

ゴム弾性を利用した金型不要の逐次部分張り出し 塑性加工法の開発

埼玉工業大学 工学部 機械工学科
教授 趙 希禄

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020007-B2)

キーワード：逐次部分張り出し，ゴム弾性，金型不要，チューブフォーミング，衝撃エネルギー吸収体

1. 研究の目的と背景

衝撃エネルギー吸収体として設計される工業製品はよく見受けられる。例えば、自動車の前面衝突用のエネルギー吸収部材として、エンジンを左右から挟むように設置されているサイドメンバーという中空の細長い角柱構造は、前面衝突時に横へ折れ曲がる現象が生じやすく、一旦それが発生すると、衝突エネルギー吸収量は極端に下がる。それに起因して、圧潰変形途中においては、圧潰反力の初期ピーク荷重は低く、横へ折れ曲がる現象が生じることはなく、できるだけ圧潰変形を長く続けることは重要な設計課題となっている。

この圧潰変形途中で横へ折れ曲がる現象が生じる問題を改善するため、折紙構造を緩衝材設計に適用する検討が行われている。圧潰変形途中で横へ折れ曲がる現象が生じる問題を改善するため、長い緩衝材の圧縮座屈の波長を求め、座屈の腹部と節部に切欠きを入れることによって確実にアコーディオン状の圧潰変形の実現を得たが、圧潰反力の初期ピーク荷重が高すぎるという欠点は解決できていない。そこで、周長方向に折り線を入れた反転らせん型折紙構造を緩衝材設計に適用することで、圧潰変形が長く続けられる特性を得、初期ピーク荷重も和らげる結果を得ているが、圧潰反力は低くなり、衝撃エネルギー吸収性能は低下した結果が得られた。ただし、折紙構造を緩衝材設計に適用すれば、圧潰しわの発生を有効にコントロールすることができる利点が確認され、側面壁に沿って様々なパターンの折り線を入れることにより緩衝材の性能向上に関する検討が行われている。

一方、折紙構造の形状の特徴からパラメトリック設計の表現法を考案した最適化解析を適用して、衝撃エネルギーが多く吸収する結果が得られている。また半割型サイドメンバーの設計に最適化解析を用い衝撃圧潰エネルギー吸収性能を改善した検討結果が発表された。

しかし、折紙型緩衝材は三次元的に複雑な形状をもつため、設計通りに加工するには困難となるケースが多いが、円筒に近い形状特徴からハイドロフォーミング法を利用することによって加工できると思われるが、加工工程が複雑かつ加工コストも高い原因で、折紙型緩衝材の実用化は実現できていないのが現状である。

本研究では、折紙型緩衝材の加工問題を解決するため、新たに突起付き円筒型緩衝材 (Cylindrical Absorber with

Protrusion, 以下 CAP) を提案する。円筒素材の軸方向に沿って一定の間隔で部分張り出しの突起部を設ける。さらに CAP を簡易かつ安価で加工するように、ゴムの弾性を利用した逐次部分張り出し成形法を利用して、実際の専用加工装置を開発し、試作実験で得た CAP の測定結果と FEM 解析結果を用いて、CAP の緩衝効果とそれを加工する新しい成形法の有効性を検証する。

2. 突起付き円筒型緩衝材 CAP

衝突する際に、緩衝材の圧潰反力の分布は一般に図 1 の青い線に示すような分布になる。緩衝材は衝撃荷重を受ける際に、一番最初の座屈しわが発生する時の座屈荷重は初期ピーク荷重と呼ばれ、通常、初期ピーク荷重が低くなるように緩衝材を設計する。理想的な緩衝材としては、赤い線で示すように、比較的低い初期ピーク荷重を持ち、圧潰変形途中では圧潰反力レベルを保ちながら圧潰変形を長く続けることが求められる。

