

組立式トラスコアパネルの開発

Development of Assembled Truss Core Panel

寺田 耕輔・佐藤 秀俊・牧田 哲暢・高橋 徹*¹・萩原 一郎*²

国立高等専門学校機構 福島工業高等専門学校 専攻科 機械・電気システム工学専攻

*¹一般財団法人ふくしま市町村支援機構 試験審査所・*²明治大学 先端数理科学インスティテュート

Kousuke Terada, Hidetoshi Sato, Akinobu Makita, Toru Takahashi*¹ and Ichiro Hagiwara*²

National Institute of Technology, Fukushima College, Advanced Course in Mechanical and Electrical System Engineering, *¹Fukushima Municipality Support Organization,

*²Meiji University, Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences

(2014年9月4日受理)

Honeycomb panel as lightweight and high stiffness panel, which is widely applied into various structure. When honeycomb panel is glued, it may catch fire. That's why some new high stiffness technologies have been required. As a result of that, recently truss core panel was developed. Truss core panel has equivalent bending stiffness as honeycomb panel, and stronger in shear and more fire resistant than honeycomb panel. However, it had been difficult in general to form truss core panels compare to honeycomb panel. Therefore, multi-stage press forming process was investigated, but it cannot manufacture its structure with high aspect ratio for the limit of press forming process. The main aim of our research is to develop a new manufacturing process for Assembled Truss Core Panel (ATCP) by using bending method, suggesting the possibility to make much wider range of structure than before. In this paper, firstly we reported the results of the trial product to confirm the ability of manufacturing ATCP. Then we evaluated the bending stiffness of the trial product of ATCP. Finally, we mentioned some tasks on ATCP in the near future.

Key words: high stiffness panel, honeycomb panel, truss core panel, bending stiffness, bending method

1. はじめに

昨今の日本を襲う集中豪雨による土砂災害は、地球温暖化で海面からの水蒸気増加によって積乱雲が多発したことが主要因の一つとされている。世界的にも地球温暖化問題の解決は急務となっており、産業活動から排出された二酸化炭素の量を減らす必要が指摘されている。その対策の一つとして、軽量高剛性構造材を自動車、航空機などの輸送機器に応用し、燃費向上による化石燃料と環境汚染物質等の削減が挙げられる。代表的な軽量高剛性材料としてもっともよく知られているハニカムコアパネル (HCP : Honeycomb Core Panel, Fig. 1) は様々なコアサイズ、パネル寸法の方が比較的容易に製作でき、曲げ剛性に優れているため産業界で多く活用されている。特に、1949年に米軍機に初めて搭載された後、様々な改良が加えられ、現在では一般的な航空機体構造材料として利用されている¹⁾。しかし、HCPは、Fig. 1に示す

Honeycomb Core等に接着剤を使用しコア強度が接着剤の特性に依存するため耐熱性に限界がある、耐せん断性が低い、製造コストが高い等の欠点もあることで、より広範な利用が妨げられている。

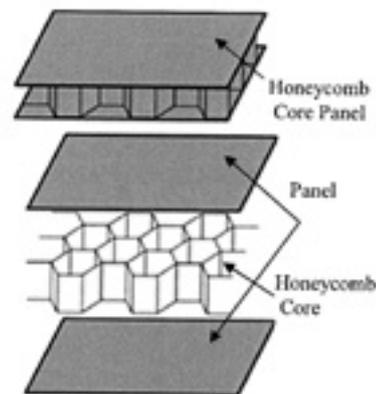
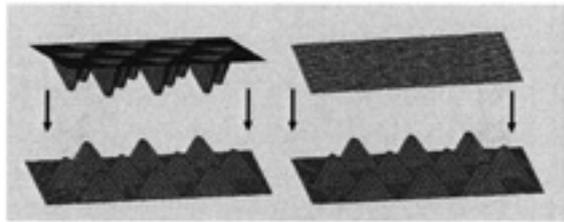


Fig.1 HCP : Honeycomb Core Panel
(from Wikipedia)

そこで、斎藤ら^{1)~3)}は折紙をモデルにして、一枚の平板から切り抜きと折り曲げのみで立体化されるトラスコアパネルを開発した。タイプとしては、ダブルとシングル (TCP : Truss Core Panel, Fig. 2 (a), (b)) とがある。しかし、このような一枚の平板からの工法は、紙では容易に曲げられるが、鋼板などの金属材料の場合は困難となるため、HCPに匹敵し低コストで加工可能な新しいTCP構造と工法の研究開発が期待されている。その経緯は次のとおりである。



