

小形軽量化、環境負荷低減、生産性向上のための 塑性アセンブリ技術の研究

東京工業大学大学院理工学研究科 機械物理工学専攻

教授 村上碩哉

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007001)

キーワード：メカニカルクリンチング、塑性結合、接合

1. 研究の目的と背景

自動車等の軽量化を図るため、アルミニウム合金板の適用が進められており、アルミニウム合金板を効果的に接合できる方法の確立が望まれている。板同士の接合法は各種あり、鋼板では抵抗スポット溶接が主流である。しかし、アルミニウム合金は電気抵抗が小さく、熱伝導率、熱膨張率、凝固収縮率が大きいために、スポット溶接を用いて接合を行った場合には大電流を要する、熱影響部の拡大による変形や割れが生じる、アルミの凝着による電極のドレッシングが煩雑に必要となる、などの問題があり、より適した接合方法が求められている。他の接合法としてセルフピアシングリベットが実用化されているが^{1)~3)}、鋼製リベットを使用するためランニングコストが高く、またリサイクル性にも問題がある。

メカニカルクリンチングは、**図1**に示すようにパンチの下降によってダイ内に導入した材料をパンチとダイの底面間で押しつぶし、径方向に流動させることで上板と下板間にお互いが噛み合う形状（インターロック）を形成し、機械的に結合する方法である。生産性が高く、リベットなど結合部材が不要なためランニングコストが低く、またリサイクル性にも優れている⁴⁾。さらに、平板状の板の場合には、プレス成型などに組み込んで多点を同時に接合することも可能である。しかし抵抗スポット溶接やセルフピアシングリベット等と比べて、剥離強度が約50%と低いという欠点があり^{5), 6)}、今後メカニカルクリンチングの適用拡大のためには剥離強度の向上が必要である。

そこで、本研究は2つの方法により、剥離強度の向上を図る。先ず第2章ではメカニカルクリンチングにおけるインターロック部の形状が剥離強度に影響を明らかにし、その強度を向上させる方法を提案する。ついで第3章では2枚の板の接合界面における摩擦力増加が剥離強度向上に効果的であると考え、まず接合界面状態が剥離強度に及ぼす影響を明らかにした。次に接合界面における摩擦力を増加させることにより剥離強度向上を図った。

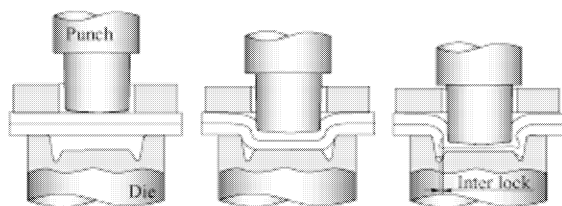


図1 メカニカルクリンチング概要

2. 剥離強度に及ぼす突起付き板押えの影響

2・1 実験、解析方法

本研究で用いる実験金型を**図2**に示す。板押え（ストリッパプレート）付きメカニカルクリンチング用工具の塑性加工部形状の例を**図3**に示す。本研究では板押えに着目し、通常は平板の板押えに**図4**に示す形状の突起などをつけて接合を行い、剥離試験と接合部の断面観察を行った。

(A)は通常のメカニカルクリンチングに適用されている平板状のものである。(B)~(D)は接合部の断面形状のパラメータを変化させて、剥離強度への影響を把握する目的で3種類を選択した。(B)は外側への材料の流出を防止し、(C)は材料を積極的に内側へ移動させ、また(D)はその中間を狙ったものである。**図3**に示しているのはB形状の板押えである。パンチとダイの間に挿入した板材2枚にまず板押えで荷重をかけ、その後板押えをしたままパンチ