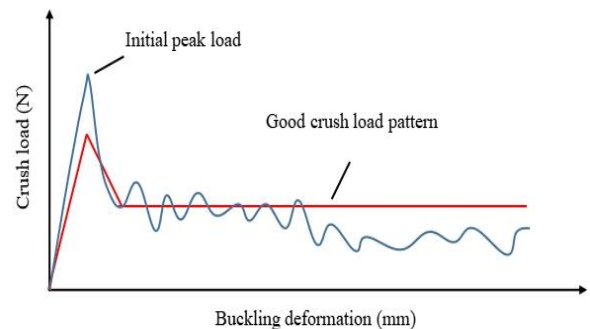


図 1. 衝突変位と荷重曲線

図 1 の赤い線で示す理想的な圧潰荷重分布を得られるように、図 2 に示すように円筒素材の軸方向に沿って等間隔で突起部を設ける形で新たな CAP を提案する。

本研究の検討対象である CAP の寸法は図 2 に示すように円筒素材の内径 50mm に対して、突起部の高さを内径の 10% の 5mm とし、基本構成部の長さは構成部の平均直径 $(50+60)/2=55\text{mm}$ に等しくなるように、円筒部の長さを 22mm、突起部の長さを 33mm とした。成形前の肉厚は 1.2mm、円筒素材の材質は炭素鋼 STKM11A である。

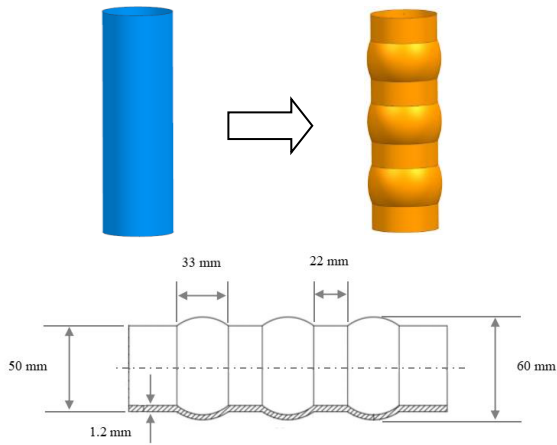


図 2. 突起付き円筒型緩衝材 CAP

3. ゴム弾性を利用した逐次部分張り出し成形法

図 3 に示すようなゴムを用いた逐次部分張り出し成形法を提案する。図 3 により、円筒素材の中に円柱状のゴムと金属丸棒を入れて、その外側に成形金型を設ける。

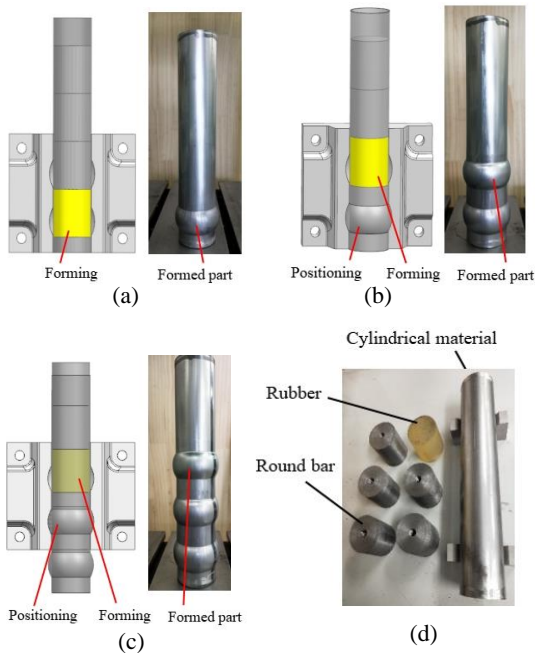


図 3. ゴムを用いた逐次部分張り出し成形法

成形する際に、まず、図 3(a)に示すように、両端から円筒素材の中にある金属丸棒に圧力を加えて、円柱状のゴムを外側へ膨らませることによって、円筒成形素材の一部だけを外側にある金型に貼り付けるように塑性変形させ、一段の CAP が得られる。

次に、図 3(b)に示すように、型締めをして、既に成形した CAP 形状を金型位置に密接に合わせることによって、円筒成形素材が正確な成形位置にセットされる。両端から円筒成形素材の中にある金属丸棒に圧力を加えて、金型の

