

氏名（本籍）	ZUBAIR BIN KHALIL（ズバイル ビン カリル）（マレーシア）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第492号
学位授与日付	平成28年3月25日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	Energy absorption performance of press-formed shell （プレス成形シェルエネルギー吸収特性）
学位論文審査委員	（主査）三宅 卓志 （副査）植松 美彦、山下 実

論文内容の要旨

自動車の車体は、強度を落とさないうえに軽量化を図るとともに、衝突時における乗員の安全確保の観点から、できる限り所定の個所のみを変形させる工夫が必要とされている。軽量化と強度、衝撃吸収能の両立に対する要求は常に高い。また航空機機体や鉄道車両などにおいても部分的にそうした構造を採用している。これまで、角管などの軸圧縮変形については、その形状が圧縮強度やエネルギー吸収能に及ぼす影響について系統的に検討され、限定的ではあるが設計指針にもなりうる効果的な形状が示されている。しかし、板材のプレス成形品については、自動車車体等に多用されているにもかかわらず、成形品のエネルギー吸収特性と変形特性を適切に考慮した設計指針がまだないのが現状である。

そこで本研究では、車両におけるエネルギー吸収構造の基本設計指針の構築を目標に、プレス成形品の部品単体としてのエネルギー吸収能に着眼し、どのような変形様式を採用すれば高いエネルギー吸収効率が得られるかという点に注目し、検討した。はじめに、使用したプレス成形品の代表として単純形状のものを選定し、その基本変形特性を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。上部が平坦形状、または半球頭形状の軸対象の薄板シェルを深絞り加工で成形し、成形した凸部をインデントで押し込み変形させた。成形素材はアルミニウム合金 A5052 とし、これら2種類のシェルおよび先端が平坦または半球の2種類のインデントを使用し、計4種類の変形について準静的条件で実験した。併せて、有限要素解析で計算モデルをいくつか試し、この種の変形について適切な計算モデルの設定についても検討した。以下の結果を得た。

- 1) 上部が平坦形状のシェルと平坦インデントの組合せが、4種類のうちで最も押し込み荷重が高い。
- 2) シェルの材料内に圧縮応力場を形成するように変形させると、押し込み荷重を高くできる。
- 3) 移動型の塑性ヒンジの長さが変形の進行とともに長くなるのに合わせて、曲げ半径を減少させ塑性ひずみの大きさを小さく変化させることによって、押し込み荷重の変動を少なくできる。
- 4) 数値計算では材料に移動硬化則を導入すると変形荷重の予測精度を高めることができる。

つぎに、アルミニウム合金 A5052 と軟鋼板 SPCE を供試材とし、落錘試験機を援用して衝撃変形試験を行った。新たに実験装置と衝撃荷重検出部を設計、製作した。インデントの衝突速度を 3.4 ~ 5 m/s に設定した。準静的条件での試験結果と比較し、変形速度の影響を検討した。軟鋼板については3種類の板厚を用意し、板厚が変形挙動に及ぼす影響も検討し、以下の結果を得た。

- 1) 衝撃変形におけるインデントの押し込み荷重は、アルミニウム合金の場合、準静的条件のものに比べてやや高い。一方軟鋼においては、衝撃荷重は準静的条件の約 1.5 倍にも達する。
- 2) 板厚の増加に伴って押し込み荷重も増加するが、その程度は、特に平坦シェルを用いるとき顕著になる。
- 3) 半球頭シェルでは、押し込み荷重の変動は板厚が薄いとき比較的小さいが、厚くなるとその変動が大きくなる。
- 4) 使用材料の単位質量当たりのエネルギー吸収能について、本実験におけるシェル形状では材料による差は小さいが、素材自体の降伏強度も考慮するとアルミニウム合金が大きい。

以上の結果を総合すると、エネルギー吸収部品としてのプレス成形品形状は、適切な形状の角部を

持つ形状が適していることを示し、エネルギー吸収能を飛躍的に高める変形様式が得られる面内に圧縮応力場を生じさせる方法、さらに変形時の荷重変動を小さくする方法を具体的に示している。数値計算を行い、変形形状と押込み荷重について良好な予測精度が得られるモデルと示し、確認計算で裏付けを取っている。また、板厚の影響については、荷重の大きさだけでなくその挙動自体にも影響を及ぼすことを示している。使用材料の降伏強度が同様であれば、エネルギー吸収能はアルミニウム合金のほうが軟鋼板より高いことも示し、板プレス成形品の基本変形挙動の特徴を単純形状のシェルを用いて明確にしていることから、研究目標として設定した衝撃吸収部品の基本的設計指針の一端を構築している。

論文審査結果の要旨

本論文は、自動車車体等における軽量化と衝突安全性の両立を考慮した金属板のプレス成形品の設計指針を構築しようとするものである。対象としたプレス成形品は、衝突時にはエネルギー吸収構造部材として働くものである。その設計指針の構築に必要な情報を得るために、成形品の形状、板厚、変形速度、材料が変形挙動に及ぼす影響について、研究を行っている。従来の研究では、構造部材として中空部材をその軸方向に圧縮する変形が主に取り扱われ、設計指針についても提示されてきている。しかしプレス成形で立体的な形状に加工したものについては、形状の複雑さから変形挙動に関する検討は行われておらず、基本影響因子の解明に関する系統的な検討が待たれていた。

本研究では、成形品の形状を単純な立体成形品として、上部が平坦なシェルと半球頭のシェルをプレス成形で製作し、実験素材に設定している。この方法によって変形挙動の複雑さを排除しているが、シェルの変形に用いるインデント形状も平頭と半球頭の2種類用いることによって、成形品としての剛性や変形様式に特徴がみられるように工夫されたものであることが分かる。成形素材にプレス成形に頻用されるアルミニウム合金 A5052 と軟鋼板 SPCE を選定しており、得られた結果の実用展開も視野に入れている。

アルミニウム合金を使った実験で、エネルギー吸収部品として適するプレス成形品形状は、適切な角部を持つものであることを示していることに加え、変形を積極的に制御して、変形中の板面内に圧縮応力場を生じさせることによって、成形品の荷重負担能力を飛躍的に高める具体的な方法を提示していることは非常に興味深いものである。塑性ヒンジの挙動と関連させて変形荷重の変動を小さくする具体的な方法が示されたことも、エネルギー吸収体の設計に参考となる。数値計算を行い変形挙動のシミュレートの高精度化に寄与するモデルを試行して決定できている。負荷方向が反転する際、軟鋼板のひずみ速度に対する敏感性がより一層顕著に現れることは、従来、知られていなかった知見である。成形品の板厚は、荷重の大きさだけでなくその変形形状にもかなり影響を及ぼす場合があることを示し、質量当たりのエネルギー吸収能に関しても製品設計の参考となる指標を与えていることから、目標として設定した衝撃吸収部品の基本的設計指針を提供できている。

以上、本論文は新たな知見を見出しており、優れた工業的な有用性を持つ点でも評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判断した。

最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる査読付きの発表論文2報の内容を確認し、平成28年2月1日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問等に基づき審査し、最終試験結果を合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. Deformation behavior of press formed shell by indentation and its numerical simulation: Minoru Yamashita and Zubair Bin Khalil, Journal of Engineering, Vol. 2015 (2015), Article ID 453931.
2. Energy absorption performance of press-formed shell: Zubair Bin Khalil, Minoru Yamashita, Yusuke Kuno and Toshio Hattori, Procedia Engineering, Vol. 81 (2014), pp. 951-956.