

高延性接着剤を用いた異種金属接合板塑性加工の 高精度シミュレーション

広島商船高等専門学校 商船学科
教授 瀧口 三千弘
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013022)

キーワード：高精度シミュレーション，異種金属接合板塑性加工，高延性接着剤

1. 研究の目的と背景

近年の構造用接着剤¹⁾の急速な進歩により，接着接合が構造組立物へ多く用いられるようになってきた²⁾。接着接合は異種材料との接合が用意であることや，軽量化の実現，溶接工法の問題点である熱ひずみの解消，面接合による部材剛性の向上，さらには製品の寸法精度や意匠性の向上といった多くの利点を有している。

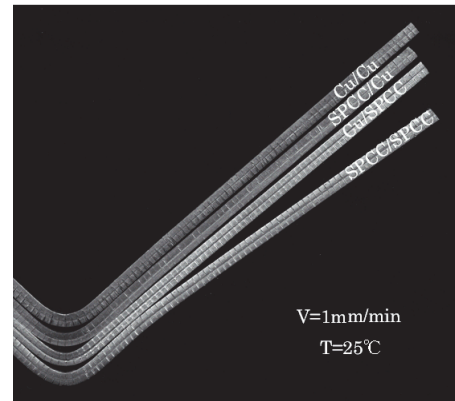
しかしながら，産業界における従来の接着接合は構造組立の最終段階において行われることが一般的であり，板材を接着接合後にプレス成形などにより加工して製品を作るといったことは行われていない。もしこうした利用方法が可能であるならば，接着接合は今後さらに用途が広がってくるものと思われる。こうしたことから，筆者らは構造用の高延性接着剤に注目し，「接着板の塑性加工」という新しい技術の提案³⁾を行い，その可能性や実現に向けた問題点を解明すべく一連の研究を進めてきた⁴⁻¹⁶⁾。

接着板の塑性加工の大きな問題点は，接着層に生じる大きなずれ変形（せん断変形）であり，接着剤の強度特性の把握が重要である。この点については，これまで温度・速度依存型弾粘塑性構成モデル¹⁰⁾，¹¹⁾，さらには繰返し粘塑性構成モデル¹³⁾を構築し，接着板の変形解析等を行ってきたところである。

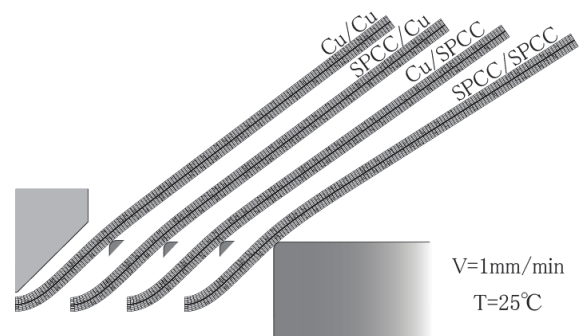
図 1 に，被着体材料の組合せの違いによる V 曲げ（三点曲げモード）後の接着板の形状不良（カモメ折れ）の比較の一例を示す¹⁶⁾。また，図 2 に図 1 に示した結果の比較を示す。本結果から明らかなように，実験結果と汎用有限要素解析プログラム（MSC.Marc 2010）を用いた解析結果の全体的な傾向はあっているものの，厳密には解析結果の方が実験結果よりかなり大きなカモメ折れを示していることがわかる。

本研究はこうした経緯を踏まえて，異種金属接合板塑性加工の高精度シミュレーション技術の確立を目指して行うものである。

筆者らは，汎用有限要素法による接着板の変形解析結果が実験結果と大きく異なった原因の一つが，接着剤の降伏関数として一般的に使用されているフォンミーゼス（von Mises）を用いている点にあると考え，今回新たな高延性接着剤用の降伏関数を提案し，汎用有限要素解析プログラムに組み込み，異種金属接合板塑性加工の高精度シミュレーションを目指した。



