

論文

多面体サンドイッチコアパネルの形状による機械的性質への影響

高橋 俊也*¹⁾ 西川 康博*¹⁾ 阿保 友二郎*¹⁾

Influence of the structure of polyhedron sandwich-core panel on mechanical properties

Shunya Takahashi*¹⁾， Yasuhiro Nishikawa*¹⁾， Yujiro Abo*¹⁾

The structure of the sandwich core was improved in this study to develop a high rigidity sandwich core hard to peel off between the skin and core material. A sandwich core has been prepared by bonding the plates with polyhedron unlevel structure. Because the area for bonding is larger than that of honeycomb, the sandwich core is hard to peel off from the skin material. The bending test results show that, the panel using the sandwich core developed in this study has higher rigidity than the honeycomb panel. Results of the compressive test show that the developed sandwich core may have the shock absorbing performance.

キーワード：サンドイッチ構造，高剛性，セル構造

Keywords：Sandwich structure, High rigidity, Cellular structure

1. はじめに

現在，様々な分野において製品の軽量化が要求されている。製品の軽量化を達成するためには比強度に優れた材料の採用，あるいはハニカムパネルや多孔質材料のような軽量，高剛性を兼ね備えた構造を採用する方法がある。特にハニカムパネルは航空機や鉄道車両の床のような交通機械から，家具であるテーブルの天板まで幅広い分野で使用されている。ハニカムパネルはコア材であるハニカムの両端面にスキン材を接着することで作製される。ハニカムパネルの曲げ剛性はスキン材の曲げ剛性によるものであり，コア材であるハニカムの曲げ剛性はハニカムパネルの曲げ剛性は計算する際に一般的に無視される⁽¹⁾ほど低い。

更に，ハニカムパネルの課題として，曲げ変形を受けた際にコア材であるハニカムとスキン材が剥離しやすいことが挙げられる。これはハニカムとスキン材の接着面積が小さいことが原因と考えられ，スキン材との接着面積を増加することによって曲げ強さの向上が見込まれる。

そこで本研究では内部のコア材の形状を改良し，コア材とスキン材の接着面積を増加させると共に，コア材自身に曲げ剛性を与えた。コア材の形状として，なるべく製造コストの安いプレス成形で製造可能な形状にすることが望ましい。そこでコア材を図1のような規則的な凹凸を持つ形状とした。この凹凸形状は図2に示す空間充填構造であるケルビン14面体を半分にした形状である。異方性が無いため，パネル材にした際に曲げ，圧縮の両方に対応可能であると考えられる。

最終的に多面体サンドイッチコア材の形状による曲げ特

性，及び圧縮特性について検討を行い，ハニカムパネルよりも曲げ変形に強いサンドイッチコア材を開発した。

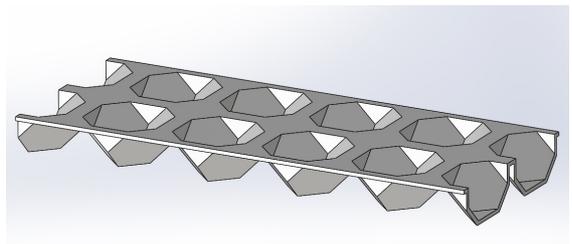


図1. 多面体サンドイッチコア

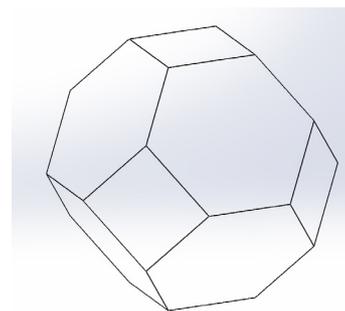


図2. ケルビン14面体構造

2. 形状と曲げ剛性の検討

2.1 解析条件 解析モデルの作製及び有限要素解析には Solidworks2013 を用いた。解析モデルの形状は図3に示すように，幅方向に中空の多面体が4個，長さ方向に10個，厚さ方向には凹凸板を3層接着したものに0.3mmのスキン材を接着したものとした。解析は静荷重解析である。計算負荷低減のため，長さ方向と幅方向で対称条件を使用し，1/4モデルでの解析を行った。長さ方向の中央部に強制変位

