

安全な高さでの自由落下試験による 包装貨物限界落下高さ衝撃加速度推定

川口 和晃^{*}、斎藤 勝彦^{**}、竹内 雅和^{***}

Prediction on Peak Acceleration of Packaged Freight at Target Drop Height by Safety Drop Height Free Fall Test

Kazuaki KAWAGUCHI^{*}, Katsuhiko SAITO^{**} and Masakazu TAKEUCHI^{***}

包装貨物落下試験時に内容品が破損してはならない場合に対する新しい落下試験方法として、「ハイブリッド落下試験」が提案されている。これは製品が破損しない高さでの落下試験を実施することにより、目標とする高い落下高さでの発生加速度を予測する試験方法である。すでに実証試験により、本試験方法の有効性が確認されている。ものの、衝撃試験装置、シミュレーションソフトウェア、加速度計測機器など、高額な機器が複数必要となるため広く普及させる面で課題がある。

本報告ではハイブリッド落下試験を汎用的に利用する目的で、自由落下試験機と加速度計測機器を用いた簡便法について検討した。ここでは自由落下試験における加速度予測方法の考え方を提示すると同時に、その実証試験を行った。その結果、本提案による加速度予測はおおよそ 15% の誤差で得られ、緩衝材料特性の影響は比較的少ないことが示唆された。

A new method of the drop test has been proposed as 'The Hybrid Drop Test'. The purpose of this test is to evaluate the cushioning package design without the damage of the test specimen by the drop test. On this test, the predictive acceleration of the target drop height is calculated by the result of the safety drop test from the low drop height. The high efficacy of this test has been confirmed in the prior study. However, there is a problem that expensive equipments, such as shock machine, simulation software and acceleration measurement system, are needed to carry out this test.

In order to become more useful test, the new simple method with the free fall tester and acceleration measurement equipment was proposed and investigated in this paper. As the result, the accuracy of the predictive acceleration was within 15 % toward the peak acceleration by the drop test. Moreover, it has suggested that there is a relatively slight influence of the characteristic of the cushion materials.

キーワード : 緩衝設計、輸送包装、落下試験、予測加速度

^{*}連絡者(Corresponding author), 神栄テクノロジー(株) (〒650-0034 神戸市中央区京町 77 番 1 神栄ビル 5F),

Shinyei Technology Co.,Ltd., 77-1, kyomachi, chuo-ku, Kobe, Hyogo, 650-0034, Japan,

TEL:078-393-6963, FAX:078-332-1619, Email:k-kawaguchi@stc.shinyei.co.jp

^{**}神戸大学 輸送包装研究室, Kobe University, Transport Packaging Laboratory

^{***}京セラドキュメントソリューションズ(株),Kyocera Document Solutions Inc.

1. 緒言

緩衝包装設計の最終確認試験として、落下試験が実施されている。この試験では、指定の落下高さから包装貨物を落下させた後、内容品の破損状況が確認される。もし不具合が起きた場合は緩衝設計が見直され、改めて落下試験による検証が行われる。

ここで、落下試験を実施する段階の内容品は、製品開発途中の試作品や高額のため取り換えてできない製品など、内容品を破損させてはならない場合についても、実試験による緩衝包装機能の評価が求められることがある。

そこで上記のような場合に対応する新しい落下試験方法として「ハイブリッド落下試験」¹⁾が提案されている。本試験のコンセプトは、内容品が破損しない安全な落下高さでの落下試験結果から、目標とする高い落下高さの発生加速度を予測することにより、内容品を破損させず緩衝設計を評価するものである。すでに本試験における実証試験も行われ、その有効性が確認されている。ただし本試験を実施するためには、包装貨物落下試験を行うための衝撃試験装置、加速度計測機器およびシミュレーションソフトウェアなど、高額な設備が必要となるため、汎用性の点で課題が残っている。

本報では、ハイブリッド落下試験を、より簡易化し、広く普及させる目的で、一般的に活用されている自由落下試験機と加速度計測機器のみを用いて、包装貨物の発生加速度を予測する方法について検討した。

2. 加速度予測方法

2.1 加速度予測方法の基本的考え方

ここでは、ハイブリッド落下試験と同様、包装貨物を Fig.1 に示すような FVD モデル (Friction Viscous Damping) と仮定する。ここで、FVD モデルが自由落下したときに質量部に発生する最大加速度²⁾は、式(1)で表される。

