



入門講座

鋼を接合する-4

セルフピアスリベットおよび メカニカルクリンチによる板材の接合

Joining of Sheets by Self Piercing Rivet and Mechanical Clinch

安部洋平

Yohei Abe

豊橋技術科学大学 機械工学系
講師

1 はじめに

自動車の二酸化炭素排出量の削減、低燃費化のために自動車の軽量化が求められている。車体の約1/3は車体重量であり、軽量化のために高張力鋼板や超高張力鋼板の利用が拡大してきている。また、高級車やスポーツカーでは小さな比重のアルミニウム合金板も利用されてきている。車体は、プレス成形された板材部品が接合されて組み立てられおり、鋼板同士の接合には抵抗スポット溶接が一般的に用いられている。しかし、鋼板とアルミニウム合金板をスポット溶接すると加熱により接合界面において脆弱な金属間化合物が生成されるために実用的な接合強度を得ることが難しい¹⁾。加熱なしに接合する方法としてセルフピアスリベッティングとメカニカルクリンチがある。本稿では著者らが取り組んできたセルフピアスリベッティングとメカニカルクリンチによる高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合を中心に紹介する。

2 セルフピアスリベッティング

2.1 セルフピアスリベッティングによる板材の接合

セルフピアスリベッティングは、従来のリベットのように下穴をあけることなく板材へリベットを直接押し込むのみで接合できる方法である。1978年に原型となる特許が出願されており²⁾、欧州の自動車メーカーが車体軽量化のためのアルミニウム合金板部品の接合に利用し、さらに、アルミニウム合金板と鋼板の接合や3枚板の接合に利用が拡大されている^{3,4)}。接合機は、スポット溶接機のようにロボットに搭載でき、サーボモータを搭載した機械が開発されてスポット溶接と同等以上の速度で接合できる⁵⁾。

セルフピアスリベッティングによる板材の接合を図1に示す。初期状態においては、板押えによって板材を固定する。

リベットはパンチによって板材に打込まれて上板を貫通した後に、リベット先端のテーパとダイの凸部によって広げられて板材を接合する。セルフピアスリベッティング性は板材の機械的性質と板厚に影響されるが、板を接合するためには次の条件を満足する必要がある。

- ・インターロックの形成
- ・下板の破断なし

インターロックが形成されない場合では板を上方向に引っ張ると容易に外れ、車体の接合に用いる場合では板材に破断が生じると気密性が低下して腐食の原因となる。

本稿では1.4～1.8mm厚さの板を2枚の組み合わせに対して、図1 (b) に示すようなアルミニウム合金板用の先端直径が5.2mmのリベットを用いて、ダイ形状を変化させた接合結果を中心に示す。リベットは、鍛造された後に熱処理されたボロン鋼製である。

高張力鋼板とアルミニウム合金板を接合したときの欠陥例を図2に示す。上板に高張力鋼板を配置するとリベット先端

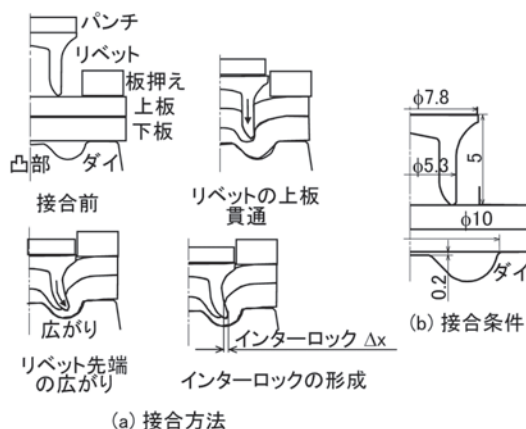


図1 セルフピアスリベッティングによる板材の接合

が板を貫通できず板材が接合できない。下板に高張力鋼板を配置すると鋼板の高い変形抵抗のためにリベットが広がれなくインターロックが小さくなる。また、高張力鋼板の延性が不足すると破断が生ずる。

セルフピアスリベッティングにおける板材の変形は、市販の有限要素シミュレーションにより計算できる⁶⁻¹⁰⁾。本稿でのシミュレーションソフトはLS-DYNAであり、変形を軸対称と近似して断面を計算した。なお、計算時間はCore2Quadプロセッサ搭載のパソコンで数十分程度である。

