

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656412

研究課題名(和文) 高分子系ポラス体を用いた衝撃変形応答の可視化によるエネルギー吸収能改善

研究課題名(英文) Dynamic compressive response of porous polymeric materials characterized with high speed imaging and enhancement of energy absorption

研究代表者

向井 敏司 (Mukai, Toshiji)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40254429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：空隙を複合化したポラス体やセル構造体は衝撃エネルギー吸収能を有する構造材料として注目されている。衝突時の安全性を保障するためには、衝撃エネルギーを高効率に吸収することが大切である。本研究では、衝突時に物体へ負荷される応力が波として伝播する様子をサンプリング時間1 μ 秒の経時変化として捕捉するための可視化を試行した。また、試験結果の妥当性を判定するため、有限要素シミュレーションとの対比を行い、衝撃変形時に形成されるポラス体内部の不均一なひずみ分布を明確にした。

研究成果の概要(英文)：Porous materials have a potential for absorbing impact energy during the crashing of a vehicle either against another vehicle or a pedestrian, since the class of materials exhibits an extended stress plateau. Accurate evaluation of flow stress is noted to be important to develop a suitable absorber. In this study, compressive response was characterized under dynamic loading by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB). High speed imaging with the sampling time of 1-4 μ s was applied for the characterization of acrylic resin cube with or without perforations. The deformation behavior was monitored with shadowgraph imaging. The effect of existing perforations was co-related with the mechanical response of the polymer cube evaluated by the SHPB with three stress waves. The captured image revealed that the heterogeneous distribution of strain changed to homogeneous with deformation progress. As a result, the effect of geometrical imperfection on the dynamic response was characterized.

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：構造・機能材料

キーワード：構造・機能材料 ポラス材料 高速変形可視化 衝撃エネルギー吸収

1. 研究開始当初の背景

ポーラス構造化は、空隙を内在させることにより、応力プルトーひずみを増加させることが可能となる、いわゆる複合軟化の一手段である。強化因子を混合させる、いわゆる複合強化材料と設計思想は異なるが、塑性ひずみエネルギーの散逸性能を付与するといった付加機能を与える方策として、自動車やトラムカーなど移動構造体の衝突保安部材として応用されている。ポーラス体やセル構造体は高体積率の空隙を内包することから、降伏後には応力レベルがほぼ一定のプルトー領域を形成する。プルトー領域を広くすることは衝撃エネルギーの吸収持続時間を長くし、また、プルトー応力の高低を適切に設計することでできれば、衝撃エネルギー吸収能を高めることにつながる。

しかしながら、時速 50km/h などの衝突時には変形現象が数ミリ秒で完了するため、その変形挙動をマイクロ秒オーダーで捕捉しなければ、実際にどのような変形が生じているかを把握することは困難である。すなわち、衝撃荷重の作用による変形は物体中を波として伝播する応力、いわゆる応力波が伝わった部位では変形し、伝わっていない部位では変形しないという、変形領域の不均一分布を生じる。また、応力波は物体の端面で反射波として戻り、先の入射波と干渉し、波の重なりによる応力の増加を生ずるため、物体の変形とともに応力の分布も変化する。ポーラス体の研究はドイツや米国で先導的に行われ、衝撃エネルギー吸収に用いられている事例も多いが、高速変形応答に関しては未知な部分が多く、まだまだ改良の余地があるものと考えられる。

2. 研究の目的

一般に材料の衝撃荷重に対する耐性は、シャルピー試験器などを用いて、破壊に至るまでのエネルギー差の高低で判断されることが多い。シャルピー試験器では、JIS などにより規格化された形状の試験片を用いることで、材料の衝撃強さを相対評価することは可能である。しかしながら、荷重を付与するためのハンマー形状が複雑であるため、試験片に作用させる衝撃荷重も必然的に複雑となり、試験片のリアルタイムな変形応答解析は困難を極める。他方、材料にランプ状の応力波を付与する衝撃試験法として、スプリット・ホプキンソン棒法 (split Hopkinson pressure bar method; 以降 SHPB) が用いられ、高精度で材料の衝撃変形応答が解析されている。この手法では応力の伝播について、試験片