事業名 平成25年度 基盤研究

*¹⁾ 電子・機械グループ

1mm を与え、中央部の反力の合計から曲げ剛性を求めた。

曲げ剛性 EI を求める式は、3 点曲げのたわみの式、

$$\text{たわみ } \delta = (Pl^3) / (48EI)$$

を変形して、

$$\text{曲げ剛性 } EI = (Pl^3) / (48\delta)$$

から求めた。P は曲げ荷重、l は支点間距離、 δ は長さ方向の中央のたわみである。更に板厚、セルサイズ、加工間隔を変更すると試験片全体の幅が変わるので、試験結果を幅で除して単位幅当たりの曲げ剛性で評価を行った。以後、本研究では単位幅当たりの曲げ剛性を単に曲げ剛性（単位・N・mm）と呼ぶことにする。

今回の有限要素解析では図 4 に示すような多面体形状の大きさであるセルサイズ、多面体形状の板厚、多面体形状の間隔である加工間隔を変化させた。セルサイズ 6mm、板厚 0.3mm、加工間隔 0.1mm のモデルを基本のモデルとし、これらのセルサイズ、板厚、加工間隔をそれぞれ単独で表 1 のように変化させて形状と曲げ剛性の関係について検討を行った。

2.2 曲げ解析結果 形状と曲げ剛性の関係について図 5 から図 7 に示す。板厚が増加するにつれて、曲げ剛性が増加するが、それに伴い、重量も増加する。セルサイズについては、セルサイズが大きくなるにつれてサンドイッチパネル全体の厚さが増加するため曲げ剛性が向上した。加工間隔については、加工間隔が増加するにつれて、軽量になるが曲げ剛性には影響がなかった。

2.3 試験体の製造とコア形状の改善 スキン材とコア材との剥離を検討するため、インクジェット式三次元造形装置 Connex500 を使用して、曲げ試験体を製作した。モデル材は UV 硬化アクリル系樹脂 FullCure 840 VeroBlue を使用した。コア材の接着及びコア材とスキン材の接着には Scotch-Weld DP-8010 クリアを使用した。図 8 のように凸部同士を突き合わせて接着を試みた。しかし、製造した試験体の反りが原因で加圧時に凸面が凹面にずれ落ちる不具合が発生した。そこで、コア材の形状の改善として、図 9 のように凸面と凹面を接着して、2 枚の凹凸板を使用して、コア材の 1 層を製作することによって、製造時の不具合の発生を防止した。凹凸を組み合わせることによって、1 層のコア材が、穴空き板のスキン材を接着したサンドイッチパネルになるため、曲げ剛性が更に向上すると考えた。3 点曲げの有限要素解析を行ったところ、改善案で 0.3mm のコア材を使用したものと、0.6mm の改善前のコア材を使用したものを比較すると、曲げ剛性が 23300N・mm から 23600N・mm に向上し、コア材の改善によって曲げ剛性の向上が確認できた。そのため、本研究では改善後の形状を採用した。

2.4 曲げ試験 曲げ試験は株式会社エー・アンド・デー社製のテンシロン RTC-1325 を使用した。試験条件は支点間距離 160mm、試験速度 5mm/min で行った。本研究での開発材及びハニカムパネルに対して曲げ試験を行った。開発材はセルサイズ 6mm、板厚 0.3mm、加工間隔 1.0mm である。図 9 に示した開発材の 1 層当たりの厚みは 3.6mm であ

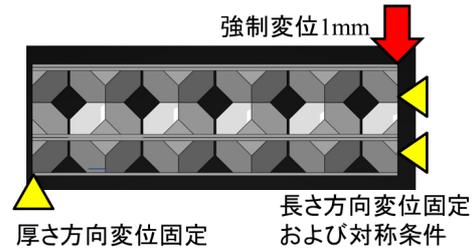


図 3. 解析モデル及び解析条件

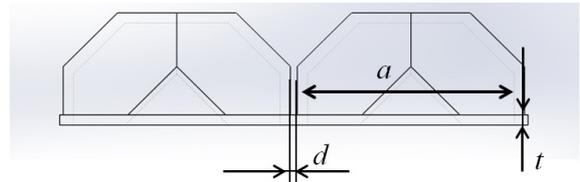


図 4. 設計パラメーター

表 1. 解析に使用した設計値

板厚 t (mm)	0.3, 0.4, 0.5, 0.6
セルサイズ a (mm)	4, 6, 8, 10
加工間隔 d (mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0

