

段ボール構造体の落下衝撃シミュレーション

中川 幸臣*・丹羽 一邦**・斎藤 勝彦***

Simulation of Corrugated Fiberboard Structure for Dropping Impact

Yukiomi NAKAGAWA*, Kazukuni NIWA** and Katsuhiko SAITO***

最近、段ボールは製品を保護する緩衝材や固定材など包装用内装材として使われる事例が多くなってきている。しかし現状の段ボール包装設計においては現品サンプルの試行錯誤による試作や過去の経験のみに頼った手法に依存する傾向にある。そこで段ボール包装設計の効率化を図るため、汎用構造解析ソフトを利用した段ボールのシミュレーションについての検討を試みた。

今回は実用性を考慮し、段ボールシートを単一素材としてとらえた簡易モデル化について焦点を絞り、段ボール構造体の緩衝材モデルを用いて実験・解析を行った。そこから解析精度を向上させるための要因について考察し、段ボール包装設計における FEM 解析利用の有効性について検討した。

Recently, corrugated fiberboard is often made into inner packaging materials such as cushioning or fixing. But in the present circumstances, as their structure which fit for products are complicated, trial-and-error or empirical approach tends to be used for the design of these inner materials. To realize more effective design process of them, new method is attempted to incorporate multipurpose FEM simulation software.

This paper focused on a simple material model of corrugated fiberboard, and cushioning of corrugated fiberboard structures made of a simple model were simulated and compared with experimental results of drop tests.

Then main causes to improve accuracy of calculation and the validity of using FEM simulation software for packaging design were investigated.

キーワード：段ボール, 緩衝包装設計, 衝撃解析, 有限要素法

Keywords : corrugated fiberboard, cushioning design, impact analysis, FEM.

*愛知県産業技術研究所 (〒448-0003 愛知県刈谷市一ツ木町西新割)

Aichi Industrial Technology Institute, Nishishinwari, Hitotsugi-Cho, Kariya, Aichi 448-0003, Japan

**株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島3-31-6)

Terrabyte Co.,Ltd, 31-6,3chome,Yushima,Bunkyo-ku,Tokyo 113-0034, Japan

***神戸大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

1. 緒言

段ボールの内装容器、つまり緩衝材や固定材としての用途が増えている状況において適切な包装設計が行われるためにはその設計技法に関するノウハウも確立されなければならない。しかし、現状の段ボール包装設計は製品形状に合わせたサンプルを試作した後、実際に落下試験を行い緩衝性などの機能評価を実施するという、いわゆるトライ・アンド・エラーに基づく方法がほとんどである。この方法では製品が異なれば段ボールの構造も異なってくるため緩衝設計の一般化のために必要な基礎データの蓄積が非常に困難であるという問題がある。

そこで、家電品や機械部品などの設計では常識となっている汎用構造解析ソフトを段ボール包装設計にも適用させ、設計の迅速化・効率化を図ることを考える。前報¹⁾では段ボールという異方性の紙素材で構成された材料が FEM 解析に適用できるかについて様々なモデル化を行い検討してみた。その結果、強度を推定するレベルにおいては実験値と解析値の近似が認められた。しかし、段ボールシート全体を単一の素材と見なした簡易モデルによる解析においては特に、座屈後の荷重の挙動が実際と大きく異なってしまうなどの課題があった。

ところで、本研究の目的は製品を含んだトータル包装品レベルでのシミュレーションを行うことにある。その点からも実用性を考慮した場合、段ボールを詳細にモデル化しソリッド要素で解析していたのでは作業に大変な労力がかかってしまい、現実的な手法とは言い難い。従ってここでは段ボールシート全体

を単一素材と見なしてシェル要素によりモデル化を行う簡易モデル解析について考えていく。今回、簡易モデルにおける段ボールの材料データの見直しを行い基本的な試験での解析結果を検証し、さらに、ダミー木箱を用いて緩衝包装設計を施した包装品モデルの落下試験のシミュレーションを実施し、実験との比較を試みた。

2. 段ボールの簡易モデル化について

2.1 解析ソフトについて

本研究で用いた汎用構造解析ソフトは前報に引き続き米国 LSTC 社製の「LS-DYNA」である。このソフトは陽解法により非線形解析を行うもので^{2) 3)}、塑性加工解析や衝撃解析の分野で実績がある。

