

接着剤を併用した高比強度異種板材の高効率塑性接合法の開発

豊橋技術科学大学 機械工学系

准教授 安部洋平

1. はじめに

自動車車体には燃費・電費の改善のために、比重に対して強度の大きな高比強度板材の利用が望まれている。炭素繊維強化樹脂、マグネシウム合金などの非常に小さな比重の板材も利用されるが、高いコスト競争力の超高張力鋼板とアルミニウム合金板の利用拡大が望まれている。鋼板とアルミニウム合金板の重ね接合に熔融を伴う接合を利用すると脆弱な金属間化合物が生じ、その制御が容易でないために加熱なしの機械接合が利用されることが多い。機械接合として下穴なしに押し込むのみで接合できるセルフピアスリベットがよく利用される。リベットでは、締結要素であるリベットが用いられており、リベットの重量、リベットと装置のコストが増加している。クリンチング接合は板材の塑性変形のみで接合するために低コストに接合でき、接合部の重量増加がない。しかしながら、クリンチ部の接合強度を受け持つ面積が小さいために、接合1点当たりの接合荷重が余り大きくなく、要求される荷重が小さな部位に使用されていることが多い。

エポキシ系接着剤は、自動車のドアパネル端の折返し接合部に焼付塗装工程で硬化させて利用されているほかに、溶接やリベットと併用して接合部の剛性と強度の向上、耐食性、振動特性の改善などに利用されている²⁾。この際、エポキシ系接着剤を硬化させる焼付塗装工程まで接合体の形状を保つために何らかの接合法と組み合わせる必要がある。クリンチング接合と接着剤を併用することにより接着剤の向上効果とともにリベットコストの低下が期待できる。しかしながら、上板と下板にある接着剤により低摩擦となり板材の変形挙動が変化して板材に破断を生じ、接合できない事例が生じていた³⁾。アルミニウム板のメカニカルクリンチングにおいて接触界面に塗布するプレス油の粘度により接合された断面形状が変わり剥離強度に影響することが報告されている⁴⁾。鋼板とアルミニウム合金板の2枚板の接合を対象にすると組み合わせは4種類であるが、特に上板に延性の低い高強度な鋼板と下板にアルミニウム合金板の組み合わせに接着剤を併用すると鋼板の破断が生じ易いことがあった⁵⁾。

本研究では、上板鋼板と下板アルミニウム合金板において上記の破断を抑制するためにエポキシ系接着剤にセラミック微粒子を添加し、接着剤塗布部の摩擦を増加させて接合性を改善した。その後、接合部の荷重を測定し、そのほかの接合法と比較した。

2. 接着剤を併用したクリンチング接合の工程と継手効率

自動車車体を想定すると数多くの鋼板とアルミニウム合金板を接合する組み合わせがあるが、今回は1.2mm厚さのめっきされた980MPa級超高張力鋼板と1.5mm厚さのアルミニウム合金A5052H材の組み合わせとした。接着剤は温度を上げて硬化させるエポキシ系とした。接着剤を併用したクリンチング接合の工程を図1に示す。下板のアルミニウム合金板上面にエポ

キシ系接着剤を塗布し、鋼板を重ねた後にクリンチング金型へ搬送し、パンチを押し込んで上板と下板の引っ掛かりであるインターロックを形成して機械的に接合する。その後、接着剤を硬化させるために電気炉により加熱し、接合部の断面観察と接合荷重を測定した。実接合においては、塗装工程の加熱による接着剤硬化までクリンチ接合によりインターロックを形成して部品を接合して、その後の組立て工程を可能にしている。クリンチング時には、破断等の欠陥なく接合するとともに接着剤が有効に作用するように板のフランジ部の隙間を減らす必要がある。