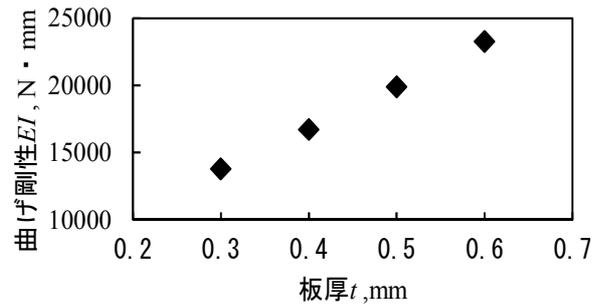


図 5. 板厚と曲げ剛性の関係

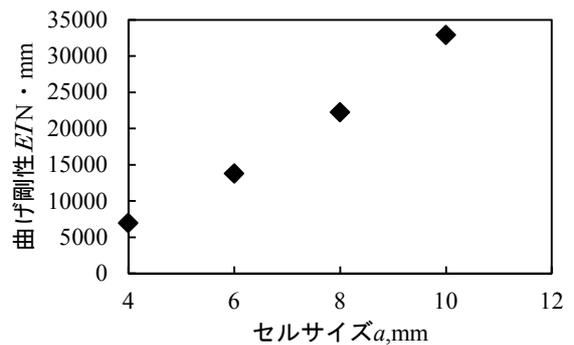


図 6. セルサイズと曲げ剛性の関係

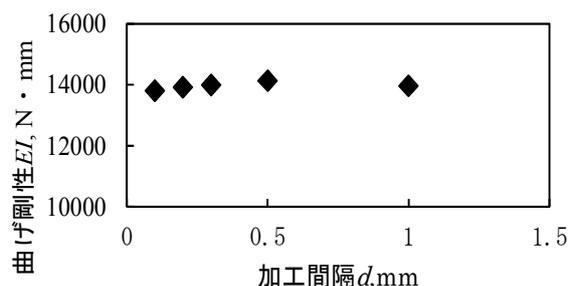


図 7. 加工間隔と曲げ剛性の関係

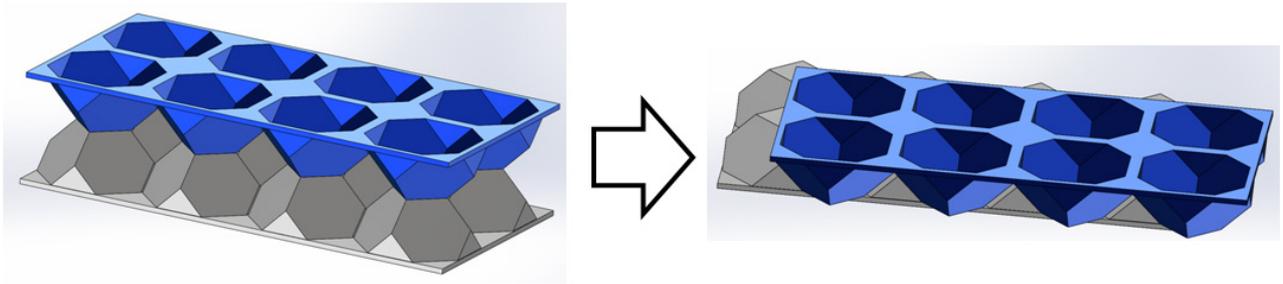


図8. 接着時の不具合

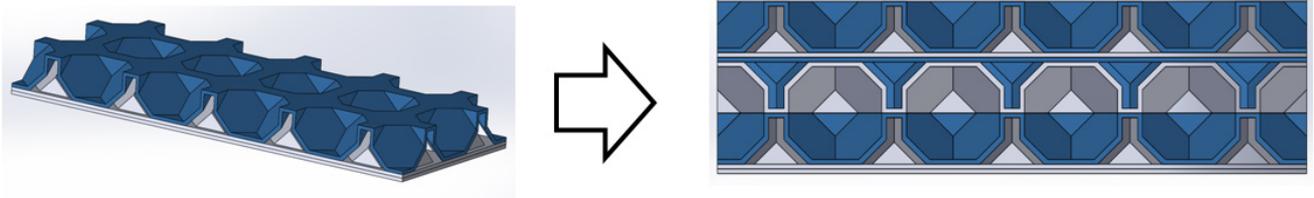


図9. コア形状の改善

り，それを3層接着し，表面に0.3mmのスキン材を接着した。ハニカム形状は図10に示すようにセルサイズは6mm，板厚は0.3mm，ハニカムコアの高さ10.8mmのものを使用し，表面に0.3mmのスキン材を接着した。それぞれ0.3mmのスキン材を接着し，試験体の状態調節は室温23℃，湿度50%の環境下に48時間以上放置した。試験体の本数はそれぞれ5本である。