成形部位における円柱状のゴムを外側へ膨らませることによって、第 2 段の CAP が得られる。同様に図 3(c)に示すように第 3 段の CAP が成形できる。

このような成形工程を軸方向へ逐次繰り返して、最終的な CAP が得られる。実際に使用する円筒素材、ゴムと金属丸棒を図 3(d)に示す。

開発した逐次部分張り出し成形法の実験装置を図 4 に示す。成形に使用する手動油圧プレスは大阪ジャッキ社製 30 トン (KPA-30S20) である。

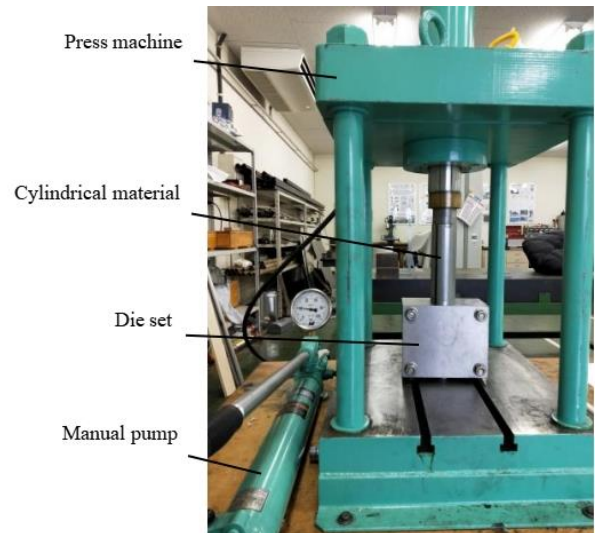


図 4. 逐次部分張り出し成形法の試作実験装置

逐次部分張り出し成形法の実験装置を図 5 に示す。2つの部分に分ける金型を締め付ける際に、両サイドにある楔形状の部分により正確に位置決めて、4つのコーナー部にあるボルトを通して金型を締め付ける。

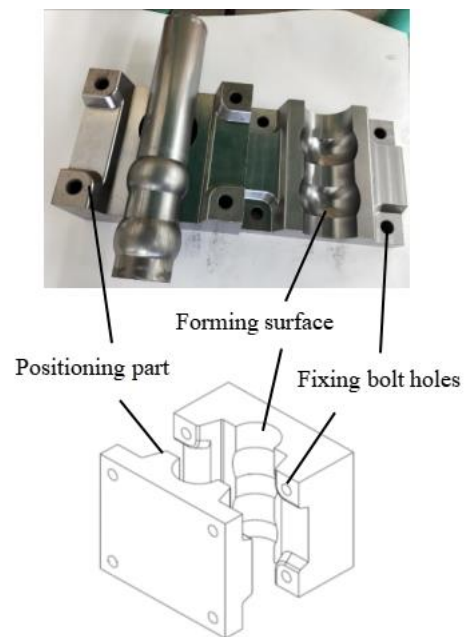


図 5. 逐次部分張り出し成形法の成形金型

実際に CAP の試作成形実験を行い、得られた CAP 成形品を図 6 に示す。



図 6. 成形した突起付き円筒型緩衝材 CAP

提案した部分張り出し加工法の成形性能を検証するため、試作品と同じ寸法の FEM 成形解析モデルを作成し、それを図 7 に示す。成形解析モデルは円柱状ゴム、円筒素材と金型の 3 つの部分から構成される。