2.2 前回の簡易モデルについて

簡易モデル化の考え方として、本来ライナと中芯で構成される段ボールシートを一様の単一素材と捉え、シート全体をシェル要素でモデル化し解析を行った。そして、解析に用いる物性データについては段ボールシートの状態で測定した数値を利用した。シェル要素で解析を行うために実施した試験としては、エンドクラッシュ試験と曲げ試験である。また解析には LS-DYNA の塑性モデル解析の計算則を用いた。

ここで、エンドクラッシュ試験について解析を行った結果を示す。なお、実験に用いた段ボールシートの原紙構成については表ライナ及び裏ライナともに坪量 210g/m^2 の K ライナ、中芯は坪量 120g/m^2 の普通芯で構成された A フルートのものを使用した。また緩衝材

モデルの実験等を行うが、それらの実験に用いた段ボールの材質についてもすべて上記と共通である。ここで、本文中の各実験データはすべて温湿度条件 23℃/50% の標準状態で前処置を施した試料を用いている。

Fig. 1 は 50×100mm のシートを CD 方向（シートの段流れに直交する方向）に圧縮速度 10mm/min で試験を行った場合の実験とシミュレーション解析の比較である。図から圧縮荷重が最大値になるまでの弾性域の荷重と変位の挙動に関してはある程度の精度が良い解析ができていますが、最大荷重を過ぎて座屈域になると実験と解析との結果に大きな差が生じているのがわかる。実際の試験の様子を見てみると、圧縮を加えていくと試料は Fig. 2 のように端部から局部座屈が発生する。しかし、シミュレーション解析では試料の中心付近から座屈していくような挙動になっていた。また、他の試験の解析でもこのように荷重のピーク値は合っているにもかかわらず座屈域での解析精度に課題がある傾向が見られた。

段ボール緩衝材の現実的な効果について考えた場合、ここで課題となっている座屈後の荷重の挙動こそが衝撃エネルギーを吸収する

状態を示すことになるため、座屈後の解析精度を上げなければ段ボール緩衝材のシミュレーションについては十分な効果が得られないと言える。したがって、段ボールの座屈後の荷重挙動を考慮した材料のモデル化について再検討を行う。

2.3 新しいモデル化の検討について

段ボールが座屈した後の荷重挙動についても考慮するため、ここで LS-DYNA の破壊モデル解析の計算則を用いることを試みた。解析に利用した数値として圧縮強度に加え、せん断破壊強度と残留強度を設定した。圧縮強度は材料の最大荷重に寄与し、またせん断強度・残留強度はピーク荷重後の座屈挙動に影響すると考えられる。ここで今回解析に用いた材料物性値について Table. 1 に示す。表中の弾性率の値は初期の微小変形域において適用される。また、ポアソン比については前報¹⁾と同じ数値を用いており、文献¹⁾を参考にした値を導入している。

これらの数値を用いた破壊モデルでの解析について同じエンドクラッシュ試験の条件で

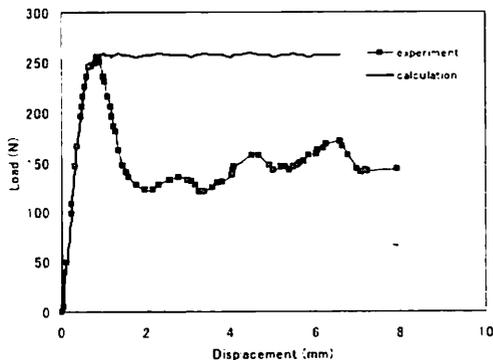


Fig. 1 Comparison between the calculated and found values of end crush test by plastic model

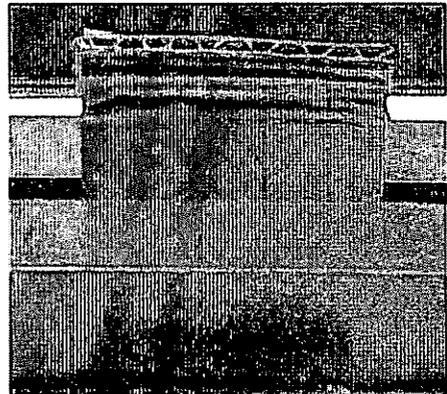


Fig. 2 Local buckling of corrugated fiberboard by end crush test

Table. 1 parameters for destructive model of corrugated fiberboard

parameter	values
elastic modulus (CD direction)	656MPa
elastic modulus (MD direction)	374MPa
Poisson's ratio	0.1
compressive strength (CD direction)	1.05MPa
compressive strength (MD direction)	0.44MPa
shearing strength	0.30MPa

