

ハニカム構造材料の衝撃吸収特性に関する研究*
(第1報, 準静的状態における逐次座屈現象)小笠原 永久*¹, 白鳥 正樹*¹
宮原 進*², 于 強*¹Energy Absorption by Honeycomb Structure
(1st Report, Progressive Buckling under Quasi-Static Condition)Nagahisa OGASAWARA, Masaki SHIRATORI,
Susumu MIYAHARA and Qiang YU

Honeycomb structure is used as the shock absorbent to protect precision machines during transport. The purpose of this study is to establish the relation between the energy absorption ability and the honeycomb parameters such as cell size, cell wall thickness and material properties. In this work, as the first step of study, the authors carried out experiments on the collapse of honeycomb structure under quasi static condition, and clarified the energy absorbing mechanism which is due to progressive buckling. Based on the observed buckling mode, the authors established a finite element model which can represent the debonding failure between the bonded cell walls. The analysis results calculated using this model agreed well with the experimental results for mean collapsing stress and buckling mode.

Key Words: Buckling, Impact Strength, FEM, Honeycomb Structure, Collapsing Stress, Quasi-Static Condition

1. 緒 言

ハニカム構造材料は、軽量かつ高い比剛性を持つ構造材料として、主に航空産業で使用されてきたが、近年では上空からの精密機器投下時、または重量物運搬時の理想的な衝撃吸収材料としても利用されてきている⁽¹⁾。

ハニカム材料はFig. 1に示したように、セル壁筋厚： t 、セルサイズ： s 等の様々なパラメータの組み合わせによる種類があるため、あらかじめその組み合わせとエネルギー吸収能力の関係が導かれていれば、保護すべき対象物の質量および衝撃速度に合わせた最適なハニカム材料が選択できる。

円筒鋼管または箱型鋼管の衝撃吸収特性^{(2)~(4)}については数多くの研究が行われ、既に自動車の設計などに応用されている。これらに対しハニカム材料の衝撃吸収特性については、実験的検討⁽⁵⁾の他にR.K.McFarland⁽⁶⁾またはT.Wierzbicki⁽⁷⁾による研究が行われているものの、材料定数によっては精度が保証されていない、また動的現象を考慮していない等の理

由により、現場において使用境界条件を再現する実験を繰り返し行い、安全を確認した後に使用している現状がある。

本研究では衝撃吸収材として使用する際、条件に最も適したハニカム材料を選択できるよう、各種パラメータの組み合わせとエネルギー吸収能力の関係を導き出すことを目的としている。

まず、ハニカム材料のエネルギー吸収現象の機構を解明するために、準静的な圧潰実験を行い、そこで得た知見を基に、現象を再現できる有限要素法モデルを作成する。続いて準静的圧潰の条件において、様々なパラメータの組合せを変化させた実験と有限要素解析を行い、準静的な条件での上記関係式を導く。さらに、有限要素モデルに衝撃特性を加えた後に、同様のパラメトリックな解析を行い、また衝撃実験の結果との比較を行い、衝撃荷重がかかる際の各種パラメータの組合せとエネルギー吸収能力の関係を導く。

本報では、その第一段階として、準静的な条件でハニカム材料の圧潰実験を行い、エネルギー吸収機構を解明した。さらに、実験で得た座屈モード等を基に、現象を再現しパラメトリックな解析を行うための有限要素解析モデルを作成した。

* 原稿受付 1996年6月6日。

¹ 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。² 昭和飛行機工業(株) (〒196 昭島市田中町600)。