曲げ試験の結果を図11に示す。ハニカムパネルとの曲げ剛性の平均値を比較すると，ハニカムパネルの曲げ剛性は7550N・mm，開発したコア材の曲げ剛性は13100N・mmであり，コア材の曲げ剛性を高めることによって，曲げ剛性をパネル全体の1.74倍に向上させることができた。また，曲げ試験の荷重についてハニカムはスキン材の剥離により，最大荷重以降は急激に荷重が低下する破壊形態であったが，開発材の場合，最大荷重以降は徐々に荷重が低下するハニカムよりも破壊形態となった。図12のようにコア材の内部が破壊することによって急激な荷重の低下を防止することができたと考えられる。

3. 形状と圧縮強さの検討

圧縮試験には株式会社島津製作所製オートグラフAG-100kNXを使用した。開発材は多面体がかみ合った状態で接着されており，コア材が強固に拘束されているためスキン材の有無は圧縮特性には影響は受けない。このためスキン材を接着せずにコア材のみで圧縮を行った。

試験は板厚の影響の検討には板厚を0.3，0.5，0.7mmの3水準とし，セルサイズ6mm，加工間隔0.1mmの試験体で行った。セルサイズの影響を検討する場合には，セルサイズを6，8，10mmの3水準とし，板厚は0.3mm，加工間隔は0.1mmとした。加工間隔の影響の検討には，加工間隔0.1，0.5，1.0mmの3水準とし，板厚は0.3mm，セルサイズは6mmとした。

