

アクリル系高延性接着剤の組合せ応力下の
温度・速度依存性挙動に関する研究

Viscoplastic Behavior of Highly Ductile Acrylic Adhesive
at Various Temperatures under Complex Loading

広島大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻博士課程後期

D044531

吉田 哲哉

目 次

第1章 結 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 従来の研究の展望	2
1.2.1 接着剤の強度特性及び接着継手に関する研究	2
1.2.2 接着接合板の塑性加工に関する研究	3
1.3 本研究の目的と論文の構成	3
第2章 接着剤の組合せ応力下における弾粘塑性挙動の実験観察	6
2.1 緒言	6
2.2 供試材および試験片	6
2.3 実験方法	8
2.4 実験結果と考察	12
2.4.1 せん断強度の温度・速度依存性	12
2.4.2 突合せ試験片の引張りねじり組合せ試験における温度・速度の影響	16
2.5 結言	21
第3章 接着剤の温度・速度依存性を考慮した単純せん断粘塑性構成式	22
3.1 緒言	22
3.2 粘塑性構成式	22
3.3 材料定数の同定	24
3.4 結言	27
第4章 接着剤の多軸粘塑性構成式	28
4.1 緒言	28
4.2 多軸粘塑性構成式	28
4.3 解析結果と実験結果の比較および考察	31
4.4 結言	34
第5章 接着板の塑性曲げに及ぼす温度・速度の影響	35
5.1 緒言	35
5.2 実験方法	35
5.3 曲げ解析	36
5.4 結果と考察	37
5.5 結言	45
第6章 結 論	46

参考文献 49

謝 辞 52

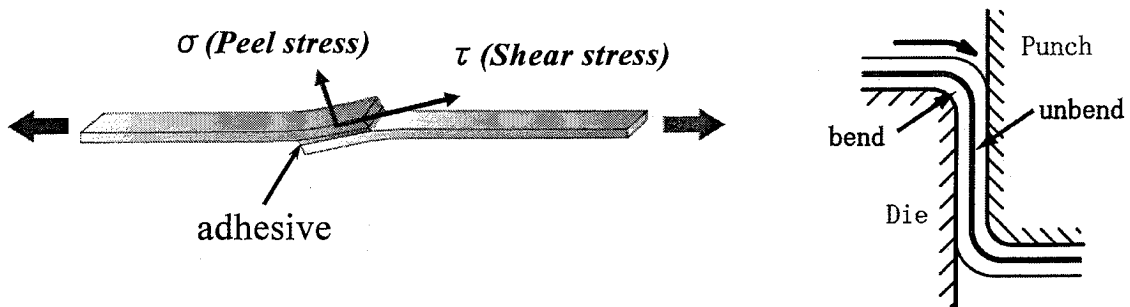
第1章 緒 論

1.1 はじめに

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に広く用いられるようになってきた²⁾。接着接合は他の接合法と比較して、軽量化の実現、異種材料同士の接合が容易、寸法精度や意匠性の向上、溶接工法の問題点である熱ひずみの解消、さらには面接合により応力が分散するためせん断強度や耐疲労性が高いといった多くの利点を有している。しかしながらその反面、接着接合はその強度特性に関してまだまだ未解明なことが多く、信頼性や安全性という点で十分な評価が得られているとは言い難い。したがって、強度部材として使用する場合には、溶接やボルトなどの機械的バックアップを伴うのが通常である。また、その際、接着接合は構造組立ての最終段階において使用されることが一般的である。

こうした構造接着の分野に、最近、はく離強度や耐衝撃性に優れた高延性高強度のアクリル系接着剤に注目して、接着接合後に塑性加工して製品を作るといった新しい技術が瀧口らによって提案され^{3),4)}、この技術の可能性や信頼性について様々な視点から研究が行われている³⁾⁻⁸⁾。これらの研究が行われる過程において、使用した接着剤のせん断強度特性に非常に強いせん断ひずみ速度依存性があることが明らかにされ^{5),6)}、この特性が構成式として構築され塑性加工の解析に利用されている⁷⁾。本研究は提案された新しい技術のさらなる進展と接着接合の信頼性の確立を目指して、この接着剤の強度および変形特性をより詳細に検討しようとするものである。