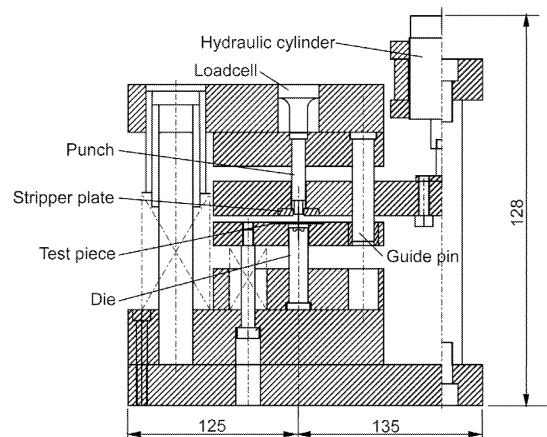


図2 実験金型の概要

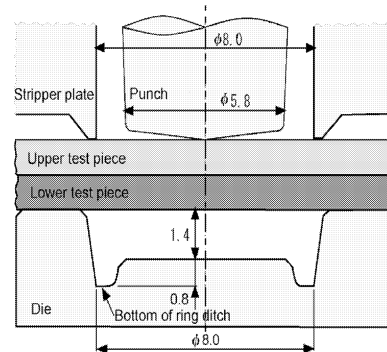


図3 メカニカルクリンチング工具の概要

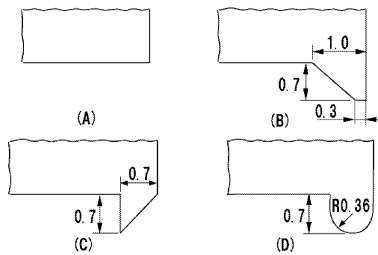


図4 突起付き板押えの形状

表1 アルミニウム板の機械的特性

材質	A5182
板厚	1.0 mm
引張強さ	270 MPa
降伏応力	128 MPa
伸び	31.0 %

表2 解析条件

解析ソフト	DEFORM-2D
メッシュ数	3000
パンチ速度	$1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
降伏応力	128 MPa
伸び	31.0 %

で押し込んで接合する。板押えとパンチはそれぞれ油圧シリンダと油圧試験機により独立に作動させた。今回はパンチ径とダイ径は変化させず、パンチの挿入深さ、板押えの種類を変化させた。板押え力は板押え(A)の場合6.3 kN、板押え(B)~(D)の場合8.3 kNとした。この板押え荷重はそれ以上増加させても剥離強度が変化しない値(圧痕部の面圧換算で400 Mpa程度)に設定した。接合の評価として剥離試験と接合部の断面観察を行った。剥離試験を行うため、十字形に接合した試験片の4隅にφ10の穴を空け、治具にボルトで固定した。そして引張速度5 mm/minで剥離試験を行った。接合材は板厚1 mmのアルミニウム合金板A5182を用いた。その材料特性を表1に示す。

解析には有限要素法シミュレーションソフトDEFORM-2D (SFTC社)を用いた。解析モデルは軸対称モードを選択し、パンチ、ダイ、板押えなどの金型は剛体、接合材は弾塑性体とした。摩擦モデルはせん断摩擦モデルを採用した。せん断摩擦係数に関しては、接合材間はDEFORMのアルミニウム板間の推奨値 $m = 0.4$ に、またアルミニウムと工具間は著者らの以前のデータ⁷⁾をもとに $m = 0.3$ とした。解析条件を表2に示す。

2.2 突起付き板押えの剥離強度に及ぼす効果

図5に剥離強度の結果を示す。1つのプロットは3つの剥離実験データを平均した結果である。横軸の底部板厚 t はパンチの挿入につれて減少する値であるため、それに合わせ数値を反転させている。板押え形状の種類によらず、底部板厚 t が小さくなるにつれて剥離強度が向上している。また、突起付き板押えを用いることにより、底部板厚 t の

