

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05769

研究課題名(和文) 繊維強化プラスチック折紙型の革新的な軽量化構造の開発とその基盤技術に関する研究

研究課題名(英文) Development of Innovative Light Weight Structure of Fiber Reinforced Plastic Origami Type and Research on its Base Technology

研究代表者

趙 希祿 (ZHAO, XILU)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：30610307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：鉄道車両や自動車などの構造軽量化を実現するために、従来のトラスコアパネル構造に繊維強化プラスチック複合材料を適用し、新しい高性能軽量化構造および加工法を考案する。複合材料と折紙構造の持つ剛性補強効果を十分に活かせることによって、構造全体の力学特性と成形した構造の板厚分布が大幅に改善される。今まで実用展開に最大課題となっていたトラスコアパネル軽量化構造の加工困難の問題も解決できるようになった。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the structural weight of railway cars and automobiles, we propose a new high performance lightweight structure and processing method by applying fiber reinforced plastic composite material to conventional truss core panel structure. By fully utilizing the stiffness reinforcement effect of the composite material and the origami structure, the mechanical properties of the structure and the plate thickness distribution of the manufactured structure are improved. The manufacturing difficult problem of Truss Core panel lightweight structure was a major challenge to the previously became to be resolved.

研究分野：機械工学

キーワード：軽量化構造 複合材料 設計方法 折紙工学 最適設計 力学特性解析

1. 研究開始当初の背景

設計基準を満たした上で出来るだけ軽い構造を開発するのは非常に重要な研究課題である。通常、薄肉構造に補強リブを適切に配置させたり、先進的複合材料を利用したりする方法がよく見受けられているが、より簡単かつ有効な軽量化構造の研究開発は産業界などでは重要視されている。

構造の軽量化と力学性能の向上を両立するため、金属材料の代わりに繊維強化プラスチック（以下 FRP）を軽量化構造の設計に適用する研究活動が活発に行われており、代表者グループでは、長繊維からなる FRP 積層板・偏平シェルの理論解析および最適設計法を検討し、繊維配向角を適切に調整することにより最適な FRP 積層構成を求める計算法が得られている。しかし、これらの研究は、ほとんど平板または偏平シェルのような単純な形状を持つパネル構造に限られており、これよりもっと性能向上を追求するには FRP 構造の形状構成に対する工夫が非常に有効と思われるが、3次元的な複雑形状を持つ FRP 構造に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

本研究は、3次元の軽量化構造の局部コア形状より FRP 構造の力学性能向上への影響要素を分析し、新しい高性能の FRP 軽量化構造を開発するための設計製造法の確立を行うものである。

2. 研究の目的

(1) 今まで別々に行われてきた折紙工学と複合材料の研究成果を融合し、新しい FRP 折紙軽量化構造を開発する。

(2) 3次元の局部コア形状より FRP 構造の力学性能向上への影響要素を分析し、新しい高性能の FRP 軽量化構造を開発するための設計製造法を検討する。

(3) FRP 折紙軽量化構造の詳細設計および加工方法に関する基盤技術を開発することは本研究の主な目的である。

3. 研究の方法

本研究では、課題を達成するために、下記の手順で検討を行った。

(1) 代表者グループが既に得ている FRP 積層板・偏平シェルに関する研究成果をベースにし、FRP からなる三角錐や多角台形など折紙構造の基本コアに相当する部分構造に対し詳細な検討を行い、折線配置と繊維配向角より構造剛性補強への影響を理論的に分析し、FRP 折紙構造の基本コアの等価弾性係数を検討する。ここで、FRP 折紙構造から抽出した基本コアに対して、どれだけ正確に等価弾性係数が正確に評価できるかが主な研究課題となった。

(2) 各基本コアの等価弾性係数を組合せて、更に基本コア間の相互影響を検討した上で、FRP 折紙構造全体の等価弾性係数を求める。ここで得られた FRP 折紙構造の等価弾性係数

の結果は、次の各研究にとって最も重要な基礎パラメータとなる。

(3) 折線配置と繊維配向角を同時に変更させても精度よく変更解析できる最適化システムを開発して、FRP 折紙構造の最適化設計を実施する。

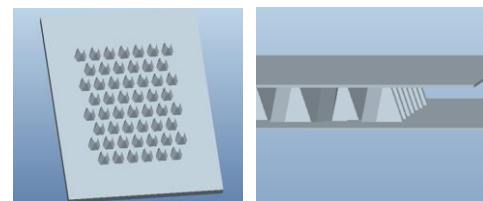
(4) 通常のプレス成形法の代わりに、FRP の容易に複雑形状構造を加工する性能を活かして、ガラス繊維と熱硬化性ポリエステル樹脂を使用した複合材料によるトラスコアパネルの成形法を提案し、試作実験により加工方法の妥当性および成形した FRP トラスコアパネルの加工性能について検証する。