(a) Double TCP (b) Single TCP
Fig.2 TCP : Truss Core Panel

TCPは、Fig. 2に示すように、周期的な四面体形状の凹部を三角形のグリッド上に成形したパネルから構成されている。この構造材料はHCPと同程度の曲げ剛性を持ち、かつせん断強度、面内圧縮特性に優れ、さらに接着剤を使用することなく金属材料のみで製造可能なため、火災時の安全性が高いというメリット等を有すると萩原⁴⁾は報告している。TCPを輸送機器等の構造材料に適用するためには、金属材料の加工法としては、一般的にプレス成形、ハイドロフォーミング、超塑性成形などが用いられる。しかし、ハイドロフォーミングや超塑性成形は成形コストが高い。また単純なプレス成形では三角錐形の一つのコア成形において頂点近傍に大ひずみが局所的に発生するため、その解決策として戸倉ら⁵⁾は多工程プレス成形法を提案した。この工法では、半球型パンチにより素材板を半球状に予備成形した後、三角錐パンチで本成形を行う多工程の成形方法である。しかし、この多工程プレス成形法でも、汎用的な鋼材の場合、Fig. 3 (b)に示すように、三角錐の高さ d と底面の辺の長さ c の比をアスペクト比 f とするとその限界は0.29と報告している。TCPの縦方向の剛性は f が大きいほど高い故に、 f に制限がある問題は大きい。また、プレス成形法は、スプリングバックの制御が困難であり、設計許容寸法精度内に成形できるまでトライアル試作による長期の型開発期間を要するという問題もあ

る。このため、各種の輸送機器や重機械等における多品種少量生産の場合には、型設計と型製作費用を考慮するとプレス成形法の適用は極めて難しいと言える。

このような背景に立脚し、筆者らは組立式トラスコアパネル (ATCP) 工法と構造を提案している。本稿においては、この提案の有効性を検証するため、ATCPの試作を行い、試作品ATCPの曲げ剛性試験結果をもとに今後の課題について報告する。

2. 提案する組立式トラスコアパネル工法と構造の特徴

2.1 曲げ加工と組立

本稿では、これまでのTCP工法の問題を解決するため、Fig. 3 (a) ~ (d)に示すように、三角錐型コアを曲げ加工し組立て製造するATCP工法と構造を提案する。本工法では工程数は多いが、コアの形状自由度が高く、プレス金型が不要であるため、従来のプレス成形では対応できない多品種少量生産にも適用できる。曲げ加工で多種多様の寸法形状のコアを大量生産し組立を行えば、Fig. 4 (a) ~ (e)に示すように、正3角形からなる正4面体と正8面体を用いた平行菱形6面体を構成して空間充填することにより任意曲面形状のATCPも可能となる。この空間充填形は、オクテット・トラスと呼ばれる強固な構造である。