を挟む 2 本の弾性棒表面に貼り付けたひずみゲージにより計測し、一次元の波動方程式から、高速変形中のひずみ速度、ひずみ、および応力を算出する。

ポーラス材やセル構造体は中実材料と比較して、空隙体積率に応じて密度が低くなるため、伝播速度 ($c = (E/\rho)^{1/2}$; E : ヤング率, ρ : 密度) が遅くなる。また、セル構造体の変形初期、たとえば、付与されるひずみが 0.02 以下では、圧縮試験片の両端面で応力の不一致を生じ、セル構造体が衝撃変形を受ける際に材料内部では応力は不均一となっていることが予測される。本研究では衝撃変形応答を理解するため、高分子材料に複数の貫通孔を設けたモデル試験片を用いて変形の可視化を行い、ポーラス構造材料の高速変形挙動を明確にすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、既設の SHPB にシャドウグラフ法による変形応答解析システムを付設し、衝撃変形可視化システムを構築した。その後、モデル試験片を用いたポーラス材料の衝撃変形応答解析を実施した。具体的には、サンプリングタイム $1 \mu\text{sec}$ で連続撮像が可能な高速度ビデオカメラを用いて、先述の SHPB により衝撃圧縮試験中の試験片について変形挙動を観察した。なお、本研究では試験体に光が透過する PMMA (アクリル) 材を選択し、複数の貫通孔を空けることにより、ポーラス体モデル材を設定した。また、シャドウグラフ法を適用することにより、圧縮変形により生ずる試験片の体積膨張から、ひずみの伝播部位を光の陰における濃淡として、リアルタイムに撮像することにより視覚化した。特に試験片に導入した貫通孔部の表面近傍に生ずる応力集中部位と変形方向を視覚化した。

なお、実験に平行して、陽解法有限要素シミュレーションにより、試験片と同一形状のポーラス材料モデルについて、応力分布の経時変化を算出した。有限要素シミュレーションによる応力分布と実験により撮像されたひずみ分布を対比することにより、捕捉した結果の妥当性を検討した。

また、マクロな形態は大きく異なるものの衝突保安部材としてバンパーなどに用いられている中空円管について、高速圧縮試験を行い、エネルギー吸収能を評価した。

4. 研究成果

(1) シャドウグラフ法による衝撃変形の可視化

ホプキンソン棒法試験機および高速度ビデオカメラを活用し、シャドウグラフ法を用いて、PMMA 試験片について、ひずみ分布

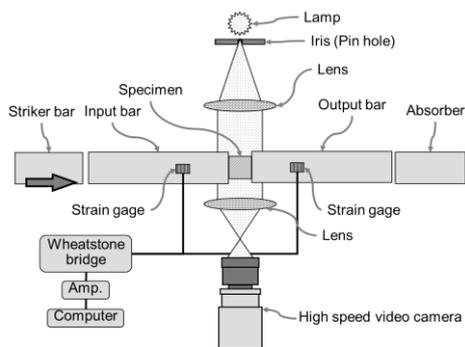


図1 衝撃変形撮像システムの概略図

を観察するためのシステムを構築した。概略を図1に示す。打撃棒の速度を調整することにより、一辺10mmからなる立方体試験片の平均ひずみ速度を約 $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ となるように設定した。はじめに、貫通孔のない中実試験片および貫通孔を1個設けたポーラスモデル試験片について、衝撃圧縮変形挙動のリアルタイム観察及び変形応答解析を実施した。中実試験片ならびに貫通孔有り試験片について、衝撃圧縮荷重を作用させたところ、ひずみが集中した箇所が影となって現れ、試料中を音速に近い速度で伝播することがわかった。

引き続き、ポーラスモデル試験片の可視化実験を行った。貫通孔を2個、4個、9個設けた試験片について、衝撃圧縮荷重を作用させた場合の変形応答を調査した。構築したシャドウグラフ法を用いて変形の様子を観察したところ、変形とともに影が発生し、試験片内部を高速で伝播すること、ならびに、試験片と応力棒の端面で影が反射することが明らかになった。立方体形状の試験片が一軸圧縮変荷重を受け、圧縮軸と垂直方向へ膨張することにより、凸レンズの役割を果たし、ひずみ分布が影と