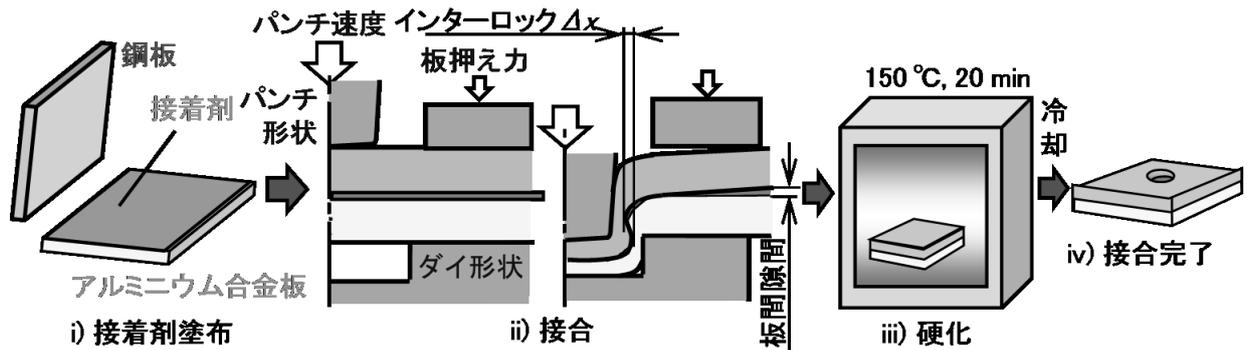


図 1. 接着剤を併用したクリンチング接合の工程

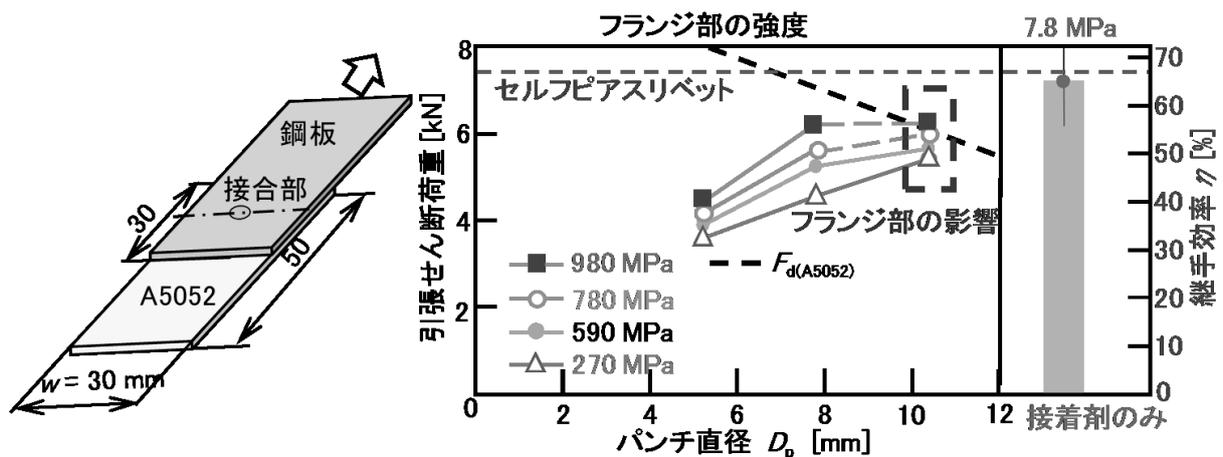


図 2. クリンチング接合のパンチ直径と引張せん断荷重

クリンチ接合部の強度は引張せん断試験によりよく評価される。図 2 は、重ね代を 30mm 角とした際の引張せん断荷重である。比較のために低強度の鋼板と接着剤単体の荷重⁹⁾を示す。クリンチング部の外の A5052 材フランジ部の長さから同部が受け持てる荷重 F_d を書き込んでいる。鋼板強度とクリンチングのパンチ直径の増加とともに接合荷重は大きくなる。フランジ部の受け持てる荷重はパンチ直径とともに減少していくために、10mm のパンチ直径では、フランジ部の荷重が低下して増加しなくなっている。また、大きなパンチ直径では重ね代を大きくとる必要があり、部品端部での接合には適さないことが予想されるために今回は 5.2mm のパンチ直径を基準とした。継手効率⁹⁾は、アルミニウム合金板の引張強さに板厚と板幅を乗じて得られる荷重を基準にした割合である。エポキシ系接着剤のみの 980MPa 級鋼板と A5052 の継手では、980MPa 級鋼板のめっきにより 7.8MPa 程度で接着剤単体のカタログ値よりも小さく、

