) F. Li, D. Twede and J. W. Goff, Packaging Technology and Science, 6, 139-146 (1993)
- 2) JIS-Z-0202-1994 包装貨物 - 落下試験方法, 日本規格協会
- 3) 山口誠、改訂版包装設計の基礎知識、日本包装技術協会、193-204 (1998)
- 4) 斎藤勝彦、川口和晃、日本包装学会技術報告、13 (5)、303-307 (2004)
- 5) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、日本機械学会論文集C編、67 (664)、3924-3929 (2001)
- 6) 川口和晃、斎藤勝彦、日本航海学会論文集、116,255-260 (2007)
- 7) R. S. Ayre, Transient Response to Step and Pulse Functions, Shock and Vibration Handbook, Chapter 8, pp.8.53

(原稿受付 2007年10月3日)

(審査受理 2007年11月9日)