(a) 実験結果



(b) 解析結果（FEM利用）

図 1 被着体材料の組合せの違いによる V 曲げ後のカモメ折れ形状の比較の一例¹⁶⁾（V=1mm/min, T=25°C）

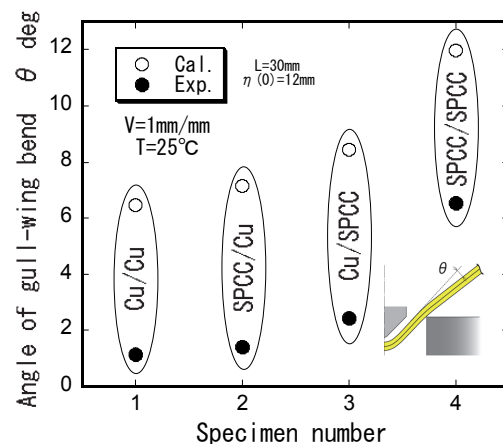


図 2 図 1 に示した実験結果と解析結果の比較¹⁶⁾

2. 高延性接着剤用の降伏関数の提案

これまでの研究において、高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動を表現できるせん断応力-せん断ひずみ構成式を次のように構築した¹³⁾。構成式の基本的な枠組みは、次式に示すような超過応力モデルを用いている。

$$\dot{\gamma}^p = \left\langle \frac{|\tau - \alpha| - K}{D} \right\rangle^n \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}^p$ は相当粘塑性せん断ひずみ速度、 α はせん断背応力、 K 、 n 、 D は材料定数である。式(1)を多軸応力に拡張するための相当応力、相当塑性ひずみの関係式は次のようになる。

$$\dot{\varepsilon}^p = \left\langle \frac{\bar{\sigma} - K}{D} \right\rangle^n \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}^p$ は相当粘塑性ひずみ速度である。 $\bar{\sigma}$ は相当応力(降伏関数)であり、通常の金属材料で使用される von Mises の降伏関数ではなく、吉田ら⁹⁾が提案したせん断変形の係数が 0.81 とした以下ものを使用する。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\sigma_{xx} - \alpha_{xx} - (\sigma_{yy} - \alpha_{yy}) \right)^2 + \left(\sigma_{yy} - \alpha_{yy} - (\sigma_{zz} - \alpha_{zz}) \right)^2 + \left(\sigma_{zz} - \alpha_{zz} - (\sigma_{xx} - \alpha_{xx}) \right)^2 \right\} + 0.81 \left\{ (\tau_{xy} - \alpha_{xy})^2 + (\tau_{yz} - \alpha_{yz})^2 + (\tau_{zx} - \alpha_{zx})^2 \right\}} \quad (3)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 α_{ij} は背応力テンソルである。降伏後の流動応力は、先に報告した粘塑性構成式¹³⁾を MSC. Marc. 2010 のユーザーサブルーチン Hypela2 に組込んで使用している¹⁷⁾。式(3)のポイントは、せん断成分にかかる係数が通常の 3 ではなく、0.81 であることである。

3. 接着板の引張り繰返し曲げ・曲げ戻し¹⁸⁾

本研究において提案する新たな降伏関数の妥当性を検証するために、接着板の引張りによる繰返し曲げ・曲げ戻し実験と解析を行った。

3.1 供試材

接着剤には、常温硬化型の二液主剤・変性アクリル系構造用接着剤ハードロック M-372-20 (電気化学工業(株)製)を用いた。本接着剤の基本的な強度特性については、参考文献 9 及び参考文献 13 を参照されたい。

被着体 (SPCC, Cu) の強度特性については、それぞれ図 3 中に示す値及び構成式 (Swift 型で表現) を用いた。降伏関数は、von Mises を使用した。

3.2 実験概要

図 4 に、実験の概略及び外観写真を示す。本実験は、接着板を左右のジグに挟み、垂直方向に引抜くというものである。これにより、接着板はジグ(ダイ)に交互に取り付けられた三つのパンチ(半径 5mm)によりジグザグ状に曲げられる。パンチの押込み量は、全て 5mm とした。接着板は引抜かれると同時にパンチによって交互に曲げ・曲げ戻されるため、接着層には繰返しせん断変形が生じる。

なお、ダイ出口(パンチ空間への入口)から一つ目のパンチまでの距離と、三つ目のパンチからダイ入口までの距離はプレス加工を意識してパンチ間距離に比べて少し厳しめの 20mm とした。実験は、引張り速度 $V=20\text{mm/min}$ 、温度 $T=20^\circ\text{C}$ 一定として行った。