継手効率は 65%程度であった。接着剤なしの 5.2mm のパンチ直径における 980MPa で 40%程度の継手効率であり、接着剤のみよりも低く、接着剤を併用することにより接着剤の継手効率程度に向上できる可能性がある。

3. 高張力鋼板とアルミニウム合金板の接着剤を併用したクリンチング接合における割れ

エポキシ系接着剤を併用したクリンチング接合における接着剤の塗布量と材料流動を図 3 に示す。エポキシ系接着剤を上下板の界面に塗布してクリンチング接合した。高い粘度のエポキシ系接着剤の塗布量が多い場合では、板同士の接触による摩擦が減少して下板のアルミニウム合金板の流動が増加するようである。ダイ外側に流動増加した下板により、ダイ底部の上板が増えるとともに、下板が上板の鋼板を持ち上げ、パンチ側壁部の上板が薄くなって破断するようである。

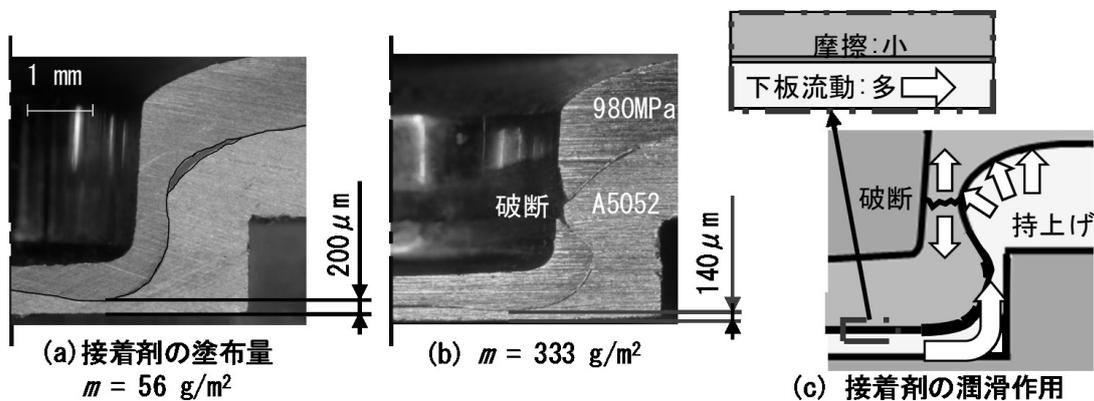


図 3. エポキシ系接着剤を併用した 980MPa 級鋼板と A5052 のクリンチング接合における接着剤の塗布量と材料流動

高い粘度のエポキシ系の接着剤を併用して接合する際に生じる上板の破断を抑制するためには、1) 高い延性の鋼板を用いる、2) 接合部の接着剤の塗布量を減らす、3) 下板の流動を金型形状により制御する、4) 上板と下板の間の減った摩擦を増加させるような対策が考えられる。図 3 で示した鋼板は、プレス成形性を重視した全伸びを優先した 980MPa 級鋼板であるために、1 のように今回生じた破断に有効な高い局部延性を有する鋼板へ接合工程前のプレス成形性を確保した上で置換することは有効である。塗布量を全体的に低減させると接着力が低下するので、2 のように接合部の塗布量を減らす様に制御できれば有効である。3 のようにダイ底角にくぼみを設けてくぼみ部へ流入させたり、ダイを多角形にして円周方向へ分布させたりすることで下板が上板を押し上げる量が低減でき、破断を抑制できる可能性がある。ここでは、接着剤が低下させた上板と下板の間の摩擦を取り戻すべく 4 に示した摩擦を高くする方法を試みた。