本研究においては、まず、接着剤の温度依存性に注目しせん断ひずみ速度依存性と併せてその強度特性を明らかにする。先にも述べたように高延性アクリル系接着剤のせん断強度が、純せん断応力状態下において著しいせん断ひずみ速度依存性を持つことはこれまでの研究で明らかにされているが、温度の影響を考慮した研究はなされていない。次に、接着剤の組合せ応力下における強度特性を明らかにする。図 1.1 には接着接合板に組合せ応力が作用する例を示す。(a)は単純重ね合わせ継手である。接着層に生じる応力はせん断応力が支配的であるが、板はせん断応力によって誘起された



(a) 単純重ね合わせ継手

(b) 接着接合板の曲げ加工

図 1.1 組合せ応力状態の一例

曲げモーメントにより曲げ変形を受けるので、その結果、接着層にはピール応力（接着面に垂直に作用する引張り応力）が同時に作用する。また、接着接合板の塑性加工について、一例として図 1.1(b)に示すように板がダイコーナーに沿って引き込まれて曲げ・曲げ戻しを受ける過程を考えると、曲げ戻しでは接着層にせん断応力とともに引張り垂直応力が発生して剥離が生じることが懸念される。このように、接着層にせん断応力と垂直応力が同時に作用することは普通の状態と考えられ、こうした場合の接着剤の強度と変形挙動を知ることは極めて重要な課題となる。

本研究では、最終的に温度・速度依存性と併せて組合せ応力下の強度特性を明らかにし、接着剤の弾粘塑性構成式を構築する。さらに、得られた構成式の妥当性を検討するために、接着接合板の塑性加工に及ぼす温度と速度の影響を議論する。

1.2 従来の研究の展望

1.2.1 接着剤の強度特性及び接着継手に関する研究

接着接合は非常に多くの分野で利用されており、研究成果も数多く報告されている。また、接着接合の構造的応用が広まるにしたがい、接着強度への関心が高まってきている。こうした中、これまで日本機械学会では世界中の主だった学術雑誌を対象に、接着接合の変形、強度、破壊、耐久性、試験法に関する文献を集めデータベース化^{9),10)}している。文献 9)には 1985 年から 1990 年の間に刊行された 26 種類の学術雑誌から約 220 編の文献が、文献 10)には 1990 年から 1996 年の間に刊行された 19 種類の学術雑誌から約 300 編の文献が収録されている。池上¹¹⁾は 2000 年から 2004 年 5 月の間に刊行された日本接着学会誌、日本機械学会論文集 A 編、International Journal of Adhesion and Adhesives, Journal of Adhesion, Journal of Adhesion Science and Technology から接着継手に関する論文 133 編を取り上げ、その研究の趨勢を概観している。これらも含め、その後今日に至るまでの文献調査を行い、本研究と関連する構造接着に関する研究の現状と課題につき以下にまとめてみた。そのキーワードは、高延性接着剤の変形および強度特性、それらに対する速度と温度の依存性、組合せ応力（せん断応力と垂直応力の組合せ）、接着剤（あるいは樹脂）の弾（粘）塑性構成式である。

これまでの接着接合に関する研究において、高延性アクリル系接着剤に関する研究報告は、このタイプの接着剤が開発されたのが 1990 年代中頃であったこともあり、極めて少ない。これについての代表的な研究は、既に述べたように、瀧口ら³⁾⁻⁸⁾によるものである。彼らは、せん断強度特性に非常に強いせん断ひずみ速度依存性があることが明らかにし、せん断応力とせん断ひずみの関係を表す弾粘塑性構成式を提案しているが、温度の影響、組合せ応力の影響についてはまだ検討されていない。木原ら^{12),13)}は二軸負荷試験機と十字形の接着継手を用いて、せん断接着強度の評価方法を検討しエポキシ系接着剤においてはミーゼスの降伏条件が適用できるが、アクリル系接着剤においてはミーゼスの降伏応力が適用できないことを調べている。また木原ら^{14),15)}は円筒突合せ継手、衝撃試験装置および低温恒温装置を用いて、アクリル系接着剤の

