

ハニカム構造体の衝撃変形特性と接着部を考慮した数値計算モデル Impact behavior of honeycomb structure and its numerical model allowing bonding portion

○正 山下 実(岐阜大工) 正 服部 敏雄(岐阜大工) 正 西村 尚哉(岐阜大工)
Minoru YAMASHITA, Toshio HATTORI and Naoya NISHIMURA, Gifu university, 1-1 Yanagido Gifu-shi, Gifu

Keywords: Impact behavior, Honeycomb structure, Numerical model, Bonding

1. 緒言

軽量化および高強度化のために、構造強度部材の芯材として頻用されるアルミ・ハニカム構造体は、通常、箔を部分的に接着しながら積層した後、展開して所望セル形状に加工される。また、ハニカムの芯材は衝撃時に塑性変形してエネルギーを吸収し、過大な加速度がかからないようにする目的にも利用されている。特に、筒状のセルが軸方向に圧潰すると周期的な折れ畳み座屈変形を生じ、これに関連する各種研究が行われている^{1)~6)}。衝撃吸収能の指標として、圧潰時の平均荷重を受圧面積で除して得られるクラッシュ強度を一般に用いる。

本報では、アルミ・ハニカム(Bare honeycomb)を用いたが、一般的な正六角形セルのハニカムのみならず、それ以外のセル形状についても変形特性を実験的に検討した。また、こうした接着部を含む構造体の数値計算モデルについて、適切に接着部を取り扱うことができるモデルを提案し、セル形状や箔厚が圧潰変形挙動に及ぼす影響を、同モデルを用いて数値計算で系統的に調査した。

2. 実験条件

アルミ・ハニカムの箔(A5052)材料の機械的特性を Table 1 に示す。箔厚が薄いものほど、耐力と引張強さはわずかに大きくなるがほぼ同等とみなせる。一方、伸びはわずかに減少するが、元々小さい値である。なお、二重壁の箔は熱硬化性フェノール樹脂で接着してある。

衝撃実験では、1辺が 150 mm の立方体のハニカム材に質量 65 kg の落錘を 10 m/s で衝突させ、セルの軸方向に圧縮した。また、各種セル形状について、準静的試験を行った。

Table 1 Mechanical properties of aluminum alloy (A5052) foil.

t (mm)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	U.T.S. (MPa)	e (%)
0.020	343	347	1.2
0.033	300	324	2.5
0.066	291	301	2.9

$\sigma_{0.2}$: 0.2 % proof stress, U.T.S.: Ultimate tensile strength, e: Total elongation

3. 数値計算モデル

Fig.1 に接着部を考慮した六角形セルの数値計算モデルを示す。幾何形状の対称性を利用して、同図網掛け部分に示す Y 字断面の柱体でハニカムをモデル化した。また、同図の分枝角 α を変えて種々のセル形状とした。もちろん、正六角形セルのハニカムでは 120°である。

セル・サイズ(対辺距離)が 3/8in.(9.525mm)のハニカムを基に、分枝角 α を 30°~180°の範囲で変化させた。また、箔厚については 0.02~0.10 mm とし、系統的に計算を行った。なお、モデルの高さ(紙面垂直方向)は 20mm とし、数周期の座屈が生じてクラッシュ強度の予測が可能となるまで計算した。

この種のハニカムは箔を部分的に接着して積層した後、展開して作成するため、Fig.1 に示すように二重壁部があ

る。計算モデルでは、箔材料および接着剤はいずれも弾塑性材料とし、以下の線形硬化塑性を仮定した。

$$\sigma = \sigma_0 + F\varepsilon \quad (1)$$

それぞれの機械的特性値を Table 2 に示す。実際には二重壁部では部分的に剥離が生じるが、接着剤の機械的特性値を箔に比べてかなり小さく設定することにより、二重壁近傍における変形に対する拘束が過大なることを防止できると考えた。接着剤の降伏応力は、3, 30, 60 MPa の 3 種類を仮定した。また、数値計算には動的陽解法 FEM コード DYNA3D (Public domain version)⁷⁾を用いた。箔の有限要素の寸法は、縦×横が 0.25×約 0.30 mm である。柱体モデルの一端を固定しておき、他端を 10 m/s の一定速度で圧縮するものとした。