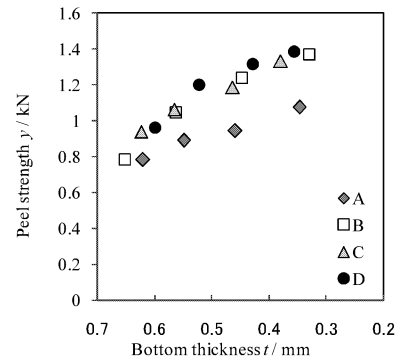


図5 板押え形状と剥離強度との関係

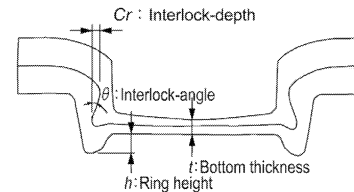


図6 接合部断面の形状パラメータ

減少とともに平板状板押え(A)と比較して剥離強度向上が見られた。剥離強度は、平板状板押え(A)と比べ突起付き板押え(B)と(C)では底部板厚0.3~0.55 mmの範囲において平均30%、突起付き板押え(D)では平均35%向上しており、(D)が最も効果が高かった。なお、剥離強度向上の割合の算出は同じ底部板厚 t で板押え(A)の強度を仮想的に計算することで行っている。この板押え(A)による剥離強度 y (kN)は実験値のプロットから実験式 $y = -0.858t + 1.34$ を導出して求めた。

2.3 接合部断面の形状パラメータと剥離強度との関係

メカニカルクリンチングの剥離強度は接合材の上板と下板のかみ合い(インターロック)によるものとされている^{4), 8)}。そこで、図6のように接合部断面のパラメータを定義して、インターロックに関する形状パラメータとして、半径方向深さ Cr とインターロック角度 θ を採用する。ただし、インターロック角度 θ は接合部断面上において境界線の傾きが最大となる値とした。図7に底部板厚 $t = 0.45$ mmにおける接合部断面を示す。塗りつぶした断面写真は突起付き板押え(D)を用いて接合したものであり、上部に板押えによる凹部がある。比較のために平板状板押え(A)を用いて接合した結果を白い輪郭線で示してある。突起付き板押え(D)を用いると、平板状板押え(A)を用いて接合した場合よりもリング溝張出し高さ h やインターロック角度 θ が大きくなっている。著者らによる従来の研究において、平板状板押え(A)を用いたとき、剥離強度と半径方向インターロック深さ Cr はほぼ比例関係にあった⁹⁾。

ところが今回、図8に示すように、同じ底部板厚 t において板押え(A)と、突起付き板押え(B)~(D)を用いて接合した試験片の接合部断面を比較した場合、剥離強度が大きく異なるにもかかわらず、半径方向インターロック深さ Cr に関して板押え形状の違いによる顕著な差はなかった。図9に示すように、半径方向インターロック深さ Cr