(5) 有限要素法解析と振動台による加振実験を実施し、本加工法で成形した FRP トラスコアパネルと FRP ハニカムコアパネルの振動特性を検討して、本研究の提案する FRP トラスコアパネルの振動特性および衝突エネルギー吸収特性に関する検討を行う。

4. 研究成果

(1) FRP 軽量化パネルの開発

構造軽量化を目指して提案したトラスコアパネルとは図1に示すように平面に稜と頂点を削った三角錐状のセルを千鳥状に配置されるパネルである。このようなコアパネルを2枚表と裏に逆にして重ね合わせ接合することによってトラスコアパネルが製作される。



(a) シングルパネル (b) ダブルパネル

図1 トラスコアパネルの構造

トラスコアパネルのコア構造と形状パラメータを図2に示す。図中より、トラスコアは頂面と底面に正三角形の角部をカットして得られた六角形を、側面に3つの台形と3つの長方形を交互貼り付けて構成される。aは側面の台形の底辺長さ、bは側面の台形の頂辺の長さ、cは側面の長方形の底辺長さ、hはコアの高さである。これらの形状パラメータを変えることによってコアの形状を調整することができる。

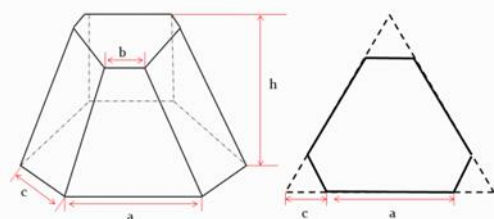


図2 トラスコアと形状パラメータ

本研究では、熱硬化性ポリエステル樹脂と補強材のガラス繊維を使用した FRP を用いて

トラスコアパネルを成形することを考案する。成形用金型の材質にはアルミニウムを使用し、マシニングセンターを利用し製作した成形金型を図3に示す。図中より、1回の成形工程では4個のコアが成形される。

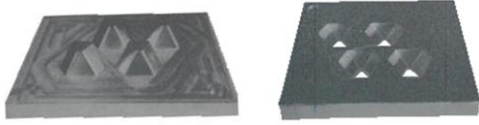
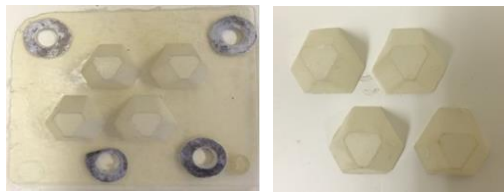


図3 トラスコアパネルの成形用金型

図3に示す成形金型を用いて、トラスコア成形過程は次の通りである。(1)アセトンで金型を洗浄して、離型剤を2回凹型表面に塗り込む。(2)熱硬化性ポリエステル樹脂に硬化剤を3%添加して、完全にかき混ぜる。(3)樹脂を凹型表面に塗り、ガラス繊維を張り付け、さらに樹脂を塗る。(4)最後に凸型を上からプレスして、4時間ほど加圧状態で硬化させる。

成形したパネルとコア構造を図4に示す。同図(a)の中央にトラスコアが4個成形されており、周辺の4つの穴は金型の位置決め及びスペーサ用のピン跡である。同図(b)に示すのは余分な材料をカットして得られたトラスコアである。更に図5に示すように、交互に逆方向に沿って側面長方形同士を接着剤で接合させて、さらに両面からFRP平板を接着剤で接合して、FRPトラスコアパネルが得られる。



(a) 成形したパネル (b) トラスコア構造

図4 成形したパネルとコア構造

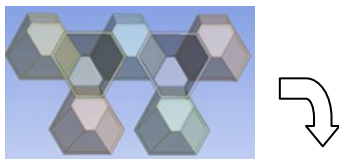


図5 成形したトラスコアパネル

(2) FRP 軽量化パネルの性能検証

前節と同様な加工方法でFRP平板を作成して、引張試験片を切り出す。作成したFRP平板と引張試験片を図6に示す。引張試験を行い、得られた測定結果を表1に示す。



図6 力学特性を測定する引張試験片

表1. FRP 材料の引張試験結果

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
1回目試験	3.82	0.38
2回目試験	3.74	0.38
平均値	3.78	0.38

また、前節の加工方法で得られたトラスコアの質量の平均質量と体積からFRP材料の密度は $1308\text{g}/\text{m}^3$ であることが判った。

検証のため、同じ条件の下で、FRPトラスコアパネルの固有振動特性について、汎用解析ソフトANSYSを用いる有限要素法解析と振動台による加振実験をそれぞれ行い、詳細な検討を行う。

