

八ニカムパネルの剛性と挙動

環境構造工学講座 修工 11-165 田部井 香月
指導教員 後藤 文彦 加賀谷 誠

1. はじめに

八ニカム構造とは正六角形または正六角柱を隙間なく並べた構造である。八ニカムとは英語で「蜂の巣」という意味であり、多くの蜂の巣がこのような形をしていることから名付けられた。この構造は少ない材料で高強度が得られるほか、衝撃吸収、散光、装飾などといった様々な特徴がある。八ニカム構造の建築・建設材料として利用されている代表的な例は、図-1 のような八ニカム構造を板でサンドした八ニカムパネルである。この構造は非常に強固であり、同一

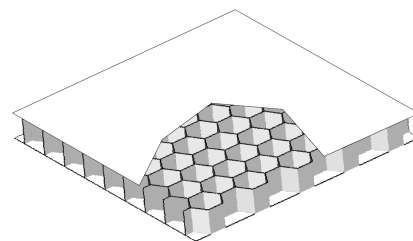


図-1 八ニカムパネル

剛性を得るための重量比は、アルミ製だと、鉄板の十数分の一、アルミ板の数分の一と軽量であり経済的であるため、航空機の内装・外装、人工衛星、建築材料などといった、様々な分野で利用されている。本研究では、こうした八ニカムパネルを土木・建設構造で多用される曲げ材料として見たときに、橋桁などの曲げ部材として一般的に用いられる格子パネルと比べて、曲げ剛性や局部座屈の観点から優れているかどうかを有限要素解析によって確かめ、八ニカムパネル構造の曲げ部材としての適用性について考察する。

2. 解析手法

本研究で用いるモデルは、実際の天井パネルなどで使用されている程度の表-1 に示す諸元のアルミ製八ニカム板で、これと比較するための格子パネルは、表-1 に示す同じ材料諸元で、後述するように材料重量が八ニカム板と同じになるように設定する。解析モデルはオープンソース CAE ソフトウェアの SALOME-MECA と、同じくオープンソース CAE ソフトウェアの FreeCAD を用いて作成する。

モデルは実際の天井パネルほどの大きさの板状のものを想定しているが、有限要素法は角などに応力集中が起こりやすい。図-2 のように、単純支持で解析するよりも、片持ち梁で解析を行った方が応力集中を抑えられるため、半解析を行う。

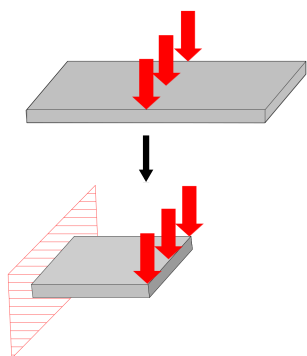


図-2 モデル

表-1 材料諸元

板厚 t	1mm
桁高 h	0.5cm, 1cm, 0.3cm
ヤング率 E	70 GPa
ポアソン比	0.3

有限要素解析のためのメッシュを作成するために、Gmsh というオープンソースのソフトウェアを利用し、高さ方向分割数が最低でも 4 分割になるようにメッシュを切る。解析には、GPL ライセンスの有限要素解析ツール CaliculiX を用い、6 節点三角形シェル要素で計算する。

(1) ハニカムパネル

図-3 をハニカムセルと呼ぶことにする。また、図-3 に示すように正六角形の上底から下底の長さをセルサイズとする。解析モデルはセルサイズ $2\sqrt{3}\text{cm}$ とし、図-4 のような向きにハニカムセルを並べてゆき、 x 方向寸法 $L=2\sqrt{3}\times$ ハニカムセル 5 個、 y 方向寸法 $W=2\sqrt{3}\times$ ハニカムセル 9 個とし、上下を同じ材料、同じ厚さの板でサンドしたものとす。このパネルの高さを、 $0.5\text{cm}, 1\text{cm}, 3\text{cm}$ の 3 種類に分けてどのような挙動を示すのか解析を行っていった。また、セルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ で、 x 方向にセル 4 個、 y 方向にセル 7 個の粗いハニカムモデルも作成し解析する。

