

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760076

研究課題名(和文)ポアソン効果により高エネルギー吸収特性を発現する傾斜フォーム充填衝撃吸収構造の開発

研究課題名(英文)Development of impact absorbers filled with gradient foams having high Poisson effect

研究代表者

樋口 理宏 (Higuchi, Masahiro)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：50455185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、薄肉円筒に軽量なコア材として内挿したシタクチックフォームのポアソン効果と傾斜構造を効果的に利用した新規の衝撃吸収構造の開発を目的とした。ポアソン効果を有するシタクチックフォームと円筒の相互干渉によりエネルギー吸収量が増加し、フォームのひずみ速度依存性により大きな静動比が得られることがわかった。また、高速衝撃の場合、衝撃吸収構造の衝突端のみを高密度、高剛性にすることで高いエネルギー吸収特性が得られると同時に固定端の荷重を低く抑えられること示した。さらに、コア材の材料特性を傾斜分布あるいは積層分布させることで、低速衝撃下における荷重-変位線図を操作可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of the research is to develop of novel impact absorbers using Poisson effect of a syntactic foam filled into a thin-walled circular tube, and then to examine the effect of graded structure of the foam. Experiments reveal that the interaction between transverse deformations of the foam and progressive buckling of the tube enhanced the absorbed energy, and the absorbed energy in impact load is higher than that in static load because of the strain rate effect of the matrix of the foam. Furthermore, dynamic finite element analyses suggested that by increasing the density and rigidity near the impacted end of the structure, the energy absorption just after a high-velocity impact could be dramatically enhanced without increasing the maximum load at the fixed end. In addition, the load-displacement diagram in the low velocity impact can be controlled by the graded distribution of the material properties of the core foam material.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料工学

キーワード：衝撃工学 発泡材料 エネルギー吸収 構造設計

1. 研究開始当初の背景

マイクロバルーンと呼ばれる中空微粒子を樹脂材料に充填することにより作製されるシタクチックフォームは、低密度、低吸水性を示し遮音性に優れることから、海洋探査機の浮力材など、海洋船舶産業で幅広く利用されてきた。また母材やシタクチックフォームを変えることで、材料特性を容易に変更可能となる。同時に高い圧縮降伏強度を有することから軽量の衝撃吸収材としての応用が期待される。しかし、硬質な樹脂を母材とした場合、衝撃圧縮変形下において脆性となるため、シタクチックフォームを単体で衝撃吸収材としての利用は困難であり、衝撃吸収構造として広く用いられる薄肉構造のコア材としての利用が適当であると考えてきた。また、研究代表者の先行研究によりシタクチックフォームは発泡材であるが圧縮荷重下でポアソン効果を示す、つまり大きな横ひずみを生ずることがわかっていた。すなわち、薄肉要素とシタクチックフォームの変形による相乗効果により衝撃エネルギー吸収量を高められることが期待された。

また、傾斜機能材料に代表されるように、構造内で材料特性を変化させることで衝撃現象、振動現象において均質な材料とは異なる挙動を示すことが示されてきていた。そこで、衝突により発生する応力波伝ばに伴う衝撃吸収構造の両端部の荷重に関する動的非平衡状態を、傾斜構造により積極的に誘発させ入力荷重に対して出力荷重を低減する衝撃吸収手法に着想した。

2. 研究の目的

本研究課題では、アルミ合金から成る薄肉円筒に軽量のコア材として内挿したポアソン効果を有するシタクチックフォームとアルミ円筒の変形の相互干渉により高いエネルギー吸収特性を示す衝撃吸収構造の開発を第一の目的とした。さらに、衝撃吸収構造に傾斜構造を付与することで上述した新規の衝撃吸収手法の発現および荷重 - 変位関係の制御法について検討を行った。

3. 研究の方法

(1)シタクチックフォーム充填薄肉円筒の衝撃エネルギー吸収特性評価

まず、シタクチックフォームのポアソン効果、すなわち圧縮荷重下における横方向変形と円筒の変形の相互干渉により、高いエネルギー吸収特性を発現させることを主な目的として、均質な材料組成を有するシタクチックフォームをコア材として用いた衝撃吸収構造の衝撃吸収特性の調査を行った。