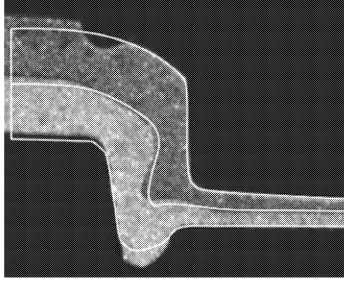


図7 突起付き板押えが断面の変形に及ぼす影響

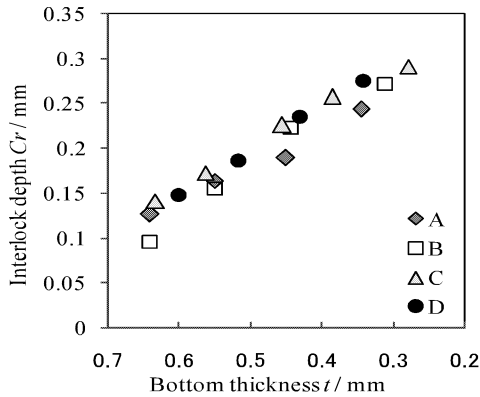


図8 インタロック深さと底部板厚の関係

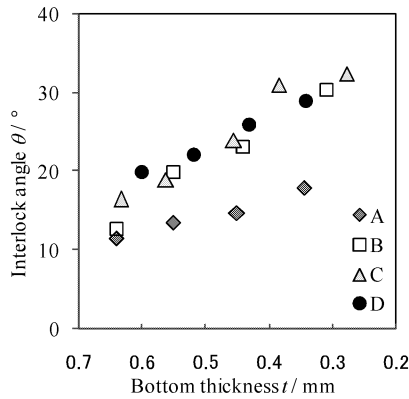


図9 剥離強度とインタロック深さの関係

が大きいと剥離強度が大きくなる傾向は変わらないが、半径方向インタロック深さ C_r が等しくても板押え形状が変わると剥離強度が異なっている。したがって剥離強度は半径方向インタロック深さとは別のパラメータによっても決定されていると考えられる。

各種板押えにおけるインタロック角度 θ と底部板厚 t の関係を図10に示す。突起付き板押えを用いた場合は、平板状板押えの場合と比較して、同じ底部板厚 t ではインタロック角度 θ が大きくなっている。そして、底部板厚 t が小さくなるほど板押え(A)と比べ、突起付き板押え(B)~(D)で接合された試験片のインタロック角度 θ が大きくなった。

そこで、剥離強度とインタロック角度 θ の関係を図11に示す。板押え形状によらず、インタロック角度に対して

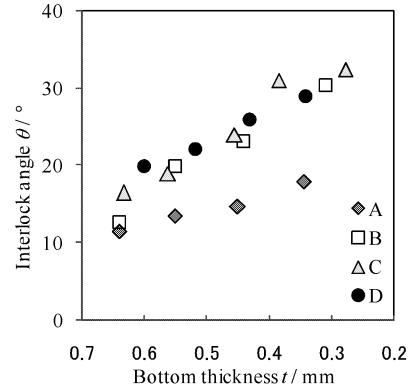


図10 インタロック角度と底部板厚の関係

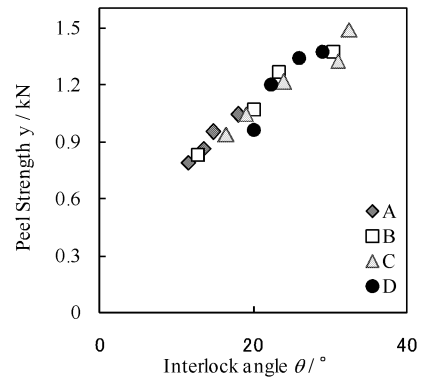


図11 剥離強度とインタロック角度の関係

剥離強度はほぼ1本の直線上にある。インタロック角度 θ が大きい程、剥離強度も高くなるので、剥離強度を向上させるには、インタロック角度 θ を大きくすることが有効であることが明らかになった。

2.4 インタロック角度 θ 増加の検討

2.4.1 実験結果

図12に底部板厚 t とリング溝張出し高さ h の関係を示す。突起付き板押え(B)~(D)を用いた場合、平板状板押え(A)と比べリング溝張出し高さ h の形成が早く、パンチの押し込みにより底部板厚 t が0.55 mm付近になると下板がダイのリング溝底部に接触する。平板状板押え(A)の場合は、底部板厚 t が0.3 mm付近になってもリング溝張出し高さ h がリング溝底部に達していない。一方、図13より、リング溝張出し高さ h がダイのリング溝深さと等しくなった後、インタロック角度 θ が大きくなる。以上より突起付き押えにより、リング溝に材料が早く流動してインタロック角度 θ が増加し、剥離強度が向上したと言える。突起付き板押えの突起形状に関しては、(D)が若干良好な値を示すが、現時点ではその差は明確ではなく、突起形状の最適化は今後の課題である。

