セルフピアシングリベットによる アルミニウム合金板と鋼板の接合

加藤 亨*
森 謙一郎**

安部 洋平**
呉 宣***

Joining of Aluminum Alloy and Mild Steel Sheets by Self-Piercing Rivet

Toru Kato, Yohei Abe, Ken-ichiro Mori and Wu Xuan

(Received on April 4, 2005)

The joinability of aluminum alloy and steel sheets using a self-piercing rivet was evaluated using a finite element simulation and experiment. Self-piercing riveting is a potential replacement of spot resistance welding generally used for steel sheets, because it is not easy to apply resistance welding to the joining of aluminum and steel sheets of vastly different melting points. To obtain optimum joining conditions, joining defects are categorized into (1) penetration through the lower sheet, (2) necking of the lower sheet and (3) separation of the sheets. The penetration, the necking and separation defects are caused by a small total thickness, a small thickness of the lower sheet and a large total thickness, respectively. The joining range for the combination of an upper sheet of steel and a lower sheet of aluminum is wider than that of the reverse combination. The joint strength is influenced by not only the deformation of the sheets and rivets but also the thickness and strength of the sheets.

Key words: structural joining, FEM, self-piercing riveting, aluminum alloy sheet, steel sheet, joining defects, welding conditions

1. 結 言

自動車の重量を軽減させるため、アルミニウム合金板の自動車車体への適用が注目されている¹⁾。しかしながら、アルミニウム合金板では溶接性が高くなく、鋼板で一般的に使用されているスポット抵抗溶接は適用しにくい。最近自動車部品の一部だけがアルミニウム化されており、鋼板との接合が望まれているが、アルミニウム合金板と鋼板の溶接は融点が大きく異なるため容易ではない。

アルミニウム合金板は鋼板と比べると変形抵抗が小さいため、鋼板で一般的に使われている溶接以外の接合法も考えられる。アルミニウム合金板の塑性変形接合法として、メカニカルクリンチング、摩擦攪拌接合、セルフピアシングリベットなどがある。メカニカルクリンチングはポンチとダイスで板材の局部を折り曲げて接合するものであり、ランニングコストは低い但接合部の強度は小さい²⁾。一方、摩擦攪拌スポット接合は摩擦熱によってアルミニウム合金板を軟化させて接合する方法であるが、主にアルミニウ

ム合金板どうしの接合に適用されている³⁾。

セルフピアシングリベットはリベットを板材に打込むことによって接合する方法であり、予め穴を空ける必要がなく、接合速度が高く生産性が大きい。また、接合後の疲労強度も高く、スポット抵抗溶接と同様なCフレーム構造であるため、スポット溶接の代替として期待されている⁴⁾。セルフピアシングリベットは主にアルミニウム合金板どうしの接合に使われているが、アルミニウム合金板と鋼板の接合にも適用できる。しかしながら、リベットは板材の中に打込まれて、板材を接合するように変形する必要があるが、変形抵抗が大きい鋼板の接合では接合不良が発生しやすい。板材内部の変形挙動を実験的に把握するのは容易ではなく、有限要素シミュレーションは有効である。Cacko⁵⁾らは、セルフピアシングリベットによるアルミニウム合金板の接合における変形形状を、有限要素法によってシミュレーションしているが、加工条件に関する考察を行っていない。

本研究では、セルフピアシングリベットによるアルミニウム合金板と鋼板の接合条件に関して検討を行う。有限要素シミュレーションと実験を行って板材およびリベットの変形挙動を求め、接合不良を分類して最適な加工条件について考察する。

*ポップリベット・ファスナー(株) 第1技術部
〒441-8540 愛知県豊橋市野依町字細田
**豊橋技術科学大学 工学部 生産システム工学系
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
***豊橋技術科学大学大学院 工学研究科
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