衝撃試験を行い負荷速度と温度が接着強度に及ぼす影響を実験的に調べている。今中ら¹⁶⁾はエポキシ系とアクリル系接着剤を使用して接着剤および接着/リベット併用で継手の引張せん断強度を統計的に評価している。また、今中ら^{17),18)}は疲労試験を行い被着体鋼板やリベット強度の影響を調べている。春名ら¹⁹⁾はCFRP薄板の被着体を使用して単純重ね合わせ継手の応力を有限要素法により解析し、継手強度予測について調べている。しかし、高延性接着剤の組合せ応力状態下における温度・速度依存性の両方を同時に考慮した強度特性の研究および弾粘塑性構成式の提案は皆無である。

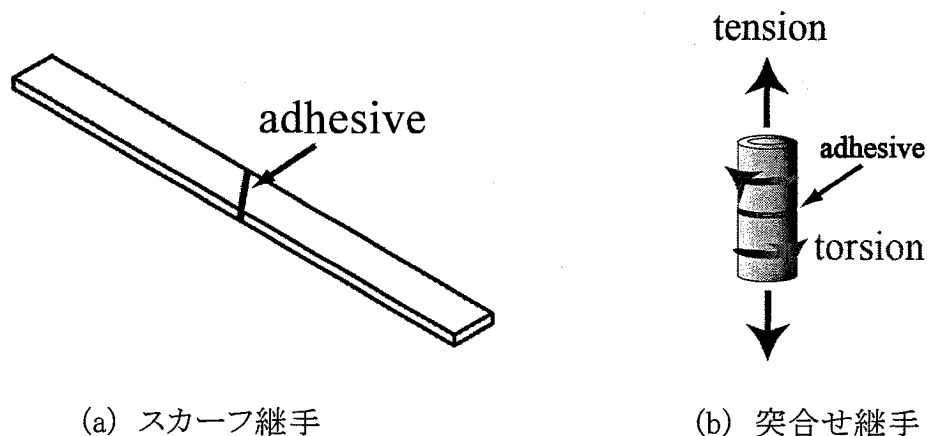


図 1.2 組合せ応力下の接着強度試験に使用される試験片形状

ここで、組合せ応力下における接着強度の研究の歴史と現状について概観してみる。図 1.2(a)に示すスカーフ継手の引張り試験では接着面に対してせん断応力と引張り応力が同時に作用するので、このときの接着強度を取扱った研究は多い。図 1.2(b)に示す円筒突合せ試験片に引張りとなじりを組合せることによりせん断応力と引張り応力の比を種々に変えることができる。池上ら²⁰⁾⁻²²⁾の研究グループこのような実験で組合せ応力下の接着強度のクライテリオンや破壊靱性の研究を精力的に行っている。沢ら^{23),24)}はスカーフ継手を用いて衝撃曲げモーメントや衝撃引張り荷重を作用させ、三次元有限要素法により応力伝播と応力分布を解析している。今中ら^{25),26)}はスカーフ継手の引張り試験と薄肉円筒突合せ継手のねじり試験により、降伏および破断応力に及ぼす応力3軸性の影響を調べている。逢坂ら²⁷⁾は2軸応力状態下における継手接着層の応力-ひずみ曲線を測定することが可能な測定装置を製作し、種々の一定圧縮荷重下におけるせん断応力-せん断ひずみ曲線を測定した。誉田²⁸⁾は二重重ね合わせ継手を用いて、せん断とはく離の混合モード下における薄板接着継手強度の評価法を開発している。熱硬化型 Metlbond においては、Sancaktar²⁹⁾による混合モード試験片を用いた引張応力とせん断応力を作用させた疲労試験の報告がある。なお、こうした研究のほとんどは延性に乏しいエポキシ系接着剤を対象としている。