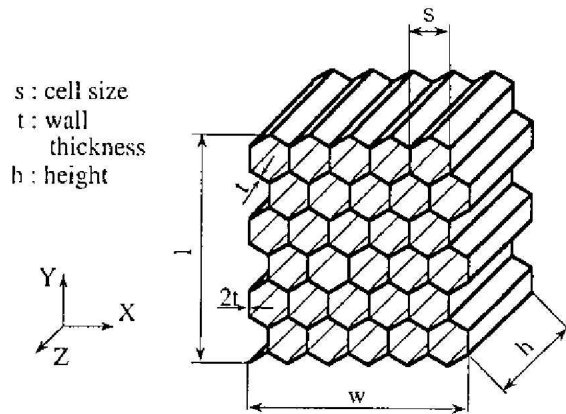


Fig. 1 Hexagonal cell structure

2. 準静的圧潰実験

ハニカム材料が理想的な衝撃吸収材料として使用される主な理由として、下記の4点があげられる。

- 1) 長いストロークでほぼ等しい圧潰荷重が得られるため安定したエネルギー吸収が行われること
- 2) 衝撃吸収後の跳ね返りがほとんど無いこと
- 3) 軽量構造であること
- 4) 衝撃吸収能力の選択に幅があること

1) および2)に関しては、ハニカム材料の逐次座屈現象に起因するものであり、本章では逐次座屈現象の機構を観察することを目的とした準静的な圧潰実験の結果について述べる。

アルミニウム (A5052-H19) 製の外寸法 $100 \times 100 \times 60$ ($w \times l \times h$ mm) セルサイズ $s : 9.5$ mm, セル壁厚 $t : 0.061$ mm の試験片に対し、万能試験機を用いて一定変位速度 0.5 mm/min で Z 方向強制変位を与え、荷重と変位の関係を生出力した。得られた荷重と試験片の受圧面積の比を圧潰応力と定義した。また、圧潰応力-変位曲線より圧潰応力値の平均をとり、平均圧潰応力としている。Fig. 2に実験概要を示す。

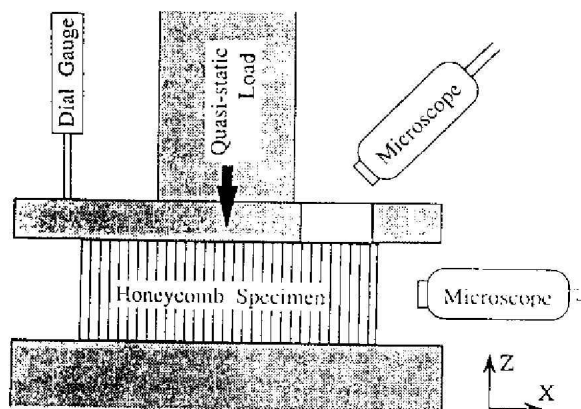


Fig. 2 Scheme of quasi-static loading condition

試験片上面の平板に透明なエポキシ板を使用し、試験片上面もしくは側面からマイクログラフにて座屈モードの観察を行った。

実験で得られた代表的な圧潰応力-変位曲線をFig. 3に、また逐次座屈後のハニカム材料の様子をFig. 4に示す。

実験では、まず試験片の上下端の一方から座屈が起き、この時最大の荷重(初期座屈荷重)を得る。そして、六角セル壁面が連続かつ一定の折れ幅で内外にアコーディオン状に折れ曲がり、見掛けの高さが $1/3$ 程度になるまで塑性座屈し続ける。この現象を逐次座屈現象と呼び、この間の圧潰応力値はほぼ一定値を示している。全ての壁面が座屈し接触し始めると、圧潰応力値は急激に増え、単純な密材の圧縮現象とほぼ同じになる。

また、逐次座屈時に一度除荷した後、再び強制変位を加えると、初期座屈応力は生じず除荷以前の曲線を描き始める。つまり、あらかじめ初期座屈済みの材料を衝撃吸収材として用いることで、大きな値を持つ初期座屈荷重による衝撃が和らげられることが確認された。

よって、今後の研究においては平均圧潰応力についてのみ考察することとする。

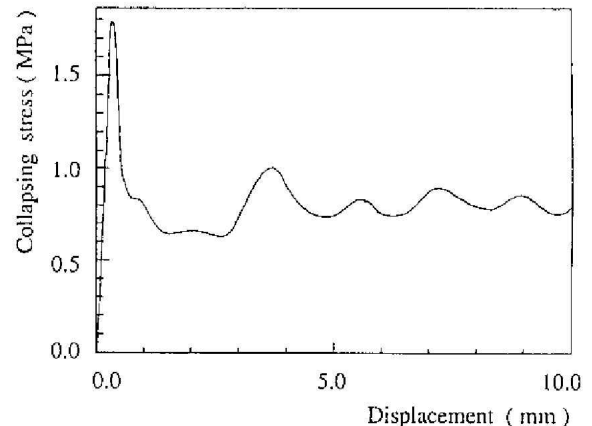


Fig. 3 Collapsing stress-displacement curve (experiment)