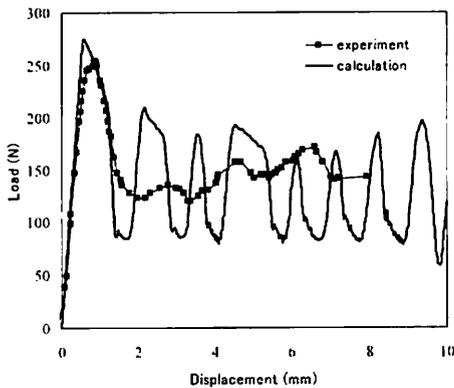


Fig. 3 Comparison between the calculated and found values of end crush test by destructive model

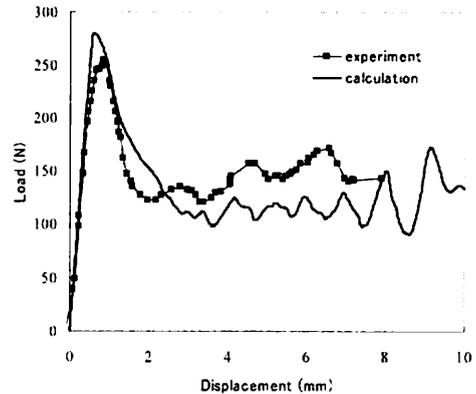


Fig. 4 Comparison between the calculated and found values of end crush test by destructive model with initial irregularity

行った。また、解析時の初期不整の有無の影響について調べるため、モデル上端部の試験機が接触する部分の板厚方向に対し、一様にランダムな初期不整を設定したモデルの解析を行った。なお、設定幅は試料幅に対して最大1%の範囲内とした。

実験と解析の比較について Fig. 3 及び Fig. 4 に結果を示す。まず、Fig. 3 は初期不整の設定が無い場合の解析と実験の比較であるが、図より最大荷重を過ぎた座屈域の荷重の挙動について見ると、解析結果も実験同様に変位 1mm の付近から座屈後大きく荷重が下がっているのがわかる。ただ、実験では変位 2mm を過ぎたところからおよそ 120~170N の荷重範囲で上下に推移しながらほぼ横ばい

に圧縮変形が進行しているのに対し、解析ではおよそ 80~210N の荷重範囲で実験よりかなり多くの上下の挙動を繰り返している様子がわかる。一方、Fig. 4 は初期不整を設定した場合であるが、図より変形が進んで荷重が座屈域に入ったところでも解析値が実験値の挙動とかなり近似しているのがわかる。この初期不整により実際の試験における座屈現象に近い解析が行えるようになったと考えられ、また今回のモデル解析の結果からも局部座屈に近い変形の様子がみられ、前回より改善された内容となった。

したがって次にこれらの材料則を用いて段ボール構造体の落下衝撃試験、いわゆる動的

圧縮試験の解析を行い、緩衝材としての評価について考える。

3. 段ボール構造体について

3.1 基礎データ用モデルの考案

段ボール構造体を緩衝材として評価する場合、実際の包装では製品に合わせた形状の調整や組み合わせにより作られているためブロック状緩衝材のような一般的な評価モデルというものがない。JIS 規格でも構造体緩衝材の評価試験方法 (JIS Z 0240) としては製品ダミーを用いて実際の使用状況に合わせた条件での試験を定めている³⁾。このような構造体の緩衝性の評価方法について定量化し、緩衝特性の一般化を図るためにはまず、シンプルな構造体モデルを考案し緩衝特性データを収集する必要があると考えられる。

そこで今回、薄板構造体の緩衝材についての基本モデルを考え、その基本ファクターとして、製品支持部の有効長さ、製品支持部の折り曲げ構造の有無、さらに製品支持端部のせん断条件の考慮といった要因を含めて Fig.5 のようなスリーブ状の構造体を考案した。試料の外側寸法は 150×50×50mm で、折り曲げ構造を考慮したモデルについては試料上端

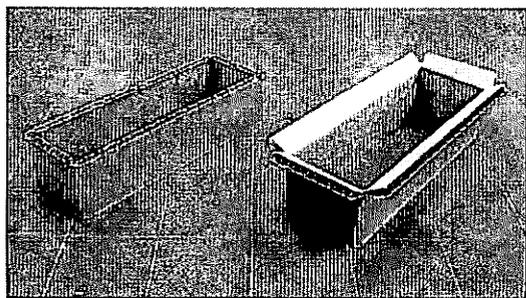


Fig. 5 Sleeve structure model of corrugated fiberboard

部を長さ 10mm 余分に延ばしてけい線部を設けた。

3.2 緩衝特性に関する実験

このモデルの緩衝特性について落下衝撃試験機を用いて調べたが、落下時に重錘が試料に接触する際にせん断力が作用するように Fig.6 に示すように重錘の底面に 100×100mm 断面の角材を取り付けて試験を行った。試験は落下高さ 60cm、試料前処置 23℃/50% という条件において実施した。