接着強度の温度依存性や速度依存性に関する研究、さらには速度依存性が顕著に現れる応力緩和挙動について調べた研究報告は極めて少ない。エポキシ系接着剤においては、Reedy, Jr ら³⁰⁾が突き合わせ継手強度に及ぼす接着剤の残留応力、応力緩和挙

動及び温度依存性について実験的に調べている。Hu ら³¹⁾は単純重ね合わせ継手と突き合わせ継手における接着強度の速度依存性を検討し、クリープおよび応力緩和挙動の実験結果にもとづく構成式の定式化を行っている。藤並ら³²⁾はリング状継手試験片のねじりにおける速度依存性と応力緩和挙動の実験結果にもとづく構成式の定式化を行っている。FM73 フィルム接着剤においては、Chalkley ら³³⁾による単純重ね合わせ継手（肉厚矩形被着体使用）を用いた引張りせん断の速度依存性とクリープの実験的な研究報告がある。また、Crocombe³⁴⁾は二重重ね合わせ継手を用いた引張りせん断の速度依存性とクリープについて実験し、クリープ構成式を求めている。

一方、接着剤とは別に、樹脂、高分子材料の弾粘塑性特性について調べた研究報告がいくつかみられる。Kleiner ら³⁵⁾は制振鋼板における樹脂層の応力緩和挙動、温度依存性および速度依存性について実験的に調べている。由田ら^{36),37)}は樹脂複合鋼板における樹脂のせん断変形特性を測定するための試験装置を開発し、せん断変形特性に及ぼすずれ変形速度の影響を明らかにしている。伊藤ら^{38),39)}はリング状継手試験片を用いて制振鋼板の樹脂のねじりにおける速度依存性を調べ、その実験結果をもとにせん断変形特性をひずみ速度の影響を踏まえて定式化している（ただし、ひずみ速度は一定）。また、牧野内ら⁴⁰⁾は樹脂の熔融状態（射出成形、押出し成形時）および固体状態における流れの構成式について報告している。さらに、大上ら⁴¹⁾は樹脂特性の温度依存性について報告している。富田らはポリマーの構成式について精力的に提案を行っており、その内容は解説記事⁴²⁾に詳しい。ただし、組合せ応力下での実験的検討はしていない。

1.2.2 接着接合板の塑性加工に関する研究

接着接合板の塑性加工という技術は、前節でも述べたように、瀧口ら^{3),4)}により提案されたものであり、この技術の可能性や信頼性について様々な視点から研究が行われている³⁾⁹⁾。その結果、提案された技術は加工性・生産性さらには接着強度の面からも十分実用化できる技術であることが明らかになってきた。しかし、接着強度の温度依存性についての知見が得られていないことから、温度が加工性に与える影響についてはまだ解明されていない。なお、接着接合板とは異なるが、防振を目的として開発された樹脂複合サンドイッチ鋼板の塑性加工を取り扱った研究はいくつかあり、力学的な面からは接着接合板の成形と関連が深い。しかし、これらの研究でも樹脂の特性やそのモデル化については十分な注意が払われているとはいえない。

1.3 本研究の目的と論文の構成

前節で指摘したように、高延性アクリル系構造用接着剤の強度特性に関して解明しなければならない問題は、概ね以下のように要約できる。

- (1) 高延性アクリル系構造用接着剤の温度依存性が未だ解明されておらず、実験データそのものがほとんど発表されていない。
- (2) 上記(1)とも関連し、こうした特性を考慮した接着剤の構成式は未発表である。当

然のことながら、温度と速度依存性の両方を考慮した接着剤の構成式も確立されていない。

(3) 上記(2)で得られた構成式の妥当性を検討する必要がある。接着接合板の塑性加工に及ぼす温度と速度の影響は、同時に議論されたことはない。

本研究は、こうした問題を解決することを目的としている。本論文は6章から構成されており、本論文の構成とその概要は以下の通りである。

第1章は緒論であり、本研究の着眼点を示し、このことに関連した従来の研究の展望を行い、本研究に関する問題点を明確にした上で、本研究の目的および本論文の概要を述べている。