シタクチックフォームを構成する母材には 3 種類のポキシ樹脂 (タイプ A: AER2603+RICACID MH-700, タイプ B: jER828+YH306, タイプ C: TRANSLUX D150, AXSON) を用いた。マイクロバルーンにはプラスチック製マイクロバルーン(F-80DE およ

び MFL-100CA, とともに松本油脂製薬), ガラス製マイクロバルーン(K1 および K37, とともに 3M) を用いた。これらは、広く流通しており低価格であり入手性の高いものとして選定した。マイクロバルーンの充填率は 50 ~ 60% とした。また、円筒の材質はアルミニウム合金(JIS A6063)に統一し、所望の寸法となるよう旋盤により機械加工して用いた。

まず、作製したシタクチックフォームに対して、万能試験機およびスプリット・ホプキンソン棒法試験機による広範囲のひずみ速度域に対する圧縮試験を実施し、シタクチックフォームの機械的特性について調査を行った。

さらに、衝撃圧潰シタクチックフォーム、アルミ円筒およびフォーム充填円筒のエネルギー吸収特性を万能試験機および落錘式衝撃試験機による評価した。

(2)傾斜フォームおよび変断面構造による衝撃吸収特性評価

衝撃吸収構造が高速衝突した際、材料内部で応力波が伝ばしている箇所に慣性力が生じ衝撃端の反対側から出力される荷重が低減されることで被保護空間の緩衝効果が得られと考えられる。すなわち、応力波伝ばに伴う衝撃吸収構造の両端部の荷重に関する動的非平衡状態を、傾斜構造により積極的に誘発させ入力荷重に対して出力荷重を低減する衝撃吸収手法について動的有限要素解析により検討を行った。ここでは、提案する衝撃吸収手法を得るためには両端部の荷重に関する動的非平衡状態が生成されれば良いため、フォーム単体に対して有限要素解析を実施した(図 1)。解析には動的陽解法に基づく汎用コードである Altair RADIOSS ver.11 を用いた。また、円筒単体に対しても同様な衝撃吸収効果を得られるかを検証するため、衝突部と固定部で肉厚の異なる変断面円筒の衝撃解析も実施した。

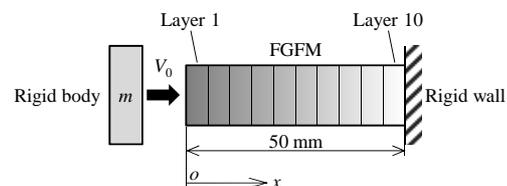


図 1 解析モデル

(3)傾斜フォーム充填円筒の軸圧潰特性評価

さらに、傾斜フォームを円筒に充填した際の挙動を把握するために、異なる特性を有するシタクチックフォームを 2 層積層したコア材をアルミ円筒に充填し、万能試験機による軸圧潰試験を実施した。ここでは、動的非平衡状態を利用した衝撃吸収手法ではなく、フォームの傾斜構造により荷重 - 変位関係を操作可能かについて重きを置いて調査を行った。

4. 研究成果

(1) シンタクチックフォーム充填薄肉円筒の衝撃エネルギー吸収特性評価

一般的な発泡材料は圧縮変形下においてポアソン比が小さく、横方向の変形は微小であることが知られている。一方、本研究課題で作製したシンタクチックフォームを静的圧縮した際の様子を画像解析した結果、公称ひずみを用いてポアソン比を定義すると、弾性域からプラトー応力領域にかけて 0.3 程度のポアソンを示すことがわかった(図2)。また、マイクロバルーンの種類に関わらず、シンタクチックフォームの圧縮降伏応力およびプラトー応力は、母材の樹脂特性に従ってひずみ速度の影響を強く受けることが明らかとなった。