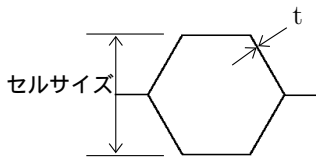


図-3 ハニカムセル

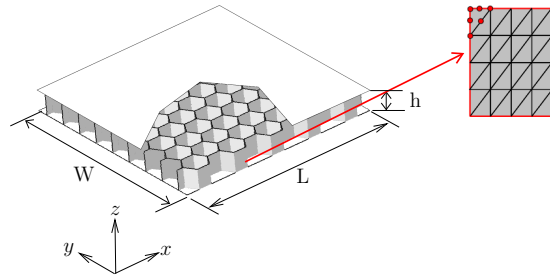


図-4 ハニカムパネル

(2) 格子パネル

ハニカムパネルと同じサイズにしたいが、六角形の制約を受けるため、 y 方向の寸法 W は、セルサイズ $2\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルに対応する格子パネルは $W=2\sqrt{3}\times 9=31.1769\text{cm}$ 、セルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルに対応する正方形格子は $W=2.5\sqrt{3}\times 7=30.3108\text{cm}$ とする。

正方形の格子から、壁の量は同じまま一方の壁の数を増やしていき、最終的に一方のみに壁のある図-5 のように I 型断面を繋げたような断面のパネルまで作成する。

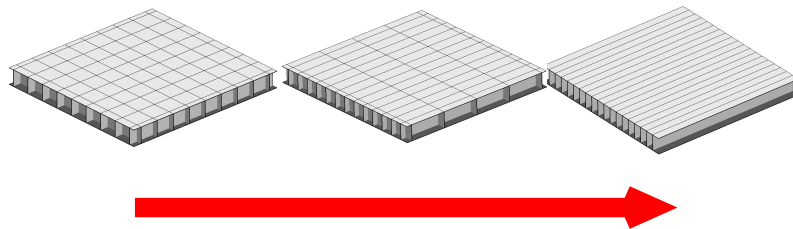


図-5 格子パネル

ハニカムパネルと格子パネルの壁の総長も等しくしたいが、無理なので、次のように処理する。

例えばセルサイズ $2\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルの壁の総長は 550cm になる。同じサイズの格子パネルの壁の量は、 x 方向に平行な壁の数を m 、 y 方向に平行な壁の数を n とすると、 $30\times m+31.1769\times n=550$ となる。 x 方向に平行な壁のみの場合、 $n=0$ となり、壁の数 $n=\frac{550}{30}=18.333\dots$ となるので、壁の数 18 枚のモデルと、19 枚のモデルを作成し、どちらも解析してゆく。以上の要領で他の組み合わせの格子パネルも作成した。 n と m の組み合わせは、ハニカムパネルのセルサイズ $2\sqrt{3}$ に対応するものは表-2 に、 $2.5\sqrt{3}$ に対応するものは表-3 に示す。