2.2 接合性

上板に高張力鋼板、下板にアルミニウム合金板を配置した組み合わせにおける実験と計算により接合された板材断面を図3に示す¹¹⁾。ダイの寸法は $h_1 = 0.2\text{mm}$ 、 $h_2 = 1.4\text{mm}$ である。引張強さが590MPa級鋼板では欠陥なく板材は接合されているが、980MPa級鋼板ではリベット先端が板を貫通できず板材が接合されていない。計算された断面形状は実験とほぼ同様である。980MPa級鋼板に対してシミュレーションを

利用してダイ深さ h_1 と h_2 を最適にしたダイ形状において接合された断面を図3(c)に示す。ダイ深さを増加させることにより上板を貫通できて、板材は接合されている。

下板に980MPa級超高張力鋼板、上板にアルミニウム合金板を配置した組み合わせにおける計算と実験により接合された板材の断面形状を図4に示す¹¹⁾。ダイ寸法が $h_1 = 0.2\text{mm}$ 、 $h_2 = 1.4\text{mm}$ では、リベット先端が広がれず接合できていない。下板内でリベットが広がりやすいようにダイ寸法を $h_1 = 0.8\text{mm}$ 、 $h_2 = 2.2\text{mm}$ と深くするとインターロックが形成できて接合できている。

セルフピアスリベッティングではリベットが上板を貫通して下板においてインターロックを形成して板材を接合するために、複数枚貫通できて最も下の板でインターロックを形成できれば3枚以上の板材を接合できる。図5は、セルフピアスリベッティングによる3枚板の接合例である¹²⁾。板材の組み合わせにより板材とリベットの変形形状が異なっているが、アルミニウム合金板、軟鋼と超高張力鋼板を含んだ組み合わせでも接合されている。

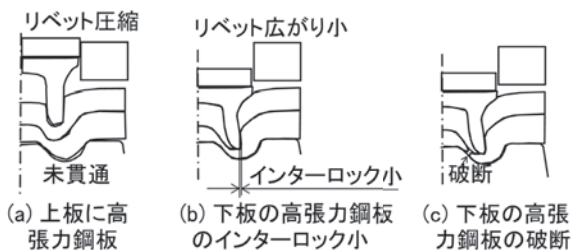


図2 高張力鋼板とアルミニウム合金板を接合したときの欠陥例

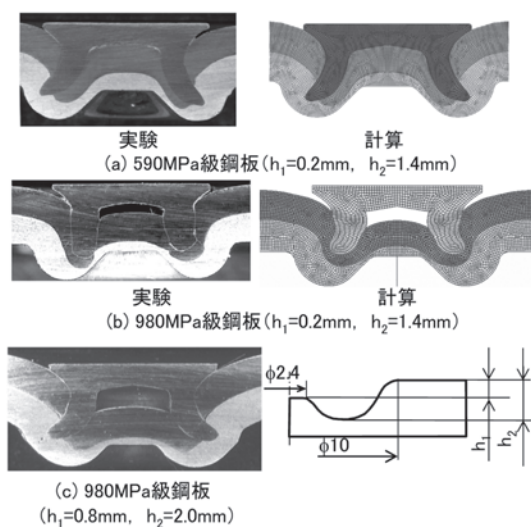


図3 上板に高張力鋼板、下板にアルミニウム合金板を配置した組み合わせにおける計算と実験により接合された板材断面(上板(高張力鋼板: 1.4mm)、下板(A5052: 1.5mm))

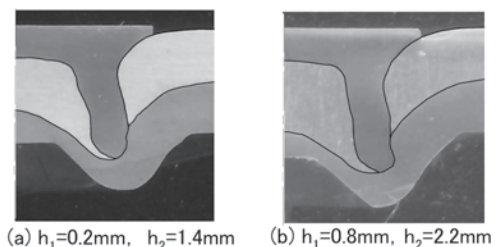


図4 下板に980MPa級超高張力鋼板を配置した組み合わせにおける実験により接合された板材断面(上板(A5052: 1.5mm)、下板(980MPa級超高張力鋼板: 1.4mm))