2. アルミニウム合金板どうしの接合

2.1 シミュレーション条件

セルフピアシングリベットでは、Fig.1 に示すように、リベットを板材に直接打込むことによって接合する。リベットはパンチによって板材に打込まれ、ダイによって変形させられる。アルミニウム合金板どうしの接合では、板材の変形抵抗が比較的小さく、リベットを打込むことは容易であるが、変形抵抗の大きい鋼板ではリベットと板材が接合するように変形しない場合がある。そこで、リベットと板材の変形挙動を詳細に求めるために、有限要素法によるシミュレーションを行った。本章では、先ず計算結果の精度を調べるため、アルミニウム合金板どうしの接合をシミュレーションする。

シミュレーションには市販有限要素コード LS-DYNA を使用し、軸対称変形を近似して断面の変形を計算した。リベットは焼入れ・焼戻したボロン鋼(500HV)、板材は A5052-H34(80HV)であり、リベットと板材を 4 角形ソリッド要素で分割し、パンチ、ダイ、板押えは剛体とした。セルフピアシングリベットの計算に使用した条件を Table 1 に示す。板材は引張試験、リベットは圧縮試験によってそれぞれ変形抵抗を測定した。工具面、リベットと板材の接触面では、摩擦係数は 0.2 とした。パンチ速度は、動的陽解法において計算時間を短くするために 2500mm/s としたが、これ以下の速度でも変形形状はほとんど変化しなかった。

有限要素シミュレーションによる計算結果の精度を評価するため、幅 50mm、長さ 150mm、厚さ 1.5mm の 2 枚のアルミニウム合金板 A5052-H34 の接合実験を行った。接合において、板材の両面にはプレス油を塗布した。

2.2 計算と実験結果の比較

有限要素シミュレーションによって計算された断面の変形形状を Fig.2 に示す。先ずリベットの脚部が上板を貫通し、次に下板に侵入し、ダイによって脚部が広げられて下板内に留まる。上板の貫通では脚部が広がらない方が打込みやすいが、下板に侵入した状態で脚部が広がらないと板材を接合することはできない。板材だけでなく、リベットを適当に変形させることが、セルフピアシングリベットでは重要であり、リベットおよびダイスの形状が接合に大きな影響を及ぼす。

Fig. 1 Joining of sheets using self-piercing rivet

断面における変形形状の計算と実験結果の比較を Fig.3 に示す。リベットは板材に打込まれて脚部が広がっており、計算の変形形状は、実験結果とよく一致している。

打込み荷重の計算と実験結果の比較を Fig.4 に示す。荷重は変形後期に大きく上昇しており、計算結果は実験結果とよく一致している。

Table 1 Computational conditions of self piercing riveting of two aluminum sheets

Flow stress of rivet / MPa	$\sigma = 1960\varepsilon^{0.014}$
Flow stress of sheet / MPa	$\sigma = 366\varepsilon^{0.11}$
Punch velocity / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	2500
Coefficient of friction	0.2
Sheet holder force / N	5800

Fig. 2 Cross-sectional shapes of sheets and rivet obtained from calculation for two aluminum sheets

Fig. 3 Comparison between cross-sectional shapes obtained from calculation and experiment for two aluminum sheets

Fig. 4 Comparison between riveting loads obtained from calculation and experiment for two aluminum sheets

3. アルミニウム合金板と軟鋼板の接合

3.1 接合組合せ

アルミニウム合金板と軟鋼板を長さ 5mm のセルフピアシングリベットで接合した。組合せにおいて、前に書いてある材料が上板、後が下板である。また、計算に用いた各板の変形抵抗は、板厚ごとに引張試験により測定され、その結果を Table 2 に示す。

3.2 接合不良

セルフピアシングリベットでは、十分な接合が得られない場合があり、接合不良を次のように分類し、それらの不良を避ける最適な加工条件に関して検討を行った。

リベット長さに対し、接合する総板厚が小さい場合は、Fig.5 に示すようにリベットの脚部が下板を貫通して、下板に円周状の割れを生じる。ここで、 t_u は上板の厚さ、 t_l は下板の厚さである。下板の割れは水を浸入させて腐食の