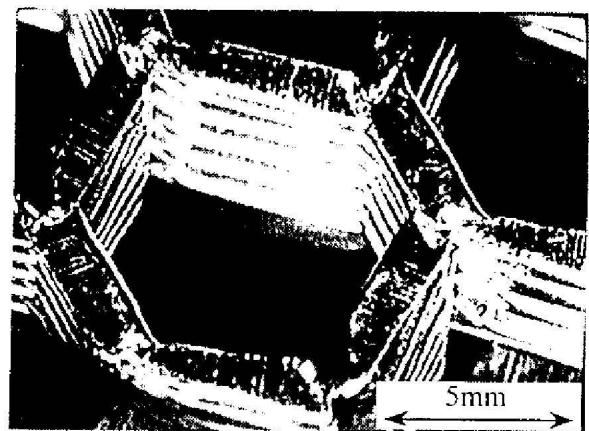


Fig. 4 View of buckled honeycomb

3. 有限要素法によるモデル解析

実験において、材料定数などが圧潰応力に及ぼす影響を調べるためには、各種パラメータの組合せを変化させた試験片を数多く用意する必要があり容易に行うことはできない。そこで、有限要素法によるシミュレート解析にて補うことを考えた。ここではまずその第一段階として、前章の実験で得られた現象を再現することを目的とした有限要素解析手法について述べる。

有限要素法解析には、陽解法有限要素法プログラムLS-DYNA3Dを用い、要素はBelytschko-Tsayの4節点シェル要素を使用している。セル壁がアコーディオン状に折れ曲がるため、要素には要素同士及び底面に定義した剛体壁との接触を要素両面に考慮している。最上端に定義した剛体壁を準静的と考えられる速度：0.5 (mm/min) にZ方向に変位させ、実験において与えた強制変位を再現している。準静的問題に対し、陽解法プログラムを用いた場合は非常に解析時間がかかる。このため、本解析では質量密度を100倍に増加させ時間増分値を大きくするマススケーリング法を利用して計算時間を短縮している。また、質量密度を変化させた解析を行い、100倍以下の質量密度増加は解析精度に影響を与えないことを確認している。側端の節点には、一部に局所座標系を用いて、対称性を考慮した拘束を与えている。解析モデルのサイズについては、高さは20mmに固定したが、その他の各サイズについては実験に準じたサイズとしている。アルミニウム材料は弾塑性材料として扱い、縦弾性係数：71 GPa、ポアソン比：0.34、初期降伏応力：190MPaである。その塑性挙動は真応力-対数ひずみ曲線を8直線近似し代入している。

また、剛体壁の強制変位量と反力を出し、剛体壁の反力と解析モデルが占める面積の比を圧潰応力値とし、圧潰応力値のZ方向変位に対する積分値を吸収エネルギー(単位面積あたり)とし、最大変位時の吸収エネルギー線の傾きを平均圧潰応力値として定義している。

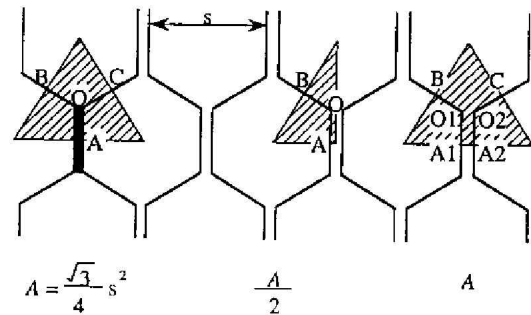
3.1節において解析モデルの形状について述べ、3.2節では初期不整の与え方について述べている。