2.4.2 解析結果

突起付き板押えの効果を確認するために、平板状板押え(A)と最も効果の大きかった突起付き板押え(D)の有要素法解析を行った。図14のように、中心から半径方

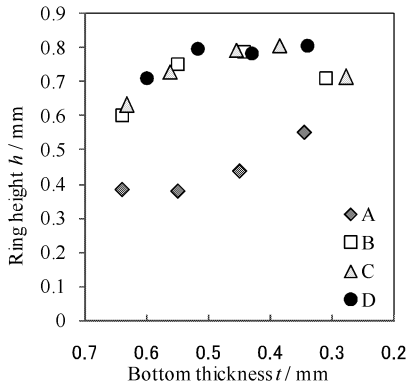


図 12 リング溝高さと底部板厚の関係

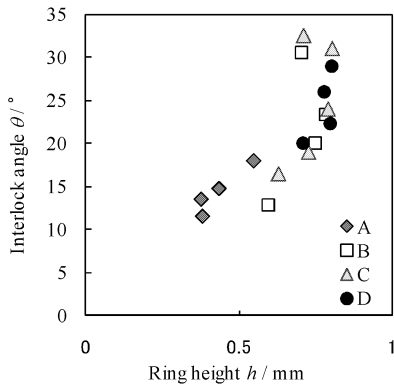


図 13 インターロック角度とリング溝高さの関係

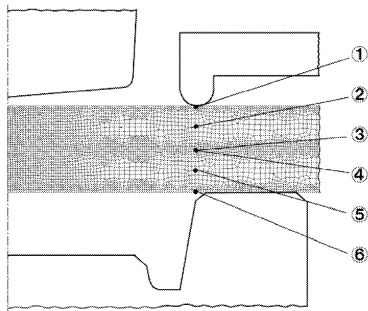


図 14 有限要素解析と変位を追跡した位置

向外側 4.36mm の位置 (突起の頂部) に上から①～⑥の計 6 点を取り (板押え (A) も同様), それらの点の半径方向 (外側を正) の変位を底部板厚 t が 0.55 mm になるまで解析したところ, 図 15 の平板状板押え (A) に比較して, 図 16 の突起付き板押え (D) を用いて接合した場合は, 各点, 特に両板の下面である⑥, ③の変位が大幅に減少している. 突起付き板押え (D) を用いて接合したほうが材料は内側に流れやすく, また外側に流れにくくなっている. 突起付き板押えによりリング溝への充填のタイミングを早めることが出来たといえる.

パンチが挿入するにつれて下板の材料がリング溝底部に達し, リング溝張出し高さ h が 0.8 mm となった後にインターロック角度 θ が増加する現象を解明するために, 有限要素法解析により材料の流れを調べた. その結果を図 17 に示す. 左から順に底部板厚 t が 0.50 mm, 0.49 mm, 0.40 mm の場合の材料各点の速度ベクトルを示している. (a)は下板

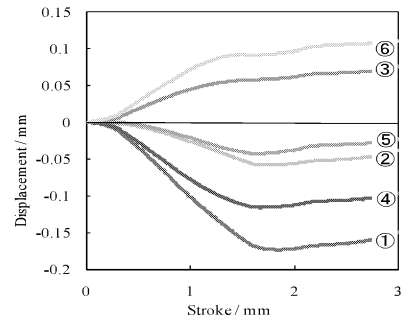


図 15 平板状板押えにおける追跡点の変位

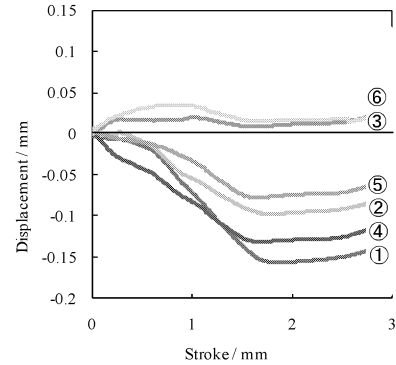
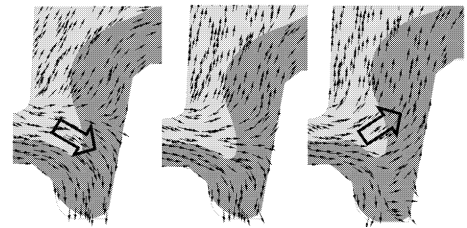