第2章では、アクリル系高延性接着剤を使用し接着接合した単純重ね合わせ継手を用い試験温度 10~40℃、試験速度 0.01~100mm/min の範囲で引張りせん断試験を行い、接着層のせん断強度に及ぼす温度依存性とせん断ひずみ速度依存性について明らかにしている。また、円筒突き合せ継手を用い引張り応力 0, 4, 8, 12, 16MPa、試験温度 10~40℃、せん断ひずみ速度 0.002, 0.02, 0.2sec⁻¹ の範囲で引張り応力とせん断応力を組合せた試験を行い、接着層のせん断強度に及ぼす引張り応力の影響と温度依存性とせん断ひずみ速度依存性について明らかにしている。

第3章では、単純重ね合わせ継手を用いた引張りせん断試験結果をもとに温度依存性とせん断ひずみ速度依存性を明らかにしている。また、それらを考慮した接着剤の弾粘塑性構成式を提案している。さらに、この構成式を用いて数値シミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較することにより、本構成式の妥当性を検証している。

第4章では、第2, 3章で得られた実験結果をもとに、接着剤に引張り応力とせん断応力が作用する組合せ応力下の温度・速度依存型弾粘塑性構成式を提案している。さらに、この構成式を用いて数値シミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較することにより、本構成式の妥当性を検証している。

第5章では、接着接合板の塑性加工に及ぼす温度と速度の影響について検討するため、接着接合した金属薄板のV曲げ試験と第3章で得られた接着剤の弾粘塑性構成式を用いた変形解析を行っている。曲げの解析結果および対応する実験結果から、とくに接着層のせん断変形（上下のスキン金属板のずれ）といわゆるカモメ折れ現象に及ぼす温度と成形速度の影響を明らかにしている。

第6章では、本研究で得られた結論をまとめている。

第2章 接着剤の組合せ応力下における弾粘塑性挙動の実験観察

2.1 緒言

前章で述べたように、これまでの接着接合に関する研究において、接着強度の温度依存性や速度依存性に関する研究、さらには速度依存性が顕著に現れる応力緩和挙動について調べた研究報告は極めて少ない。組合せ応力下の接着継手強度に関する研究報告も極めて少ない。エポキシ系接着剤において僅かに報告されているのみである。本研究で対象とするようなアクリル系の高延性接着剤の強度特性については、前章で述べたように、瀧口ら^{5),6)}によりせん断強度特性に非常に強いせん断ひずみ速度依存性があることが明らかにされ、この特性が構成式として構築されている。しかし、温度の影響についてはまだ検討されていない。温度依存性と速度依存性の接着強度特性についての実験データや、垂直応力とせん断応力が同時に作用する組合せ応力下におけるこれらの実験データは、これまで全く発表されていない。

そこで本章では、まずアクリル系高延性接着剤を用いた接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす温度・速度依存性について調べた^{43),44)}。試験は、単純重ね合わせ継手を用いた引張りせん断試験で行った。その際、せん断速度は試験機のクロスヘッド変位速度 V を一定とし、0.01~100mm/min (接着層のせん断ひずみ速度に換算すると、約 10^{-3} ~ 10sec^{-1}) の準静的から衝撃速度までの広範とした。温度は実際の加工温度を想定して 10~40°C の種々の温度とした。

次に、組合せ応力下における接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす垂直応力の影響と温度・速度依存性について調べた^{43),45)}。試験は、円筒突き合せ接着継手に引張りとおねじりの組合せ負荷を加えた引張りねじり試験で行った。

2.2 供試材および試験片

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。この接着剤は、通常のエポキシ系接着剤と同程度の接着強度を持ちながら同時に高い延性を有するという特徴がある。

引張りせん断試験に用いた被着体にはアルミニウム合金板 (A5083 P-O) を用いた。図 2.1 に引張りせん断試験用の試験片形状と寸法を示す。接着部のラップ長さを 8mm としたのは、接着部が破断する前に被着体が降伏しないようにするためである。なお、試験片の製作において、被着体は圧延方向と長手方向が一致するように切り出した。