3.1 モデル解析 複雑な形状を持つハニカム材料を対象に有限要素解析を行う際には、逐次座屈のように複雑な現象に限らず、比較的単純な構造解析などにおいても、要素分割等非常に困難な作業を必要とする。そこでハニカム材料が細かな六角セルのきわめて規則的な集合体であることに着目し、セルの一部を切り出した解析モデルを作成し解析を行った。

3.1.1 1/6モデル ハニカム形状の周期性から考えられる最小のモデルは、六角セルを6等分した1/6モデルである。1/6モデルの形状をFig. 5(a)に、要素分割

図をFig. 6に示す。Fig. 5の斜線部は、各モデルの占有面積である。

最も一般的な展張法により製造されたハニカム材料は、六角セルの中で向かい合う一对のセル壁が接着結合されている。そのため、1/6モデルではAOがBOとCOに較べて2倍の板厚となっている。



(a) 1/6 model (b) 1/12 model (c) 1/6 adhesive model

Fig. 5 Unit cell area

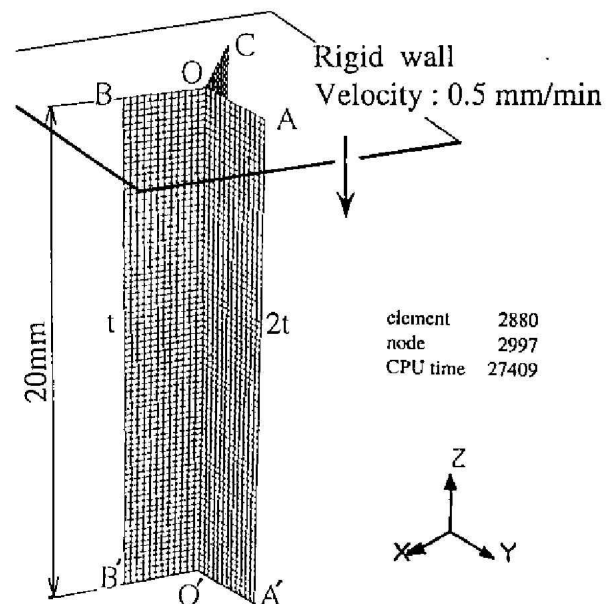


Fig. 6 FEM analysis model (1/6 model)

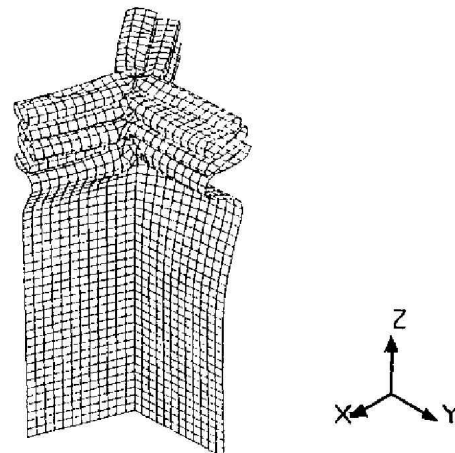


Fig. 7 Deformed shape of 1/6 model

前述の条件で解析を行った結果として、変形図(変位10mm)をFig. 7に、圧潰応力—変位曲線と吸収エネルギー—変位曲線をそれぞれFig. 12とFig. 13の細実線で示した。

変形状態を観察すると、実験で得られた座屈モードと明らかに異なる以下の3点が確認された。

- 1: 接着接合のため板厚が2倍になっているセル壁が、実験では他のセル壁と同じ折れ幅で座屈していることに対し、解析ではそれぞれの折れ幅が異なるため、接点である $\overline{OO'}$ 近傍において安定した変形が得られていない。
- 2: 実験では $\overline{OO'}$ 近傍において接着はく離が生じているため、比較的小さなせん断変形で座屈できていることに対し、はく離を考慮していない1/6モデルの解析では、 $\overline{OO'}$ 近傍において大きなせん断ひずみが生じている。
- 3: 接着されていないセル壁 (\overline{BO} と \overline{CO}) が、実験での折れ幅に対して約半分程度の折れ幅で座屈変形している。