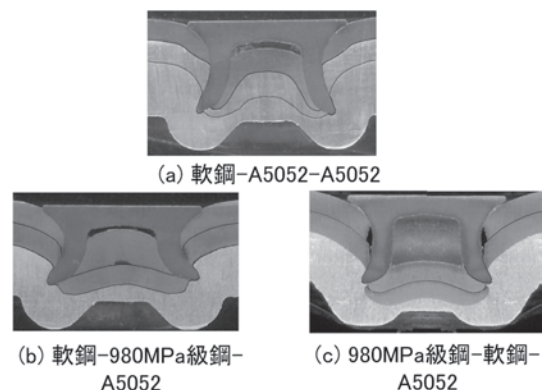


図5 セルフピアスリベッティングによる3枚板の接合(上、中、下板の厚さはそれぞれ1mm、1mm、2mm)

③ メカニカルクリンチング

3.1 メカニカルクリンチングによる板材の接合

メカニカルクリンチングは、板材同士を塑性変形させ、かして接合する方法であり、セルフピアスリベッティングと比較するとリベットを使用しないためにコストが低く^{13,14)}、電気部品、自動車部品、建築部品の接合に利用されている^{15,16)}。

メカニカルクリンチングによる板材の接合を図6に示す。重ねられた板材はパンチによって張り出され、ダイ底と接触すると半径方向に広げられた後に上方へ材料が流動する。材料流動により上板と下板の重なりであるインターロック Δx を形成して板材は接合される。材料の流動性を向上させるためにダイの角部に溝部がある。メカニカルクリンチング性は板材の機械的性質と板厚に影響されるが、板材を接合するためには次の条件を満足する必要がある。

- ・ インターロックの形成
- ・ くぼみ側壁の上板最小肉厚の確保
- ・ 板材の破断なし

上板と下板の重なりであるインターロックが形成されない場合では板を上方向に引っ張ると容易に外れ、くぼみ側壁の上板最小肉厚が限界値以上でなければ破断する。また、自動車用の接合に用いる場合では、板材に破断が生じると気密性が低下して腐食の原因となる。

ここでは、円形のメカニカルクリンチングを示しているが、四角形のメカニカルクリンチング¹⁶⁻¹⁸⁾、2段で接合するクリンチング¹⁹⁾、平らなダイを利用して接合するメカニ

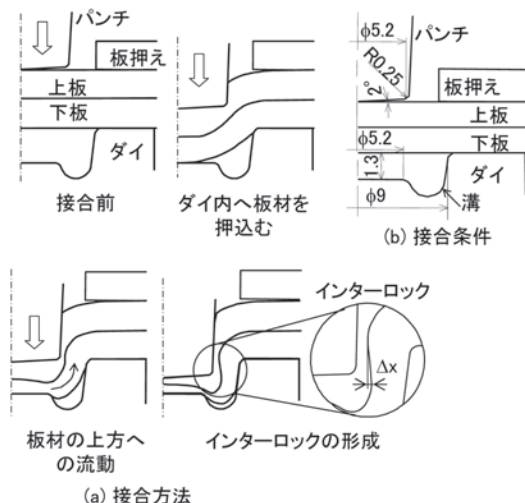


図6 メカニカルクリンチングによる板材の接合

ルクリンチング^{20,21)}など様々な接合法が提案されている。また、メカニカルクリンチングにおける板材の変形も有限要素シミュレーションにより計算できる²²⁻²⁵⁾。本章でも2.1節で示した条件で計算した計算例を示す。

本章では図6 (b) に示すような1.2mmのめっきされた高張力鋼板同士、および、1.4mmから1.6mm厚さの高張力鋼板とアルミニウム合金板に対してパンチ直径が5.2mmの接合の結果を示す。なお、軟鋼板とアルミニウム合金板²⁸⁾、アルミニウム合金板同士²⁹⁾の接合についても調査されている。異種合金板の接合部に生じる電食を防止するための絶縁剤²⁶⁾や接合強度の向上を目的とする接着剤²⁷⁾は用いていない。

3.2 接合性

実験と計算により接合された板材の断面形状、および、パンチ押込み荷重とパンチストロークの関係を図7に示す。板材の組み合わせは1.2mm厚さの亜鉛-アルミニウム合金めっきされた590MPa級鋼板同士である。上板が下板内で広がりインターロックを形成して欠陥なく接合されている。実験と計算された断面形状および、パンチ押込み荷重はほぼ一致しており変形を計算によって予測できている。