引張りねじり試験に用いた被着体にはアルミニウム合金 (A5052) を用いた。図 2.2 に引張りねじり断試験用の試験片形状と寸法を示す。外径 30mm、内径 20mm の円筒を突き合せ接着した継手で強度測定を行った。接着層の厚さは、最も強度が高い約 0.1mm とした。固着時間は強度特性に変化のない 1週間以内とした。

接着にあたっては、被着体を #150 のサンドペーパーで研磨後アセトン脱脂処理を行った。接着時の温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度は $60 \pm 10\%$ とした。

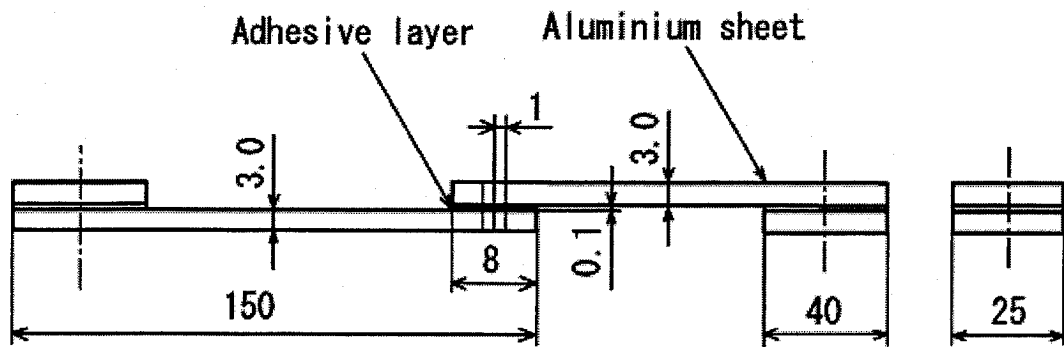


図 2.1 引張りせん断試験用の試験片形状と寸法

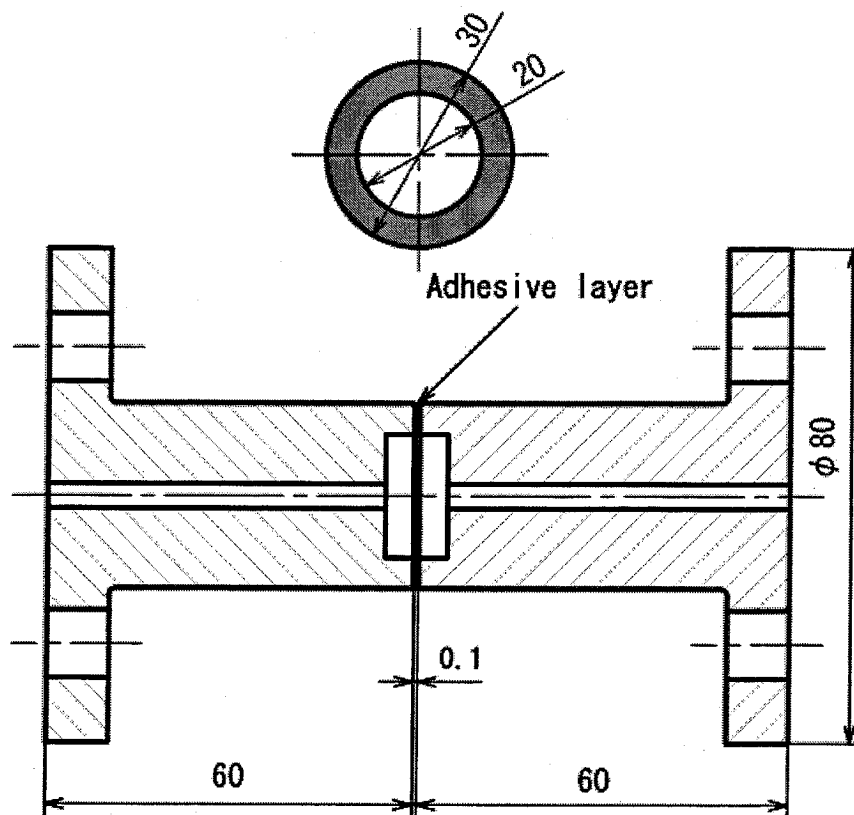


図 2.2 引張りねじり試験用の試験片形状と寸法

2.3 実験方法

図 2.3 に引張りせん断試験の概略図を示す。試験機には島津オートグラフ（定格 50 kN）を用いた。試験荷重の測定には試験機のロードセルを、接着層のせん断変形の測定には、図 2.4 に示すように渦電流式変位センサ（キーエンス製）を用いて行った。あらかじめ、負荷時に被着体に曲げ変形が生じてもほぼ問題なく変位の測定ができることを確認した。ただし、より正確を期するために、図 2.1 に示したように試験片の接着部側面に 1mm 間隔のけがき線を入れ、上下の被着体間のずれ量を高速度カメラで記録し、パソコンに出力した画像からもせん断ひずみを求めた。試験は、試験片全体をペルチェ素子制御による恒温チャンバー内に設置して 10, 20, 30, 40℃ の 4 条件で行った。引張りせん断試験はクロスヘッド変位速度を一定とし、速度は 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/min で行った。

図 2.5 に引張りねじり試験の概略図を示す。試験機には（株）昭和製作所のラチェット試験機（SW-1500）を用いた。ラチェット試験機は、油圧駆動で上部はねじり、下部は引張・圧縮ができる構造で、トルクと引張・圧縮荷重を同時に負荷することが可能な二軸試験機である。この試験機の制御方法は、接着層の垂直ひずみやせん断ひずみで制御するひずみ制御と接着層に作用する荷重やトルクで制御する荷重制御であり、両方式を組み合わせて試験を行うことができる。