Fig. 7 に試験結果を示すが、図の横軸は重錘の質量を試料と角材が接する長さ (この場

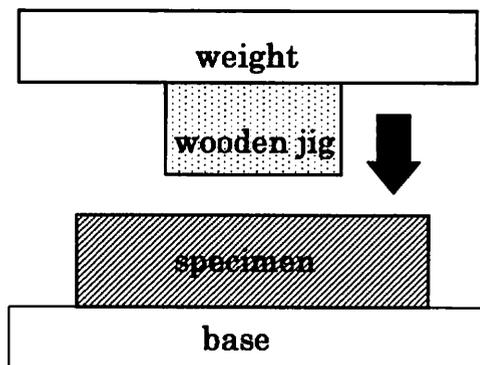


Fig. 6 Drop test method considered the influence of shearing force

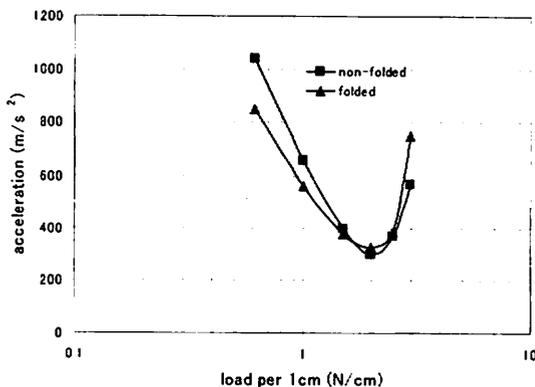


Fig. 7 Comparison for acceleration of sleeve structure model

Table. 2 parameters for destructive model of corrugated fiberboard

a part of specimen	values	
	compressive strength (CD direction)	shearing strength
folded part of board	0.3MPa	0.05MPa
edge of board	0.6MPa	0.05MPa

合は 20cm) で除した値で、これはブロック状緩衝材が一般的に用いる静的応力に相当するパラメーター⁶⁾として定義した。図より試料の折り曲げ構造の有無により発生する加速度の大きさにも差が出るのがわかる。例えば横軸の単位長さ当たり荷重が 1N/cm 付近ではおよそ 100m/s^2 の差があり、実際の緩衝設計を行う際にも折り曲げ構造について考慮しなければ適切な包装が実現できないと言える。

3.3 基礎データ用モデルのシミュレーション解析

次に前出の段ボール構造体の落下試験についてシミュレーション解析を行った。解析条件については Fig. 6 に示した試験方法で重錘の質量を 2.05kg、落下高さを 60cm とした。また、解析に用いたモデルはエンドクラッシュ試験の解析と同様に破壊モデルとした。

段ボール構造体について考えた場合、通常の段ボールシートと折り曲げ部分のシートには強度に差があるためその影響を考慮したモデル化を試みた。今回、試料端部に折り曲げ構造のあるモデルについては段ボールの折り曲げ部分の物性値を垂直、水平方向とも通常の段ボールシートの数値より強度を小さく設定して計算を行っている。また、折り曲げ無しモデルについても試料の上下両端部の物

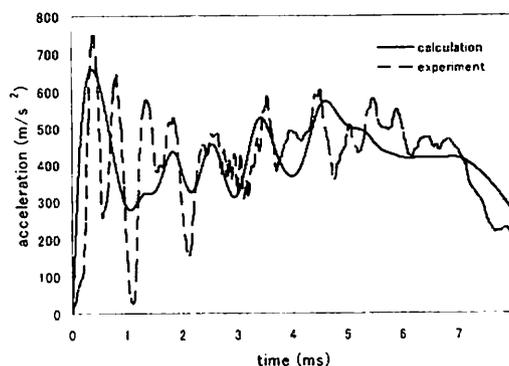


Fig.8 Comparison between the calculated and found values of drop test for the simple sleeve structure model

性値については通常の値と異なった数値を用いた。これはモデル全体に同一の数値を用いた場合、衝撃の初期段階において極めて加速度値が大きくなってしまい、実際とかなり隔たった値になってしまうため、この操作は解析精度を上げるための初期不整の意味合いを含んでいると言える。これらの部分の材料物性値について Table. 2 に示す。