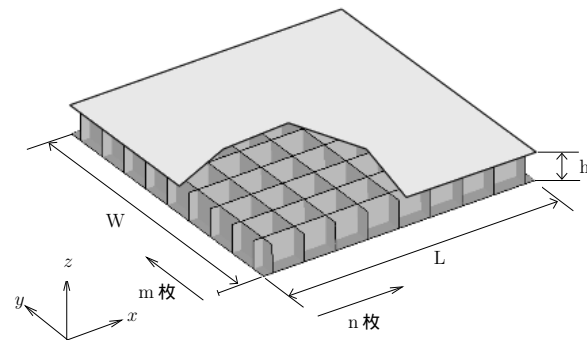


図-6 格子パネル

表-2 格子パネルの壁の数

m	9	11	12	13	14	15	16	18	19
n	9	7	7	5	5	3	3	0	0

表-3 格子パネルの壁の数

m	7	9	10	11	12	14	15
n	7	5	5	3	3	0	0

(3) 境界条件

拘束条件は、パネルの上下板の固定端側全接点の x, y, z 方向変位を拘束し、載荷条件は、パネルの上下板の載荷端側全接点に z 方向から等分布に荷重を加える。

(4) 数値計算

比較手段として曲げ剛性と座屈荷重を求める。曲げ剛性 (EI) は、たわみの式 ($v = \frac{P\ell^3}{3EI}$) に分布荷重の総和と有限要素法により求めた自由端全載荷節点の載荷方向変位の平均を代入して求める。曲げ剛性が低い場合は変形しやすく、高い場合は変形しにくい。座屈荷重は薄い部材が圧縮力などの強い力を受けると、面外へ変形して破壊に至る現象で、細長比が大きい程座屈を起こしやすい。また、座屈荷重が大きければ座屈しにくいということになる。

格子パネルは、図-5 のように正方形の格子から一方向に壁を増やしていくと、図-7 の右上のモデルのような方向に荷重をかけた場合は剛性は上がっていくが、それと直交方向からの力には弱くなる。ハニカムパネルにも向きによる剛性の差があるので、このグラフ上で比較していく。

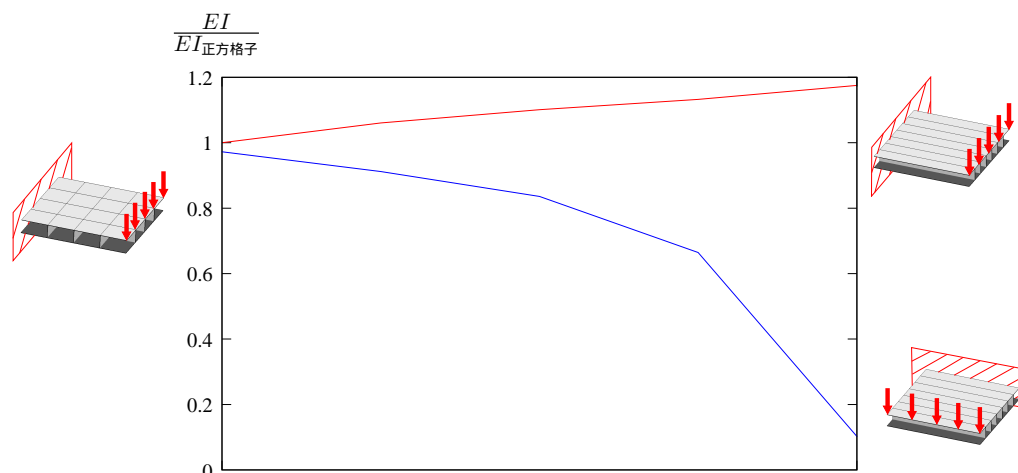


図-7 格子の曲げ剛性

3. 解析結果

(1) 曲げ剛性

高さ 1cm のハニカムパネルと格子パネルの曲げ剛性の関係を図-8 に示す。 x 軸は原点が正方格子で、右に行くほど格子パネルの壁が一方向に増えていく。 y 軸は有限要素法より求めたたわみから、曲げ剛性を計算し得られた各モデルの曲げ剛性を、正方形格子パネルの曲げ剛性で無次元化したものである。格子パネルは、壁の数を減らしたものと増やしたものを誤差棒で示したが値に大きな差はなかった。このグラフからハニカムパネルの曲げ剛性が、正方格子パネルよりやや低くなっていることが分かる。