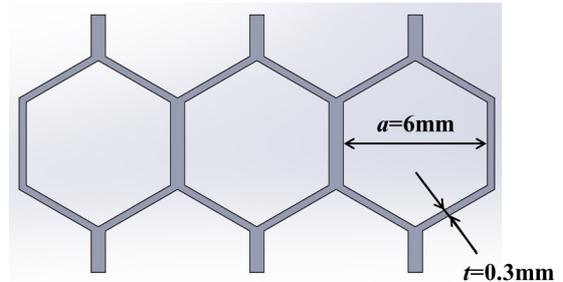


図10. ハニカムコアの形状

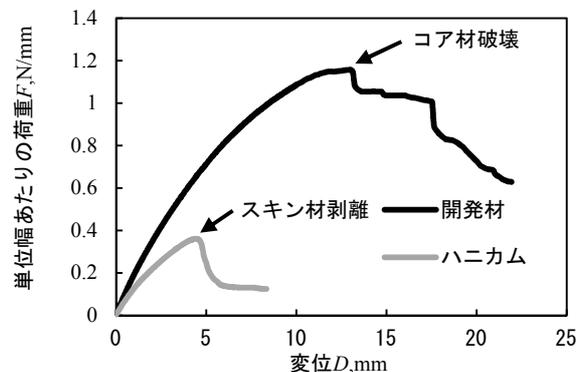


図11. 曲げ荷重-変位線図

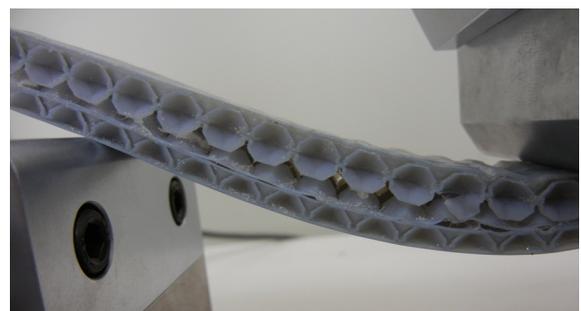


図12. 曲げ試験における開発材の破壊形態

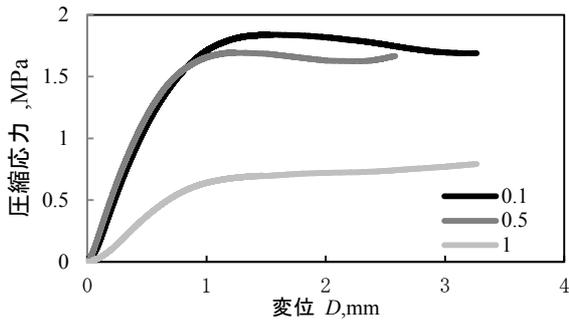


図 13. 加工間隔と圧縮特性の関係

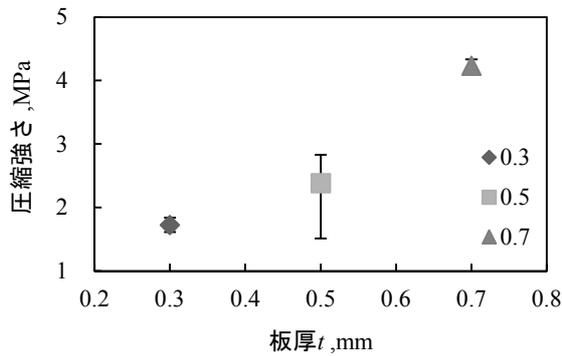


図 14. 板厚と圧縮強さの関係

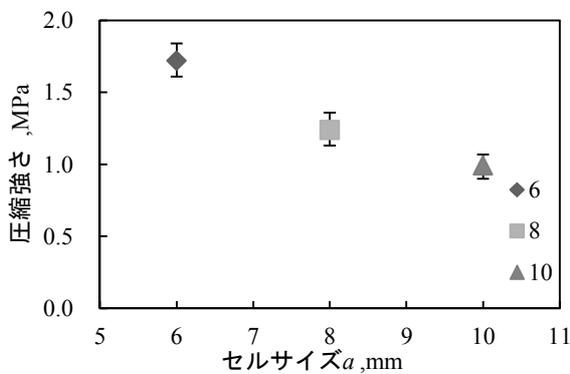


図 15. セルサイズと圧縮強さの関係

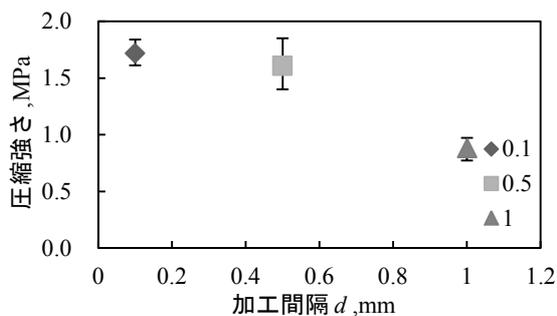


図 16. 板厚と加工間隔の関係

図 13 に加工間隔と圧縮特性の関係について示す。圧縮時に応力一定で変形するプラトー領域が確認できたことから、開発材は衝撃吸収能も期待できる。加工間隔を大きく取り過ぎると極端に圧縮強さが低下することが分かった。これは多面体と接触していない拘束の弱い部分の割合が増加するため、構造として不安定になり、座屈が発生しやすくなるのが原因と考えられる。そのため、実際に加工を行う際には加工間隔は狭める必要がある。

図 14 に板厚と圧縮強さの関係を示す。この結果より、板厚の増加に伴い、圧縮強さも高くなる。図 15 に圧縮強さとセルサイズの関係を示す。この結果から、セルサイズの増加に伴い圧縮強さは低下する。図 16 に圧縮強さと加工間隔の関係を示す。加工間隔 0.1mm と 0.5mm の結果を比較すると、圧縮強さの平均値が減少し、ばらつきも大きくなる。これは構造の不安定な試験体の割合が増加することが原因であると考えられる。加工間隔 0.5mm と 1.0mm の結果を比較すると、1.0mm の場合は圧縮強さが大きく低下するが、ばらつきが小さくなる。これは加工間隔が 1.0mm の場合、構造が不安定な試験体のみになるため、ばらつきが少なく、圧縮強さが大きく低下すると考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた成果を以下に示す。

- ・同一厚さのハニカムパネルよりも曲げ剛性の高いコア材が開発できた。
- ・開発材の曲げ変形による破壊時には、スキン材との剥離は発生せず、コア材内部で破壊が発生した。破壊後は徐々に荷重が低下する破壊形態となった。
- ・圧縮試験の結果から、開発したコア材はプラトー領域が確認できた。

今後はプレス加工によって実際にサンドイッチコア材を製造すると共に、自動車のバンパービームのように曲げ剛性と衝撃吸収特性が必要な部材として使用を提案する。また、吸音特性についても検討を行い、建築部材など適用分野の拡大を目指す。

(平成 26 年 7 月 7 日受付, 平成 26 年 8 月 7 日再受付)

文 献

- (1)大塚正久訳：「セル構造体 多孔質材料の活用のために」, 内田老鶴圃, pp.334-336 (1993)