図 16 突起付き板押えにおける追跡点の変位



(a) $t=0.5\text{mm}$ (b) $t=0.49\text{mm}$ (c) 0.40mm

図 17 底部板厚毎の流動方向と速度

の材料がリング溝底部に達する直前の状態, (b)は下板の材料がリング溝底部に達した状態, (c)は更にリング溝に下板の材料が充填している状態である. 下板の材料がリング溝底部に達すると, 矢印で示すようにリング溝周辺に位置する上板材料の流動方向が斜め下方向から斜め上方向へ変化し, インターロック角度 θ が増加している. リング溝への材料の充填のタイミングを早めることが有効であることがここでも確認できた.

3. 剥離強度に及ぼす接合界面の摩擦力の影響

3.1 接合界面状態と剥離強度の関係

接合部材間の脱脂と油塗布によって, 接合界面の摩擦状態の差が剥離強度に与える影響を調べた.

3.1.1 実験方法

供試材は自動車パネル材料として一般的な A5182, 板厚 1.0mm とした. 接合実験に用いた工具は TOX 社製のものです. 図 18 にそのパンチ形状を, 図 19 にダイ形状を示す. 試験片は 25 mm×75 mm の長方形とし, 十字に組み合わせ

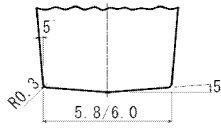


図 18 パンチ

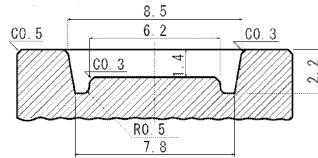


図 19 ダイ

表 3 試験片の表面条件

納入状態	揮発性圧延油が付着している
脱脂	アセトン中で 15 分間超音波洗浄
油塗布	脱脂後動粘度 56mm ² /s の工作油を塗布後拭取り

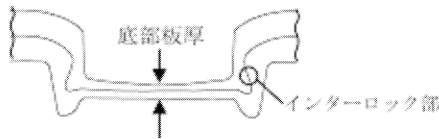


図 20 接合部断面

て接合した。板押さえ荷重は 6.3 kN とした。試験片表面条件を表 3 に示す。接合界面状態に違いを作るために納入状態、脱脂、油塗布の 3 つの条件とした。

底部板厚が 0.4 mm～0.7 mm となる範囲で接合を行った。剥離強度は十字引張試験によって測定した。引張速度は 5 mm/min とした。接合界面観察部位はインターロック部とした。接合部断面の各部名称を図 20 に示す。

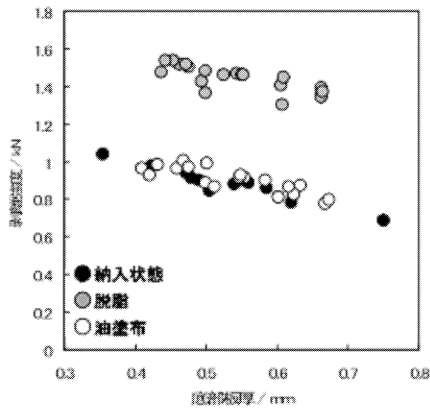


図 21 剥離試験結果

3.1.2 剥離試験

剥離試験の結果を図 21 に示す。底部板厚の減少に対応して剥離強度が高くなる傾向がどの条件でも確認することができる。納入状態と油塗布条件では大きな差は見られなかった。これらと比較し脱脂条件では 600 N 程度高い値となり、脱脂によって剥離強度が底部板厚 0.4 mm 付近では 50% 程度、0.7 mm 付近では 80% 程度向上することが明らかとなった。