以上の3点のため、1/6モデルでは吸収エネルギーが非常に大きくなり、実際の座屈現象を捉えることができなかったと考えられる。

3.1.2 1/12モデル 1/6モデルの結果を踏まえて、六角セルを12等分した1/12モデルを作成した。1/12モデルの形状をFig. 5(b)に、要素分割図をFig. 8に示す。このモデルは、1/6モデルの半分にあたり、接着接合を考慮しなければ、ハニカム形状の周期性から得られる最小モデルとなりうる。すなわち、接着面は比較的簡単にはく離し、1/6モデルの \overline{AO} は2枚に分かれて座屈していると仮定して得られたモデルである。

解析を行った結果として、変形図(変位10mm)をFig. 9に、圧潰応力—変位曲線と吸収エネルギー—変位曲線をそれぞれFig. 12とFig. 13の破線で示した。

変形図を観察すると、1/6モデルの変形図で見られた $\overline{OO'}$ 近傍の複雑な折れ曲がりはなく、せん断変形を小さく抑えて、実験に近い変形形状の安定した座屈モードを表すことができています。

しかし、圧潰応力—変位曲線では、1/12モデルの平均圧潰応力は実験で得た平均圧潰応力の値と比較し、30%程度低い値が得られている。これは、接着されて2倍の厚さになっている \overline{AO} について、1/12モデルでは完全にはく離し2枚が独立して座屈していると仮定したことに対し、実験でははく離せず2倍の厚さの1枚の板として折れ曲がっている部分が残っているためと考えられる。また、変形図および圧潰応力—変位曲線の波の数から、実験結果よりセル壁の折れ幅が大きく、

同じ強制変位量を与えた際の折れ数が減っていることがわかる。これは、1/6モデルが $\overline{OO'}$ 近傍の拘束が過剰であることに対し、1/12モデルでは拘束条件が足りないためであると考えられる。

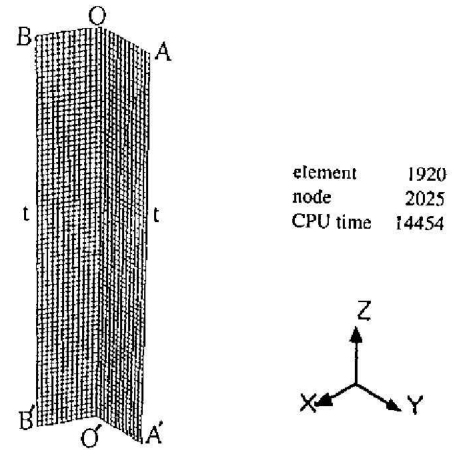


Fig. 8 FEM analysis model (1/12 model)

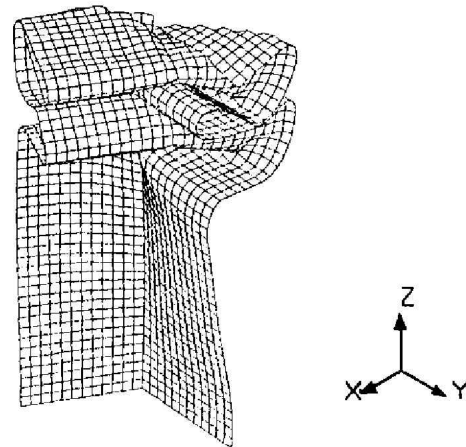


Fig. 9 Deformed shape of 1/12 model

3.1.3 1/6接着モデル 上記両モデルの中間の現象を捉えるために、1/6モデルの \overline{AO} を $\overline{AO_1}$ と $\overline{AO_2}$ の2枚に分け、1/12モデルを並べた形状をしている1/6接着モデルを作成した。1/6接着モデルの形状をFig. 5(c)に、要素分割図の拡大図をFig. 10に示す。2枚のセル壁の間は接着され1枚のセル壁として変形することを想定し、向かい合う節点間の自由度を互いに拘束している。しかし、節点近接要素の相当塑性ひずみの平均値が接着はく離ひずみと同値になった時、節点間の拘束は解かれるよう設定し、接着がはく離したことを再現した。接着はく離ひずみとは、接着はく離を引き起こす際にセル壁に生じている相当塑性ひずみのことで、JIS (K6854)「接着剤のはく離接着強さ試験法」に基づく実験と有限要素シミュレート解析から求めている。