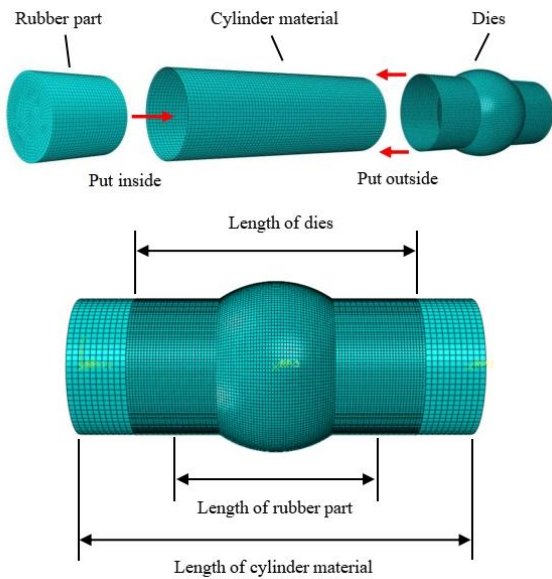


図 7. 部分張り出し成形の解析モデル

成形金型には剛体モデルを用い、円柱状ゴムには Mooney-Rivlin 材料モデル、円筒素材には弾塑性材料モデルをそれぞれ適用する。解析モデルの総節点数は 141368、総要素数は 54477 である。

円柱状ゴムに超弾性材料モデルの材料定数 $C_{10} = 0.32$ 、 $C_{01} = 0.08$ 、 $d = 0.0001$ を用い、そのひずみエネルギー密度関数 W を次式で表す。

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (1)$$

ただし、 \bar{I}_1 と \bar{I}_2 はそれぞれ偏差ひずみの第一と第二不変量、 J は体積比である。解析中では、式(1)のひずみエネルギー密度関数を微分することによって応力を求めることができる。

円筒素材の静的降伏応力 $\sigma_{y0} = 200\text{MPa}$ として、降伏後の硬化特性を図 8 に示す応力と塑性ひずみ関係グラフで与える。

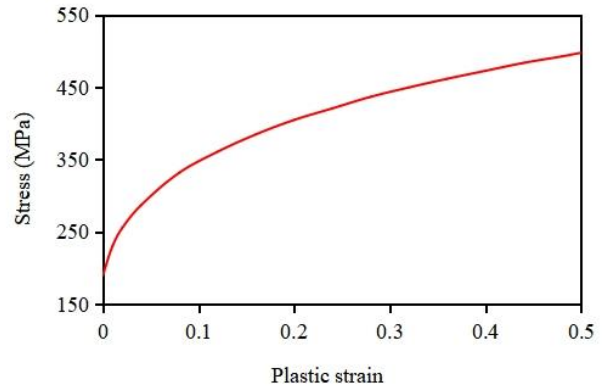


図 8. 成形材料の応力ひずみ線図

さらに、式(2)に示す Cowper-Symonds の式を用い、材料のひずみ速度依存性を考慮する。

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{c} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (2)$$

式中では、 σ_y は動的降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度であり、材料定数 $c = 8000$ と $p = 8$ とする。

成形のため、円柱状ゴムを円筒素材の内部に挿入し、円筒素材の外側に金型をセットする。各部分の接触面にペナルティ関数法による接触条件を適用し、実際の成形実験ではゴムと円筒素材の間に潤滑用のグリスを塗っていることを考慮して、その摩擦係数を 0.15 とした。

成形加工の荷重条件としては、図 4 に示す手動油圧プレスの圧力メータから読み取った圧力値を参考に、円柱状ゴムの両端から等分布荷重 100kN を加える。

解析して得られた CAP の軸方向に沿って円筒素材板厚分布の結果を図 9 に示す。横軸は成形しない円筒部の中心点から CAP 成形部を越えて、隣の円筒部の中心点までの距離である。赤い線は解析結果、青い線は実験結果を示す。○または△の標記は板厚測定点を示し、CAP の測定位置を図 9 の写真で示す。

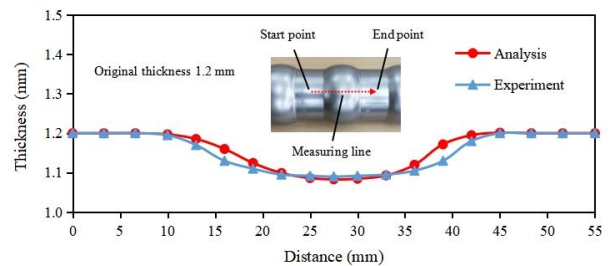


図 9. 解析し得られた成形後 CAP の板厚分布

図 9 により、得られた解析値と測定値は傾向的に一致しており、最も薄くなったのは部分張り出しによる突起部の中央にあり、その最小板厚の解析値 1.083mm、測定値 1.090mm である。