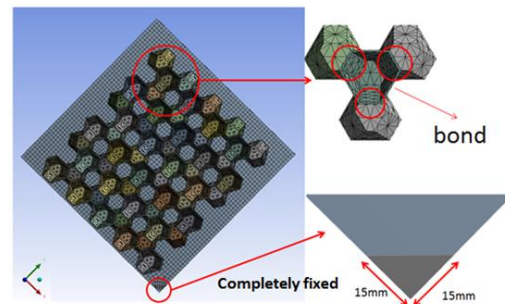


図7 FEM 解析モデルと拘束条件

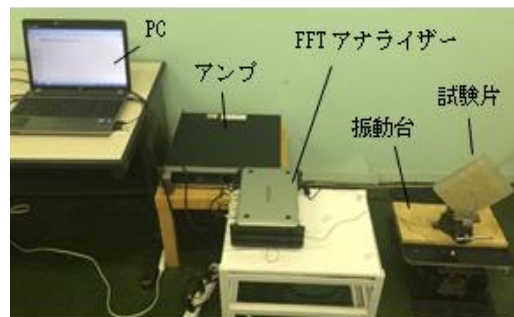


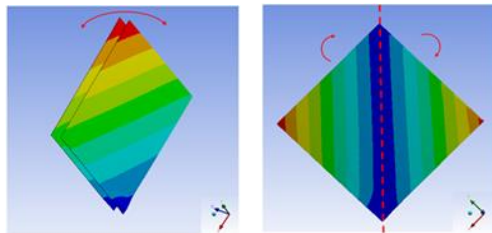
図8 振動特性測定システム

図7に示すのは有限要素法解析モデルと拘束条件であり、解析に必要な材料特性値には表1の計測データを用いる。振動特性の計測実験を実施するには、図8に示す振動台を用いるスイープ加振による固有振動特性の測定システムを使用した。

FEM 解析と測定実験で得られた固有振動数結果を表2に示す。表2の結果により、有限要素法の解析結果は振動台加振による測定結果に近いことが判り、更に、FEM 解析と測定実験で得られた固有振動モード形状を比較して、図9に示すような良く一致した結果が得られた。

表2. 固有振動数の解析値と実測値の比較 (Hz)

	解析値	実測値	誤差
1次振動数	51.1	48.5	5.3%
2次振動数	79.5	80.8	-1.6%



(a) 1次固有モード (b) 2次固有モード

図9 固有モードの結果

(3) ハニカムコアパネルとの比較

本研究で開発したトラスコアパネルの有効性を検証するため、現在最も軽量化パネル構造として使用されているハニカムコアパネルを比較対象として、前述と同様な方法でFRP ハニカムコアパネルを作成して、その振動特性を調べ、FRP トラスコアパネルと比較し検討を行う。

そのため、図10に示す3Dプリンターを使いハニカムコアを作るためのABS製の金型を作成する。それからABS製の金型の隙間にガラス繊維と硬化剤を添加したポリエステル樹脂を入れて硬化させて、さらにABS製の金型を壊し外すことによってハニカムコアが得られ、最後に2枚の平板を両面から接着剤で接合して、図11に示すFRP ハニカムコアパネルが得られる。



図10 3Dプリンターとハニカムコア金型

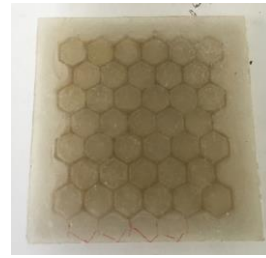


図11 FRP ハニカムコアパネル

図12に示すのは、FRP ハニカムコアパネルの振動解析モデルであり、その材料特性値にはトラスコアパネルと同じデータを用いる。

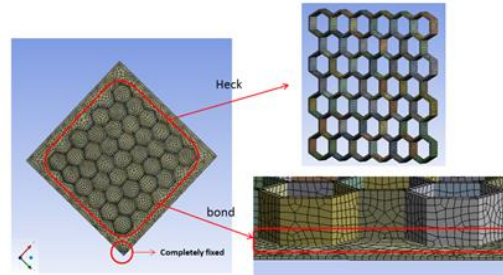


図12 ハニカムコアパネルの解析モデル

解析して得られた固有振動モードは図9の固有振動モードと一致しており、さらにFRP ハニカムコアパネル固有振動数を、前述のFRP トラスコアパネル固有振動数の結果と比較し、その結果を表3と表4にまとめる。

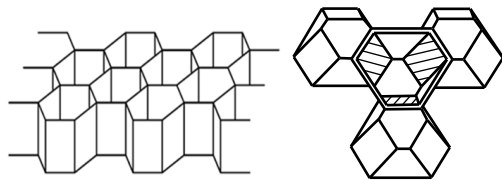
表3 2種類パネルの解析結果の比較 (Hz)