解析を行った結果として、変形図(変位10mm)をFig. 11に、圧潰応力—変位曲線と吸収エネルギー—変

位曲線をそれぞれFig. 12とFig. 13の太実線で示した。

1/12モデルと同じように実験に近い変形形状の安定した座屈モードを表すことができ、さらに平均圧潰応力値も実験とほぼ近い値が得られている。また、セル壁の折れ幅、同じ変位量を与えたときの折れ数の点でも実験と同じ結果が得られている。

1/6接着モデルでは、接着はく離を考慮したことで、1/6モデルと1/12モデルの中間であり、実験で観察した逐次座屈現象が再現できたと考えられる。

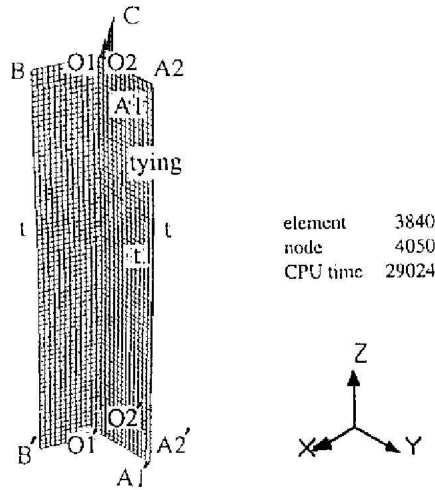


Fig. 10 FEM analysis model (1/6 adhesive model)

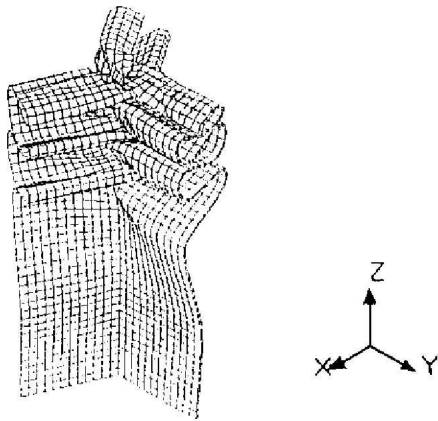


Fig. 11 Deformed shape of 1/6 adhesive model

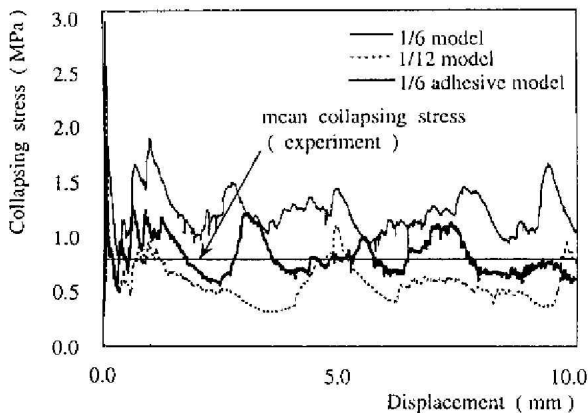


Fig. 12 Collapsing stress-displacement curves (analysis)

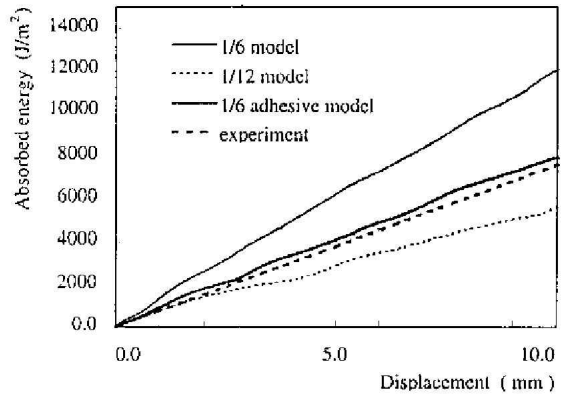


Fig. 13 Absorbed energy - displacement curves

3.2 初期不整 一般に角型鋼管などの座屈解析を行う際は、初めに対象とするモデルのモード解析を行った後、得られたモードの半波長分・板厚の1/10程度の微小変位を、座屈解析モデルに初期不整として与えている⁽⁸⁾。

しかし、上記モード解析手法では、ハニカム材料のように接着はく離を引き起こし現象の途中で形状が変化する場合、または荷重が衝撃的に加わった場合の座屈モードの変化を捉えることは難しいと考えられる。さらに、ハニカム材料の準静的圧潰実験では、セル壁の板厚が角型鋼管などと比較して非常に薄いため、それらと異なる座屈モードが生じていることが確認された。上下端面一方の六角セルの辺中央付近が、六角形の頂点Oを中心に同一回転方向に移動した後 (Fig. 14)、逐次座屈現象が起きているのである。

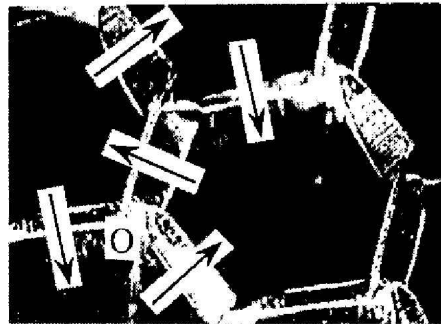


Fig. 14 Magnification of buckling

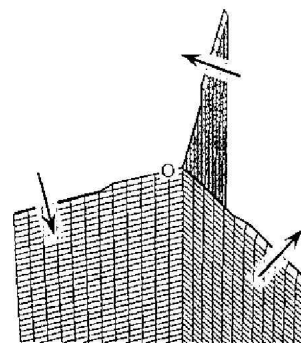


Fig. 15 Modeling of initial imperfection

そこでハニカム材料の座屈解析モデル: Fig. 15では、各セル壁上端部の外側半分にあたる節点に、六角形の頂点: Oを中心に同一回転方向に、同じ量の変位を初期不整として与えることとした。初期不整の正当性を確認するために、初期不整を与えなかったモデル、実験と異なる同一回転方向ではない変位を初期不整として与えたモデルについて解析を行い、上記の初期不整を与えたモデルの結果と比較した。また、初期不整として与える変位の適正量を確認するために、変位量を変化させたモデルの比較解析を行った。

吸収エネルギー—変位曲線をFig. 16に示す。初期不整を与えなかったモデルは、モデル中央付近で複雑な変形が始まるなど安定した結果が得られず、吸収エネルギー値も大きい値となった。実験と異なるモードを与えたモデルは、初めは上端面から同一回転方向ではなく周期性が成立しない、変形を生じるが、次第に実験と同じモードに移行していく。吸収エネルギー—変位曲線においても、モードの正常化による吸収エネルギー増分値の減少の様子が表れている。

また、初期不整値の大きさによる圧潰応力値または吸収エネルギー値の変化は微小なものであったが、板厚の1/10程度が最も吸収エネルギーが小さく1/10以下でも以上でもやや大きめの値を示すことが確認された。また、初期座屈荷重は初期不整の値により若干の違いがみられたが、吸収エネルギーに与える影響は小さいのでここでは無視した。

以上の結果より、ハニカム材料の座屈解析を効率よく行うためには、各セル壁上端部の外側半分にあたる節点に、六角形の頂点: Oを中心に同一回転方向に、板厚の1/10程度の変位を初期不整として与えるのが適当であることがわかった。