原因になる。

リベットの侵入によって上板が下板を局部的に引き伸ばし、Fig.6 に示すように下板厚が 0.1mm 以下に減少するくびれが発生する。この不良は、板材に外力が加わったときに下板に割れを生じさせる原因になる。

リベットの脚部の広がり小さい場合、Fig.7 に示すように、下板へのリベットの掛かりが小さく、打込み後分離して接合しない。脚部の広がり接合性に大きな影響を及ぼす。

(a) Occurrence of separation of two sheets

(b) Cross-sectional shape

Fig. 7 Occurrence of separation of sheets obtained from experiment for aluminum-steel, $t_u=1.5\text{mm}$ and $t_l=1.2\text{mm}$

Sheet material	Thickness / mm	Flow stress / MPa
Mild steel: SPCC	0.8	$\sigma = 559 \varepsilon^{0.20}$
	1.2	$\sigma = 520 \varepsilon^{0.25}$
	1.6	$\sigma = 504 \varepsilon^{0.17}$
	2.0	$\sigma = 481 \varepsilon^{0.15}$
Aluminum A5052-H34	1.0	$\sigma = 379 \varepsilon^{0.12}$
	1.5	$\sigma = 366 \varepsilon^{0.11}$
	2.0	$\sigma = 353 \varepsilon^{0.11}$

(a) Occurrence of crack of lower sheet

(b) Cross-sectional shape

Fig. 5 Occurrence of penetration for aluminum-steel, $t_u=1.0\text{mm}$ and $t_l=1.2\text{mm}$.

(a) Cross-sectional shape

(b) Deforming shapes obtained by calculation

Fig. 6 Occurrence of necking of lower sheet for aluminum-steel, $t_u=2.0\text{mm}$ and $t_l=0.8\text{mm}$

(a) Experimental results

(b) Calculated results

Fig. 8 Joinabilities for aluminum-steel obtained from experiment and calculation

3.3 接合性

下板の貫通、下板のくびれ、板材分離の3種類の接合不良を、上下の板厚の組合せについて調査した。上板をアルミニウム合金板、下板を軟鋼板とし、長さ5mmのリベットで接合した場合の実験と計算結果を Fig.8 に示す。リベット長に対して総板厚が小さすぎる場合はリベット脚が広がる前に下板を貫通し、総板厚が大きくなるとリベットが上板を貫通した後下板にてリベット脚が広がり接合している。一方、下板厚と総板厚の比が小さくなると、下板でリベット脚が十分に広がらないで板の分離が発生し、さらにその比が小さくなると下板が上板とすべって局部的に引き伸ばされてくびれを生じる。リベット長に対し総板厚が小さい場合の計算結果はくびれを示しているが、実験においてはリベットの脚部下の下板はくびれから貫通に至っており、計算結果は実験とほぼ同様の傾向を示している。

Fig. 9 Joinabilities for steel-aluminum obtained from experiment and calculation

(a) Fracture of upper sheet for aluminum-steel and $t_u=1.0\text{mm}$, $t_l=2.0\text{mm}$

(b) Fracture of lower sheet for steel-aluminum and $t_u=1.2\text{mm}$, $t_l=2.0\text{mm}$

Fig. 11 Fractures in cross-tension test

上板を軟鋼板、下板をアルミニウム合金板とした場合の実験と計算結果を Fig.9 に示す。Fig.8 と同じ傾向であるが、上板を軟鋼板、下板をアルミニウム合金板とした場合、その反対よりも接合範囲が広がった。

計算から得られたリベット先端半径の変化を Fig.10 に示す。 r_0 は打込み前のリベット半径、 r は変形後のリベット先端半径である。ストロークの増加とともに、リベットがダイスによって押されて先端半径が増加する。下板がアルミニウム合金板の場合、下板が柔らかいためリベット脚部の広がりが大きく、下板へのリベットの掛かりが大きくなり、Fig.9 の方が Fig.8 よりも接合可能領域が大きくなったものと考えられる。