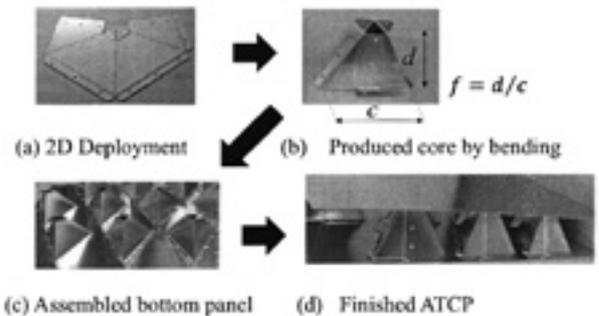


Fig.3 Manufacturing process and structure of ATCP

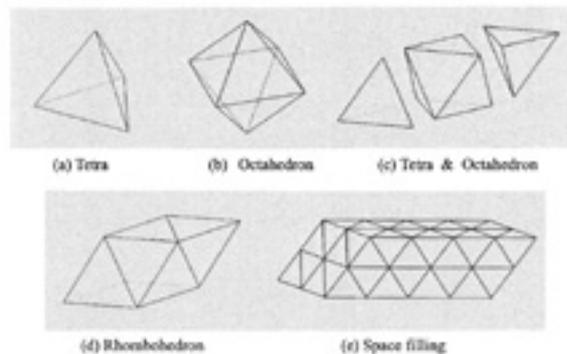


Fig.4 Octet truss structure

2.2 スプリングバックの抑制

三角錐型コア曲げ加工においては、所定の曲げ角度に精度良く加工するためには、スプリングバックを抑制する必要がある。主なスプリングバック抑制方法⁶⁾としては、“決め押し”と“溝掘り”が知られている。決め押しでは、曲げ加工において素材板厚を圧下することによってスプリングバックを抑制する。これに対して、溝掘りでは、折り曲げ線上に素材板厚の約半分の深さの溝をフライス加工などで設定して、曲げ加工部を薄肉化することによってスプリングバック抑制する。三角錐型コア曲げ加工における決め押しについての報告⁷⁾をもとに、素材板厚圧下のための加圧設備およびそれに伴う治工具類等の設備を想定し、溝掘りはフライス加工で行えることを比較すれば、後者の方がはるかに簡便である。従って、ここでは、スプリングバック抑制方法として溝掘りを採用する。

2.3 接合法

製造したコアの合わせ面の接合法としては、溶接、ボルトナット、リベットなどが挙げられる。溶接としては、レーザーやアークがあるが、接合後の熱変形や設備費が非常に高い等の問題がある。ボルトナットは、設備費はほとんどかからないが、作業時間がかかることと裏面にナットをセットする作業空間がない場合も考えられるなどの欠点がある。これらに対して、リベット、特にブラインドリベット (Fig. 5) は、設備費もほとんどかからず、かつ裏面からの作業を要しない利点がある。従って、ここでは、接合法としてブラインドリベットを採用する。



Fig.5 An example of blind rivet

3. 組立式トラスコアパネル試作品の仕様

今回の試作では、ATCP工法と構造の提案の有効性を示すことを目的とし、かつ新しい初めての試みであることも考慮して、主な仕様を次のように設定している。なお、本試作は、金属材料の折り曲げ加工で世界的に定評のあるRobofold社⁸⁾の協力を得て行っている。

- ・素材：軽量で曲げ加工を行いやすい板厚1.5mmのアルミ合金5000系材料を用いている。
- ・主要寸法：作り易さと試作費用の制限等も考慮して、基本寸法である正四面体コアの平面状態の1辺の長さを

200mmとし、1辺の両端の曲げ部分3mmを差し引くと三角錐コア底辺長さ c は194mmとなる。コア総数10個 (3-4-3列) のシングルタイプとしている。試作品の形状寸法を Fig. 6 (a), (b) に示す。ここで、 L は長さ、 B は幅、 H は上下板の板外間長さ等の寸法である。

- ・溝掘り加工：折り曲げ線上をフライス加工で深さ0.7mm×幅0.7mmの溝を設定している。

- ・コア曲げ加工：一般的にはスクリーブレスなどが用いられるが、今回の試作では、折線部は薄肉化されているため、Fig. 7に示すようなハンディな治具で容易に曲げ加工が行える。このコア試作品の f は、0.582 ($=d/c=(115-1.5\times 2)/194$) となり、プレス加工での限界値 f の約2倍程度に向上している。

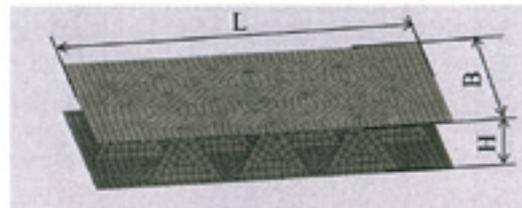
- ・接合～組立：曲げ加工後のコアは、Fig. 8 (a)～(c)に示すように、各合わせ面にブラインドリベットで接合している。今回の組立作業時間は1時間程度である。