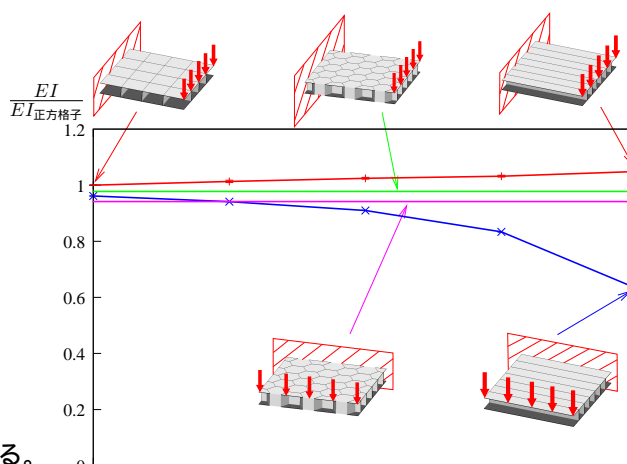


図-8 曲げ剛性

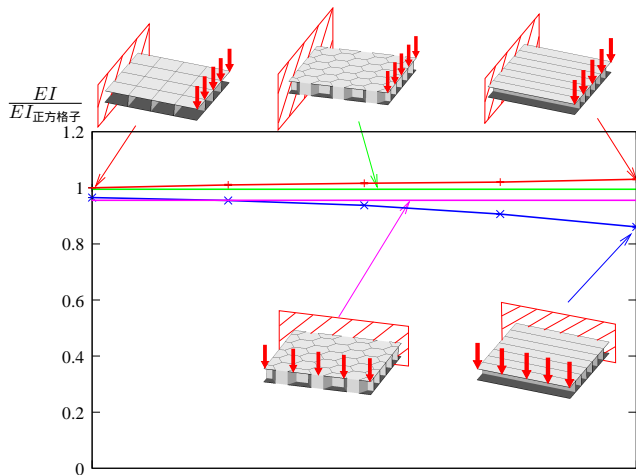


図-9 高さ 0.5cm 曲げ剛性

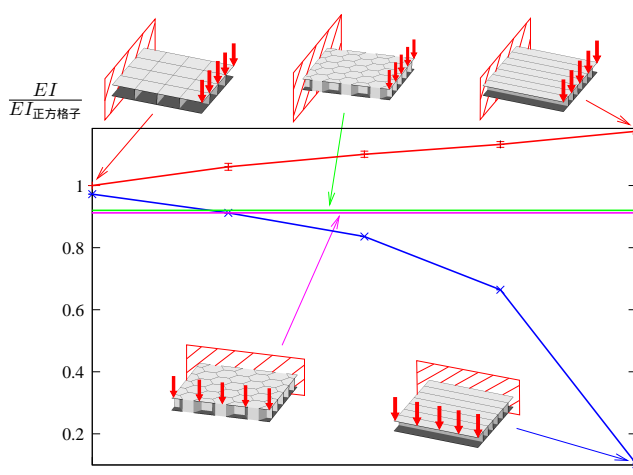


図-10 高さ 3cm 曲げ剛性

図-9 に高さ 0.5cm、図-10 に高さ 3cm のハニカムパネルと格子パネルの曲げ剛性の関係を示す。

格子パネルは高さを高くしていくと壁を一方向のみにしていった際の、強い方向に荷重をかけた場合と弱い方向に荷重をかけた場合の曲げ剛性の開きが大きくなり、ハニカムパネルは高さが高くなるほど荷重をかける方向による曲げ剛性の差が小さくなり、正方格子パネルよりも曲げ剛性が低くなる。また高さ 0.5cm のハニカムパネルは正方格子パネルと同程度の曲げ剛性を示している。図-11 にハニカムのセルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルと格子パネルの曲げ剛性の関係を示す。格子パネルはセルの粗いモデルの方が正方格子の荷重をかける方向による曲げ剛性の差が小さくなっていることがわかる。ハニカムパネルはセルの粗いモデルの方が荷重をかける方向による曲げ剛性の差が大きくなっていることがわかる。また、このハニカムパネルは正方格子パネルと同程度の曲げ剛性を示している。

(2) 座屈荷重

セルサイズ $2\sqrt{3}\text{cm}$ 、高さ 1cm のハニカムパネルと格子パネルの座屈荷重の関係を図-12 に、図-13 に高さ 0.5cm、図-14 に高さ 3cm のハニカムパネルと格子パネルの座屈荷重の関係を示す。 x 軸は原点が正方形格子で、右に行くほど格子パネルの壁が一方向に増えていく。 y 軸は有限要素法より得られた座屈荷重を、正方形格子パネルの座屈荷重で無次