4. 結果および考察

Fig.2(a)に示す正六角形セルの衝撃実験における折れ畳み座屈周期は、同図(b)の分枝角 180°のセルを準静的圧縮にしたものより短いように見える。これは、定常的座屈変形を示す圧縮ストロークの範囲内では、落錘の運動エネル

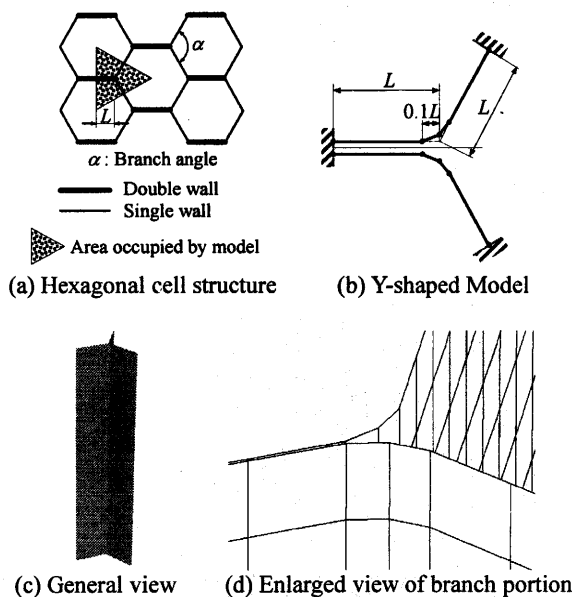


Fig.1 Numerical model of honeycomb allowing bonding portion. L: 2.75 mm.

Table 2 Mechanical properties assumed in computation for foil and adhesive. σ_0 and F: Ref. Eq.(1).

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	σ_0 (MPa)	F (MPa)	Density (kg/m ³)
Foil	72	0.34	300	50	2700
Adhesive	5	0.3	3,30,60	0	2000

ギーを吸収しきれずに圧縮工程の後半に過大な荷重が生じたことによるものである。Fig.2(a)の衝撃試験で得られた圧潰応力(ハニカム構造体の受圧面積あたりの圧縮応力)をFig.3に示す。初期ピークを示した後、圧潰応力は時間(ストローク)とともにやや上昇している。これは、内包される空気が圧縮されるためである。圧縮初期にはハニカム内部の空気は外部に漏れないと仮定し、断熱圧縮による温度上昇による影響も小とすれば、測定値 $\sigma_{measured}$ とハニカムの変形自体の圧縮応力 σ_c は、次式で関連付けられる。

$$\sigma_{measured} = \sigma_c + P_0 \left(\frac{H_0}{H_0 - S} - 1 \right) \quad (2)$$

S : Compressive stroke, P_0 : Atmosphere pressure: 0.1 MPa, H_0 : Initial height of honeycomb core.

この式で得た近似曲線から外挿してクラッシュ強度は 0.88 MPa と求まる。一方、準静的圧縮実験では 0.79 MPa であり、材料自体のひずみ速度感受性は小であった。一方、数値計算において、接着剤の降伏応力を 30, 60 MPa と仮定した場合は、共にクラッシュ強度は 0.84 MPa, また、3 MPa と仮定した時は 0.80 MPa であった。接着剤の降伏応力が小さくなるとクラッシュ強度も低下する傾向があるものの、ほぼ同様な値である。接着剤厚さが薄い時、その影響は小であり、Fig.4 に示す変形状にも明らかな差異は認められない。また、Fig.5 に示す数値計算で得られた変形状は、実験結果をほぼシミュレートしており、ここで用いた数値計算モデルは妥当であると判断する。以降の計算においては、接着剤の降伏応力は 30 MPa とした。

この数値モデルを用いて、各種計算条件下で得られたクラッシュ強度および準静的試験で得られたものを Fig.6 に示す。計算では、大きいものから順に分枝角 30°, 60° のハニカムで、120° と 180° ではほぼ同等である。このことは、準静的実験の結果とほぼ一致した。クラッシュ強度は箔厚の約 5/3 乗に比例して増加しており、その傾向に限れば正六角形セルに対する Wierzbicki による理論解析結果¹⁾と良

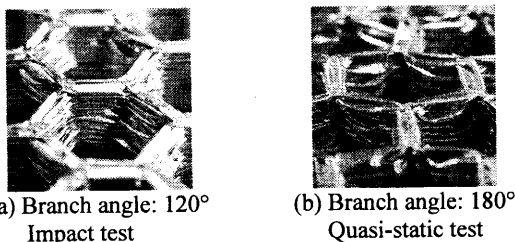


Fig.2 Examples of compressed honeycomb in experiment. Foil thickness: 0.066 mm.

