ハニカム構造の面外圧潰特性

Out-of-plane compressive behavior for Honeycomb structure

正 牛島 邦晴 (東理大), ○ 吉田 比呂志 (東理大),
米田 裕一 (東理大), 正 陳 玳珩 (東理大)

Kuniharu USHIJIMA, Hiroshi YOSHIDA, Hirohito YONEDA, Dai-heng CHEN

Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan

Key Words: Buckling, Impact-Strength, FEM, Honeycomb Structure, Deformation Behavior

1 緒 言

本研究では、図1のように正六角形で構成されたハニカム構造が面外方向から衝撃負荷を受ける問題に対し、有限要素法による数値解析を行い、ハニカム構造や衝撃速度の違いによる圧潰特性への影響について系統的に検討する。

Fig.1 ハニカム構造体

2 研究概要

本研究では、有限要素法解析ソフト Marc (静解析) /Dytran(動解析) を用いて弾塑性解析を行う。解析に用いるハニカムモデルは以下の2つに大別する。

1. 複数のハニカムセルを有する全体モデル
2. ハニカムセルの一部分を切り出した対称モデル (図2中の点線で囲まれたBの部分)

Fig.2 解析モデル

ハニカムモデルのセルサイズ s は 9.5mm とし、セルの高さ h は 15mm、セル壁一辺の長さ l は 5.48mm、箔厚 t は 0.1mm とし、接着面箔厚は一般的な製造法を考え 2 倍の $2t$ となっている。材料はアルミニウム材で、降伏点を過ぎた後の歪と応力の関係が

$$\sigma = \sigma_Y + E_h(\epsilon - \frac{\sigma_Y}{E})$$

となる二直線硬化則で近似できるものとし、塑性硬化係数 $E_h/E = 0.01$ として解析を行った。各材料物性値を表1に示す。全体モデル・対称モデルともに、ハニカムセルの一端を固定し、他端に剛体板を衝突させ、5~10 mm まで圧潰したときのハニカムにかかる荷重と剛体の変位の関係と変形モードについて検討する。

Table.1 材料定数

ヤング率	$E=71[\text{GPa}]$
ポアソン比	$\nu=0.34$
降伏応力	$\sigma_Y=190[\text{MPa}]$
塑性硬化係数	$\frac{E_h}{E}=0.01$

3 解析結果及び検討

3.1 解析モデルの違いによる影響

静解析 (剛体板による強制変位) によって得られた応力—変位線図を図3、図4に示す。ここでは、ハニカムが受ける荷重とハニカムの受圧面積の比を応力と定義する。また、全体モデルの xz 平面の箔厚 $2t$ のセル壁の部分の断面形状 (図2中の A—A' 断面) を変形モードとして図5に示す。

3.1.1 全体モデルの検討

図3より、全体モデルにおいては箔厚 t の上端部から座屈が開始し、少し遅れて箔厚 $2t$ の上端部の座屈が開始する。その時最大の応力値 (初期ピーク応力) が生じる。その後塑性座屈を続けるが、角筒などで見られるような応力の振幅が見られず、初期ピーク応力の約半分の応力値を一定に示し続ける。その要因としては、図5の変形モードで見られるように、同じ箔厚のセル壁でもハニカム周辺部のセル壁から座屈が始まり、遅れて中央部のセル壁が座屈し始めて、しわの形成が進行していくといことがあげられる。つまり、セル壁の位置によって座屈が生じ、進行していくタイミングが異なるために、それぞれのセル壁で生じる応力振幅を互いに相殺しあい、一定の応力値を示し続けていると考えられる。

3.1.2 対称モデルの検討

図4より、対称モデルにおいては初期ピーク後の応力は角筒や円筒の面外圧潰と同様に一つのしわが形成されるたびに振幅するため、全体モデルのような一定の応力値を示していないという特徴がある。また、変形モードは全体モデルと同様にまず箔厚 t の部分の座屈が開始し、少し遅れて箔厚 $2t$ の部分の座屈が始まる。ただし、同じ箔厚 t の部分は同じタイミングで座屈していくことが見られる。

Fig.3 全体モデル

Fig.4 対称モデル

Fig.5 全体モデルの変形モード

次に、表 2 に全体モデルと対称モデルの初期ピーク応力値及び平均応力値を示す。これより初期ピーク応力、平均応力ともにほぼ一致していることがわかる。よって対称モデルは、変形挙動にはおいて全体モデルで見られるような座屈タイミングの違いや初期ピーク後の応力振幅は見られないが、初期ピーク応力値及び平均応力値においては対称モデルでの検討の余地はあると考えられる。

Table.2 初期ピーク応力及び平均応力の比較

	初期ピーク応力	平均応力
全体モデル	4.81 [Mpa]	2.41 [Mpa]
対称モデル	4.71 [Mpa]	2.34 [Mpa]

3.1.3 セル数の異なる全体モデルの検討

次に図 6 に示すようなセル数 $n = 1, 7, 19, 37$ とするセル数の異なる全体モデルについて応力-変位線図の挙動を調べる。図 6 より、 $n = 1$ のモデルにおいては角筒や円筒の面外圧潰と同様に、一つのしわが形成されるたびに応力値が大きく振幅するという挙動が見られる。しかし $n = 7, 19, 37$ とセル数が増加するにしたがって応力振幅が収まり、より安定した挙動になることが分かる。

Fig.6 ハニカムセル数に対する応力-変位線図

3.2 衝突速度による圧潰挙動への影響

動解析によって剛体板に速度を与えてハニカム材に衝突させる解析を行い、これによって得られた応力-変位線図を図 7 に示す。ここでの応力は静解析における応力の定義と同様である。図 7 より、剛体板に速度を与えてハニカムに衝突させた場合も、静解析の全体モデルの結果と同様に、初期ピーク応力が生じた後応力は初期ピーク応力の約半分の値をほぼ一定に示し続けている。また速度が小さいほど応力値はより安定している。よって初期ピーク以降に応力がほとんど振幅しないのはハニカム構造材の面外圧潰の特性であると考えられる。

Fig.7 速度変化に対する応力-変位線図

3.3 衝突速度及び相対厚さの応力値への影響

次に剛体衝突速度とハニカムの厚さ t の違いによる初期ピーク応力及び平均応力への影響を図 8 (a)、(b) に示す。ここで、相対厚さはハニカムセル一辺 l あたりに対する箔厚 t の値である。図 8 (a) より、剛体衝突速度が増加するにしたがって、初期ピーク応力もゆるやかに増加している。また平均応力は剛体衝突速度に依らず、ほぼ一定値を示していることがわかる。次に図 8 (b) より、相対厚さの増加に比例して初期ピーク応力、平均応力ともに増加しているということがわかる。

Fig.8 衝突速度とハニカムの厚さの応力値への影響

4 結 言

- 全体モデルは初期ピーク後の応力振幅が見られず安定したエネルギー吸収を示す。またハニカムの中央部と周辺部ではセル壁の座屈するタイミングが異なる。
- 対称モデルは全体モデルとは異なり初期ピーク後に応力振幅を示す。しかし初期ピーク応力値及び平均応力値はほぼ全体モデルと一致する。
- セル数が増加するほど応力の振幅が収まる。
- 剛体板に速度を与えても応力の振幅は見られず、速度が小さいほどより安定したエネルギー吸収を示す。
- 平均応力値は剛体板衝突速度のに依らずほぼ一定の値を示す。また、相対厚さに比例する。