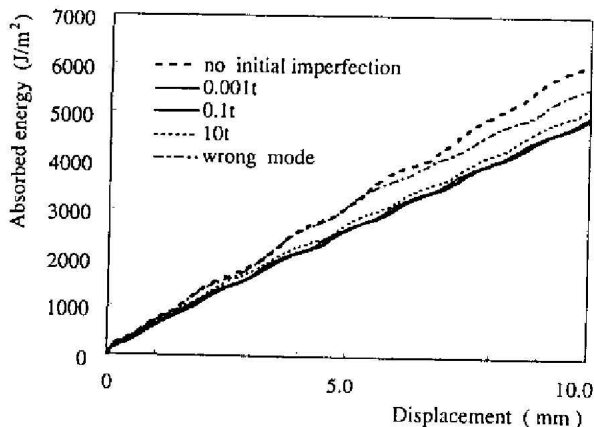


Fig. 16 Influence of initial imperfection on energy absorption

4. 結 言

ハニカム材料の準静的な逐次座屈現象について、その機構を明らかにするために、圧潰実験と有限要素解析を行った。準静的荷重による圧潰実験においては、マイクロスコブを用いた観察により、初期変形あるいは接着はく離の生じ方などについて確認できた。それらを基に有限要素モデルを作成し、ハニカム材料の逐次座屈現象を再現した。六角セルを6等分し接着はく離を再現できる1/6接着モデルでは、実験と同じ座屈モードが再現され、単位面積あたりの吸収エネルギーの値を実験で得た値と比較し良い結果を得ることができた。

今後は、圧潰実験と本報で得られた有限要素モデルを用いてパラメータの組み合わせと平均圧潰応力の関係について検討していく予定である。

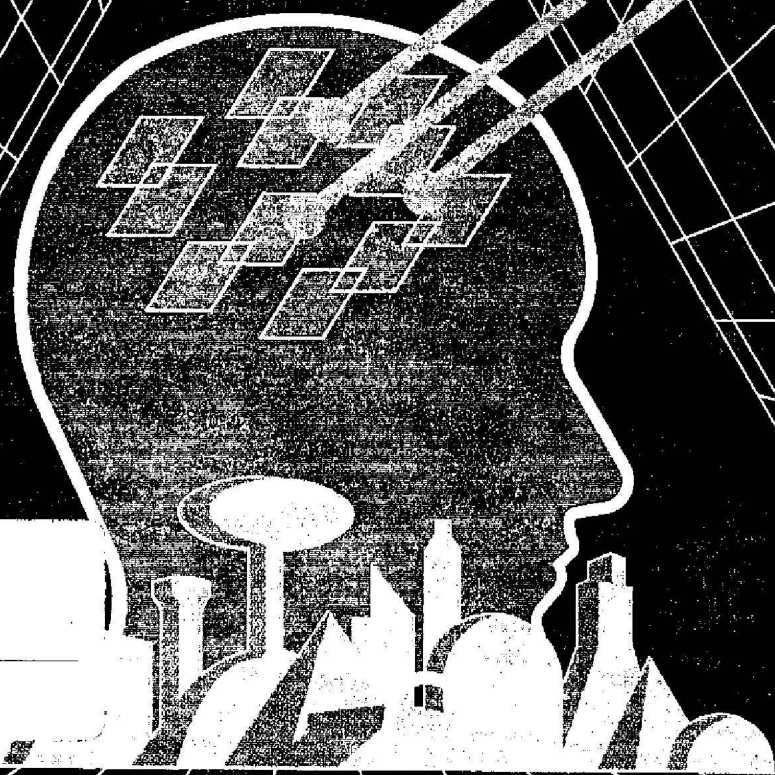
本研究においてご助言をいただいた青山学院大学理工学部降雅久教授、向小川和雄助手、横浜国立大学特別研究員後藤仁一郎氏、同工学研究科学生の宮野篤君に深く感謝の意を表します。また、財団法人トステム建材産業振興財団の助成によることを記して謝意を表します。

文 献

- (1) 佐藤孝編, ハニカム構造材料の応用技術, 先端材料技術協会監修, 1995, シーエムシー
- (2) 小久保・長島・高柳・望月, 機論61-583, A(1995), 632.
- (3) 萩原・津田・佐藤, 機論55-514, A(1989), 1407.
- (4) 北川・萩原・津田, 機論57-537, A(1991), 1135.
- (5) 康井他5名, 機論61-589, A(1995), 1979.
- (6) R. K. McFarland, Jr., AIAA Journal 1, (1963), 1380.
- (7) T. Wierzbicki, Int. J. Impact Engng. 1, (1983), 157.
- (8) 上田・萩原, 日本機械学会 第72期通常総会講演会論文集 1, (1995), 145.

日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS



工学-機械図書室

97/6/4

100784 63 608

A 編

第008号

第 **63** 卷

平成9年4月
April 1997

日本機械学会