ここで実験と解析の結果を比較したものを Fig. 8 及び Fig. 9 に示す。Fig. 8 は試料に折り曲げ構造がないシンプルなスリーブ状モデル、一方 Fig. 9 は折り曲げ構造があるモデルについて示している。Fig. 8 より単純なスリーブ構造体について実験と解析を比べると、衝撃の初期段階でピーク加速度に達するまでの波形の挙動、またピーク後の波形の上下動の様子などについては良く似た結果が得られ

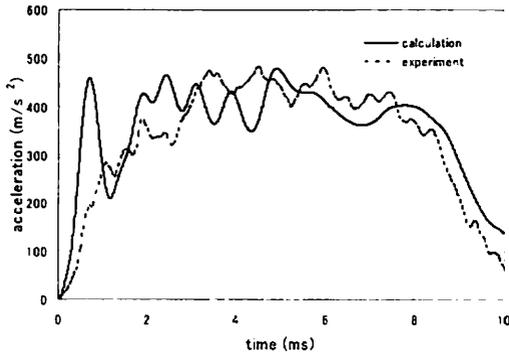


Fig. 9 Comparison between the calculated and found values of drop test for the sleeve structure model with folded board

ている。一方、Fig. 9の折り曲げ構造があるモデルについては解析結果では1ms付近で最初のピークに達した後、一度加速度が下がってから再び上昇する挙動を示している。しかし実験では解析に出ている初期段階でのピーク加速度は見られず、全体的に正弦半波に近い波形となっているものの、初期のピーク加速度の発生を除くと他の波形はかなり実験に近似しているのがわかる。シェル要素解析において段ボール折り曲げ部のモデル化は非常に困難であるが今回のように部分的に物性値を変更する等の工夫により解析の精度を高めることは可能であると考えられる。

段ボールシート全体を単一素材と見なす簡易モデル解析において、シートを重ね合わせた積層段ボールのようなブロック状構造体の解析ではソリッド要素でのモデル化も比較的行い易く、また精度の高い解析も可能になってくる。しかし、今回のスリーブ緩衝材のような薄板状構造体の解析では緩衝材の構造が複雑になるほどソリッド要素でのモデル化の手間も大きくなり実用性を損なってくる。したがってシェル要素によるモデル化でも加速度レベルの推定などの把握ができれば、新し

い包装設計手法としての実用性が得られる。

4. 段ボール包装品モデルについて

4.1 段ボール緩衝材の考案

本研究では最終的に製品と段ボールを同時に扱うトータル包装品レベルでのシミュレーション解析を目的としている。そこで、包装品のシミュレーション解析の前段階として、製品ダミーの木箱をサイドパッド方式の段ボール緩衝材で支持するシンプルな包装品モデルを考案し、実験と解析を試みる。

段ボール構造体を利用した緩衝包装設計の事例として家電製品が多いことから²⁾、今回作成した木箱は箱形の製品を想定し、長さ400mm×幅300mm×高さ100mm、質量5.3kgの仕様とした。また、この木箱の緩衝包装設計の条件を落下高さ60cm、許容加速度50Gとした。

木箱を支持するサイドパッド方式の段ボール緩衝材については段ボールの折り曲げ構造が含まれるモデルと含まれないモデルの2パターンを試作し、それぞれについて実験を行った。薄板状の構造で製品を支持して緩衝効果を得る段ボール構造体については落下時に発生する加速度を決定する要因として、製品支持部の有効長さや折り曲げ構造の有無が挙げられる。今回のサイドパッド緩衝材はFig. 5の試料を用いて得られた緩衝特性曲線を基に60cm落下時の加速度が50Gに近い値となるように木箱の支持長さを決定して作成した。Fig. 10に折り曲げ構造が無いモデル、Fig. 11に折り曲げ構造があるモデルの外観を示す。木箱を実際に支持している部分の有効長さは折り曲げ無しモデルが左右の緩衝材を合わせて380mm、折り曲げありモデルが

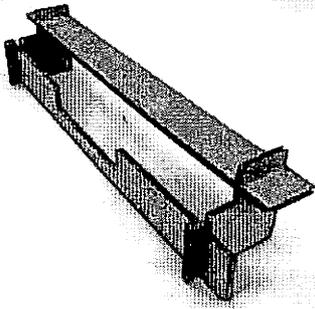


Fig.10 Corrugated fiberboard cushioning (Non-folded structure model)