- ・重量：試作完了後の重量測定を行った結果、試作品ATCP (Fig. 9 (a), (b)) の重量 W は6544.9 g である。

以上のように、限定的な仕様ではあるが、コアを曲げ加工し組立てトラスコアパネルを製造することは技術的に可能であることを示している。



(a) A bottom panel without a top panel



L=990mm, B=655mm, H=115mm

(b) A trial product of ATCP

Fig.6 Dimensions of the trial product of ATCP

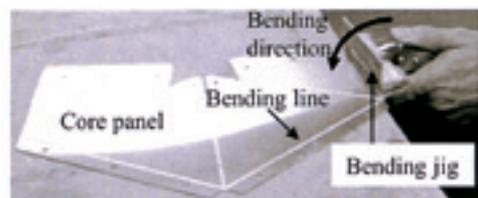


Fig.7 A handy bending jig for core panel

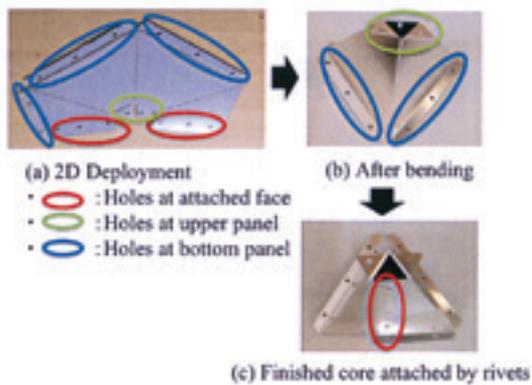


Fig.8 An assembly flow of core for ATCP

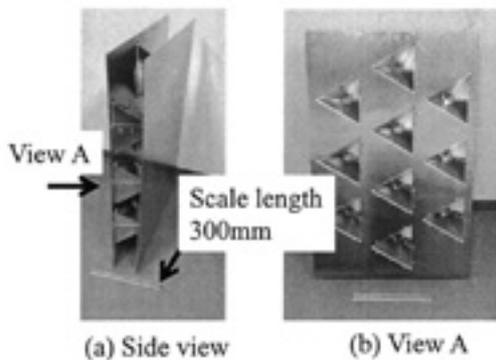


Fig.9 Photos of the trial product of ATCP

4. 試作品ATCPの曲げ剛性評価

4.1 3点曲げ試験方法

試作品ATCPの曲げ剛性評価を、Fig. 10に示す3点曲げ試験により行う。この試験では、上面中央部に一本、下面両サイドに二本の円柱状治具を設置し試作品ATCPセット後、Bedを上昇させながら、100Nごとに荷重 P とたわみ δ を測定して曲げ剛性 D を評価する。円柱状治具として $\phi 22$ 丸鋼を、試験機として株式会社 東京試験機製の油圧式万能試験機（機種YU-2000S4, Fig. 11）を用いている。この試験機の主な仕様をTable 1に示す。なお、本試験におけるBed上昇速度は0.5mm/minである。

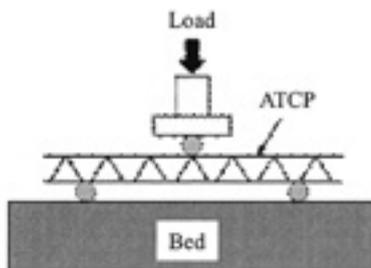


Fig.10 3 points bending mechanism



Fig.11 Hydraulic system universal testing machine

Table 1 Specifications of hydraulic system universal testing machine YU-2000S4

Press load	Max.2000 kN
Interval of columns	850 mm
Tension distance	Max.700 mm
Compression distance	Max.550 mm
Machine size W×D×H	1400×850×3300 mm

4.2 結果と考察

3点曲げ試験によって得られた P と δ の関係から、次の式 (1) を用いて D を評価する。

$$D \cong \frac{(P/\delta)l^3}{48} \quad (1)$$

ここで、 l は二本の治具支持間隔で776mmである。

曲げ剛性試験における P と δ の関係を、Fig. 12に示す。 P が1000Nまでは、 P と δ は線形関係にあり、試作品ATCPは弾性変形している。

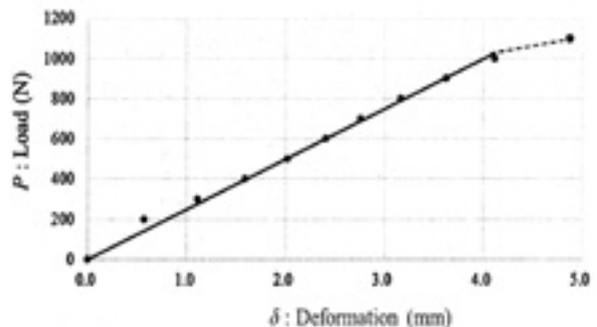


Fig.12 Measured data of P and δ

P が1000Nを超えて、これまでの P と δ の比例関係から離脱し非線形現象を示し始めた時点で試験を終了した。試験結果から、 $P/\delta = 249.1$ (N/mm)となり、式(1)から $D = 2.43 \times 10^3$ (N・m²)と算出される。