成形前の板厚 1.20mm に対して、測定値を用い計算した相対板厚減少率は $(1.20 - 1.09) / 1.20 = 10.1\%$ であり、提案

するゴム弾性による逐次部分張り出し成形法は安定的に CAP を加工することがわかる。

摩擦係数から成形品の板厚分布に対する影響を調べるため、摩擦係数を 0.1 と 0.2 に変えて解析して、得た板厚の最大誤差は 1.2% 以下であることがわかる。これは、部分張り出し成形過程においてゴム材と円筒素材の間の横方向への相対滑り傾向が非常に小さいことが原因になると考えられる。

4. 成形した CAP の圧潰変形性能

逐次部分張り出し成形法で加工した CAP の圧潰変形の性能検証を行うため、図 10 に示すようにオートグラフ(島津製作所製、AG-300KAG) を使い成形した CAP に対して、圧潰変形実験を行った。

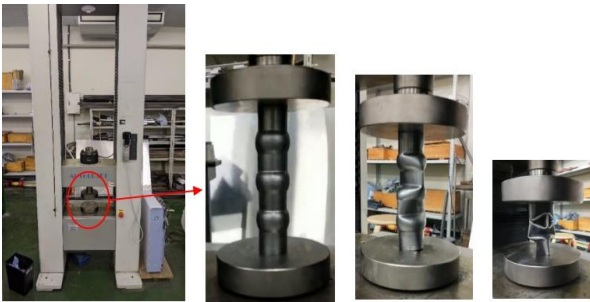


図 10. 成形した CAP の圧潰実験

軸方向に圧縮荷重を加える際に、図 10 に示すように圧潰変形の進行に伴い、CAP の中心軸に沿って互いに直角で交差する部分壁構造 (Partial Wall Structure, 以下 PWS) が自然に形成される現象が確認できる。この PWS が互いに支えることで、圧潰変形が比較的長く続けられ、衝撃エネルギー吸収性能改善に有利と思われる。

圧潰変形の性能検証のため、図 11 に示す圧潰変形モデルを使いシミュレーションを行った。作成した解析モデルを図 11 に示す。CAP の端部と剛体平板の間に接触条件を定義し、その摩擦係数を 0.15 として、CAP の上部から剛体平板で軸方向に沿って下へ強制変位で押し付ける。

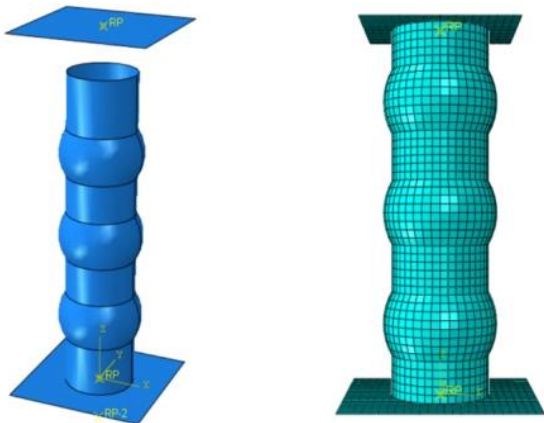


図 11. 成形した CAP の圧潰解析モデル

解析モデルの寸法は試作品と同様であり、総節点数は 3001、総要素数は 2867 である。成形した CAP の塑性ひずみによる影響を考慮するため、成形解析で得た CAP 形状と材料特性データを反映させて圧潰解析を行い、加工後の残留応力と残留ひずみの影響を無視することとした。

解析結果を測定実験の計測値と比較し、その圧潰変形の進行に伴う圧潰反力の比較結果を図 12 に示す。数値解析の結果により、測定実験と同様に、圧潰変形の進行に伴い中心軸に沿って互いに直角で交差する PWS が自然に形成することを示しており、全体的には解析値と測定値の傾向は一致することがわかる。