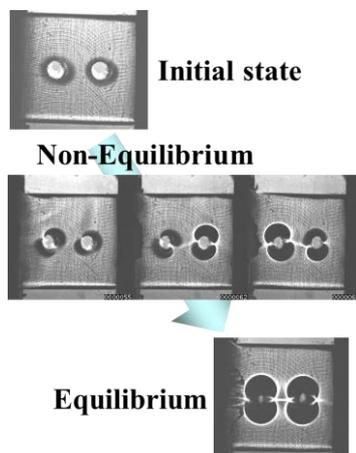


図2 Shadow graph法により撮像した貫通孔有PMMAサンプルの高速変形の様子

なって発現したものである。貫通孔を2個設けた試験片の観察例を図2に示す。変形初期には孔周辺で応力集中に対応した影の大きさが左右交互で徐々に大きくなり、変形後期には左右の影領域がほぼ同等の比率で拡大した。すなわち、変形初期には端面で反射した応力波が重積し、試験片内部のひずみは不均一に増大するが、反射と重積が繰り返されることにより、比較的均一な変形へと遷移したことがわかった。また、貫通孔の体積率を同一にしたポーラス体について、破壊に至るまでの応力-ひずみ曲線を図3に示す。同一体積で有りながらも、孔形態が異なることにより破断ひずみが異なる結果となった。孔有り試験片では、変形と共に孔部付近の影領域が拡大した。最終的には荷重作用方向に対して、約45度の角度でき裂が形成されることを確認した

(図4参照)。塑性変形エネルギーを評価したところ、2個の貫通孔を圧縮軸と垂直方向に設けたポーラス体(2-V)で最も低いエネルギーを示す結果を得た。

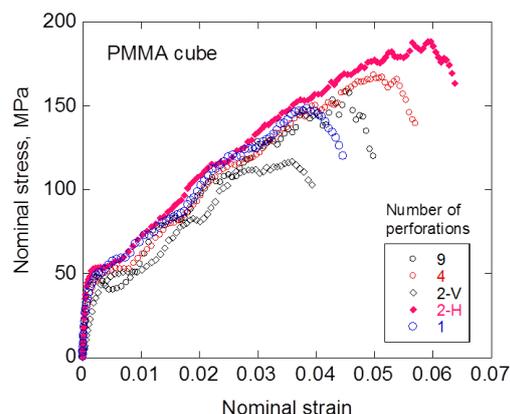


図3 異なる孔形態を有するPMMA試験片の衝撃圧縮試験による公称応力-公称ひずみ曲線

(2) PMMA ポーラス体の衝撃変形シミュレーション

可視化実験に使用したものと同一形状を有する中実およびポーラス構造立方体を3次元でモデル化し、陽解法有限要素シミュレーション(FEM)を用いて、高速圧縮荷重が作用する場合の応力分布を描画した。なお、衝撃試験の場合と条件を統一するため、剛体壁の移動速度は10 m/sとし、ポーラス体試験片の高さ10mmに対して、公称ひずみ速度を 1000 s^{-1} に設定した。変形シミュレーションを実施したところ、変形とともにひずみ分布の移動が描画され、応力波の伝播を示唆する結果を得た。すなわち、応力波の伝播および重積により、入力棒/試験片、および試験片/出力棒の各接触端面における応力の時間変化は異なるものとなった。図5に計算

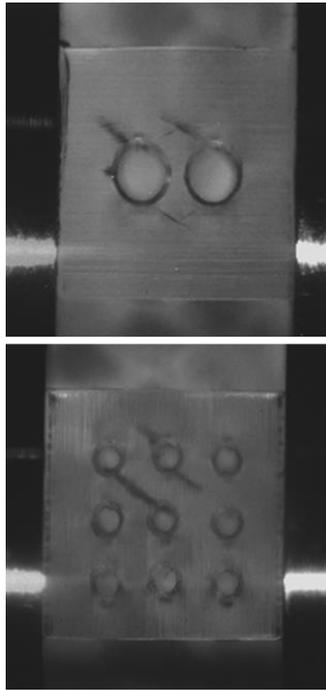


図4 衝撃圧縮荷重によるき裂発生例

結果の一例を示す。同一時点での端面荷重は変形初期には大きく異なるものの、変形が進むとともに同等の値へと近づくことがわかる。

貫通孔を1個、2個、4個、9個設けたポラス体モデルについて、FEMによる衝撃圧縮変形シミュレーションを実施した。その結果、図6に例示するように、圧縮軸に対して垂直方向の貫通孔端部にて応力集中を生じ、破壊の発生点となることがわかった。また、貫通孔の体積率を同一にしたポラス体の塑性変形エネルギーの高低を評価したところ、9個孔を設けた試験片を除き、衝撃圧縮試験と同様の順序となった。