図 2.6 は試験機に試験片、曲げ防止装置、押し当て式変位計、マイクロスコープを取り付けた状態の図である。曲げ防止装置を使用することにより、試験片の試験機への取り付け時や試験時に接着層に曲げモーメントが作用することを防止した。接着層のせん断変形の測定は、押し当て式変位計を用いて行った。ただし、より正確を期するために、それぞれの被着体接着部側面に 1mm 間隔の線を印刷したマーカを貼り、上下の被着体間のずれ量を倍率 100 倍のマイクロスコープで観察し、レコーダに記録し画像からもせん断ひずみを求めた。試験では、最初に荷重制御で設定垂直応力になるまで引張り荷重を負荷しその後、トルクをせん断ひずみ制御で負荷した。試験は、引張りせん断試験と同様に試験片全体をペルチェ素子制御による恒温チャンバー内に設置して 10, 20, 30, 40℃ の 4 条件で行った。引張り応力は 0, 4, 8MPa の 3 条件で、せん断ひずみ速度は 0.002, 0.02, 0.2sec⁻¹ の 3 条件で行った。ただし、試験温度 20℃ については垂直応力の影響を詳細に調べるため、引張り応力 12, 14, 16MPa についても試験した。試験荷重とトルクの測定にはロードセルを使用した。接着層における垂直応力とせん断応力の分布は、せん断応力が中心からの距離に比例して大きくなることや、垂直応力が被着体端部において変形拘束により応力集中が生じ大きくなることにより、均一とはならない。しかしながら、本接着剤の応力分布の不均一性は高い粘塑性の性質よりそれほど大きくなりませんと考えられる。したがって、本研究において垂直応力 σ とせん断応力 τ は引張り荷重 P とトルク T をより次式のように表す。

$$\sigma = \frac{4P}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{16T}{\pi(d_o^2 - d_i^2)(d_o + d_i)} \quad (2.2)$$

ここで、 d_o と d_i はそれぞれ接着層の外径と内径である。

せん断ひずみ γ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を次式のように表す。

$$\gamma = \frac{d_o + d_i}{4t_a} \Theta \quad (2.3)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d_o + d_i}{4t_a} \dot{\Theta} \quad (2.4)$$