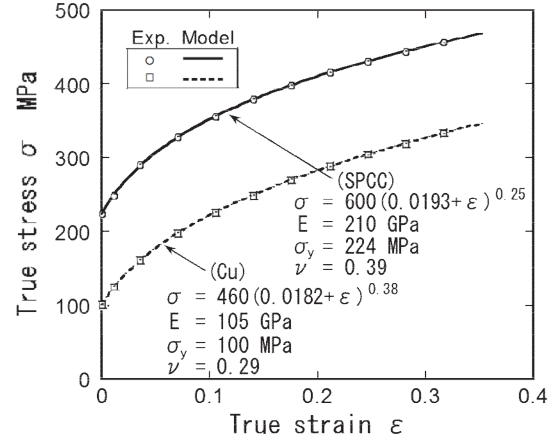


図 3 被着体の強度特性

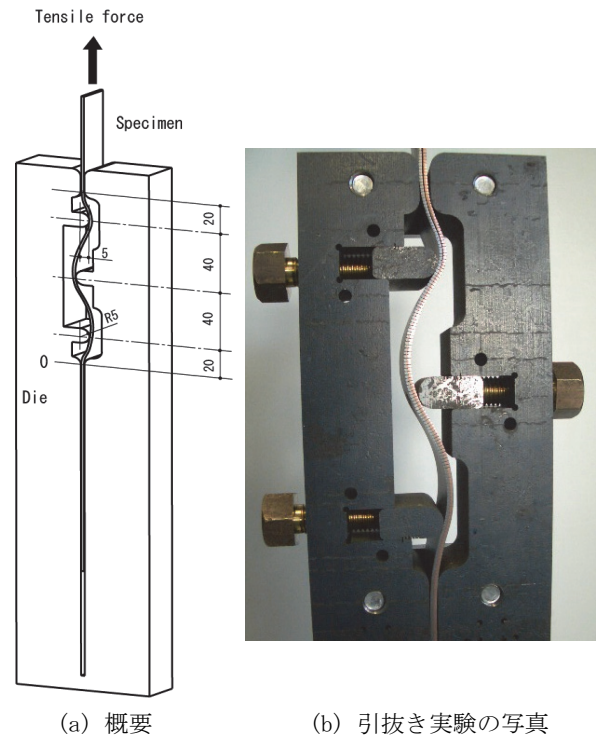


図 4 実験装置

3.3 FEM 解析

接着板の引張り繰返し曲げ・曲げ戻し変形解析を、汎用有限要素法プログラム MSC. Marc2010 を用いて行った。解析は 2 次元平面ひずみ問題として扱った。接着層の厚さは 0.1mm 一定、ダイは剛体とし、接着板と工具間の摩擦はクーロン摩擦と仮定し、その摩擦係数は 0.1 とした。

3.4 実験結果と考察

図 5 に、引張り(引抜き)による繰返し曲げ・曲げ戻し

実験後の試験片形状（接着層のせん断変形挙動に注目，SPCC/Cu の場合）を示す．各パンチ周辺（三ヶ所）をそれぞれ拡大してある．さらに，図6には各種試験片から読み取ったせん断ひずみ及び解析により得られたせん断ひずみと引抜き量（距離）との関係を示す．(a)に SPCC/Cu の場合，(b)に SPCC/SPCC の場合を示す．

本結果から，接着板の繰返し曲げ・曲げ戻しにより接着層に繰返しせん断ひずみが生じていることがわかる．具体的には，ダイ出口（パンチ空間への入口）から一つ目のパンチまでの間に最初のせん断ひずみ（正のせん断ひずみ）が生じ，二つ目のパンチまでの間に次のせん断ひずみ（負のせん断ひずみ）が生じ，以下繰返すというものである．SPCC/Cu，SPCC/SPCC いずれの実験結果においても，三つ目のパンチを過ぎたところで接着層にはく離が生じている．これは，引張り側のせん断ひずみが大きくなることと，三つ目のパンチからダイ入口までの距離が 20mm と短いことに起因している．本結果から，本接着剤は曲げ・曲げ戻し試験（両振り状態）においても V 曲げ試験³⁾や片振り試験⁸⁾と同様に，せん断ひずみがある値（約 1.7）を超えると接着層の接着強度の低下やはく離（破断）が生じることがわかる．SPCC/Cu 板と SPCC/SPCC 板を比較すると，SPCC/Cu 板の方がせん断ひずみは小さい．

なお，本結果において，実験結果と解析結果は全体的な傾向はあっているものの，解析結果の方が実験結果よりかなり大きな値となった．これは，これまでの研究結果¹⁶⁾とほぼ同様の結果である．今回の解析においては，接着剤の降伏条件として von Mises ではなく，新たに式(3)に示した降伏関数を提案し使ったが十分な解析精度は得られなかった．