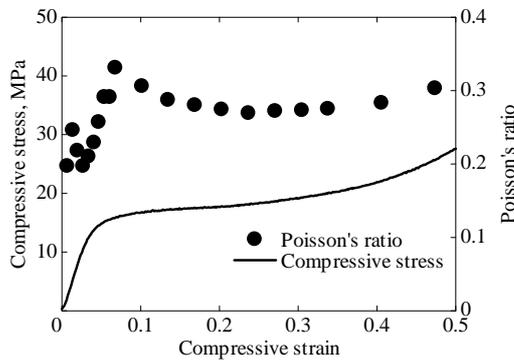
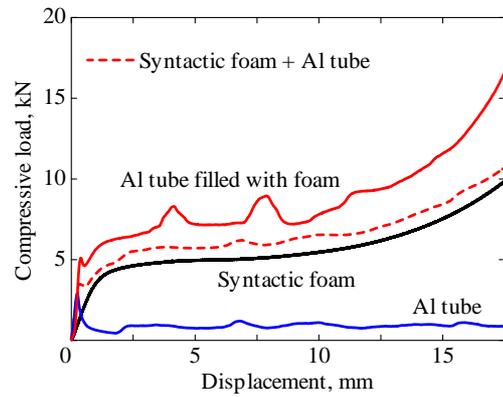


図2 シンタクチックフォームの応力 - ひずみ関係(母材:タイプA,マイクロバルーン:F-80DE,密度 460 kg/m³)

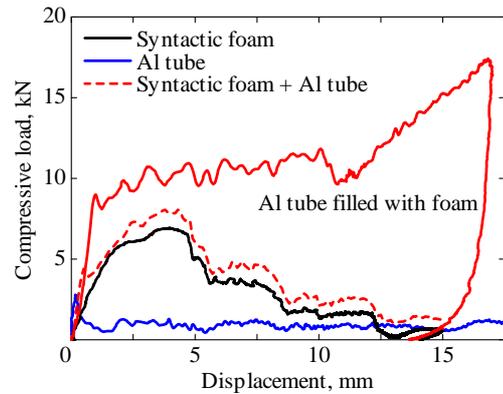
図3(a)に、万能試験機による準静的試験により得られたシンタクチックフォーム、アルミ円筒、フォーム充填円筒の圧縮荷重 - 変位線図を示す。また、落錘衝撃試験により得られた結果を同図(b)に示す。なお、同図のシンタクチックフォームは図2と同様であり、試験片寸法は直径 20 mm, 長さ 30 mm, アルミ円筒は内径 20 mm, 厚さ 0.3 mm, 長さ 30 mm である。フォーム充填円筒はフォームを接着することなく円筒に内挿した。なお内挿時の接着の影響は小さいことを確認している。図3(a)の静的試験においては、フォーム充填薄肉円筒は、シンタクチックフォームの横方向の変形とアルミ円筒の連続塑性変形が相互干渉し、それら単体の場合と異なった変形モードを示した。そのため、シンタクチックフォーム充填薄肉円筒の試験結果は、単体の結果を足し合わせた場合より圧縮荷重が向上した。一方、図3(b)に示すように、シンタクチックフォームは衝撃試験時に変形の初期段階で割れが生じ、単体では衝撃吸収材料として利用できないが、アルミ円筒に内挿することで割れが抑制され安定した荷重 - 変位関係が得られていることがわかる。さらに、降伏強度のひずみ速度依存性により、同図(a)の静的の場合と比較して荷重値が増加した。

図4に変形率 50%における各試験片のエネルギー

吸収量をまとめた。シンタクチックフォームとアルミ円筒の相互干渉によりエネルギー吸収量が増加し、フォームのひずみ速度依存性により大きな静動比が得られたことがわかる。また、他のエポキシ樹脂やマイクロバルーンを利用した場合でも同様の結果が得られており、汎用性の高い構造であるといえる。なお、エネルギー吸収量を試験片質量で除した単位質量あたりのエネルギー吸収量に換算すると、フォーム充填円筒のエネルギー吸収特性はアルミ円筒単体と比較して 20 ~ 30% の増加となり、質量効率に優れることが明らかとなった。