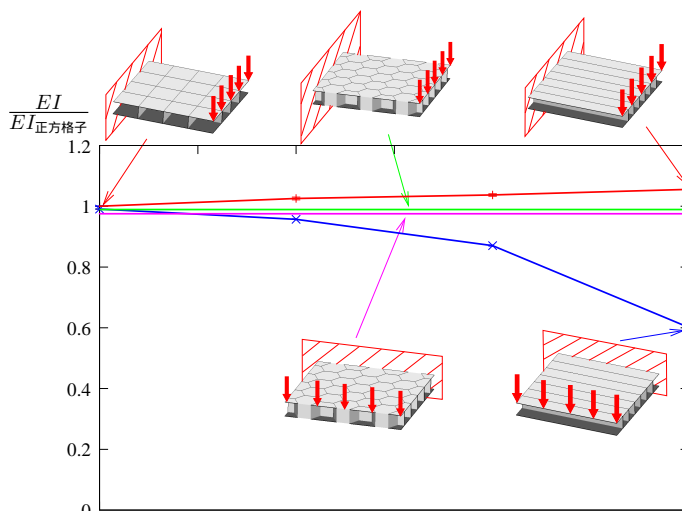


図-11 セルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ 曲げ剛性

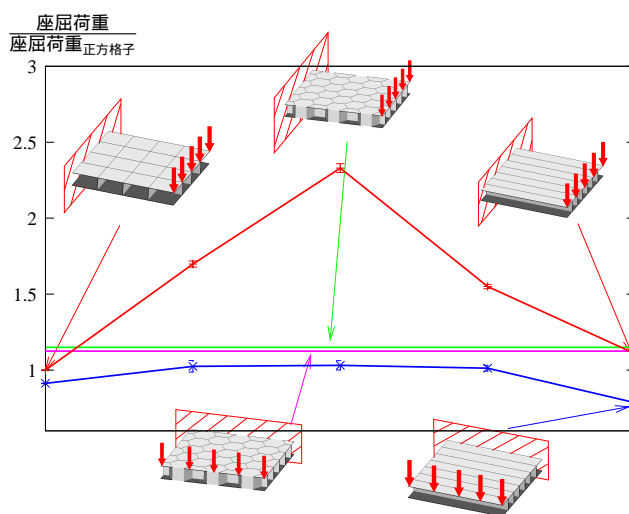


図-12 座屈荷重

元化したものである。まず、ハニカムパネルの座屈荷重が正方格子よりも大きいことが分かる。また、格子パネルはセルサイズ $2\sqrt{3}$ の場合だと $m=13,14$ と $n=5$ の組み合わせで座屈荷重が大きくなっている。また、格子パネルの壁を一方方向のみにし、強い方に荷重をかけたモデルは曲げ剛性では最も高い値と低い値が得られたが、座屈荷重は、共に小さくなっている。