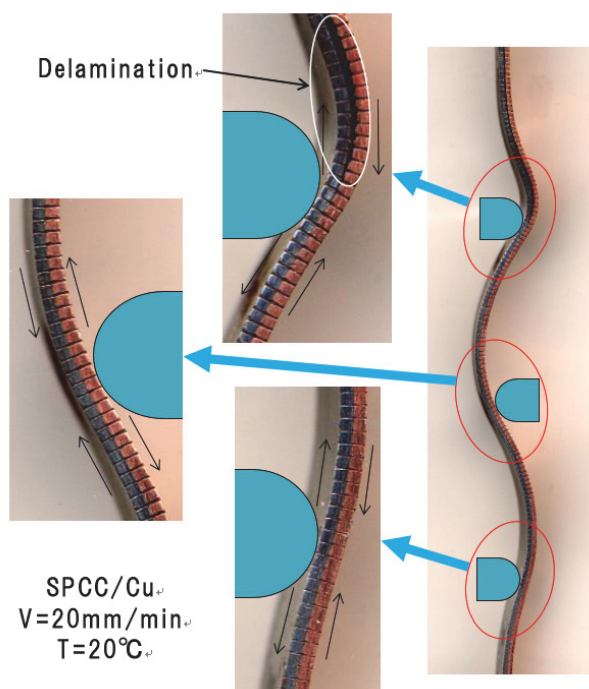
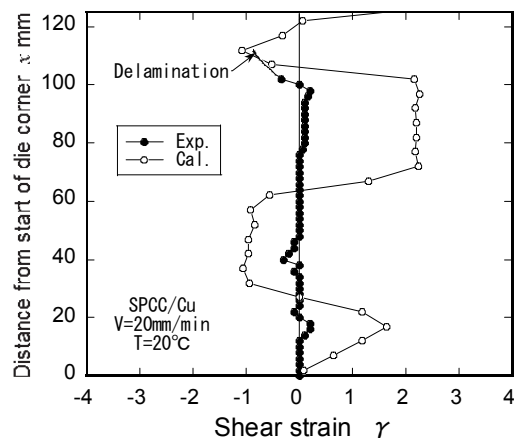
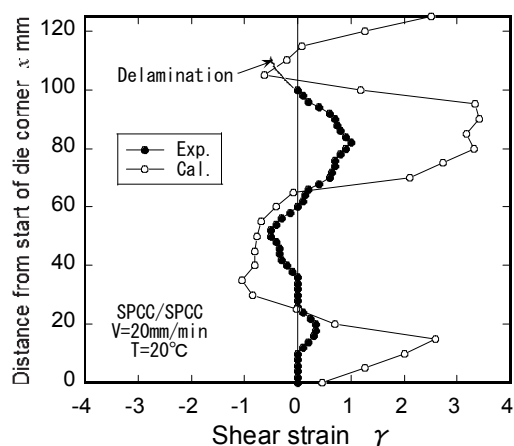


図5 引張り（引抜き）による繰返し曲げ・曲げ戻し
実験後の試験片形状（SPCC/Cu の場合）



(a) SPCC/Cu



(b) SPCC/SPCC

図6 引抜き量（距離）と接着層のせん断ひずみとの関係

4. その他の実験と解析の概要

本研究においては，3章に示した接着板の引張りによる繰返し曲げ・曲げ戻し実験と解析の他に，次のような実験と解析を行った．紙面の関係で全てを紹介できないが，その概要について述べておく．

いずれの場合も，前章の結果同様，実験結果と解析結果は全体的な傾向はあっているものの，解析結果の方が実験結果よりかなり大きな値となった．異種金属接合板塑性加工の高精度シミュレーションを行うための今後の展開については，現在取組んでいることを次章で述べる．

4.1 金属接着板の加圧曲げ加工¹⁹⁾

図7に，金属接着板のV曲げの加圧曲げ実験の概略図を示す．ダイス肩幅は 30mm とした．接着板は長さ 140mm で全面接着とした．接着層の厚さは 0.137～0.156mm であった．実験は，押し込み速度 1mm/min で，パンチ半径を 2mm，5mm，10mm（ダイスアールは各々 4.1mm，7.1mm，12.1mm）と変えて行った．加工速度の影響を調べるために，押し込み速度 20mm/min，500mm/min の場合についても調べた．加工温度は 20℃，押し込み荷重は 10kN とした．