次に試作品ATCPに対して同素材、同投影面積($L \times B$)、同重量の中実矩形断面からなる構造体を想定し、この構造体の曲げ剛性 D^* を評価する。幅 B は655mm、長さ L は990mm、試作品重量 W 、素材比重 ρ 2.6をもとに、この構造体の断面厚さ T (mm)を式(2)から計算する。

$$T = 1000 \times W / (\rho \times L \times B) \quad (2)$$

$$= 6544.9 / (2.6 \times 990 \times 655 / 1000) = 3.88 \text{ (mm)}$$

想定した構造体断面寸法は幅 $B \times$ 厚さ T であるから、曲げ剛性 D^* は、材料力学の公式から式(3)で表される。

$$D^* = E \times B \times T^3 / 12 \quad (3)$$

ここで、 E は素材のヤング率73GPaである。

式(3)を計算すると、 $D^* = 2.33 \times 10^2$ (N・m²)となる。

今回の試作品ATCPはシングルタイプであるため、コア充填率は約50%程度であるが、その曲げ剛性 D は、同素材、同投影面積、同重量の中実矩形断面からなる構造体の曲げ剛性 D^* の約10.4倍(=24.3/2.33)に高剛性化されている。

また、逆に、試作品ATCPの曲げ剛性 D と同等になる同投影面積($L \times B$)のアルミ合金板材の厚さを式(3)から計算すると8.48mm(= $(12 \times D / (E \times B))^{0.3333}$)となる。したがって、板厚に換算して、約45.8%(=3.88/8.48)に軽量化されている。

5. まとめ

本稿では、新しい軽量高剛性構造材料として組立式トラスコアパネル(ATCP)工法と構造を提案し、試作品を製作して曲げ剛性試験を行うことによって、その実用化の可能性を示した。今回の取組から、実用化を推進するためには、次のような今後の課題が指摘される。

- ・素材の機械的性質、折線の溝条件(深さ、幅、形状)、締結条件(接触面積、締結ピッチ)などを考慮したATCP曲げ剛性評価手法を開発し、用途に応じた構造材料としてATCP設計手法に活用できるようにする。

- ・曲げ加工のために折線上に設定する溝条件(深さ、幅、形状)の加工性への影響を把握し、スプリングバックを抑制し、割れや皺が発生しない適正な曲げ加工条件を成形シミュレーションから事前検討できるようにし、ATCP製造条件を明確化する。

- ・コア曲げ加工～組立までの作業をロボットによる自動化方案を開発し、人件費削減とともに昼夜全自動運転製

造により生産性の向上を図る。

謝辞

福島高専機械工学科共通経費と国立大学改革強化推進補助事業による国立高等専門学校教員の教育研究力強化において世界教育研究動向調査プログラムに応募して得た研究開発費により、本稿の試作を行えましたことに感謝いたします。また、試作におけるROBOFOLD社 Gregory Epps CEOのご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) Saito, K., and Nojima, T., Modeling of New Light-Weight, Rigid Core Panels Based on Geometric Plane Tilings and Space Filings, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 73, No. 735, (2007).
- 2) Saito, K., Nojima, T., Morimura, H. and Hagiwara, I., Evaluation of Bending Rigidity in Newly Developed Light-Weight Core Panels, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 75, No. 750, (2009).
- 3) Saito, K., and Nojima, T., Designing Method for a Folding Line Diagrams of Arbitrary Cross-Section Honeycomb Cores, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 78, No. 787, (2012), pp. 324-335.
- 4) Hagiwara, I., Welding by pressing 2 sheets of cheaper steel panel than honey comb, Automotive Technology (2011-11), pp. 96-101.
- 5) Tokura, S., and Hagiwara, I., Forming Process Simulation of Truss Core Panel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 74, No. 746 (2008), pp. 1379-1385.
- 6) 小川孝行, 高張力鋼板のプレス加工における決め押しがスプリングバック抑制に及ぼす効果, 広島大学大学院工学研究科 博士学位論文 (2011).
- 7) Nguyen Thai Tat Hoan, Terada, T., Tokura, S., Hagiwara, I., Application of Metal Bending to Forming Process of Truss Core Panel, JSST 2013 International Conference on Simulation Technology Paper No. 179, (2013).
- 8) 寺田耕輔, ロンドンRobofold訪問記, 平成25年度文部科学省数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ (2014).