等方的なシェル構造の補剛模様の開発*

高橋 昌也^{*1}

Development of Isotropic Patterned Shell Structures with High Stiffness

Masaya TAKAHASHI^{*1}^{*1} Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.
Chitose 3-1-12, Minato-ku, Nagoya, 455-8670 Japan

Aluminum alloy sheet and plate are commonly used in automobile, train, aircraft and so on where lightweight is required. However, lower costs and lighter weight materials are demanded. In order to satisfy the demand for lightweight without changing the material, it is necessary to raise the second moment of area to increase the bending stiffness. The purpose of this study is creating isotropic patterned shell structures to increase the bending stiffness of aluminum alloy sheet and plate. In this paper, patterned shell structures which have the large second moment of area in arbitrary cross sectional dimensions were developed. FEM results and experimental results indicated that the developed patterns reduce by half the weight of sheets under equivalent bending stiffness condition.

Key Words : Design, Rigidity, Stiffness, Shell Structure, Finite Element Method, Lightweight, High Stiffness, Sheet, Plate, Formability, Aluminum Alloy

1. 緒 言

輸送機器等の軽量化の要求が高まるにつれ、構造最適化や材料置換が積極的に進められており、低コストと軽量化の両方を満たす技術の確立が求められている。また、輸送機器等に限らず、多くの構造物や工業製品は、材料費や運送費等の節減の観点から、軽量化が求められている⁽¹⁾。

アルミニウム合金製の平板は、約半分の質量で鋼製の平板と等価な曲げ剛性となるため、軽量化材料として用いられているが、さらなる軽量化技術の開発が望まれている。アルミニウムは合金種によらず、縦弾性係数はほぼ一定値であることから、材料置換を行わずに曲げ剛性を高めるには、構造物の形状を変化させて断面二次モーメントを大きくする必要がある。

従来から、板材の曲げ剛性を上げるために、板材を波板構造にすることが一般的に行われてきた⁽²⁾。しかしながら、波板の曲げ剛性は、方向によって数十倍以上の差があるため、用途が限定される⁽³⁾。そこで、等方的な高剛性形状を開発できれば、曲げモーメントを受け持つアルミニウム合金板の縦弾性係数が擬似的に高められたことになり、様々な構造物の板材を軽量化できる可能性がある。

これまでに数理最適化法による高剛性形状の検討⁽⁴⁾がなされており、最近では汎用の最適化ソフトウェアを用いた高剛性形状の創成が一般的に行われているが、等方的な高剛性形状を導き出すのは容易ではない。そこで、本研究では、波板形状の基本単位形状に着目して、板材の曲げ剛性を等方的に高めるシェル構造の補剛模様の創成を試みた。

2. 高剛性形状の創成

板厚方向に対して、一定の設計空間が決められているとする。波板の場合、側面を除いたすべての面を設計空間の上下限に配置でき、さらに上面と下面の面積を等しく分配できることから、一方向については断面二次モー

* 原稿受付 2011 年 5 月 10 日

^{*1} 正員、住友軽金属工業(株) 研究開発センター (〒455-8670 愛知県名古屋港区千代田 3-1-12)
E-mail: masaya_takahashi@mail.sumitomo-lm.co.jp

メントを最大化できる．一方，曲げ剛性が最大となる方向と直角方向の曲げ剛性は，平板の曲げ剛性とほぼ同じである．そこで，一方向の曲げ剛性を最大化できるという波板の特徴を残しつつも，等方的な曲げ剛性が得られる形状を検討する．

図 1 に一般的な波板形状の模式図を示す．図 1 では凸部を黒，凹部を白としており，上面と下面をつなぐ側面は省略している．図 1 の基本形状を切り出したものが図 2 である．図 2 の形状は，曲げ剛性は高いが異方性があるという波板の特徴を持っている．そこで，曲げ剛性の異方性を小さくするために，図 2 の基本形状を 90° 回転させながら，4 つ連続させて図 3(a) に示す形状にした．上下面をつなぐ側面を図示した立体図を図 3(b) に示す．図 3(b) の構造は四隅を除くと任意の断面が上下面を含むため，任意の方向に対して高い曲げ剛性を持つ．

Fig.1 Corrugated plate

Fig.2 Basic shape

(a)2D diagram

(b)3D diagram

Fig.3 Basic shape for isotropic bending stiffness

図 3(a) を新たな基本形状として，四方に連続させた形状の例を図 4,5,6 に示す．図 4 (X 形状) は図 3(a) の基本形状を四方に連続させた形状であり，図 5 (I 形状) は図 3(a) の基本形状を線対称で連続させた形状である．図 6 (卍形状) は図 3(a) の基本形状を 90° 回転させながら連続させた形状である．図 4,5,6 に限らず，図 3(a) の形状を基本として，様々な形状を創成することができる．これらの形状は，上下面が同じ形状で面積が等しく，また任意の断面において，断面二次モーメントが大きい形状になっており，等方的に高い曲げ剛性を有する形状になると考えられる．