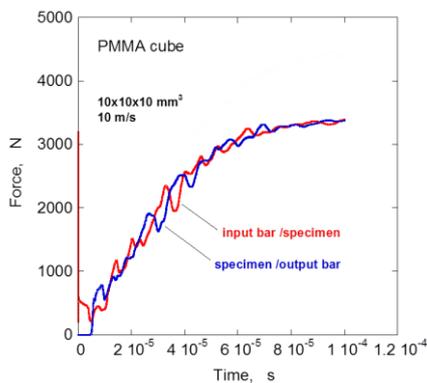


図5 入力棒／試験片および試験片／出力棒の各接触端面における荷重の時間変化例

得られた結果から、ポラス体中の応力波伝播挙動を整理した。衝撃圧縮試験により可視化されたひずみ分布の経時変化は、シミュレーションで導出された試験片内部における応力分布と良い一致を示した。また、異なる数の貫通孔を設けたポラス体について、衝撃荷重下でき裂が発生した箇所はシミュレーション上で応力集中が発生した箇所と一致したことから、シミュレーションの妥当性を確認した。クラックが形成されるひずみまで変形された場合には、応力波の重積によるひずみ分布の不均一は影響が低くなるため、ポラス構造の対称性や間隔の均等性が高ければ、変形の局所化を抑制し、エネルギー増大へ寄与する効果につながることを示唆された。

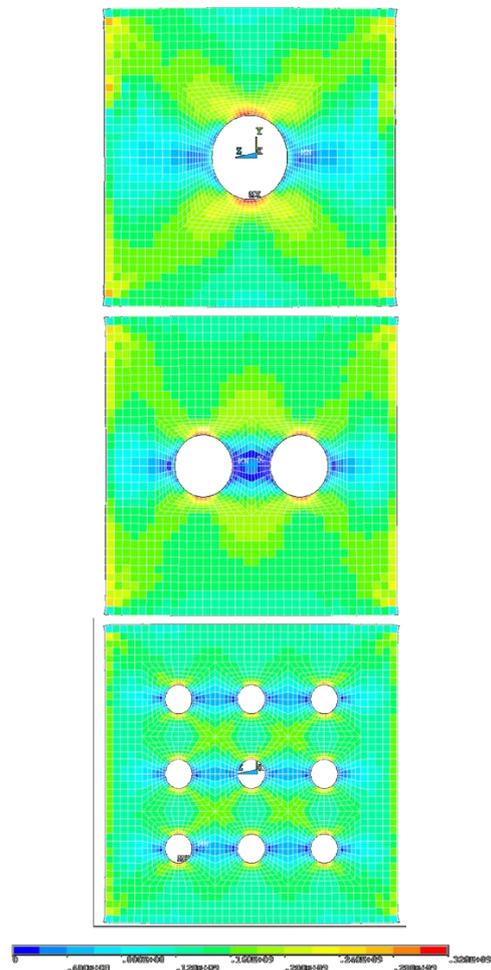


図6 衝撃圧縮負荷による破断前の相当応力分布の例

(4) 中空円管構造の衝撃エネルギー吸収

ポラス体と同様に衝撃エネルギー吸収能が期待される中空円管について、衝撃試験およびFEMシミュレーションを実施し、変形の素過程を確認するとともにエネルギー吸収量を評価した。素材は軽量化効果の大きい

マグネシウムとし、AZ31 合金および Mg-Y 合金の押出材を選択した。衝撃圧潰試験には SHPB 試験機の試験片接触端面を独自設計したものを用いた。また、試験とシミュレーションの結果を比較検証するため、FEM のメッシュモデルは打撃棒、入力棒、試験片、出力棒について、試験に用いたものと同じの形状・寸法とした。また、各材料の変形モデルには、一軸引張および圧縮試験の結果を入力データに用いた。