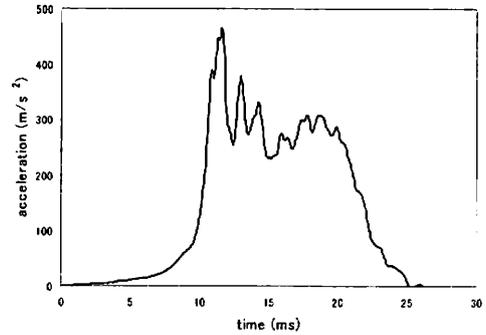


Fig.12 Acceleration wave of non-folded structure model

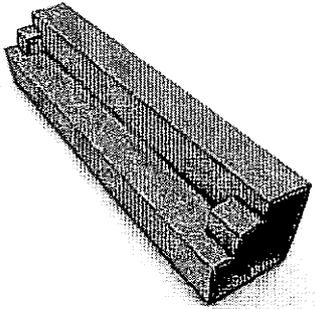


Fig.11 Corrugated fiberboard cushioning (Folded structure model)

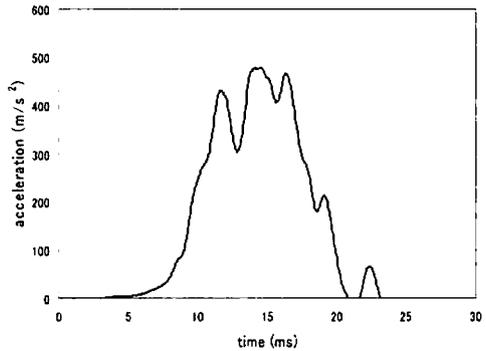


Fig.13 Acceleration wave of folded structure model

600mm で、支持部の高さは両モデルとも 35mm とした。

4.2 包装品モデルによる実験

前出のサイドパッド緩衝材と外装用段ボール箱を用いて木箱を包装し、落下試験により木箱に発生する衝撃加速度を測定した。包装の仕様は木箱の両端の上下部にそれぞれ 2 個ずつのサイドパッド緩衝材を用いて固定し、段ボール箱に入れるものとする。この時、外装の段ボール箱の底面フラップ部の緩衝効果の影響を避けるため、あらかじめ底部の段ボールについては段を潰した状態にして落下試験を行った。落下条件は落下高さ 60cm の底面落下とし、木箱天面の剛性が高い端部（長さ面の中央上部）に加速度センサーを取り付

けて測定した。なお、センサーのローパスフィルターを 500Hz に設定した。

試験結果について Fig.12 及び Fig.13 に示す。Fig.12 は折り曲げ構造が無いモデルの加速度波形であるが、衝撃の初期段階でピーク加速度 (465m/s^2) に達した後、加速度が平衡状態を維持したまま緩衝材の変形が進む様子がわかる。また、波形の形状については台形波に近いと言える。一方、Fig.13 は折り曲げ構造があるモデルの結果であるが、こちらの波形はピーク加速度 (478m/s^2) の地点をほぼ中心に左右対称の台形波に近い形状となっている。さらに緩衝材の変形量であるが、左右それぞれの緩衝材の両端部の残留高さを測定して平均値を求めたところ、折り曲げ無しモデルが 11.8mm、折り曲げありモデルが

5.6mm であった。

4.3 包装品モデル実験のシミュレーション解析

この落下試験について同一の実験条件におけるシミュレーション解析を行った。解析に用いた段ボールの材料物性値については前出の Table. 2 に示す基礎データ用モデルの時と同じ数値を用いた。また折り曲げ構造が無いモデルについては 3.3 と同様に、試料が木箱に接する部分と外装箱に接する部分の上下両端部の物性値を通常の値よりも低い数値とした。また、Fig.14 及び Fig.15 に各モデルの解析時に設定した圧縮強度値を示す。

Fig.16 は折り曲げ構造が無いモデルの解析結果と実験結果との比較であるが、衝撃初期段階での加速度の立ち上がりの様子やその後の波形の変動について近似した傾向が認められる。また、ピーク加速度についても実験値が 465m/s^2 、解析値が 487m/s^2 でおよそ 5% の小さな誤差であった。さらに緩衝材の変形

量について Fig.17 に示すが、最大値が 13.0mm となった。実験で測定した落下後の変形量は 11.8mm で、実際に段ボールが破れながら変形し反発による変位の復元がほとんど無いことを考えれば妥当な数値であると言える。Fig.18 はシミュレーション解析による緩衝材の変形と実験後の実際の緩衝材の様子を比較した例であるが、座屈変形の様子についてかなり似た結果となっているのがわかる。