図8に，パンチ半径の違いによる加圧曲げ後の接着層の

せん断ひずみの実験結果と解析結果の比較を示す。本結果から、パンチ半径を大きくすると、せん断ひずみは小さくなることわかる。

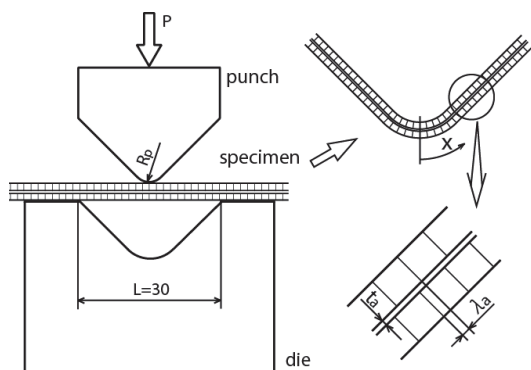


図7 V曲げの加圧曲げ実験の概略図

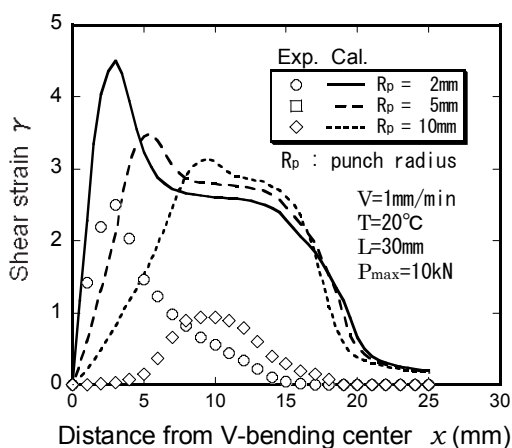


図8 パンチ半径の違いによる加圧曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較

4.2 金属接着板のハット曲げ加工²⁰⁾

図9に、金属接着板のハット曲げ実験の概略図を示す。本装置は、下側のダイに試験片をセットし上方のパンチで試験片を押し込むというものである。接着板は長さ172mmで全面接着とし、SPCC/SPCC、SPCC/Cuの2種類のタイプのものを用意した。それぞれ接着層の厚さは0.098~0.117mmであった。なお、実験は加工温度20℃、押し込み速度1及び500mm/minで行った。パンチ押し込み量はいずれも48.2mmとした。

図10に、速度の違いによるハット曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較を示す。なお、本図はSPCC/Cuの結果である。本結果より、接着層のせん断ひずみは試験片中央から6mm付近(パンチ先端のR付近に相当)までは増加しているが、パンチ側面に近づくにつれ逆方向のせん断ひずみが生じており、その後50mm付近(ダイ上方のR付近に相当)からせん断ひずみは減少していた。これより、接着層には曲げ・曲げ戻し挙動が生じているものと考えられる。また、押し込み速度が小さい方が大きなひずみが生じていることがわかる。