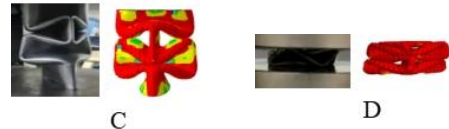
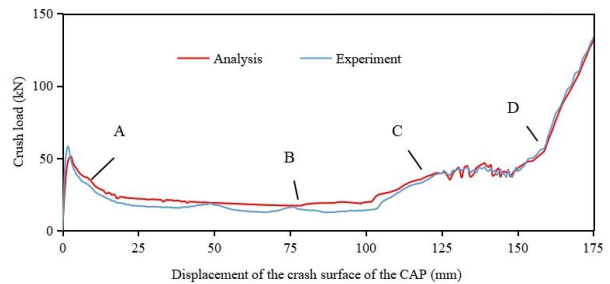
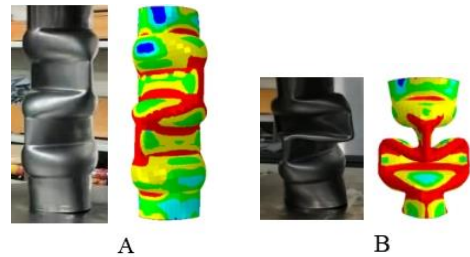


図 12. 成形した CAP の圧潰解析と圧潰実験の比較

図 12 の比較結果により、圧潰変形の初期段階では、軸方向の圧縮力により、荷重を受ける端面に一番近い突起部から座屈変形が始まり、初期座屈が発生する初期ピーク荷重が現れた後、軸方向に沿って順番に変形が進展する。CAP の圧潰しわは突起部に誘導され、自然に形成された直交に交差する PWS が互いに支え合う影響で、CAP の圧潰反力は 25kN 前後で安定するようになる。さらに圧潰変形が 100mm を過ぎた後半になって、各段の形成した PWS が互いに接触し始めてから、圧潰反力が再び高くなる特徴が確認できる。

図 12 の圧潰反力グラフは初期ピーク荷重を過ぎた後、比較的長く平坦な反力グラフを続ける特徴を持つことを示しており、さらに圧潰変形の後半においては、圧潰反力が再び高くなる特徴が見える。

成形した CAP の外へ膨らむ部分の板厚が薄くなることにより、初期ピーク荷重に対する影響を調べるため、成形した CAP 形状を使い、板厚だけを成形前の 1.2mm と設定して FEM 圧潰解析を行い、得られた初期ピーク荷重は図 12 の結果と比較して、その差は 0.5% 以下であり、非常に小さいことが判った。

5. CAP の圧潰変形モードによる影響

図 13 に示すように、CAP は軸方向の圧縮力を受ける時、側面壁の円筒部は圧潰変形により、円形断面から楕円形断面に変わり、徐々に複数の PWS が順番に形成される。

細長い PWS が下へ突起部を押し付ける際に、図 13 に示すような曲げモーメントが生じることで、その下にある円筒部を直交方向に沿う新しい PWS が形成させられることがわかる。このような形で繰り返して圧潰変形が進行し、全ての突起部が押しつぶされた後、互いに直交し交差する PWS 同士だけで圧潰変形を続けて行い、図 14 に示すように PWS の折りエッジに沿って赤線で示す空間トラスのように互いに支え合う構造になり、さらに PWS の中央部において新たな座屈変形が生じることによって、図 12 に示すように圧潰変形の後半では、圧潰荷重が再び高くなる原因と思われる。