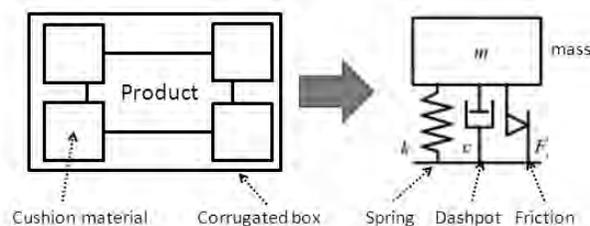


Fig.1 Friction Viscous Damping Model

$$\ddot{x}_{\max} = u_{ff} \cdot \omega_n \cdot V + \mu_{ff} \cdot \frac{c}{m} \quad (1)$$

$$\because u_{ff} = \left| \frac{4\zeta^2 - 1}{2\zeta} \right| \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{2 - 4\zeta^2}} \right)$$

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

ここに、 \ddot{x}_{\max} は内容品に発生する最大加速度、 ζ は減衰率、 π は円周率、 ω_n は角固有振動数、 V は衝突速度、 F_c は摩擦力、 m は内容品の質量である。

本提案における加速度予測の考え方として、式(1)の各パラメータ (ζ 、 ω_n 、 F_c) を何らかの方法で決定した後、目標とする落下高さに相当する衝突速度 V を代入することで、

本来評価したい落下試験での最大加速度を予測する。なお、本方法は、FVD モデルのパラメータが定数となることが前提であるため、目標高さによる落下試験で内容品が砕けたり、分解するような破損が生じることで、各パラメータが大きく変化する場合には適応しない。

2.2 パラメータ決定方法

ここでは式(1)のパラメータを決定する方法について述べる。

まず、内容品の質量 m が既知であることは自明である。 V は、落下試験時の落下高さ h から式(2)として得られる。

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

次に、落下試験時に加速度波形を計測すると、 \ddot{x}_{\max} と衝撃作用時間 T が得られる。ここで、FVD モデルにおける T と角固有振動数 ω_n の関係¹⁾は、式(3)で表される。

$$\omega_n = \frac{\pi}{\sqrt{2T}} \quad (3)$$

以上より、 V 、 m は落下試験時には既知となり、落下試験時に内容品の加速度波形を計測すれば \ddot{x}_{\max} 、 ω_n は実験的に得られることから、式(1)における未知数は、 ζ と F_c のみとなる。

次に、上記の2つの未知数を求める方法について述べる。まず、2つの異なる落下高さで落下試験を行い、落下高さ別に得られる V 、 \ddot{x}_{\max} をそれぞれ式(1)に代入すると、式(4)が得られる。これを連立方程式として解くことにより、 ζ と F_c が導かれる。

$$\begin{cases} \ddot{x}_{\max 1} = u_{ff} \cdot \omega_n \cdot V_1 + \mu_{ff} \cdot \frac{F_c}{m} \\ \ddot{x}_{\max 2} = u_{ff} \cdot \omega_n \cdot V_2 + \mu_{ff} \cdot \frac{F_c}{m} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)において $\ddot{x}_{\max 1}$ 、 V_1 は1回目の落下試験により得られる数値、 $\ddot{x}_{\max 2}$ 、 V_2 は2回目の落下試験で得られる数値を表している。また、ここでは ω_n を2つの試験で得られた作用時間 T の平均値から、式(3)により算出している。