(a) 準静的



(b) 衝撃

図3 フォーム充填円筒の荷重 - 変位関係

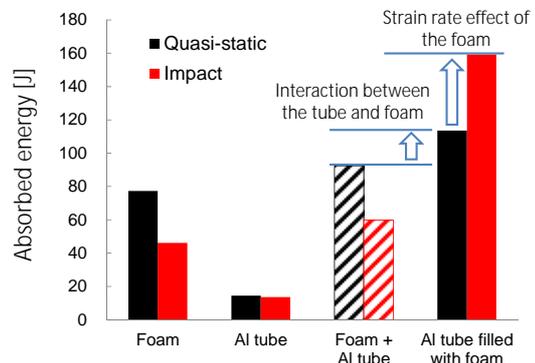
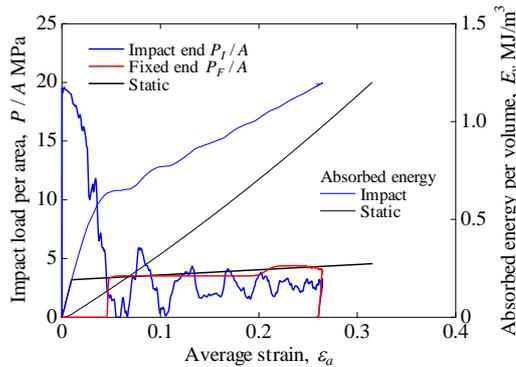


図4 エネルギー吸収量の比較

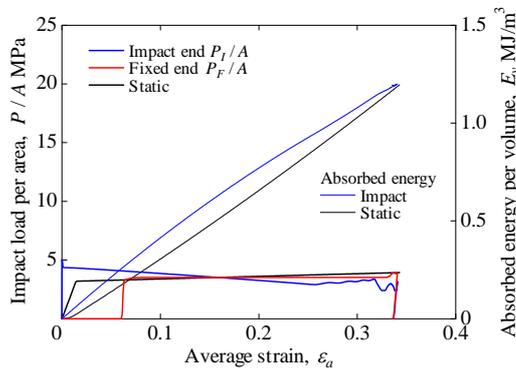
(変形率 50%)

(2) 高速衝撃下における傾斜フォームおよび変断面構造による衝撃吸収特性評価

動的非平衡状態を利用した衝撃吸収構造の検証を行うため、有限要素解析を実施した。ここでは、材料内部で母材に対する相対密度が0.4~0.9で変化する仮想的な傾斜フォームを考え、有限質量の剛体が衝突する際の解析を行った。図5は衝突速度50 m/sの場合であり、図5(a)に傾斜フォーム（相対密度が衝突端から0.9~0.4に減少）、同図(b)に相対密度0.4の均質フォームの結果を示す。傾斜フォームの場合、相対密度が大きな衝突端で大きな衝撃荷重が生じているのに対して、被保護空間となる固定端（低密度）では静的の場合と同程度の小さな衝撃荷重となっていることがわかる。また均質の場合静的と動的で大きな差はない。このように、衝突端側に高密度、高剛性・高強度な特性を配すことで、このような高速衝撃下において衝突直後のエネルギー吸収量を劇的に高め、且つ、固定端側の荷重値を低く抑えることが可能であることがわかった。なお、変断面円筒についても同様の効果が得られることがわかった。また、衝突速度が10 m/sのような低速衝撃の場合の荷重-変位線図は静的解析により評価できることも明らかとなった。つまり、傾斜構造により荷重-変位線図を変更し、所望のエネルギー吸収特性を発現することも可能となる。



(a) 傾斜フォーム



(b) 均質フォーム

図4 有限要素解析結果（衝突速度50m/s）

(3) 傾斜フォーム充填円筒の軸圧潰特性評価

図6に異なる特性を有するシタクチックフォームを2層積層したコア材を内径20 mm、厚さ0.6 mm、長さ30 mmのアルミ円筒に充填した場合の軸圧潰試験結果を示す。図中のケース1はタイプB+K1、タイプB+K37の積層、ケース2はタイプB+K1、タイプC+K1の積層、ケース3はタイプB+K37、タイプC+K1の積層とした場合である（それぞれ母材エポキシ樹脂とマイクロバルーンの組み合わせであり、各層の長さは15 mmである）。

図6に示すように、コア材を2層積層することで、まず強度の低い層が降伏しプラトー領域を経て緻密化に伴う荷重増加により、強度の高い層が次に降伏し、再度プラトー領域を示しており、2段階の降伏・プラトー領域を発現していることがわかる。このように、コア材に傾斜構造を与えることで、低速衝撃下における荷重-変位関係、すなわちエネルギー吸収特性を変更することが可能となる。