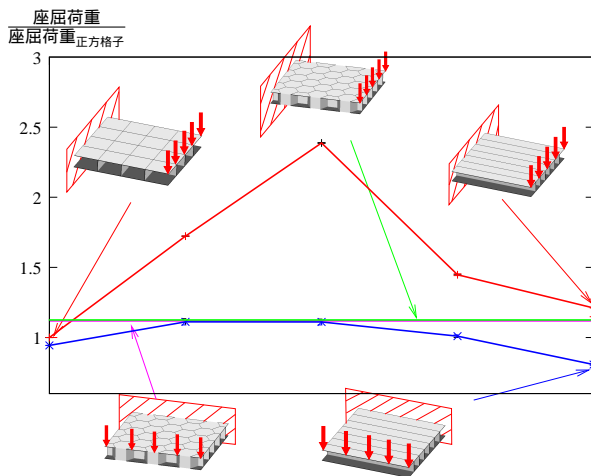


図-13 高さ 0.5cm 座屈荷重

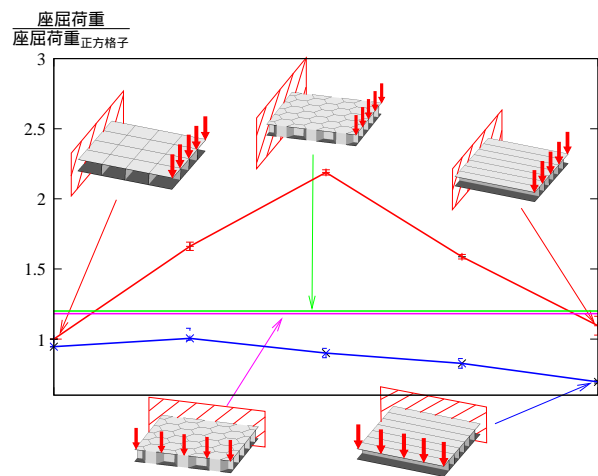


図-14 高さ 3cm 座屈荷重

セルサイズ $2.5\sqrt{3}$ cm のハニカムパネルと格子パネルの座屈荷重の関係を図-15 に示す。

セルサイズ $2\sqrt{3}$ cm のハニカムパネルと比較して、ハニカムパネルの荷重をかける方向による座屈荷重の差が大きくなっている。

(3) 座屈モード図

以下に高さ 1cm、ハニカムのセルサイズ $2\sqrt{3}$ cm のハニカムパネルとそれに対応した格子パネルの座屈モード図を示す。ハニカムパネルと正方格子パネルの座屈モード図は、どちらも固定端付近の中央辺りに局部座屈が認められる。曲げ剛性が高くなる方向にかけた際、座屈荷重が最も高くなる壁の組み合わせの格子パネルでは、局部座屈は固定端付近の端の方に起きている。