亜鉛-アルミニウム合金めっきされた590MPa級の高張力鋼板同士の接合部の上面と下面のめっき近傍写真を図8に示す。なお、ダイ形状は図7と異なり、ダイの溝を無くしてめっきの減少を低減した条件である。上面のめっきは、くぼみの底面では板の変形が大きいいため薄くなっており、くぼみの側壁部ではめっきがほとんどなくなっている。下面のめっきは、突起上部では板の変形が大きいために薄くなっている。突起側壁部では、板材が圧縮され増肉しているため、めっきは厚くなっている。

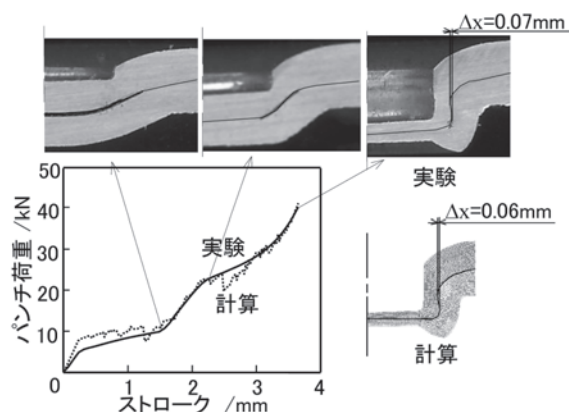


図7 実験と計算により接合された板材の断面形状、および、パンチ押込み荷重とパンチストロークの関係

図8に示した接合部と母材の耐食性の比を図9に示す。比較のためにスポット溶接も示す。耐食性比は接合部に腐食の生じたサイクルと接合前の母材のサイクルの比である。メカニカルクリンチされた板材の耐食性は、図8に示したように表面のめっき厚さが小さくなるために母材の55%であるが、溶接よりもメカニカルクリンチされた板材の耐食性は高い³¹⁾。

種々の板材を接合するために選択できる接合条件には、パンチ形状、パンチストローク、ダイ形状がある。ここでは、パンチ形状とパンチストロークを一定としてダイ形状を変化させた。板材の変形挙動に及ぼすダイ形状の影響を図10に示す。ダイ深さ h を小さくすると板材の変形量が小さくなり板材の破断を防止できるが、過小であると材料の上方向の流動が少なくなってインターロックが減少する。ダイ直径 d が小さすぎても大きすぎても材料の上方向の流動が少なくなってインターロックが減少する。

1.4mm厚さの高張力鋼板と1.5mmのアルミニウム合金板を接合した例を図11に示す。一般的にアルミニウム合金板同士を接合する $h=1.8\text{mm}$ 、 $d=8.0\text{mm}$ のダイでは、上板に

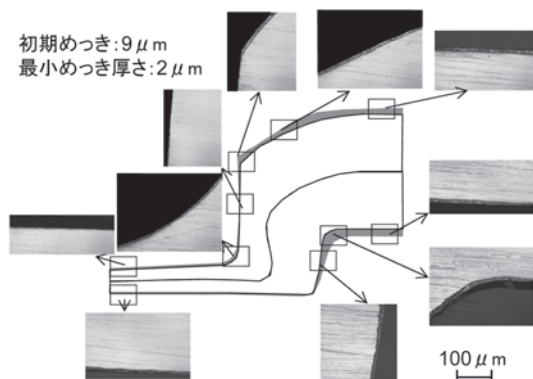


図8 亜鉛-アルミニウム合金めっきされた590MPa級の高張力鋼板同士の接合部の上面と下面のめっき（1.2mmの厚さ、ダイ直径と深さはそれぞれ8.5mmと1.8mm）

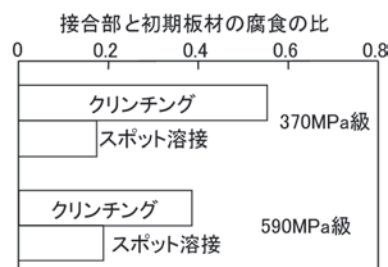


図9 亜鉛-アルミニウム合金めっきされた590MPa級の高張力鋼板の接合部と母材の耐食性の比

高張力鋼板を配置するとパンチ肩部付近の高張力鋼板が破断している。一方、下板に高張力鋼板を配置するとダイ溝付近において高張力鋼板にクラックが生じている。これらは、ともに高張力鋼板の低延性により生じたものである。板材の変形挙動は有限要素シミュレーションにより予測できるために、高張力鋼板の変形の集中を緩和させたダイ形状に修正すると欠陥なく接合できている³⁰⁾。