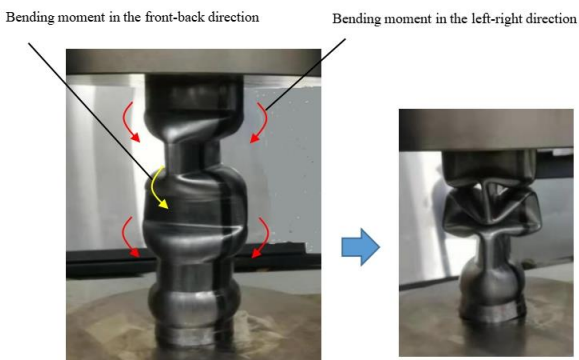


図 13. CAP の圧潰過程における PWS の形成

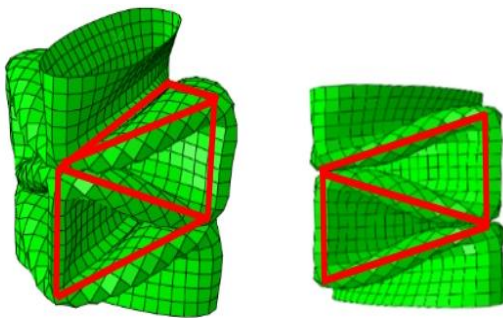


図 14. PWS の形成による空間トラス効果

一方、図 12 の圧潰変形と圧潰荷重の関係グラフに示すように、CAP は軸方向の圧縮力を受けて圧潰変形が発生する初期段階では、完全な CAP から最初の座屈変形が発生するために少し大きい初期ピーク荷重が現れることが確認できる。

一般に衝撃荷重が小さく、初期ピーク荷重より低い場合、CAP は普通の弾性ばねと同様に弾性変形をして緩衝材の役割を果たせるが、衝撃荷重が大きくなると、初期ピーク荷重を超える場合、CAP は初めて座屈現象が発生して、座屈しわを積み重ねながら圧潰変形を続けることにより、衝撃エネルギーを吸収する安全装置の役割を果たせると言っても良い。

6. CAP の圧潰変形モードによる影響

CAP の圧潰変形性能を詳しく検討するため、CAP を加工する前の円筒素材を対象に、同じ条件で圧潰変形実験と数値解析を行い、得られた実験と解析の結果を図 15 と図 16 に示す。

図 15 に示すのは円筒素材の圧潰変形実験の様子である。図 15 により、圧潰変形の過程では、円筒素材の軸方向に沿って細かい座屈しわを積み重ねて、圧潰変形が進行する特徴を示している。

図 16 に示すのは円筒素材と CAP の圧潰変形の解析結果を比較した結果である。図 16 により、円筒素材の圧潰変形の初期段階における初期ピーク荷重は比較的大きく、初期ピーク荷重を過ぎてから、圧潰反力は大きな振幅で上下に変動しながら、比較的不安定な圧潰変形が進展することが確認でき、その一回の圧潰反力の上下変動を一つの座屈しわが生じることに対応していると考えられる。

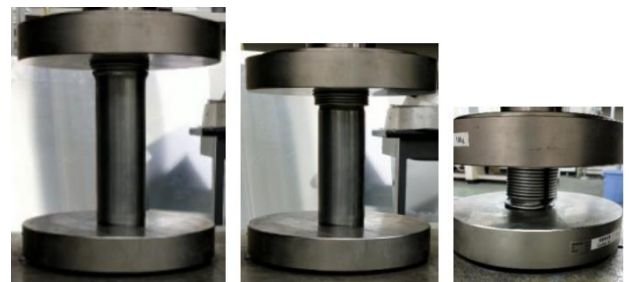


図 15. CAP 成形前の円筒素材を用いた圧潰実験

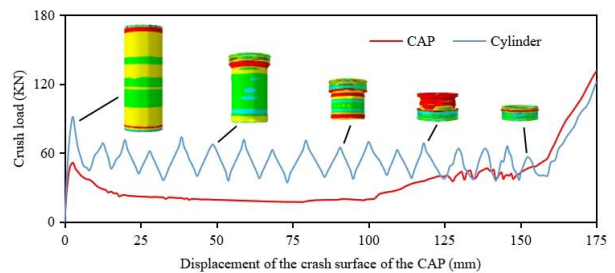


図 16. 円筒素材と CAP の圧潰変形の解析結果

一方、CAPの圧潰反力分布のほうは、圧潰反力の初期ピーク荷重を減らすことが見えて、その初期ピーク荷重を過ぎてから、圧潰反力は大きな上限変動はなく、比較的フラットな圧潰変形を長く続けることが確認できる。