計算と実験の結果を比較したところ、一軸圧縮試験データを用いた計算結果と圧潰試験の結果が良い一致を示すことがわかった。Mg-Y 合金の中空試験片について得られた計算結果の例を図 7 に示す。他方、AZ31 合金を基礎データとした円管については、変形途中で破断する結果となった。そのため、変形にともなう吸収エネルギーの変化は、図 8 に示すように合金の変形能に応じて変化する結果となった。実験に用いた円管試験片の変形組織を確認したところ、Mg-Y 合金では変形途中で組織が微細化する動的な組織変化が起こることにより、変形途中で破断を生じることなく衝撃エネルギー吸収量が高くなる結果をもたらしたことがわかった。

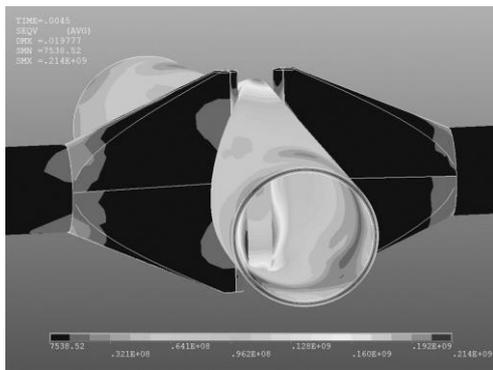


図 7 Mg-Y マグネシウム円管を衝撃圧潰した際の相当応力分布の例

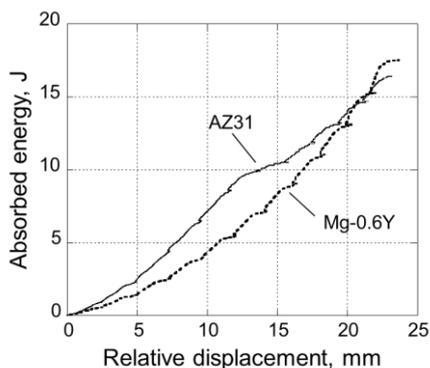


図 8 マグネシウム円管の衝撃変形にともなう吸収エネルギーの変化

今後は得られた結果を金属製のポーラス部材へ適用し、衝撃エネルギー吸収部材の創製に応用展開する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①上田哲也, 長尾昌樹, 池尾直子, 鷺尾宏太, 木下昭人, 加藤 晃, 向井敏司, マグネシウム合金製円管の衝撃エネルギー吸収特性, 日本金属学会誌, 第 78 巻, 第 4 号, (2014), pp. 142-148 (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- ① T. Mukai, Grain Refinement and Texture Modification of Magnesium Alloys for Improving Mechanical Performance, IUMRS-ICA2013, (Bangalore, 2013/12/18) (招待講演)
- ② J. Shimizu, C. Ishigaki, N. Ikee, Y. Sano, Y. Shimizu and T. Mukai, Mechanical Response of Mg-Ca Alloy Nails Penetrating the Bone Tissue and Their in vitro Degradation Behavior, ISETS 2013, (Nagoya, 2013/12/14)
- ③ 上田哲也, 長尾 昌樹, 向井敏司, マグネシウム合金製円管の衝撃エネルギー吸収特性, 日本金属学会 2013 年秋期大会 (金沢, 2013/9/17)
- ④ T. Mukai, T. Kawa and H. Kusano, Deformation behavior of porous materials characterized with high speed imaging, The 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE-2013), (Osaka, 2013/9/05)
- ⑤ M. Nagao, T. Terada, H. Somekawa, A. Singh, T. Mukai, Deformation behavior of Mg-Y alloy under dynamic compression loading, ISIE-2013, (Osaka, 2013/9/04)
- ⑥ T. Kawa, M. Nagao, T. Mukai, Evaluation of impact fracture toughness of AZ31 magnesium alloy, ISIE-2013, (Osaka, 2013/9/04)
- ⑦ 清水潤一, 向井敏司, 高強度マグネシウム合金製ネイルの人工骨への貫入に関する研究, 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会, (大阪, 2012/12/02)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 敏司 (MUKAI TOSHIJI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40254429

(2) 連携研究者

草野 英昭 (KUSANO HIDEAKI)
株式会社島津製作所・分析計測事業部・主任

(3) 研究協力者

川 智明 (KAWA TOMOAKI)
神戸大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生