4 接合強度

4.1 接合強度試験方法

接合された板材の接合強度は、板材の組み合わせ、金型形状および測定方向により変化するが、各種の接合法により接

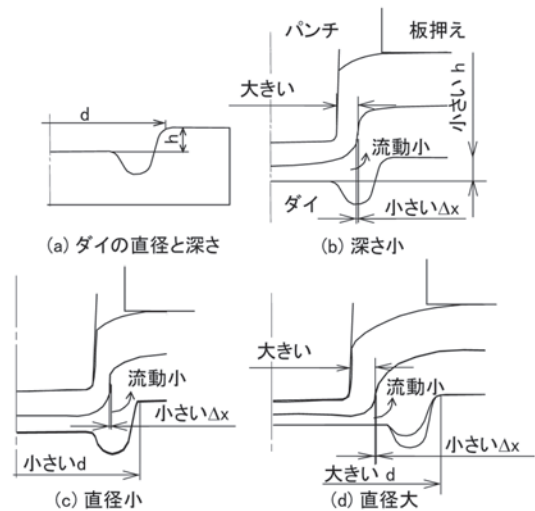
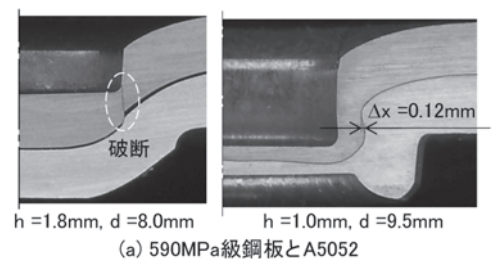
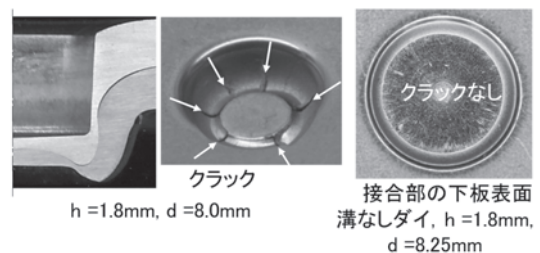


図10 板材の変形挙動に及ぼすダイ形状の影響



(a) 590MPa級鋼板とA5052



(b) A5052と780MPa級鋼板

図11 1.4mm厚さの高張力鋼板と1.5mmのアルミニウム合金板の接合

合された接合部強度の比較の報告^{27,32-34})、また、詳細な強度特性についても報告されている³⁵⁻⁴⁴)。本章ではこれまでに著者らが行った結果を示す。

接合された板材の強度の測定には、図12に示すようなスポット溶接の強度試験である引張せん断試験⁴⁵⁾と十字引張試験⁴⁶⁾が利用される。これらの引張方向は、パンチ押し込み方向に対して並行または垂直となるためにその間の方向について調査している報告もある³⁸⁾。また、接合部の静的な強度だけでなく疲労強度が重要になることもある。

4.2 接合強度

計算と実験により得られたセルフピアスリベットにより接合された板材の十字引張試験における荷重とストロークの関係を図13に示す。計算モデルは2次元軸対称から1/4対称の3次元へ拡張されて周囲の板材が外挿された。荷重曲線と最終の変形挙動は似ており、計算により接合断面形状だけでなく、接合強度もほぼ予測できる⁴⁷⁾。

1.2mm厚さの亜鉛-アルミニウム合金めっきされた鋼板同士をメカニカルクリンチングし、その板材の引張せん断試験と十字引張試験における最大荷重を図14に示す。比較のためにスポット溶接を示す。最大荷重は、いずれの接合でも引張せん断荷重のほうが大きい。また、メカニカルクリンチングされた板材は、いずれの試験においても、最大荷重はスポット溶接の1/3程度である。

セルフピアスリベットおよびメカニカルクリンチで接合された鋼板とアルミニウム合金板の引張せん断試験と十字引張試験における最大荷重を図15に示す。板材の組み合わせにより接合できる条件が異なって種々の断面形状となり、荷重