4. 軟鋼板とアルミニウム合金板の静的接合強度

4.1 評価方法

セルフピアシングリベットは自動車のボデー製作に使用されるため、JIS に規定されたスポット溶接継手の試験方法を用いて、接合後の強度を評価した。評価方法は、剥離方向の強度評価に十字引張試験⁶⁾を、せん断方向の強度評価に引張せん断試験⁷⁾をそれぞれ使用した。試験片は、Fig.8 と Fig.9 の接合可能な組合せで行い、試験速度は 10mm/min で行った。

Fig. 10 Variation of spread of tubular leg of rivet obtained from calculation for $t_u=1.5\text{mm}$ and $t_l=1.5\text{mm}$

Fig. 12 Joint strength measured from cross-tension

(a) Fracture of lower sheet for steel-aluminum and $t_u=1.6\text{mm}$, $t_l=2.0\text{mm}$ (b) Fracture of upper sheet for aluminum-steel and $t_u=1.5\text{mm}$, $t_l=1.5\text{mm}$

Fig. 13 Fractures in tension-shear test

Fig. 14 Joint strength measured from tension-shear test

4.2 評価結果

十字引張試験では、Fig.11 に示すように、(a)上板の穴拡大による破壊、(b)下板からリベットが抜ける破壊が生じた。上板の穴拡大による破壊時の強度は上板の強度となる。

十字引張試験の強度試験結果を Fig.12 に示す。ここで、 r は打込み後のリベット半径、 Δx はリベットの食込み量であり、断面形状から測定した。試験から得た荷重をリベット断面積で除して強度とした。食込み比の増加とともに引張強度が増加しており、十字引張強度は食込み量に影響し、破壊は全てアルミニウム合金板にて発生した。

引張せん断試験では、Fig.13 に示すように、(a)下板からリベットが抜ける破壊、(b)リベットによる上板のせん断破壊が生じた。前者は下板の強度が低いために生じ、後者は上板の強度が低いために生じる。

引張せん断試験の強度試験結果を Fig.14 に示す。上板の厚さが小さい場合、リベットに掛かる上板量が少ないため、上板のせん断破壊となり、接合強度は上板の強度になる。

セルフピアシングリベットによる接合強度は、板材およびリベットの変形だけでなく、板材の板厚および強度にも影響される。

5. 結 言

セルフピアシングリベットによるアルミニウム合金板と軟鋼板の接合を行い、板とリベットの変形挙動を実験と計算によって検討し、次のような結果を得た。

- 1) 接合不良をリベットの貫通、下板のくびれ、板材分離に分類して、最適な接合条件を検討した。
- 2) リベット長さに対して総板厚が小さい場合は下板の貫通が生じた。下板厚と総板厚の比が小さい場合は上下板の分離、さらにその比が過小になると下板のくびれが生じた。
- 3) 上板が軟鋼板、下板がアルミニウム合金板の方が、下板が柔らかいためにリベット脚部が広がりやすく、下板へのリベット食込み量が増加し、反対の組合せに比べて接合可能範囲が大きくなる。
- 4) セルフピアシングリベットによる接合強度は、板材およびリベットの変形だけでなく、板材の板厚および強度にも影響される。

本研究の一部は、平成 16 年度豊橋技術科学大学教育研究活性化経費によって行われた。また、本研究の遂行にあたり、打込み実験および計算に協力していただきました豊橋技術科学大学 4 年生 菅原史曜氏、川眞田潤氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 内田秀俊:182 回塑加シンポジウム, (1998), 19-25.
- 2) 熊谷正樹:183 回塑加シンポジウム, (1998), 59-66.
- 3) 坂野律男:プレス技術, 42-6 (2004), 41-45.
- 4) 遠藤五男:軽金属溶接, 39-10(2001), 16-23.
- 5) Cacko, R., Czyżewski, P., Kocańda, A.: Steel Grip, 2(2004), 307-310.
- 6) 日本規格協会: JIS-Z-3136 (1999).
- 7) 日本規格協会: JIS-Z-3137 (1999).