突起部を設けることにより、CAPの平均的な圧潰反力値は円筒より低くなり、一部の大きな衝撃荷重を受け、できるだけ多くの衝突エネルギー吸収量を追求する緩衝材の開発には不利になることがあると考えられる。ただし、円筒の圧潰しわの生じるパターンは使用条件に影響されやすく、事前に衝撃エネルギー吸収量を予想しにくいいため、実際に円筒を直接に緩衝材として使用する例は少ない。

一方、本研究の提案するCAPの圧潰しわの生じるパターンは事前に設計できる。また円筒部と突起部の組み合わせを調整することにより、CAPの初期ピーク荷重がコントロールできて、より安定的かつソフトな緩衝効果を求める緩衝材の設計開発に適用できると思われる。

特にCAPの圧潰変形途中で自然に形成するPWSの検討を進める中、さらなるCAPの緩衝性能向上を目指す設計改善に寄与できる。

7. まとめ

本研究では、より安定的な緩衝効果を求めるために、新たな突起付き円筒型緩衝材CAPを考案し、実際にゴムの弾性を利用した部分張り出し成形法を用いたCAPの加工装置を開発して、数値解析と試作実験による性能検証を行い、以下の結論を得た。

(1) 円筒を緩衝材として使用するには、初期ピーク荷重が大きく、圧潰変形途中における圧潰反力が上下変動し緩衝性能が不安定となる問題が生じる。それら問題点を改善するため、円筒の軸方向に沿って一定の間隔で部分張り出し成形によって突起部を設けることによって得たCAPを提案した。圧潰変形実験と数値解析を行い、確実に初期ピーク荷重を低減し、安定的な圧潰変形を長く続ける緩衝材の圧潰変形パターン特性をもつことが確認できた。

(2) できるだけ簡易かつ安価な工法でCAPを加工するために、ゴムの弾性を利用した部分張り出し成形法を提案した。加工工程のシミュレーションを使い成形特性を検証したうえで、実際に開発した金型および加工装置を使った試作実験を行ったCAPの板厚分布を測定し、その実測値と解析値の結果はほぼ一致しており、成形したCAPの最も板厚の薄い部位の板厚減少率は10.1%であり、非常に安定的に成形加工が行われることが確認できた。

(3) CAPの圧潰変形の後半においては、CAPの円筒部が圧潰変形によりPWSとなり、その下に繋がる突起部に対する曲げモーメントが生じることで、互いに直交し交差するPWSが自然に形成され、そのPWSの折りエッジからなる空間トラスに近い構造により、CAPの圧潰反力が再び高くなるしきみを初めて明らかにした。

(4) 従来のハイドロフォーミング法と比較して、本加工法を利用する場合、十分な加工品質を確保するだけでなく、大型の加工装置と液圧システムを使用せず、逐次に部分的な張り出し成形加工を行うため、複雑な金型は不要であり、加工に必要なエネルギーも少なく済む優位性があることを示している。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団による一般研究開発助成(AF-2020007-B2)で実施された。ここに記して同財団に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 二塚貴之・藤田毅・山崎雄司・占部俊明：衝突エネルギー吸収部材の開発，自動車技術会論文集，46，4（2015），799.
- 2) 趙希祿・胡亜波・萩原一郎：折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計，日本機械学会論文集A編，76，761（2010），10.
- 3) 趙希祿・胡亜波・萩原一郎：折紙工学援用による半割り型自動車サイドメンバーの衝突圧潰エネルギー吸収性能に関する研究，日本機械学会論文集A編，76，769（2010），1131.
- 4) 趙希祿・胡亜波・萩原一郎：衝突方向のばらつきを考慮した半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化，日本機械学会論文集A編，76，767（2010），868.
- 5) 梁狄・楊陽・孔呈海・景陽・趙巍・趙希祿・萩原一郎：反転ねじり型エネルギー吸収構造とその安価な部分加熱ねじり加工法，日本機械学会論文集，87，895（2021），20-00425-1.
- 6) 梁狄・許文豪・趙巍・向井竜二・趙希祿：突起付き円筒型緩衝材とそれを加工する逐次部分張り出し加工法，設計工学，57，8，（2021），367.