を受け持つ部位が変わるために破壊形態が変化する。いずれの試験においてもセルフピアスリベットの最大荷重は、メカニカルクリンチングよりも大きい。特に、メカニカルクリンチングの最大荷重は低いために、最弱部の肉厚の増加や接合界面の凝着による最大荷重の向上策が試みられている⁴⁸⁻⁵⁰⁾。

セルフピアスリベットおよびメカニカルクリンチで接合された板材の引張せん断試験と十字引張試験における疲労試験結果を図16に示す。比較のためにアルミニウム合金板同士をスポット溶接した板材の結果も示す。引張せん断試験と十字引張試験における疲労限度では、セルフピアスリベット、メカニカルクリンチ、スポット溶接の順で高くなっている。これは、セルフピアスリベットとメカニカルクリンチで接合すると板材同士がスポット溶接のように金属的に接合しておらずに機械的に接合されているために、板材界面がすべることができて応力が集中しないためである。

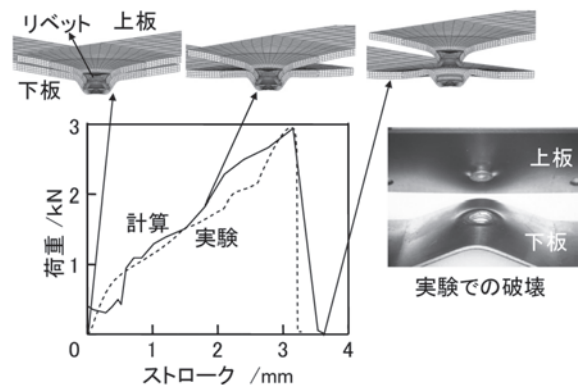


図13 計算と実験により得られたセルフピアスリベットにより接合された板材の十字引張試験における荷重とストロークの関係

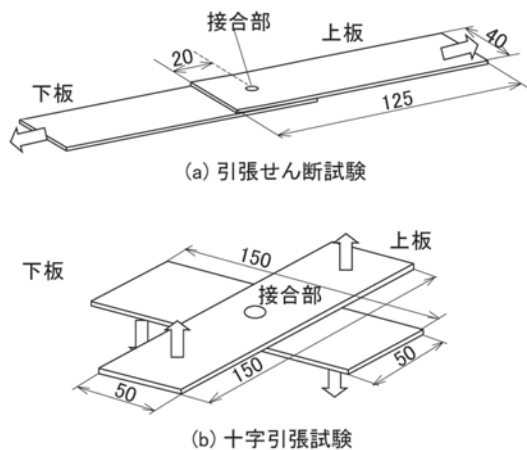


図12 引張せん断試験と十字引張試験方法

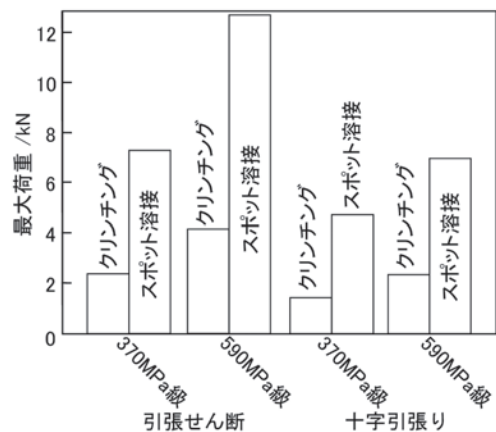


図14 メカニカルクリンチングされた板材の引張せん断試験と十字引張試験における最大荷重 (1.2mm厚さの亜鉛-アルミニウム合金めっきされた鋼板同士)

5 おわりに

自動車車体の軽量化のために高比強度材である高張力鋼板とアルミニウム合金板の利用が拡大している中で、本稿では筆者らが取り組んできた一部について紹介した。セルフピアスリベッティングとメカニカルクリンチングは、異種合金板の接合、高い疲労限、低い接合コスト、めっき厚さ減少の低減などの利点がある。また、接合条件と接合強度はシミュレーションにより容易に決定できつつある。今後の発展には、接合性のみならず、接合強度を向上させる接合法の開発が期待される。