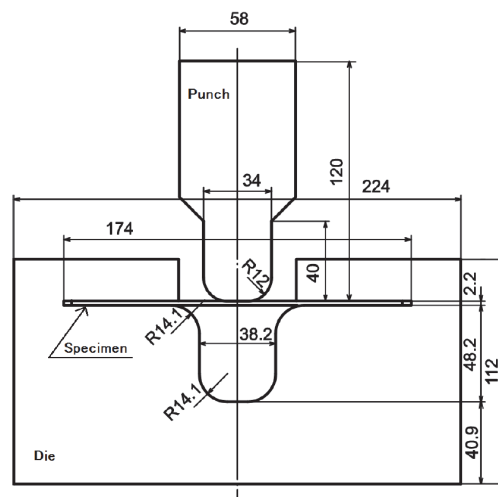


図9 ハット曲げ実験の概略図

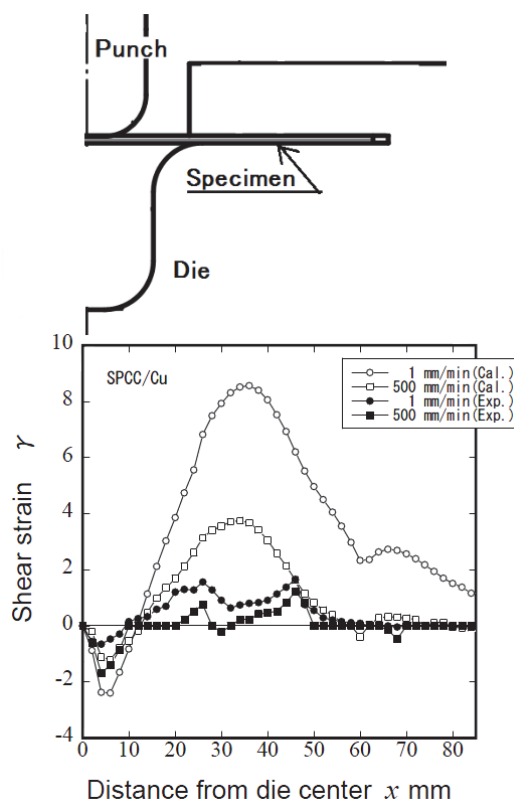


図10 速度の違いによるハット曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較 (SPCC/Cu)

4.3 金属接着板の非対称形状曲げ加工²¹⁾

図11に、金属接着板の非対称曲げ実験の概略図を示す。本装置は、下側のダイに試験片をセットし上方のパンチで試験片を押し込むというものである。接着板は長さ172mmで全面接着とし、SPCC/SPCC、SPCC/Cuの2種類のタイプのものを用意した。それぞれ接着層の厚さは0.098~0.117mmであった。なお、実験は加工温度20℃、引張り速度1及び500mm/minで行った。パンチ押し込み量はいずれも50mmとした。

図12に、非対称曲げ加工と対称曲げ加工の比較を示す。

なお、本図は SPCC/Cu の結果である。本結果から、加圧曲げ過程において非対称曲げ加工では対称曲げ（V 曲げ及びハット曲げ）に比べ接着板がダイス肩からダイス斜辺に接触するタイミングが早いことがわかった。また、ハット曲げ側では対称曲げの方がひずみの最大値は大きい値を示しているが、V 曲げ側では逆に非対称曲げの方がひずみの最大値が大きい。なお、非対称曲げの場合の実験値は絶対値は異なるもののその傾向はほぼ一致していた。以上より、接着接合板を非対称曲げ加工する場合、対称曲げとは異なるせん断挙動を示すため注意が必要であることがわかった。

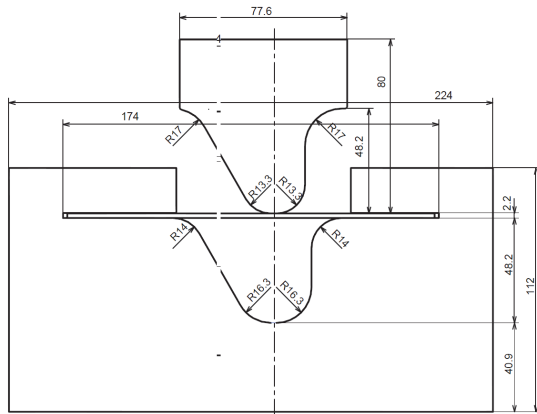


図 11 非対称曲げ実験の概略図

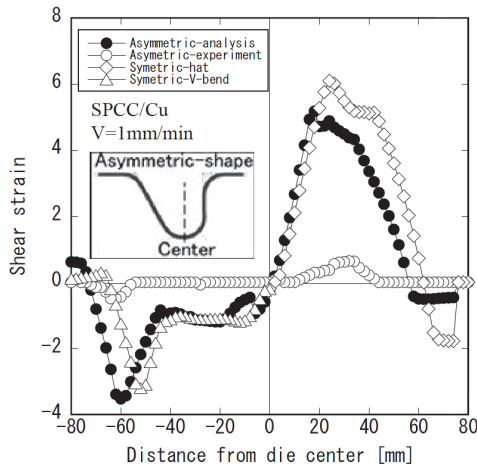


図 12 非対称曲げ加工と対称曲げ加工の比較（SPCC/Cu）

5. 高精度シミュレーションに向けた今後の展開

本章では接着板のさらなる高精度シミュレーションを行うための今後の展開について、現在取組んでいることを紹介する。

5.1 圧縮とせん断荷重が同時に作用する場合の高延性接着剤の強度特性²²⁾

図 13 に、高延性接着剤ハードロック M-372-20（電気化学工業(株)製）の圧縮とせん断荷重が同時に作用する場合の破壊限界を示す。本結果より、圧縮応力の増加により最大せん断応力は増加し、引張応力の増加により最大せん断応力は減少することがわかる。