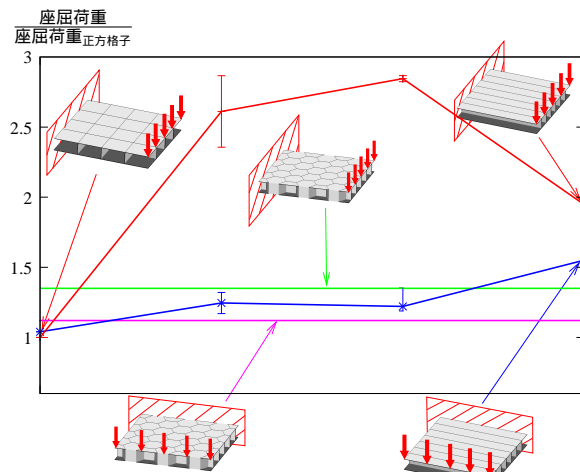


図-15 セルサイズ $2.5\sqrt{3}$ cm 座屈荷重

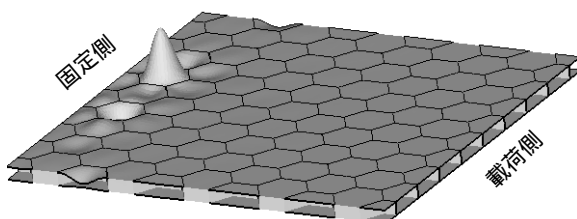


図-16 ハニカムパネル座屈モード図

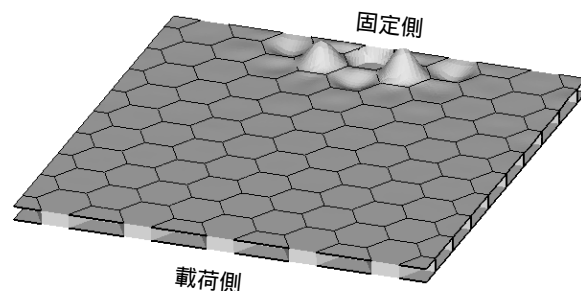


図-17 ハニカムパネル座屈モード図

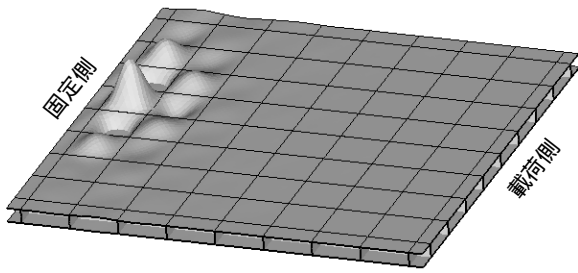


図-18 正方格子パネル座屈モード図

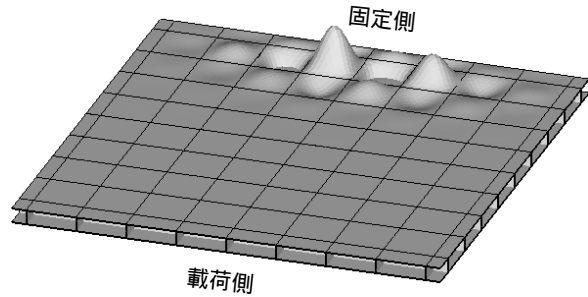


図-19 正方格子パネル座屈モード図

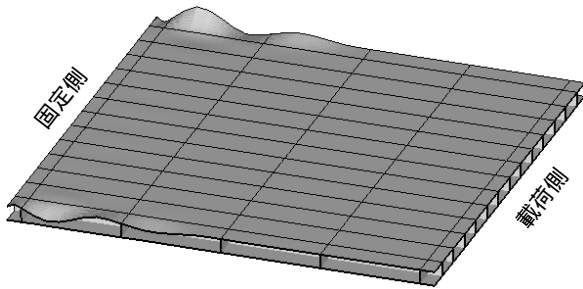


図-20 13×5 格子パネル座屈モード

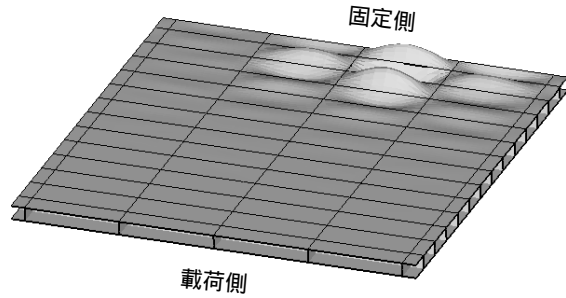


図-21 13×5 格子パネル座屈モード

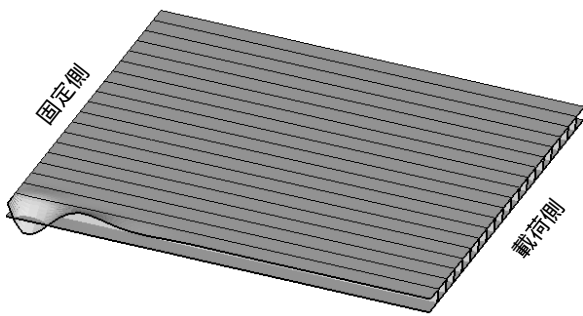


図-22 18×0 格子パネル座屈モード

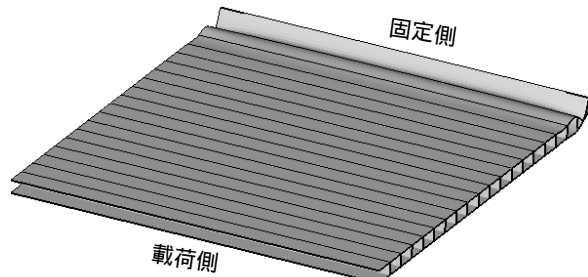


図-23 18×0 格子パネル座屈モード

4. まとめ

- 今回数値解析を行ったケースでは、ハニカムパネルが正方格子パネルの曲げ剛性を上回るケースは認められなかった。
- セルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルは荷重をかける方向による曲げ剛性の差が小さくなった。
- 座屈荷重は、ハニカムパネルが正方格子パネルよりもやや大きな値を得られた。セルサイズ $2.5\sqrt{3}\text{cm}$ のハニカムパネルは荷重をかける方向による座屈荷重の差が大きくなった。
- ハニカムパネルと正方格子パネルの座屈モード図はどちらも固定側の中央付近に発生し、座屈荷重が大きな値の格子パネルの座屈モード図では固定側の両端に局部座屈が発生することがわかった。

参考文献

- 1) <http://www.calculix.de/>