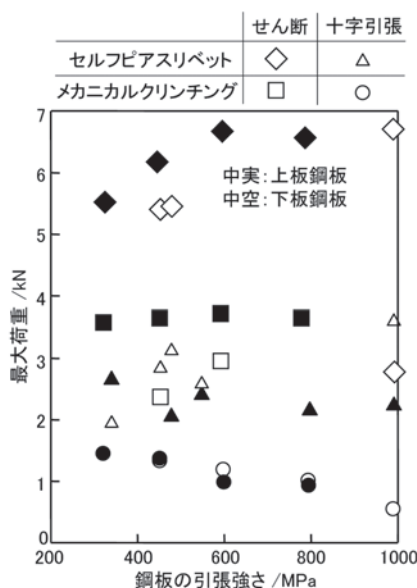


図15 セルフピアスリベットおよびメカニカルクリンチで接合された鋼板とアルミニウム合金板の引張せん断試験と十字引張試験における最大荷重

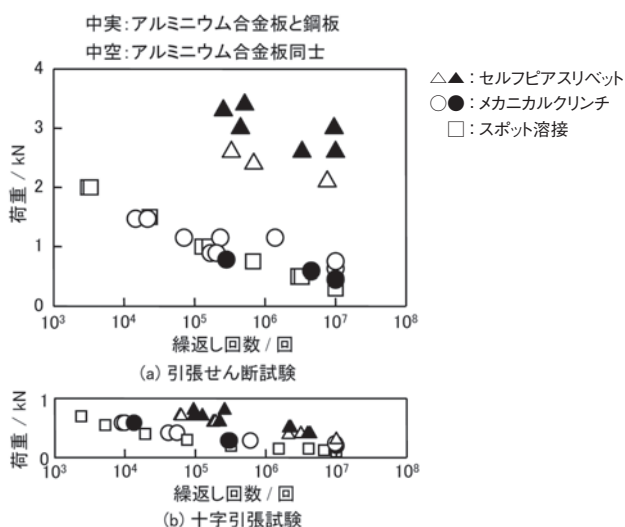


図16 セルフピアスリベットおよびメカニカルクリンチで接合された板材の引張せん断試験と十字引張試験における疲労試験結果

参考文献

- 1) 渡辺健彦, 土井悠平, 柳沢敦, 小沼静代: 溶接学会論文集, 23 (2005) 3, 491-495.
- 2) R.Fuhrmeister: United States Patent, 4106180, (1978)
- 3) 廣瀬明夫: 自動車技術, 61 (2007) 4, 18-23.
- 4) 松村吉修, 小川伸一, 三崎利次: 自動車技術, 61 (2007) 4, 78-82.
- 5) 加藤亨, 安部洋平, 森謙一郎, ユヌソフ ラフシャンベク: 自動車技術会論文集, 37 (2006) 6, 219-224.
- 6) R.Cacko, P.Czyżewski and A.Kocaña: Steel Grips, 2 (2004), 307-310.
- 7) Y.Abe, T.Kato, K.Mori and X.Wu: Advanced Technology of Plasticity 2005, ed. by P.F. Bariani et al., (2005), CD-ROM.
- 8) R.Porcaro, A.G.Hanssen, M.Langseth and A.Aalberg: Journal of Materials Processing Technology, 171 (2006), 10-20.
- 9) G.Casalino, A.Rotondo and A.Ludovico: Advances in Engineering Software, 39 (2008), 787-795.
- 10) E.Atzeni, R.Ippolito and L.Settineri: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58 (2009) 1, 17-20.
- 11) 安部洋平, 加藤亨, 森謙一郎, 酒井慎吾: 塑性と加工, 50 (2009) 585, 941-945.
- 12) 加藤亨, 安部洋平, 森謙一郎, ユヌソフ ラフシャンベク: 自動車技術会論文集, 37 (2006) 6, 219-224.
- 13) J.Varis: Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006) 1, 130-138.
- 14) 多々良浩昭: プレス技術, 40 (2002) 3, 107-111.
- 15) S.W.Pak and S.Y.Kwon: SAE Tech. Pap. Ser. (Soc Automot Eng), 950714, (1995)
- 16) LIN Peizheng, 小松健, 小久保邦雄: 日本機械学会論文集 A編, 76 (2010) 763, 317-324.
- 17) J.Varis: Thin-Walled Structures, 40 (2002) 3, 225-238.
- 18) Y.Abe, T.Kato and K.Mori: AIP Conference Proceedings, 1353 (2011), The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming Esaform 2011, 1253-1258.
- 19) C.Borsellino, G.Di Bella and V.F.Ruissi: Key Eng. Mater., 344 (2007), 685-692.
- 20) R.Neugebauer, R.Mauermann and S.Dietrich: Advanced Technology of Plasticity 2005, ed. by P.F. Bariani et al., (2005), CD-ROM.
- 21) F.Riedel, M.Todtermuschke, B.Awizus and UBeyer: Proc. 2nd Int. Conf. New Forming Tech., ed. by F.Vollertsen et al., (2007), 441-450.