上下板間の摩擦を大きくする方法として、1) 接着剤の粘度を下げ、接着剤の流出性を増加させて摩擦を増やす、2) 接着剤に微粒子などを混ぜて上下板の力が伝わるように摩擦を増やす方法などが考えられる。前者は、接着剤の粘度を下げても上下板の接触が促進されれば摩擦が増えて接合性向上に有効であるが、低い粘度により接着層厚さの減少が生じて接着力が低下、また、他の部分へ流動して生産に差し支えないかなどの問題が想定される。小職は接着剤の特性変更について専門外なので、今回は 2 の方法を進め、具体的には硬質なガラスビーズを添加し

て、上板と微粒子と下板の接触による力の伝わりによって下板の材料流動を低下させることを目指した。

4. セラミック微粒子を添加した接着剤を併用したクリンチング条件

接着剤に硬質で球状のガラスビーズを添加して、上板と微粒子と下板を接触させて下板の材料流動を低下させる。添加する微粒子の大きさと量を実験により調査することにした。図4に接合条件を示す。上下板間に1液加熱硬化型エポキシ接着剤を塗布し、接着剤なしで欠陥なく接合できた条件のダイ径とダイ深さはそれぞれ8.5mmと1.5mm、5.2mmの直径を有するパンチを3.6mm押し込んだ条件を用いた。なお、接着剤はセメダイン製EP138、塗布量 $m=167\text{ g/m}^2$ で塗布し、接合後にはみ出た部分を拭き取って、150℃で20分の加熱、自然空冷して硬化させた。平均粒径 d が約15 μm から約240 μm のガラスビーズ粒子を用い、添加割合 $c=0\sim 50\text{ mass\%}$ の範囲で接着剤に添加して効果を検証した。