3.1.3 剥離後の表面観察

剥離分解したパンチ側試験片の表面状態を観察した。図 22 にその観察部位を示す。図 23(a) の油塗布条件では、細かな筋が付いている程度であるが、図 23(b) の脱脂条件は非常に荒れた表面となっている。また金属片が付着した

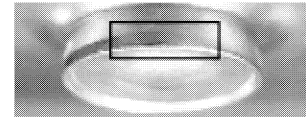
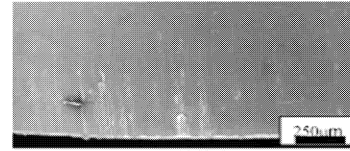
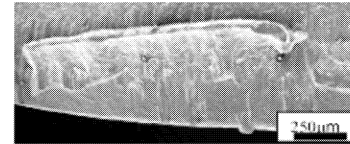


図 22 表面観察部位

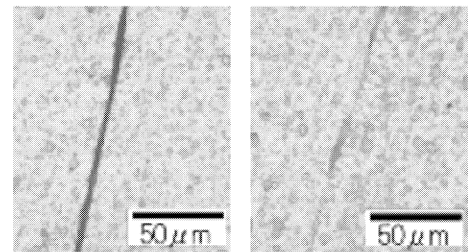


(a) 油塗布



(b) 脱脂

図 23 剥離後表面状態



(a) 油塗布

(b) 脱脂

図 24 接合界面組織

ようなものが観察された。脱脂条件では接合界面で焼付きやかじりに近い現象が起こっていると考えられる。

3.1.4 接合界面組織観察

接合後のインターロック部断面組織観察を行った。図 24 に観察結果を示す。油塗布条件では境界がはっきりしているのに対し、脱脂条件では部分的に境界が消え、母材金属と区別できなくなっている。よって脱脂条件では接合界面で凝着が起きていることが明らかとなった。このことから脱脂による剥離強度の増加は、この接合界面における凝着によって材料間の摩擦力が増加し、剥離の際の抵抗力が増したために起きたと考えられる。

3.2 接合界面の摩擦력에着目した高強度化

脱脂することで 80% の剥離強度向上が可能であることが明らかとなったが、更なる高強度を得るために次の 2 つの手法について検討を行った。①試験片を予め超音波接合し、接合界面の凝着をより強固なものとする事で高い剥離強度を期待する、超音波併用条件。②接合面に硬質粒子を塗布することで粒子のアンカー効果による摩擦増加を引き起こし、剥離強度を向上する方法。

3.2.1 実験方法

超音波併用条件では、脱脂した試験片を十字に組み合わせ中心付近 5 mm×5 mm の範囲を超音波接合した。超音波接合には TELSONIC-M4000 を用いた。接合条件を表 4

表 4 超音波接合条件

出力	周波数	印加時間	振幅	加圧力
2 kW	20 kHz	0.4 s	40 μm	940 N

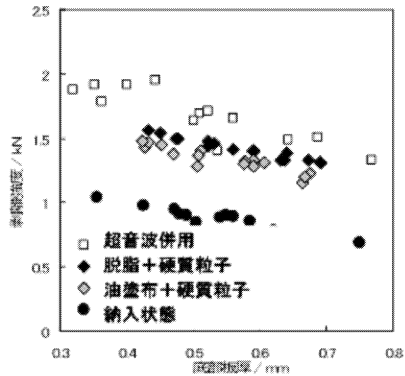


図 25 各種表面条件における剥離試験結果

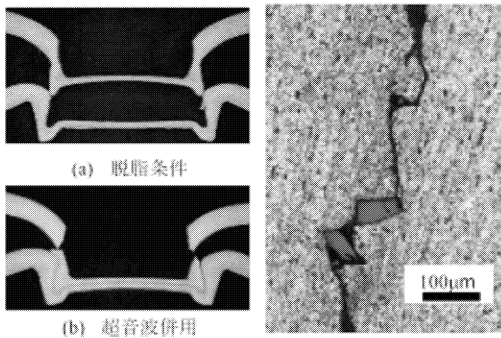


図 26 剥離後断面 図 27 硬質粒子塗布接合面

に示す。接合された部分に、これまでと同様の条件でメカニカルクリンチングを施し、剥離試験、断面観察を行った。

硬質粒子塗布条件としては市販の摩擦増加材（ケイ素系鉱物粒子と多価アルコールの混合物）を接合部表面に塗布し、これまでと同様の条件で接合を行い、剥離試験、断面観察を行った。粒子塗布前の試験片表面は油塗布と脱脂の2つの条件とした。