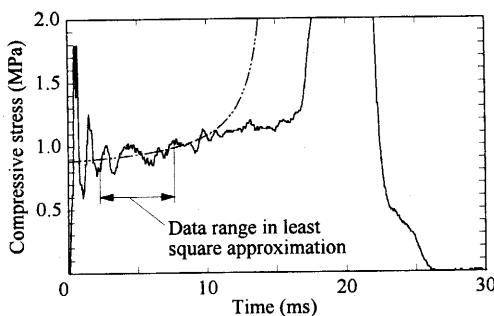


Fig.3 Compressive stress curve in impact test. Branch angle: 120°, Foil thickness: 0.066 mm.

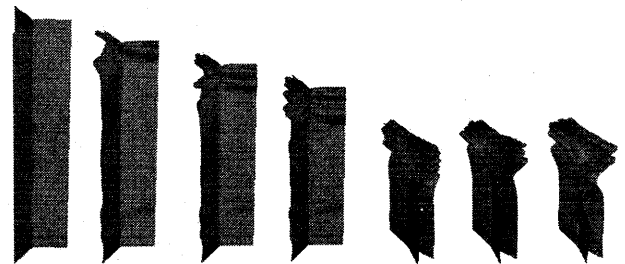
一致を見た。

また、クラッシュ強度が最も大きい分枝角 30° のハニカムでは、その値は 120° や 180° のものの 1.5 倍になっており、強度だけに注目すれば、展伸量の調整がハニカムの強度を変化させる簡便な方法として活用できる。



$\sigma_{0(adhesive)} = 3 \text{ MPa}$ 30 MPa 60 MPa

Fig.4 Collapsed patterns with various bond strengths of double wall portion.



(a) Branch angle: 120° t: 0.02mm 0.06 0.10
(b) Branch angle: 30° S: 10 mm

Fig.5 Examples of progressive collapsed patterns in numerical simulation. S : Compressive stroke, t : Foil thickness.

$\sigma_{0(adhesive)} = 3 \text{ MPa}$

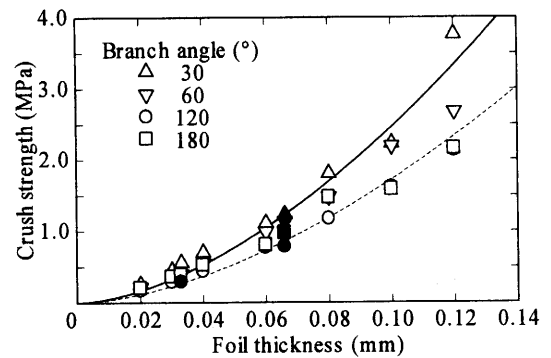


Fig.6 Crush strength for various foil thicknesses, where crush strength = mean crushing force + whole cross-sectional area of honeycomb core. Open marks: Computation, Solid marks: Quasi-static experiment, Solid curve: Analytical solution for regular hexagonal cell due to Wierzbicki¹⁾, Dotted curve: 0.7 times of values of solid curve to fit data.

参考文献

- 1) Wierzbicki T., Int. J. Impact Eng., Vol.1, 1983, 157-174.
- 2) Wu E., et al, Int. J. Impact Eng., Vol.19, 1997, 439-456.
- 3) Baker W.E., et al, Int. J. Impact Eng., Vol.21, 1998, 149-163.
- 4) Zhao H., et al, Int. J. Impact Eng., Vol.21, 1998, 827-836.
- 5) Yasui Y., Int. J. Impact Eng. Vol.24, 2000, 659-671.
- 6) Yamashita M., Abstracts 5th Int. Sym. Impact Eng., 2004.
- 7) Hallquist J.O., DYNA3D user's manual rev.5, 1989.