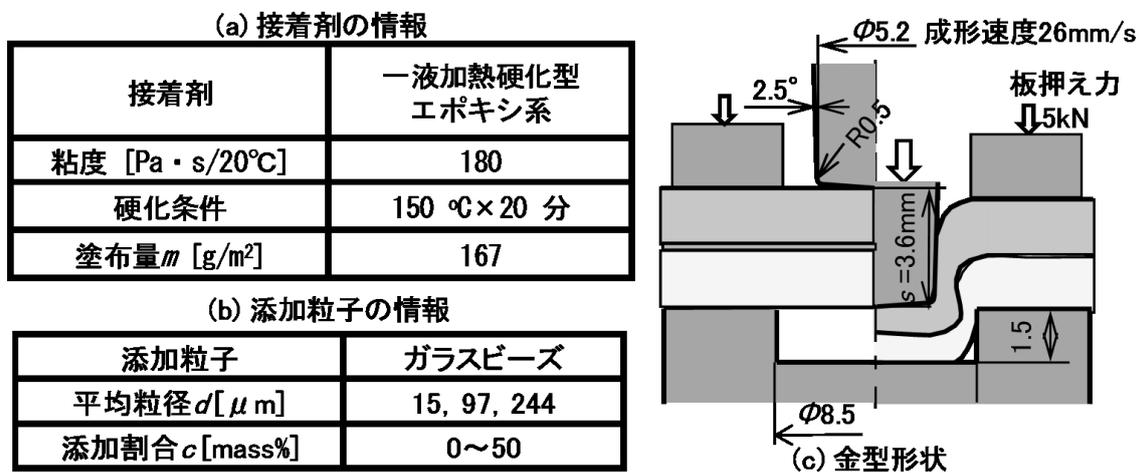


図4. エポキシ系接着剤を併用した980MPa級鋼板とA5052のクリンチング接合における接着剤、添加微粒子、金型形状。

5. セラミック微粒子を添加した接着剤を併用したクリンチングの効果

ガラスビーズを添加した接着剤を用いた接合実験により接合性を調査した。いずれの粒径においても添加により添加なしの $c=0\text{ mass\%}$ より接合性は向上しており、 $d=97\text{ }\mu\text{m}$ では、 $c=20\sim 50\text{ mass\%}$ で上板割れが1点のみの発生であり、添加による効果が高い。 $d=15\text{ }\mu\text{m}$ と $244\text{ }\mu\text{m}$ では、 $c=\text{約}10\text{ mass\%}$ から 20 mass\% において最大のものであるが、その範囲の接合率は最大で70%程度とあまり高く実生産に適さない。

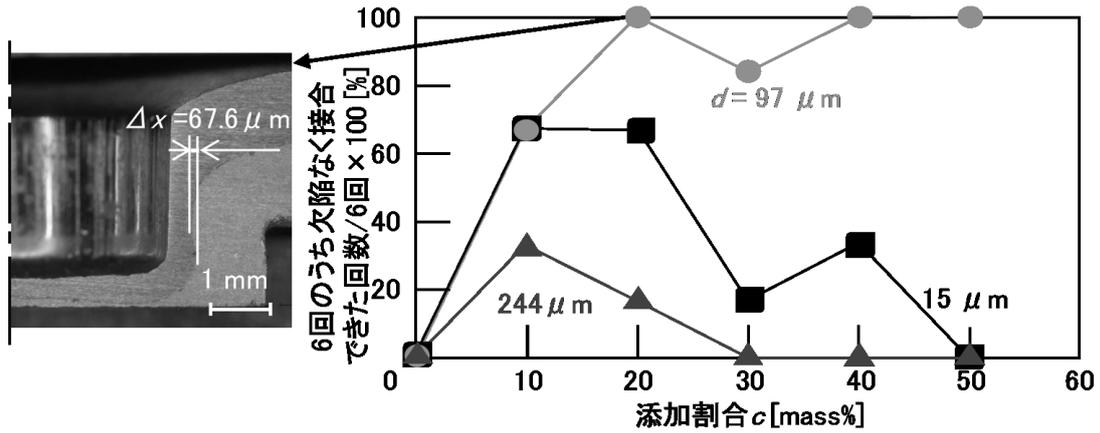


図 5. エポキシ系接着剤を併用した 980MPa 級鋼板と A5052 のクリンチング接合における接合性に及ぼす接着剤に添加した微粒子の大きさと割合の影響。

実験においてガラスビーズを接着剤に添加して接合性を向上できた。そこで、有限要素シミュレーションにより破断抑制の効果を示すが、微粒子を添加した接着剤をシミュレーションへ導入することは難しいので、クーロン摩擦を仮定し、微粒子添加接着剤使用時の摩擦係数を測定して計算に用いた。摩擦係数の測定には新生面が発生するしごき加工装置を用いて接着剤に $d = 97 \mu\text{m}$, $c = 20\text{mass}\%$ の条件で実験的に摩擦係数を測定した。得られた微粒子添加接着剤の際の摩擦係数は 0.33 であり、添加なしでは 0.13 であったために、微粒子により摩擦が高くなったことが確認できた。次に、有限要素解析を用いてクリンチング部を軸対称変形と仮定し、上板と下板の間の摩擦係数 μ を 0.1 と 0.35 として際の板材の延性破壊ダメージ値をそれぞれ計算して破断の目安にした。解析において破断が起きるダメージ値の最大が示されるパンチストロークのダメージ分布を図 6 に示す。添加なし付近の $\mu = 0.1$ ではパンチ側壁付近の上板に高いダメージが発生しており、添加あり付近の $\mu = 0.35$ ではそれよりも低くなっており、破断が抑制される低いダメージ値へ変化していることが有限要素シミュレーションによって確認できた。