- 22) V.Hamel, J.M.Roelandt, J.N.Gacel and F.Schmit : Computers and Structures, 77 (2000) , 185-200.
- 23) J.P.Varis and J.Lepistö : Thin-Walled Structures, 41 (2003) , 691-709.
- 24) M.Oudjene and L.Ben-Ayed : Engineering Structures, 30 (2008) , 1782-1788.
- 25) A.A.de Paula, M.T.P.Aguilar, A.E.M.Pertence and P.R.Cetlin : Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007) 1-3, 352-357.
- 26) 森清和 : 自動車技術, 61 (2007) 4, 13-17.
- 27) 広瀬明夫, 小林紘二郎 : 軽金属, 56 (2006) 3, 184-188.
- 28) Y.Abe, T.Kato and K.Mori : Materials Science Forum, 561 (2007) 565, 1043-1046.
- 29) C.J.Lee, J.Y.Kim, S.K.Lee, D.C.Ko and B.M.Kim : Materials and Design, 31 (2010) , 1854-1861.
- 30) 安部洋平, 森謙一郎, 加藤亨, 松田晃 : 塑性と加工, 51 (2010) 589, 141-145.
- 31) 安部洋平, 岸本和也, 加藤亨, 森謙一郎 : 塑性と加工, 51 (2010) 593, 592-596.
- 32) 原賀康介, 金坂敏行, 馬淵晃, 船崎敦, 高山直樹, 山本三幸, 高橋伸一郎 : 日本接着学会誌, 34 (1998) 11, 432-438.
- 33) K.Haraga : Weld World, 44 (2000) 4, 23-27.
- 34) L.Han, M.Thornton and M.Shergold : Materials & Design, 31 (2010) 3, 1457-1467.
- 35) D.G.Saathoff and P.K.Mallick : SAE Tech. Pap. Ser., 980693, (1998)
- 36) 田辺泰彦, 青木博文, 松本由香, 柳井裕俊, 柴田聡 : 構造工学論文集B, 50B (2004) , 367-372.
- 37) M.Carboni, S.Beretta and M.Monno : Eng. Fract. (Mech.) , 73 (2006) , 178-190.
- 38) R.Porcaro, A.G.Hanssen, M.Langseth and A.Aalberg : International Journal of Solids and Structures, 43 (2006) , 5110-5131.
- 39) M.Carboni, S.Beretta and M.Monno : Engineering Fracture Mechanics, 73 (2006) 2, 178-190.
- 40) B.Li and A.Fatemi : International Journal of Fatigue, 28 (2006) , 9-18.
- 41) P.Briskham : SAE Tech. Pap. Ser., 2006-01-0774 (2006) .
- 42) E.Atzeni, R.Ippolito and L.Settineri : Key Eng. Mater., 344 (2007) , 655-662.
- 43) 林沛征, 小松健, 小久保邦雄 : 塑性と加工, 52 (2011) 603, 459-463.
- 44) 林沛征, 小松健, 小久保邦雄 : 塑性と加工, 52 (2011) 603, 464-468.
- 45) 日本規格協会 : JIS-Z-3136 (1999)
- 46) 日本規格協会 : JIS-Z-3137 (1999)
- 47) K.Mori, Y.Abe and T.Kato : Materials Processing and Design : Modeling, Simulation and Application, ed.by J.M.A. Cesar de Sa et al., AIP Conf. Proc., 1 (2007) , 197-202.
- 48) 村上碩哉, 荒木康之, 水島大介 : 塑性と加工, 50 (2009) 579, 333-337.
- 49) 水島大介, 村上碩哉 : 塑性と加工, 51 (2010) 597, 974-978.
- 50) 安部洋平, 岸本和也, 加藤亨, 森謙一郎 : 塑性と加工, 52 (2011) 603, 419-423.

(2011年6月30日受付)