プレス加工においては、接着層に圧縮とせん断が同時に作用していることが十分考えられる。接着板の高精度シミュレーションに向けて、今後この点を考慮する必要がある。

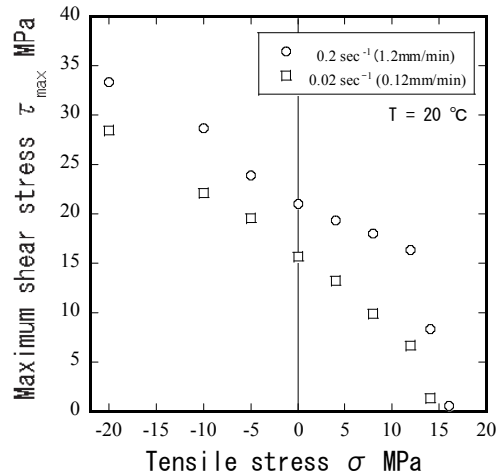


図 13 圧縮とせん断荷重が同時に作用する場合の高延性接着剤の破壊限界

5.2 新たな高延性接着剤用の降伏関数の検討²³⁾

現在検討中の高延性接着材の構成方程式を以下に示す。降伏関数である相当応力 $\bar{\sigma}$ は、デフォルト設定の等方性の von Mises の降伏関数ではなく、接着材の粘塑性変形挙動を高精度に再現するため、佐野村ら²⁴⁾が提案した高分子材料の異方性降伏関数に、本研究で著者らが提案したせん断変形の係数 0.81 を適用したものを使用する。ここで、 β は静水圧依存性を表すパラメータ ($0 \leq \beta \leq 1$) である。また、背応力 α_{ij} は徳田ら¹³⁾が提案している高延性接着剤の繰返しせん断変形を高精度に表す式を使用している。

$$f = (1 - \beta)\sqrt{J_2} + \beta J_1 - \bar{\sigma} = 0 \quad (4)$$

$$J_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (5)$$

$$\sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left\{ \sigma_{xx} - \alpha_{xx} - (\sigma_{yy} - \alpha_{yy}) \right\}^2 + \left\{ \sigma_{yy} - \alpha_{yy} - (\sigma_{zz} - \alpha_{zz}) \right\}^2 + \left\{ \sigma_{zz} - \alpha_{zz} - (\sigma_{xx} - \alpha_{xx}) \right\}^2 \right] + 0.81 \left[(\tau_{xy} - \alpha_{xy})^2 + (\tau_{yz} - \alpha_{yz})^2 + (\tau_{zx} - \alpha_{zx})^2 \right]} \quad (6)$$

解析には、汎用有限要素法ソフトウェア MSC.Marc201*（*は 1～4）のユーザーサブルーチン機能を使用し、田中ら²⁵⁾が提案している複素数階微分近似法を適用する²⁶⁾。

6. まとめ

本研究においては、異種金属接合板塑性加工の高精度シミュレーションに向けた取組みとして、新たな高延性接着剤用の降伏関数を提案し、その妥当性を確認するために各種実験と解析を行った。これらの実験と解析をとおして多くの知見を得ることはできたが、高精度シミュレーションという観点からは、十分な解析精度は得られなかった。

この原因として、現在圧縮とせん断荷重が同時に作用する場合の高延性接着剤の強度特性について新たな知見を得ている。さらに、新たな高延性接着剤用の降伏関数の検討も行っていることを述べて結びとする。