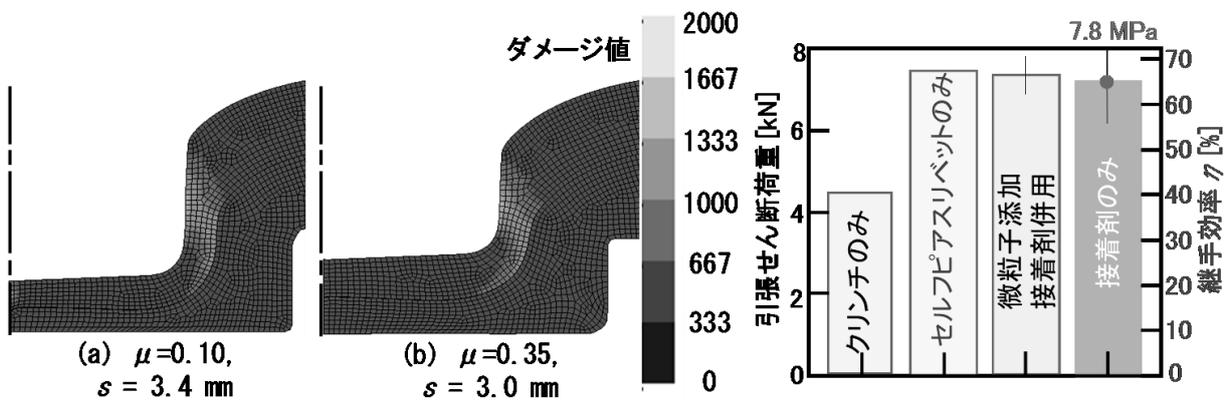


図 6. 板間の摩擦係数を変化させて計算された接合部断面のダメージ値

図 7 微粒子添加接着剤を用いて接合された引張せん断試験片の最大荷重

実験においてガラスビーズを添加して接合できたために、接着剤を硬化させた試験片を図2と同じように引張せん断試験した。図7に示すようにクリンチのみでは継手効率が40%程度であったが、微粒子添加接着剤を併用したクリンチングでは、接着剤のみ、セルフピアスリベットと同程度の65%程度の高い荷重を得ることができた。

6. まとめ

本研究では、エポキシ系接着剤を併用した超高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合において板材の破断を抑制するために接着剤にセラミック微粒子を添加して上板と下板の間の摩擦を増加させて接合性を改善した。特定の組み合わせのみの結果であるが、微粒子が添加された接着剤界面の摩擦係数が増加していること、また、増加した摩擦係数により材料流動が変化し、板材の破断の目安となるダメージ値の低下が有限要素解析により確認できた。さらに、セルフピアスリベットで接合された接合部の強度と比較を示した。しかしながら、接合部の継手効率の限界、更なる継手効率の増加法、他の板の組合せへの適用、また、継手として疲労、腐食、振動特性の評価など、まだ数多くの課題が残されている。

謝辞

最後に本研究の遂行にあたり、当時豊橋技術科学大学大学院工学研究科機械工学系博士前期課程2年次山内凌人氏、現在同課程2年次中前敬太氏の協力により接合実験、解析が行われた。また、天野工業技術研究所、スズキ財団の研究助成により一部実施された。さらに、大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度を利用して一部実施された。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 安部ほか：塑性と加工, **52-610**(2011), 1193-1197.
- 2) 中田：自動車用接着剤の接着信頼性, 日本接着学会誌, **39-12**(2003), 455-460.
- 3) Ma, Y.et.al: J. Mater. Process. Technol., **305**(2022), 117602.
- 4) 水島, 村上：塑性と加工, 51-597(2010), 974-978.
- 5) 安部ほか：2021年度塑性加工春季講演会講演論文集(2021), 277-278.
- 6) 安部ほか：2024年度塑性加工春季講演会講演論文集(2024), 175-176.