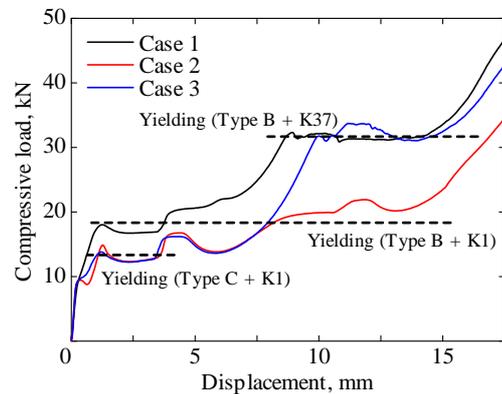


図6 傾斜積層フォーム充填円筒の軸圧潰試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Masahiro Higuchi, Shun Suzuki, Tadaharu Adachi, Hiroshi Tachiya, Improvement of Energy Absorption of Circular Tubes Subjected to High Velocity Impact, Applied Mechanics and Materials, (掲載決定, 査読有)

Masahiro Higuchi, Takuma Saka, Kenta Fujimoto, Tadaharu Adachi, Energy Absorption of Thin-Walled Circular Tube Filled with Syntactic Epoxy Foam Subjected to Axial Compression, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 12, 2012, pp. s133-s138 (査読有).

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsem/12/Special_Issue/12_s133/_article/-char/ja/

〔学会発表〕(計7件)

Masahiro Higuchi, Makoto Suzuki, Tadaharu Adachi, Hiroshi Tachiya, Axial Crushing Behavior of Aluminum Alloy Circular Tube

Filled with Syntactic Epoxy Foam,
ICEM2013-ACEM-12th, (Bangkok,
Thailand, November 26, 2013)

樋口理宏, 坂琢磨, 足立忠晴, 立矢宏,
傾斜機能発泡材料の衝撃特性評価, 日本
機械学会 M&M2013 材料力学カンファレ
ンス,(岐阜大学, 2013年10月13日).

Masahiro Higuchi, Shun Suzuki, Tadaharu
Adachi, Hiroshi Tachiya, Improvement of
Energy Absorption of Circular Tubes
Subjected to High Velocity Impact, ISIE2013,
(Osaka, September 6, 2013)

樋口理宏, 石原竜馬, 足立忠晴, 立矢宏,
シタクチックフォーム充填薄肉円筒の
軸圧潰挙動, 日本実験力学会 2013 年度年
次講演会, (由利本荘市文化交流会館カダ
ーレ, 2013年8月20日).

Masahiro Higuchi, Shun Suzuki, Tadaharu
Adachi, Dynamic Axial Crushing of Circular
Tubes Subjected to High Velocity Impact,
ISEM-ACEM-SEM7th ISEM'12-Taipei,
(Taipei, Taiwan, November 11, 2012)

樋口理宏, 藤本健太, 足立忠晴, 傾斜機
能シタクチックフォームの圧縮特性に
およぼすひずみ速度の影響, 日本実験力
学会 2012 年度年次講演会,(豊橋技術科
学大学, 2012年7月14日).

Masahiro Higuchi, Tadaharu Adachi,
Dynamic Mechanical Properties of
Functionally Graded Syntactic Epoxy Foam,
International Conference on Advanced
Dynamics and Model Based Control of
Structures and Machines, (Saint Petersburg,
Russia, July 7, 2012).

〔図書〕(計1件)

Masahiro Higuchi, Tadaharu Adachi,
Dynamic Mechanical Properties of
Functionally Graded Syntactic Epoxy Foam,
Chapter in book: Mechanics and
Model-Based Control of Advanced
Engineering Systems (Edited by A.K.
Belyaev, H. Irschik, M. Krommer), Springer,
2014, pp. 171-178.

〔その他〕

ホームページ等

[http://ads.w3.kanazawa-u.ac.jp/higuchi/
index.html](http://ads.w3.kanazawa-u.ac.jp/higuchi/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 理宏 (HIGUCHI, Masahiro)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号: 50455185