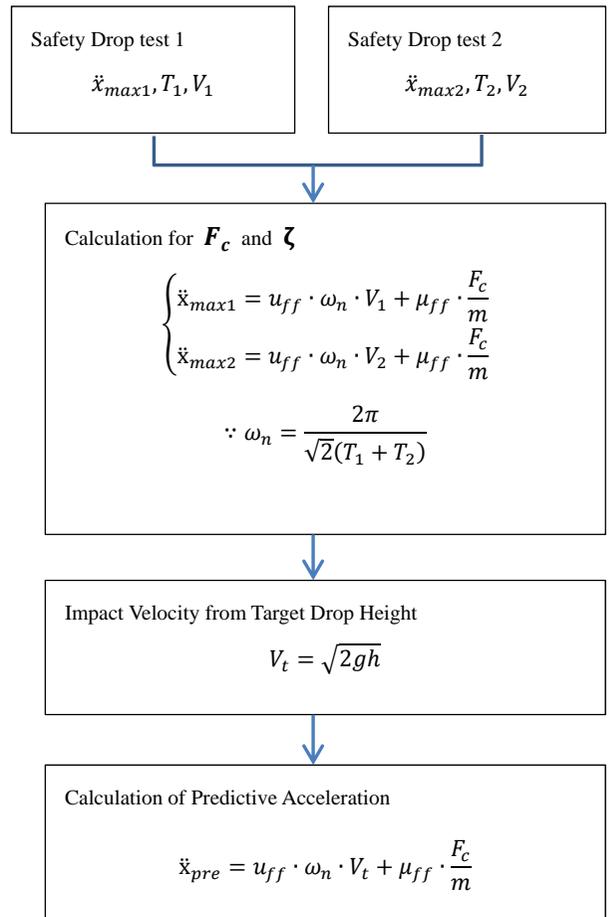


Fig.2 Derivation for Predictive Acceleration

ここでハイブリッド落下試験のコンセプトから、式(4)を得るための落下試験の落下高さ設定は、内容品が破損しないと考えられる低い落下高さとする。たとえば、1回目の落下試験の試験高さは、落下試験機の下限值を採用し、2回目の試験高さは、1回目の試験結果との差を明確にするため、下限高さ+10 cmに設定するなどが考えられる。

以上より、2パターンの落下試験を実施し、式(4)を解くことにより、式(1)の全パラメータが既知となる。最後に、目標とする落下高さ H に相当する衝突速度 V を式(1)に代入すれば、目標とする落下試験で発生すると考えられるピーク加速度を予測できる。本報における加速度予測方法における流れを Fig.2 に記す。

3. 実験による検証

ここでは2章で提案した加速度予測方法に対して、実際に落下試験を行い、その妥当性について検証する。ここでは、内容品に発生する最大加速度のみを比較対象とし、内容品の物理的な破損については言及しない。

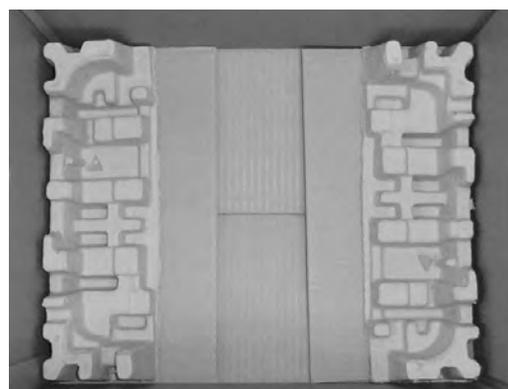
3.1 供試品

本試験で利用した供試品は、小型プリンタを想定したダミー木箱（サイズ：358×262×238 mm、質量：7 kg、Fig.3 参照）を利用した。

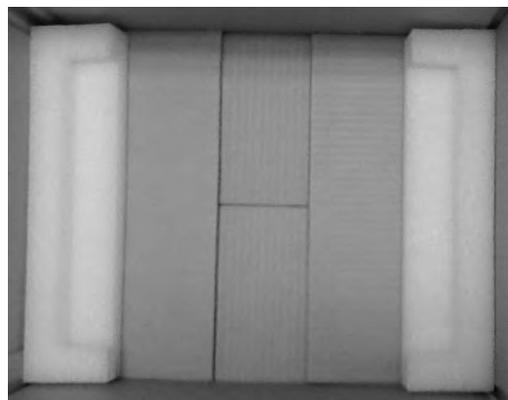
緩衝材はパルプモールド緩衝材と、発泡ポリエチレン緩衝材（サンテックフォーム発泡倍率 35 倍）の2種類を用いている。（Fig.4）。



Fig.3 Dummy Box



(a)



(b)

Fig.4 Tested Cushion Material

(a)Pulp Mold

(b)Expansion Polyethylene

また、加速度計測は木箱内部に加速度ピックアップ（1 軸：上下方向）を固定し、加速度計測システム(YOSHIDA SEIKI:SM-500)を用いた。このとき計測条件は、サンプリング周期 10 μ 秒、フレーム長さ 8000 ポイント、デジタルローパスフィルタのカットオフ周波数 500Hz とした。