次に Fig.19 に折り曲げ構造があるモデルの解析結果を示すが、Fig.13 の実験結果と比べ解析値の衝撃時の加速度波形の立ち上がりが急になっており実験値との差が認められる。ピーク加速度については実験値が 478m/s^2 、解析値が 452m/s^2 と 5% 程度の誤差で、製品

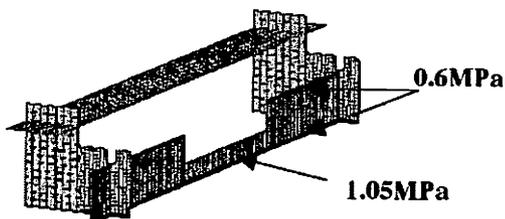


Fig.14 Compressive strength values for simulation of non-folded structure model

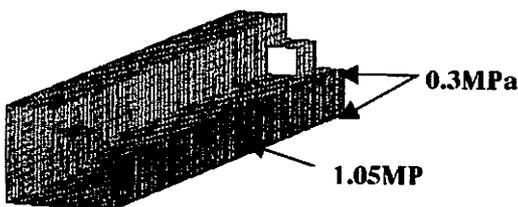


Fig.15 Compressive strength values for simulation of folded structure model

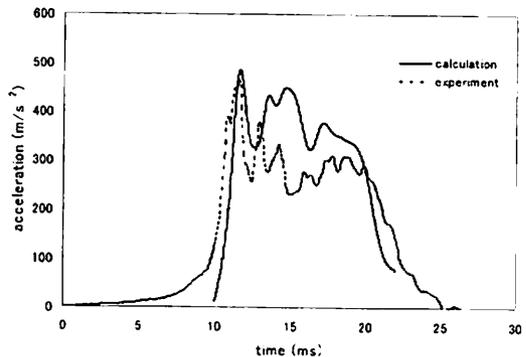


Fig.16 Comparison between the calculated and found values of drop test for non-folded structure model

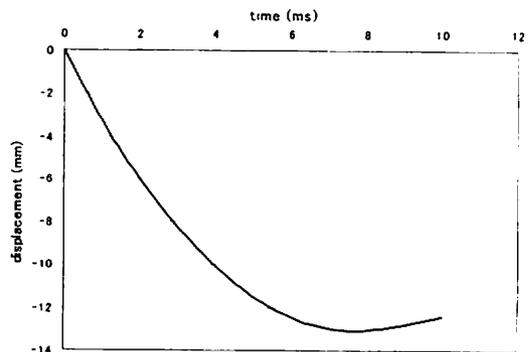


Fig.17 Calculated value of displacement for non-folded structure model

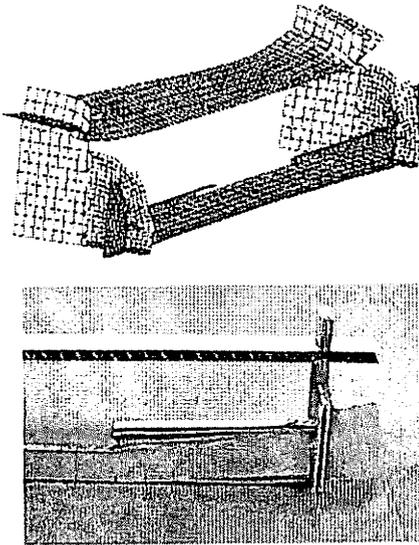


Fig. 18 Examples of simulation and specimen for non-folded structure model

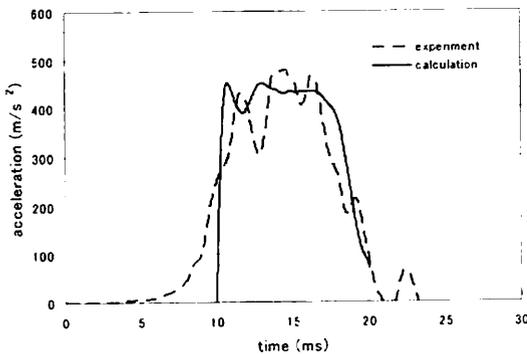


Fig. 19 Comparison between the calculated and found values of drop test for folded structure model

に加わる最大加速度の推定という点では実用的なレベルの精度が得られた。また、緩衝材の変形量は Fig.20 に示すように最大で 11.2mm となったが、実験における落下後の変形量は 5.6mm で解析値よりも小さい値となっている。この変形量の差の原因としては折り曲げ構造がある段ボールの場合、実験後の試料の状態から判断すると最大変位まで達した後に変位の復元があることが考えられる。