	1次振動数	2次振動数
トラスコアパネル	51.1	79.5
ハニカムコアパネル	42.5	70.8
比較	20.2%	12.3%

表4 2種類パネルの実測結果の比較 (Hz)

	1次振動数	2次振動数
トラスコアパネル	48.5	80.8
ハニカムコアパネル	44.0	75.8
比較	10.2%	6.6%

表3と表4の結果により、解析値での1次と2次振動数は、それぞれ20.2%と12.3%高く、実測値での1次と2次振動数は、それぞれ10.2%と6.6%高いことを示している。さらに、実物を計測して得られたトラスコアパネルの質量294gとハニカムコアパネルの質量292gのことを考慮し、単位質量あたりの固有振動特性を比較しても、解析値での1次と2次振動数は、それぞれ20.0%と11.6%高く、実測値での1次と2次振動数は、それぞれ10.0%と6.2%高いことを示している。よって、同じ材料で作成したトラスコアパネルの固有振動特性は明らかにハニカムコアパネルより改善されたことを示している。



(a) ハニカムコア (b) トラスコア

図 13 ハニカムコアとトラスコアの比較

その理由を分析すると、図 13(a)に示すようにハニカムコアの六角柱側面が上下端面に直角で互いに平行面になっていることに対して、同図(b)に示すトラスコアの斜線で表す長方形側面が上下の平面に対して交互に異なる斜め方向に接合されているため、この傾いた側面板がせん断変形を抑制する効果を果たしていると思われる。

さらに、ハニカムコアの上下端面に直角で表面平板と接合することに対して、トラスコアの上下端面に六角形の端面で表面平板に接合することとなる。この違いによりパネルの曲げ剛性を高めることが考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ①C. Kong, X. Zhao, I. Hagiwara, Progressive multistep press forming of a truss core panel for floor structure of electric vehicle, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 4, No. 2, PP. 200-217, 2018
- ②Y. Yang, S. Ishida, X. Zhao, I. Hagiwara, Vehicle energy absorbers consisting of foldable cylinders using response surface methodology, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 3, No. 5, PP. 380-394, 2017
- ③C. Kong, X. Zhao, I. Hagiwara, Hydroforming process of manufacturing for reverse spiral origami structure, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 3, No. 4, PP. 347-364, 2017
- ④Y. Hu, X. Zhao, T. Yamaguchi, M. Sasajima, T. Sasanuma, A. Hara, Effects of the Cone and Edge on the Acoustic Characteristics of a Cone Loudspeaker, *Advances in Acoustics and Vibration*, Vol. 2017, Article ID 2792376, 2017
- ⑤G. Cui, J. Dou, S. Li, X. Zhao, X. Lu, Z. Yu, Slip Control of Electric Vehicle Based on Tire-Road Friction Coefficient Estimation, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2017, Article ID 3035124, 2017
- ⑥J. Wang, S. Chen, R. Chi and X. Zhao, Study on the Structure Parameters Simulation and Optimization for Stamping Quality of Plate Heat Exchanger, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 789-790, PP. 300-305, 2015

[学会発表] (計 8 件)

- ①C. Kong, X. Zhao, I. Hagiwara, A new local thickening reverse spiral origami thin-wall construction for improving of energy absorption, 2017 International Conference on Mechanical Engineering and Applied Composite Materials (MEACM2017)
- ②田志磊, 孔呈海, 景陽, 呉瓊, 趙希祿, 多段階板金プレス法によるトラスコアパネル成形実験の研究, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 2017
- ③景陽, 孔呈海, 趙希祿, 反転ねじり型折紙構造とその加工法に関する研究, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 2017
- ④何帥, 趙希祿, 繊維強化プラスチックによる折紙構造の開発, 日本機械学会計算力学講演会, 2016
- ⑤何帥, 趙希祿, 繊維強化プラスチック製のトラスコアパネルの開発, 2016 年度日本精密工学会春季大会, 2016
- ⑥田志磊, 孔呈海, 何帥, 趙希祿, 多段階板金プレス法によるトラスコアパネル成形過程における中間モデルの検討, 日本機械学会計算力学講演会, 2016
- ⑦孔呈海, 趙希祿, 萩原一郎, 反転らせん型折紙構造のハイドロフォーミング成形工程の最適設計, 日本機械学会設計工学システム講演会, 2016
- ⑧C. Kong, X. Zhao, I. Hagiwara, Mathematical simulation and optimal design of reverse spiral origami thin-wall tube processed by hydroforming, The 35th International Conference on Simulation Technology, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

趙希祿 (ZHAO XILU)
埼玉工業大学 工学部 教授
研究者番号: 30610307

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし