

ハニカム構造の面内衝撃挙動に及ぼすライン充填セルの影響

Effect of linearly-arranged inclusions on in-plane impact behavior of honeycomb structures

○中本 浩章・東工大 Hiroaki NAKAMOTO Tokyo institute of Technology
足立 忠晴・東工大 Tadaharu ADACHI Tokyo institute of Technology
荒木 稚子・埼玉大 Wakako ARAKI Saitama university

Key Words: Honeycomb structure, Finite element method, In-plane impact behavior, Inclusions

セルがライン状に充填されたハニカム構造体の面内圧縮挙動を有限要素解析により明らかにした。充填されたセルはライン状に配置されており、ハニカム構造体はライン状に配置された充填セルによって複数のセル領域で構成される。ハニカム構造体が圧縮されるとそれぞれのセル領域は独立に変形し、その結果、面内圧縮挙動に充填セルの影響が生じた。ライン状の充填セルを持つハニカムモデルの衝撃エネルギー吸収量は、充填されていない場合よりも増加することが明らかとなった。

1. 緒言

ハニカム構造体は軽量性や高い衝撃吸収性などの力学的優位性をもっており、その挙動に関する多くの研究が行われている。ハニカム構造体を衝撃吸収材として用いるためには衝撃エネルギーの吸収メカニズム、ハニカム構造体の変形プロセスを明らかにしなければならない。これまでになされた研究¹⁾⁻⁸⁾により、ハニカム構造体の面内圧縮特性はハニカムを構成するセルの欠損や、セルの内部の充填などの内部構造の不規則性によって影響を受けることが報告されている⁹⁾⁻¹³⁾。そこで、意図的にハニカム構造体に内部構造の不規則性を与えることにより、ハニカム構造体の機械的特性を向上させることが期待される。著者らはランダムに充填されたセルがハニカム構造体の面内圧縮挙動；平均圧潰応力、最大変形量、衝撃エネルギー吸収量に与える影響を明らかにした¹⁴⁾。本研究ではハニカム構造体の面内圧縮挙動を充填セルにより設計することを目的とし、直線状に配置された充填セル（ライン充填セル）が面内圧縮挙動に与える影響を有限要素解析により明らかにする。

2. 解析

2-1 解析モデル

解析モデルは Fig. 1 (a) に示すように内部セルが直線状に充填されたハニカムである。ハニカム構造体の幅と長さはそれぞれ W および L である。Fig. 1 (b) はハニカムモデルを構成する単位セルである。単位セルの形状は正六角形であり、セル壁の長さは l である。また、実際のハニカムと同様に Y 方向セル壁の厚さはセル壁の厚さ h の 2 倍とした。充填セルは Y 軸に対して平行をなすように配置した（ライン充填セル）。なお、解析では充填セルを剛体として仮定した。解析に使用したモデルの諸元を Table 1 に示す。ライン充填セルがハニカム構造体に与える影響を調べるために、ライン充填セルの本数、配置間隔の異なるモデルについて解析を行った。

2-2 解析条件

Fig. 1 (a) のように、ハニカム構造体の面内圧縮挙動を調べるために、解析モデルの右端を固定し、モデルの左側から質量 5.0 kg の剛体を速度 5.0 m/s で衝突させた。計算は平面ひずみ問題として有限要素法(FEM)を用いて行った。剛体とハニカム構造体との摩擦係数は 0.5 とした。各セル壁は、それぞれ 3 つの Euler はり要素に分割し、剛体とハニカム構造体の衝突、およびセル壁同士の接触に対してペナルティ法を用いて、陽的時間積分法により計算した。解析には汎用 FEM ソフトである RADIOSS, ver 4.4q を用いた。

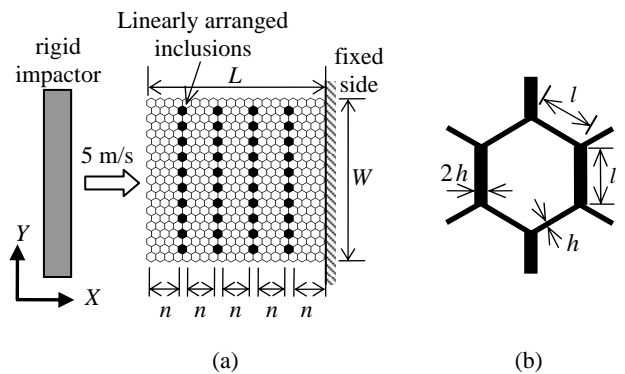


Fig. 1 Analytical model: (a) honeycomb model with linearly-arranged inclusions and (b) unit cell.

Table 1. Cell-wall properties and geometry of honeycomb model

Cell-wall	Young's modulus (GPa)	70
	Poisson's ratio	0.33
	Density (kg/m ³)	2700
	Yield stress (MPa)	34
Unit cell	Side length, l (mm)	5
	Wall thickness, h (mm)	0.10
Honeycomb	Number of cells	20×21
	Length, L (mm)	173.2
	Width, W (mm)	160.0

3. 解析結果

3-1 変形プロセス

Fig. 2 に充填セルを含まないハニカムモデルの変形過程を示す。ハニカムモデルが圧縮されると、衝突側の角から斜め方向に並んだセル列の崩壊、すなわちシエアバンドが生じる (Fig. 2 (b))。シエアバンドは徐々に生じ (Fig. 2 (c))、その後ハニカム構造体は完全に崩壊し、Fig. 2 (d) のように圧縮前の長さの 20% まで緻密化する。

Fig. 3 に 2 本のライン充填セルが等間隔に配置されたハニカムモデルの変形過程を示す。ライン充填されたハニカム構造体が圧縮されると、衝突側と充填セルにはさまれたセル領域から順に変形し (Fig. 3 (b)(c))、最終的には固定側のセル領域が変形する (Fig. 3 (d))。ライン充填セルによりシエアバンドの伝播が阻害されるため、各セル領域は独立に逐次変形することがわかった。

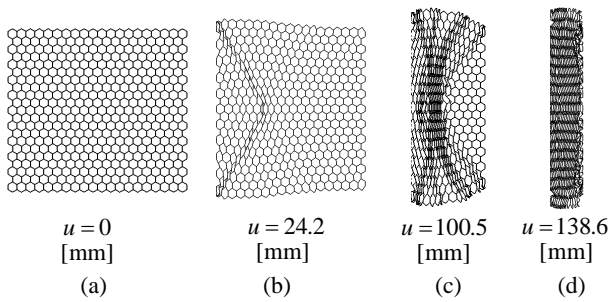


Fig. 2 Deformation process in honeycomb model without inclusions.

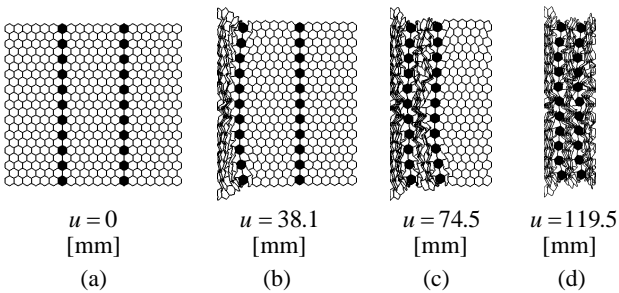


Fig. 3 Deformation process in honeycomb model with 2 inclusion lines at equal intervals.

3-2 応力 - 変位曲線

Fig. 4 は充填されていないハニカム構造体、およびライン充填セルが等間隔に配置されたハニカム構造体（ライン充填セル 2 本および 6 本）の圧縮応力 - 変位曲線である。圧縮応力は衝突により剛体に生じた反力をハニカムモデルの見かけの断面積 W で除したものとした。充填されていないハニカム構造体の圧縮応力は最初の弾性領域において大きな値を示した後、ほぼ一定値（プラトー領域）を示す。プラトー領域の応力状態はシェアバンドが繰り返して生じることに起因する。プラトー領域の後、ハニカム構造体の緻密化により、圧縮応力は急激に増加する。

2 本のライン充填セルを有するモデルの応力 - 変位曲線では、ハニカム構造体が完全に緻密化するまでに 2 つの応力ピークが見られた。6 本のライン充填セルをもつモデルでは 6 つのピークが見られ、これはライン充填セルによって分割されたそれぞれのセル領域の緻密化によるものである。ライン充填されたハニカム構造体の圧縮応力は充填されていないハニカム構造体よりも応力変動が大きく、高い応力を示すことが明らかとなった。

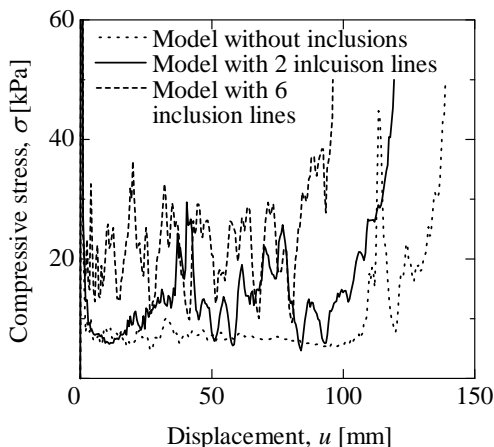


Fig. 4 Stress-strain curve of honeycomb models.

4 考察

Fig. 5 はセル領域の幅（ライン充填セルの間に存在するセル数）と、境界条件の異なる各セル領域の変形中の平均応力の関係を示す。セル領域の境界条件は次のような記号で表された。IL；衝撃端 - ライン充填セルの間のセル領域、LL；ライン充填セル - ライン充填セルの間の領域、LF；ライン充填セル - 固定端の間の領域。

セル領域 LF の平均応力が最も高く、IL の平均応力が最も低いことが分かった。また、境界条件によらず、セル領域の平均応力は幅の増加とともに減少し、充填セルが存在しないハニカムモデルの平均応力の値に漸近することが分かった。

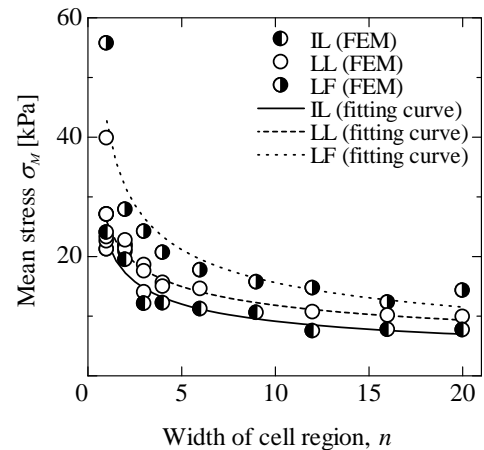


Fig. 5 Relationship between mean stress and width of cell region.

文献

- Gibson LJ, Ashby MF, *Cellular Solids Structure and Properties*, 2nd edition, Cambridge (1997).
- Masters IG, Evans KE, *Comp. Struct.* **35** (1996) 403.
- Zhu HX, Mills NJ, *Int. J. Solid Struct.* **37** (2000) 1931.
- Karagiozova D, Yu TX, *Int. J. Mech. Sci.* **46** (2004) 1489.
- Ohno N, Okumura D, Noguchi H, *J. Mech. Phys. Solids* **50** (2002) 1125.
- Okumura D, Ohno N, Noguchi H, *J. Mech. Phys. Solids* **52** (2004) 641.
- Papka SD, Kyriakides S, *Int. J. Mech. Phys. Solids* **42** (1994) 1499.
- Papka SD, Kyriakides S, *Acta Mater* **46** (1998) 2765.
- Silva MJ, Hayes WC, Gibson LJ, *Int. J. Mech. Sci.* **37** (1995) 1161.
- Silva MJ, Gibson LJ, *Int. J. Mech. Sci.* **39** (1997) 549.
- Zheng Z, Yu J, Li J, *Int. J. Impact Eng.* **32** (2005) 650.
- Li K, Gao XL, Wang J, *Int. J. Solids Struct.* **44** (2007) 5003.
- Prakash O et al., *Philos. Mag. A* **73** (1996) 739.
- Nakamoto H, Adachi T, Araki W, *Int J Impact Eng* (accepted).