Fig.4 X-shape

Fig.5 I-shape

Fig.6 卍-shape

3. FEM 解析

3・1 FEM 解析条件

図 4,5,6 の立体形状の曲げ剛性を FEM 解析ソフトウェア Altair Radioss-Bulk を用いて確認した．立体形状はアルミニウム合金板をプレス加工で成形することにし，成形前の平板の厚さを 0.3mm，成形深さ（上面・下面の板厚中立軸の距離）は 2.0mm，上下面をつなぐ側面の角度は 45° ，図 3(a) に示す基本正方形の 1 辺の長さを 24mm とした．

成形前後の体積が一定となるように、立体形状の表面積の増加率から、図4のX形状の成形後の板厚は0.265mm、図5のI形状の成形後の板厚は0.273mm、図6の卍形状の成形後の板厚は0.264mmとした。辺長1mmの四角形シェル要素で分割し、縦弾性係数70GPa、ポアソン比0.33とし、幅120mm、長さ120mmの片持りの自由端に合計1Nの等分布荷重を与え、面内0~90°方向について、自由端中央部の節点における変位を求め、曲げ剛性の方向性を確認した。例として、X形状の0°方向と45°方向のモデルを図7に示す。自由端部に荷重Fが加わる平板の片持ちりにおいて、自由端部に生じる最大たわみ量が w となる場合の曲げ剛性を $S=(F/w)$ とする。また、平板に凹凸形状を付与することによって板材の剛性が変化し、自由端部のたわみ量が w' となる場合の曲げ剛性を $S'=(F/w')$ とする。曲げ剛性が S から S' に変化した時の剛性倍率を $R=(S'/S)$ とする。

Fig.7 FEM model of cantilever bending

3・2 曲げ剛性

FEMを用いて求めたX形状、I形状、卍形状の0~90°方向の変位と、材料力学の公式から求めた板厚0.3,0.6,0.7mmの平板の変位を併せてプロットしたものを図8に示す。また、0.3mm平板の変位を基準とし、0.3mm平板との曲げ剛性倍率を比較したものを図9に示す。FEMの計算値は、モデルの大きさや、固定する端部の断面形状により値は多少変化するが、X形状は0.3mm平板の6.69~12.07倍の曲げ剛性になり、I形状は0.3mm平板の10.83~16.10倍の曲げ剛性になり、卍形状は0.3mm平板の8.63~9.23倍の曲げ剛性になる結果が得られた。板厚分布を与えていない近似計算ではあるが、卍形状の曲げ剛性の異方性は非常に小さくなる結果が得られた。

Fig.8 Comparison of bending displacement between plane plates and patterned shell structures calculated by FEM

Fig.9 Comparison of relative bending stiffness between plane plates and patterned shell structures calculated by FEM

3・3 応力分布

X形状の相当応力分布を図10に示す。図10では表示はしていないが、図7と同様に等分布荷重を上端の中央部に与え、下端の自由度を完全に拘束している。図10(a)に0°方向、図10(b)に45°方向の応力分布を示すが、側面が交差する部分の応力が他の部分と比較して高く、断続的に応力が高いライン（例えばAA線）が形成されている。このラインは中立軸と上面、もしくは、中立軸と下面で断面が構成されるため、他の断面よりも相対的に断面二次モーメントが小さくなっている。図9に示すようにX形状の0°方向の曲げ剛性は45°方向の曲げ剛性よりも高いが、図10(a)の0°方向の応力分布と比較して、図10(b)の45°方向の応力分布の方が、上面・下面の応力値が相対的に高いことがわかる。

つぎに、I形状の相当応力分布を図11に示す。図10のX形状と同様に、側面が交差する部分の応力が他の部分と比較して高く、断続的に応力が高いラインがある（例えばBB線）。このラインも中立軸と上面、もしくは、中立軸と下面で断面が構成されるため、他の断面よりも相対的に断面二次モーメントが小さい。ただし、I形状の側面の交差部分はX形状と比較すると半分程度しかないため、曲げ剛性の低い部分の面積が全面積に占める割合は小さい。さらに、I形状の板厚はX形状よりも厚いので、I形状はX形状よりも曲げ剛性は高くなる。なお、X形状も図3(a)に示す基本正方形の1辺の長さを24mmよりも長くすることで、側面の占める割合を減らして、曲げ剛性を高めることが可能である。但し、形状が大きくなりすぎると、局所的な変形や座屈が生じやすくなり、曲げ剛性は高くても強度の低い形状になるので、用途に応じた適切な大きさにする必要がある。

図11(a)の0°方向の応力分布と比較して、図11(b)の45°方向の応力分布の方が、上面・下面の応力値が比較的高いが、これはI形状の0°方向の曲げ剛性が45°方向の曲げ剛性よりも高い図9の結果を裏付けている。