3.2.2 剥離試験

図 25 に剥離試験結果を示す。超音波併用条件では納入状態と比較し 500~1000 N、割合では 60%~100%高い剥離強度が得られた。脱脂後硬質粒子塗布条件では未処理と比較して 600 N 程度高い値となり、脱脂のみの場合と同等の剥離強度を示した。油塗布後硬質粒子塗布条件では脱脂後硬質粒子塗布条件と比較して若干低い値となった。しかし、硬質粒子の塗布により油脂が付着した面に対して 50~60%の剥離強度向上効果があると言える。

3.2.3 断面観察

図 26 に剥離後断面形状を示す。油塗布条件、脱脂条件、硬質粒子塗布条件などでは、図 26(a)のように破断が生じることはなく、接合界面が滑ることで分解する。しかし、超音波接合条件では図 26(b)のように接合界面にすべりが生じることなく、破断が生じて分解する。

また硬質粒子塗布条件の接合界面を図 27 に示す。粒子が材料表面に食い込み剥離の抵抗となっている様子を確認することができる。

以上、超音波併用、硬質粒子塗布の2つの方法など、接合界面の摩擦条件の変化はメカニカルクリンチングの高強度化に有効であることが明らかになった。

4. 結論

1. アルミニウム合金板同士のメカニカルクリンチングにおいて、剥離強度と接合部断面における形状パラメータの関係を実験と解析によって検討し、以下の知見を得た。

- 1) 突起つき板押えを用いることで、同じ底部板厚の状態では剥離強度を 35%程度向上させることができる。
- 2) 剥離強度向上には接合部の断面形状パラメータにおいて、インターロック角度 θ の影響が大きい。
- 3) 突起つき板押えを用いると材料の外側への流出が抑えられ、材料がダイ内に多く流動してインターロック角度 θ が急激に増加する。

2. メカニカルクリンチングにおいて、接合界面の摩擦力増加が剥離強度向上に効果的であることを明らかにした。

- 1) 超音波接合との併用によって界面の凝着をより強固なものとする事で最大 100%の剥離強度向上を得た。
- 2) 硬質粒子の塗布によって、油脂が付着した面に対して最大 60%の剥離強度向上を得た。

謝辞

本研究は平成 19 年度財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によって行われた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、佐藤千明：塑性と加工，46-533 (2005)，6-10.
- 2) 加藤亨・安部洋平・森謙一郎・呉宣：同上，47-541 (2006)，149-153.
- 3) Varis, J. : J. Mater. Process. Technol., 172 (2006), 130-138.
- 4) 多々良浩昭：塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会第3回セミナーテキスト，(2005)，53-64.
- 5) 廣瀬明夫・小林紘二郎：自動車用溶接・接合技術，軽金属，56-3 (2006)，184-188.
- 6) 自動車技術会構造コンクリート技術専門委員会ワーキンググループ3：軽金属溶接，41 (2003)，345-355.
- 7) 村上碩哉・佐々木文吾・米岡進・大竹尚登・安原鋭幸：塑性と加工，48-555 (2007)，293-297.
- 8) dePaula, A. A., Aguilar, M. T. P., Pertence, A. E. & Cetlin, P.R. : J. Mater. Process. Technol., 182 (2007), 352-357.
- 9) 村上碩哉・荒木康之・水島大介：塑性と加工 50-579(2009)，333-337.