謝 辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人天田財団より一般研究開発助成（AF-2013022）を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、宮入裕夫監修：機能性接着剤の開発と最新技術(上巻)—構造接着の最近の進歩—，シーエムシー，1997。
- 2) 例えば、宮入裕夫監修：機能性接着剤の開発と最新技術(下巻)—構造接着の最近の進歩—，シーエムシー，1997。
- 3) 接着接合したアルミニウム合金板の塑性曲げにおける変形特性とはく離強度，瀧口三千弘・吉田総仁，日本機械学会論文集A編，67-655，pp.580-587，2001。
- 4) 接着継手のせん断強度の速度依存性と応力緩和挙動，瀧口三千弘・和泉淳・吉田総仁，日本機械学会論文集A編，68-665，pp.126-131，2002。
- 5) 接着接合した金属薄板の塑性曲げに及ぼす加工速度の影響，瀧口三千弘・吉田総仁，日本機械学会論文集A編，68-672，pp.1236-1242，2002。
- 6) 金属接着板の曲げ加工（依頼講演），瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会第 43 回年次大会講演要旨集，pp.210-213，2005。
- 7) 金属接着板の塑性曲げ加工（解説），瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会誌，41-6，pp.242-249，2005。
- 8) Effects of Loading Speed and Shear Prestrain on Adhesive Fatigue Strength in Single-Lap Joint, M.Takiguchi・F.Yoshida, Key Engineering Materials, Vols.340-341, pp.1479-1484, 2007。
- 9) 接着接合した金属薄板の塑性曲げに及ぼす温度・速度の影響，吉田哲哉・瀧口三千弘・吉田総仁，日本機械学会論文集A編，73-726，pp.292-299，2007。
- 10) Effects of Temperature and Forming Speed on Plastic Bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, M.Takiguchi・T. Yoshida・F.Yoshida, International Journal of Modern Physics B, 22-31/32, pp.6253-6258, 2008。
- 11) アクリル系高延性接着剤の組合せ応力下の温度・速度依存性に関する研究，吉田哲哉，博士論文，広島大学，2009。
- 12) アクリル系高延性接着剤の弾粘塑性挙動のモデル化とその応用（依頼講演），瀧口三千弘・吉田哲哉，日本接着学会関西 H&I 研究会第 20 回研究会，2009。
- 13) Viscoplastic Behavior of Highly Ductile Acrylic Adhesive under Cyclic Torsion and Its Modeling, T. Tokuda・T. Yoshida・M. Takiguchi・M. Funaki・N. Mizutani・F. Yoshida, Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP2011), pp.990-994, 2011。
- 14) 異種金属接着板の引張曲げ・曲げ戻しにおける接着層の変形挙動，吉田哲哉・徳田太郎・瀧口三千弘・舟木弥夫・吉田総仁，日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会 CD-ROM 論文集，No.12-9，3 ページ，2012。
- 15) 接着接合した金属薄板の塑性曲げ加工に及ぼす被着体厚さと接着層厚さの影響，瀧口三千弘・吉田哲哉・舟木弥夫・吉田総仁，日本接着学会誌，48-12，pp.430-435，2012。
- 16) Plastic-bending of Adhesively Bonded Dissimilar Sheet Metals, M. Takiguchi・T. Tokuda・T. Yoshida・M. Funaki・H. Hamasaki・F. Yoshida, Key Engineering Materials, Vols. 535-536, pp.418-421, 2012。
- 17) 接着積層アルミ合金板材の有限要素解析，上森武・瀧口三千弘・吉田哲哉・徳田太郎・吉田総仁，第 65 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp.291-292，2014。
- 18) 異種金属接着板の引張り曲げ・曲げ戻しにおける接着層のせん断変形挙動，徳田太郎・吉田哲哉・上森武・瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会誌，51-7，pp.347-354，2015。
- 19) Die-bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, M. Takiguchi・T. Tokuda・T. Yoshida・T. Uemori・F. Yoshida, Key Engineering Materials, Vols. 626, pp.103-108, 2015。
- 20) 金属接着板のハット曲げ加工，徳田太郎・上森武・吉田哲哉・瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会第 53 回年次大会講演要旨集，pp.110-111，2015。
- 21) 金属接着板の非対称曲げ加工，徳田太郎・上森武・吉田哲哉・瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会第 54 回年次大会講演要旨集，P61（2 ページ），2016。
- 22) 圧縮とせん断荷重が同時に作用する場合の高延性接着剤の強度特性，吉田哲哉・徳田太郎・上森武・瀧口三千弘・吉田総仁，日本接着学会第 54 回年次大会講演要旨集，3BJ-1（2 ページ），2016。
- 23) 異方性降伏関数を考慮した高延性接着積層板の有限要素解析，上森武・中田隼矢・多田直哉・東濱航平・徳田太郎・吉田哲哉・瀧口三千弘，日本接着学会第 54 回年次大会講演要旨集，3BJ-3（2 ページ），2016。
- 24) 静水圧依存性高分子材料の塑性構成式に対する等方硬化理論の修正と移動硬化理論の適用，佐野村幸夫・早川邦夫，材料，50-2，pp.143-149，2001。
- 25) 複素数階微分を用いた整合接線剛性の数値近似と大変形問題への応用，田中真人・藤川正毅，日本機械学会論文集A編，77-773，pp.27-37，2011。
- 26) 弾粘塑性構成方程式を用いた高延性接着剤の有限要素解析，上森武・徳田太郎・吉田哲哉・瀧口三千弘・吉田総仁，第 51 回日本接着学会年次大会講演要旨集，pp.197-198。2013。