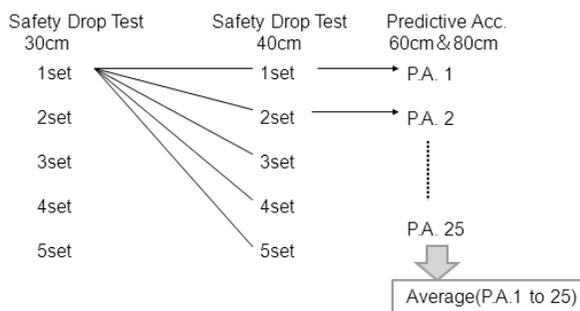


Fig.5 Calculation of Predictive Acceleration

3.2 落下試験条件

落下試験の落下高さは、安全落下試験高さとして 30 cm（試験機下限高さ）、40 cm（下限高さ+10 cm）、目標落下高さを 60 cm、80 cm とした。落下回数は緩衝材の塑性を考慮して 1 回のみとし、1 試験毎に緩衝材、段ボールを交換し、同条件で繰り返し 5 回の落下試験を実施した。また落下方向は底面方向のみとした。落下試験機は回転アーム型の落下試験装置(YOSHIDA SEIKI:DT-100B) を用いた。

3.3 加速度予測値の計算方法

加速度予測値の検証方法として、安全落下高さ 30 cm、40 cm の試験結果をもとに、目標落下高さ 60 cm、80 cm における加速度予測値を算出し、実測値と比較する。

ここで、加速度予測値の算出方法は、Fig.5 に示すように、30 cm、40 cm の各 5 回の実験値から、60 cm、80 cm に対する 25 通りの予測加速度を計算し、その平均値を各落下高さでの加速度予測値とする。ただし、30 cm のときの実験値が 40 cm のときの実験値よりも大きい場合は、計算から除外した。今回の検証ではパルプモールド緩衝材の落下

試験で、1 ケースのみ除外対象となった。

3.4 実測試験と加速度予測の比較

Table1 に落下試験での実測加速の 5 回平均値 \dot{x}_{exp} と標準偏差 \dot{x}_{exp_std} 、作用時間における 5 回平均値 T と標準偏差 T_{std} 、予測加速度の平均値 \dot{x}_{pre} と標準偏差 \dot{x}_{pre_std} および予測誤差 \dot{x}_{error} を示す。ここで、予測誤差とは式(5)で算出され、数値が小さいほど予測精度が高いことを意味する指標である。

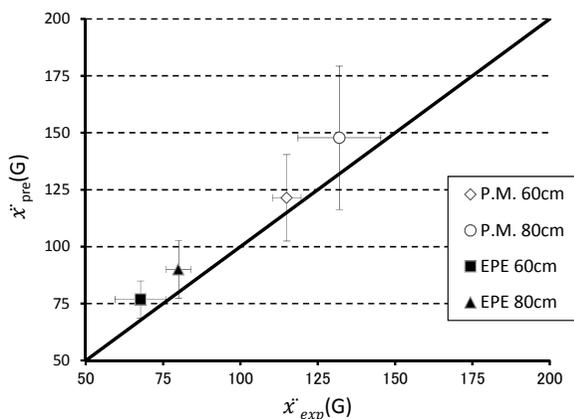


Fig.6 Comparison between Predictive Acceleration and Experimental Acceleration

Table1 Result of Experiment and Prediction

(a) Pulp Mold cushion (b) Expansion PE cushion

(a)

Drop height	$\ddot{x}_{exp}(G)$	$\ddot{x}_{exp_std}(G)$	T(ms)	$T_{std}(ms)$	$\ddot{x}_{pre}(G)$	$\ddot{x}_{pre_std}(G)$	$\ddot{x}_{error}(\%)$
30cm	71.9	8.3	9.8	0.4	-	-	-
40cm	89.8	6.5	9.5	0.4	-	-	-
60cm	115	4.7	8.4	0.8	121.4	19.0	5.6
80cm	132	13.4	8.6	0.3	147.8	31.5	12.0

(b)