Fig.21 にシミュレーション解析と実験によ

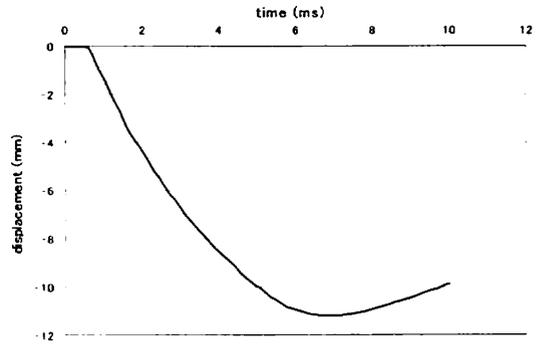


Fig. 20 Calculated value of displacement for folded structure model

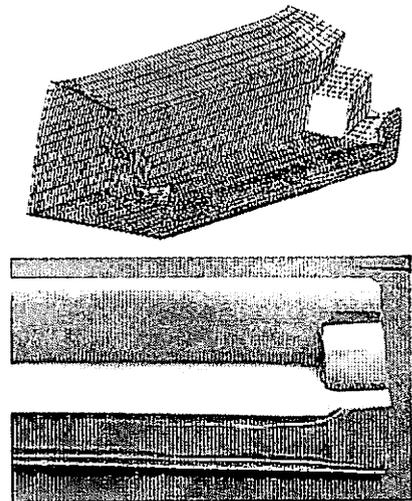


Fig. 21 Examples of simulation and specimen for folded structure model

る緩衝材の変形の様子を比較を示すが、ともに段ボールの端部から座屈しているようすがわかる。

4.4 解析の精度についての考察

次に本研究で設定した段ボールの材料物性値が他の任意の試験条件においても有効であるかについて調べるため、落下高さを変えた条件において解析を行った。前出と同じ木箱・段ボール緩衝材を用いて解析を行うこととし、落下高さ 45cm 及び 75cm の 2 パター

Table. 3 the calculated and found values of acceleration for 45 and 75cm drop test

drop height	the values of acceleration (m/s ²)			
	non-folded structure mode		folded structure mode	
	experiment	calculation	experiment	calculation
45cm	491	495	405	462
75cm	492	471	488	482

ンの底面落下の条件とした。ここでは緩衝材の性能を示す最も代表的な数値であるピーク加速度の値で比較するものとする。

Table. 3 に折り曲げが無いモデルと折り曲げがあるモデルそれぞれのピーク加速度の実験値と解析値をまとめて示す。折り曲げがあるモデルの 45cm 落下の場合に誤差が 10% 以上となったが、緩衝包装設計における最大加速度の推定値を求めるレベルで考えれば他の条件では概ね良好な結果が得られていると言える。

緩衝包装設計を行う際には、想定される落下高さから製品に衝撃が加わった場合に予測される加速度を事前に知ることができれば設計の効率化に大いに役立つ。したがって、今回の手法が実用性を有していることを裏付けることができた。

5. 結言

本研究では、段ボールの簡易モデル化によるシミュレーション解析を行った。ここでは段ボール緩衝材の基本モデルのみでなく、木箱を用いた包装品モデルについても落下衝撃の解析を行うことが可能となった。これらの解析精度を上げるためには段ボールの物性値の設定が大きな要素となることがわかったが、特に段ボールを単一素材と見なして考えたとしても、けい線折り曲げ部や上下の端面

部等に通常部分の数値とは異なった数値設定をすることで解析精度が良くなることが明らかになった。

今回の手法により段ボール包装品の落下試験についてシミュレーション解析の一般化を図ることができれば、現品サンプルの繰り返し試作による設計が常識となっている現状に対して試作回数を削減するための設計効率化の実現に寄与できるものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 中川幸臣、丹羽一邦、日本包装学会誌、14 (5)、317-327 (2005)
- 2) LS-DYNA THEORETICAL MANUAL, Livermore Software Technology Corporation、(1998)
- 3) 久田俊明、野口裕久、“非線形有限要素法の基礎と応用”、丸善、p.261-272 (1995)
- 4) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、7 (4)、175-183 (1998)
- 5) JIS Z 0240 (1997)
- 6) 星野茂雄、豊田実、“緩衝包装設計ハンドブック”、日本生産性本部、p.552-553 (1969)
- 7) 日本電機工業会包装委員会、包装技術、43 (8)、588-597 (2005)

(原稿受付2006年6月1日)

(審査受理2006年9月27日)