C形状の相当応力分布を図12に示す。C形状の側面が交差するライン（例えばCC線）の応力は他の部分と比較して高くはない。このラインは中立軸と上面と下面で断面が構成されるため、断面二次モーメントが大きく曲げ剛性が高い。図12のC形状の応力分布は、0°方向も45°方向も上面・下面に高い応力が生じており、X形状のAA線、I形状のBB線のような曲げ剛性の低いラインがない。その結果、C形状は曲げ剛性の異方性が小さくなると考える。

Fig.10 Equivalent stress of X-shape calculated by FEM model

Fig.11 Equivalent stress of I-shape calculated by FEM model

Fig.12 Equivalent stress of 卍-shape calculated by FEM model

4. 実験結果

曲げ剛性の異方性が非常に小さいという FEM 結果が得られた 卍 形状を実際に製作し、3 点曲げ試験により曲げ剛性を確認する。0.3mm の A3004-O アルミニウム合金板をプレス成形することにより、図 13 に示すような 卍 形状のシェル構造を付与した板を作製した。FEM モデルとは異なり、角部には板の中立面において半径 2.0mm のフィレットがある。

長さ 100mm 幅 100mm の卍形状の試験片を支持スパン 80mm で 3 点曲げ試験を行った．卍形状の 0° 方向と、 45° 方向の荷重 変位線図を図 14 に示す．

弾性変形範囲内の立ち上がり傾きは、 0° 方向は 12.05N/mm、 45° 方向は 12.32N/mm であった．0.3mm 平板の実験値 1.63N/mm と比較すると、卍形状の 0° 方向は 7.39 倍、 45° 方向は 7.56 倍の曲げ剛性となる．卍形状の曲げ剛性は等方的であることが実験と計算の両方から確認できた．図 8 の FEM による計算結果と比較すると、剛性は低くなっているが、金型作製時に板厚分をオフセットしたので、実物の成形深さは FEM 計算モデルの深さよりも板厚分だけ低いことが主要因と考える．また、卍形状の頂面の板厚の測定値は約 0.281mm であった．なお、高い曲げ剛性を有する本形状は、単体での使用を想定して開発したが、本形状をサンドイッチパネルのコアとして適用すれば、曲げ剛性の異方性の少ないサンドイッチパネルが作製できると考えられる^{(5),(6)}．

Fig.13 卍-shape of patterned shell structure

Fig.14 Load Stroke diagrams of three point flexural test (support span 80mm, specimen width 100mm)

5. 結 言

本研究では、波板形状の基本単位形状に着目して、板材の曲げ剛性を等方的に高めるシェル構造の補剛模様の創成を試み、以下の結果を得た．

- (1) 曲げ剛性の異方性が小さい基本単位形状を創成し、その単位形状を四方に並べた X 形状と、 90° 回転させながら四方に並べた卍形状と、線対称で四方に並べた I 形状の 3 つのシェル構造の補剛模様を考案した．
- (2) FEM 解析により、X 形状 I 形状 卍形状の元の板厚 0.3mm 平板に対する曲げ剛性倍率を計算したところ、それぞれの最小曲げ剛性方向で 6.69 倍、10.83 倍、8.63 倍であり、それぞれの最大曲げ剛性方向で 12.07 倍、16.10 倍、9.23 倍となった．したがって、卍形状は等方的な曲げ剛性を有することが明らかになった．
- (3) プレス成形により平板に卍形状を付与し、3 点曲げ試験を行ったところ、元の板厚 0.3mm 平板と比較して、最小曲げ剛性方向で 7.39 倍、最大曲げ剛性方向で 7.56 倍の曲げ剛性になった．したがって、卍形状を曲げ

モーメントを受け持つ平板に付与することにより、約 48%の軽量化となり、質量を概ね半減させることが可能となる。

文 献

- (1) 尾田十八, 軽量化設計, (2002), p.1, 養賢堂発行.
 - (2) 山崎光悦, 軽量化設計, (2002), p.40, 養賢堂発行.
 - (3) 三浦公亮, “構造のフォルムと幾何学”, 日本航空宇宙会誌, Vol. 19, No. 211 (1971), pp. 366-377.
 - (4) 下田昌利, 辻二郎, 岩佐恭平, “薄板の補剛のためのビードの創成手法について”, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会講演論文集, No.07-36 (2007), pp. 111-112.
 - (5) 酒巻正守, 三浦公亮, 小野緑, “ZETA 補強板の設計”, 東京大学宇宙航空研究所報告, Vol. 16, No. 1 (1980), pp. 639-647.
 - (6) 斉藤一哉, 野島武敏, 森村浩明, 萩原一郎, “新しく開発した軽量コアパネルの曲げ剛性の評価”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 75, No. 750 (2009), pp. 259-265.
-