Drop height	$\ddot{x}_{exp}(G)$	$\ddot{x}_{exp_std}(G)$	T(ms)	$T_{std}(ms)$	$\ddot{x}_{pre}(G)$	$\ddot{x}_{pre_std}(G)$	$\ddot{x}_{error}(\%)$
30cm	51.8	1.4	13.4	0.5	-	-	-
40cm	61.2	3.2	13.5	0.6	-	-	-
60cm	67.7	6.4	13.7	0.4	76.8	8.1	13.4
80cm	80	3.8	13.7	0.9	90.0	12.6	12.5

$$\ddot{x}_{error} = \frac{\ddot{x}_{pre} - \ddot{x}_{exp}}{\ddot{x}_{exp}} \times 100 \quad (5)$$

また Fig.6 にパルプモールド緩衝材、発泡ポリエチレン緩衝材の実測値 \ddot{x}_{exp} と予測値 \ddot{x}_{pre} の関係を図示した。横軸は実測値、縦軸は予測値であり、各マーカーはそれぞれの数値の平均値、上下左右の線分は標準偏差を示している。また図中の実線は実測値と予測値が等しくなる境界線を表しており、平均値が実線に近いほど、実測値と予測値の誤差が少ないことを示す。さらに平均値が実線の上側にある場合は実測値よりも予測値が大きく、下側にある場合には予測値は実測値より小さくなるのが理解できる。

これより、いずれの緩衝材でも予測値が実測値よりも大きくなる傾向にあることがわかる。予測誤差はパルプモールド緩衝材で最大

12.0%、発泡ポリエチレン緩衝材は最大 13.4% であり、緩衝材による差は見られない。一方で、落下高さ毎の予測値のばらつきは、発泡ポリエチレン緩衝材よりパルプモールド緩衝材が大きくなっている。これらばらつきの差については今後、より詳しく検証していく必要があるが、現時点では、事前の 2 回の安全落下試験において各 5 回、合計 10 回程度の実測データから得られる加速度予測値の平均値を用いれば、緩衝材料に関係なく、目標とする落下高さの加速度を、およそ 15% の範囲で予測できることを確認した。このことは、本提案方法を利用して、緩衝設計を評価すると安全側での設計となることを示唆している。

一方で先行研究結果^リでは、予測誤差は $\pm 10\%$ の範囲で解析されることが確認されている。ここで、本提案方法の予測誤差が大きくなる原因として、試験方法による影響が考

えられる。自由落下試験では包装貨物の姿勢が傾いて床面と衝突することにより、内容品に発生する加速度に影響を与えている³⁾。つまり、落下試験の実測数値自体に、傾きによる誤差が含まれており、それを利用して予測値を算出しているため、予測誤差が大きくなっていることが予想される。

4. 結論

本報告では、ハイブリッド落下試験をより簡便化する目的で、落下試験装置を用いた加速度予測方法を提案し、異なる2つの緩衝材を用いたダミー貨物で落下試験による実験的検証を行った。その結果、予測される加速度値の予測誤差はおよそ15%の範囲で安全側に予測されること、また予測値のばらつきに差はあるものの、予測誤差は緩衝材料の特性による影響は少ないことから、合計10回程度の事前実験データがあれば、緩衝材料に関係なく本提案方法を利用できる可能性が示唆された。

今後の課題として、落下姿勢の影響がない動的圧縮試験を用いた検証を行うことで、本提案の一般化が必要である。さらに、予測加速度の精度を向上させるため、加速度予測値を導出する際の計算手順についても再考する余地がある。また、実用上では落下高さによりFVDモデルのパラメータが変化することも考えられる。このような場合に対する方法についても今後検討していく必要がある。

<引用文献>

- 1) Chen ZHONG, Katsuhiko SAITO, Kazuaki KAWAGUCHI and Hiroshi SETOUE, *Packaging Technology and Science*, 27(7), 509, (2014)
- 2) Chen ZHONG, Katsuhiko SAITO and Kazuaki KAWAGUCHI, *Packaging Technology and Science*, 26(2), 67, (2013)
- 3) 川口和晃, 斎藤勝彦, 日本包装学会誌 18(3), 203 (2009)

(原稿受付 2014年3月19日)

(審査受理 2014年7月7日)