ここで、 t_a は接着層の厚さである。 Θ と $\dot{\Theta}$ はそれぞれ上下の被着体の相対的なねじれ角とねじれ角速度である。

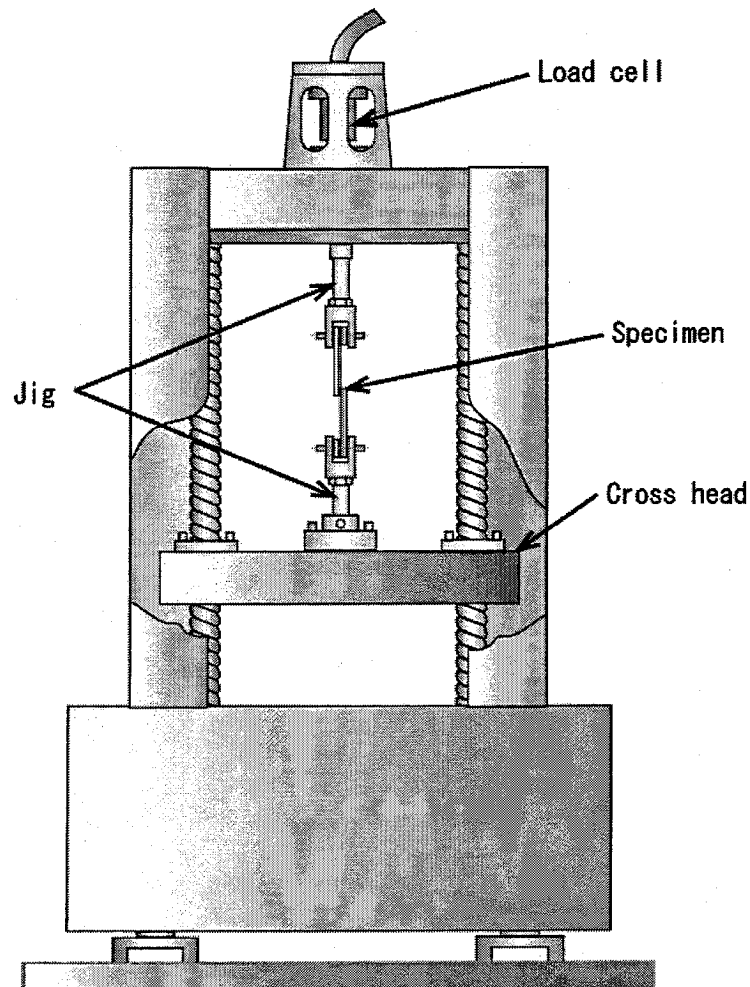


図 2.3 引張りせん断試験の概略図

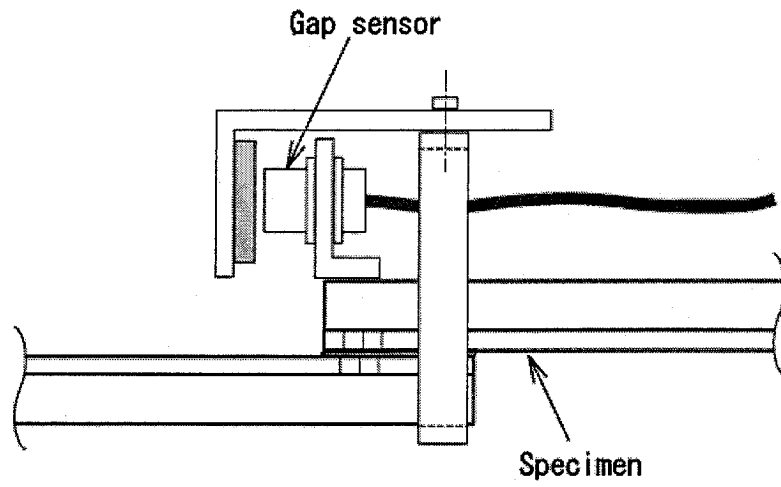


図 2.4 渦電流式変位センサを用いた接着層のせん断変形の測定方法

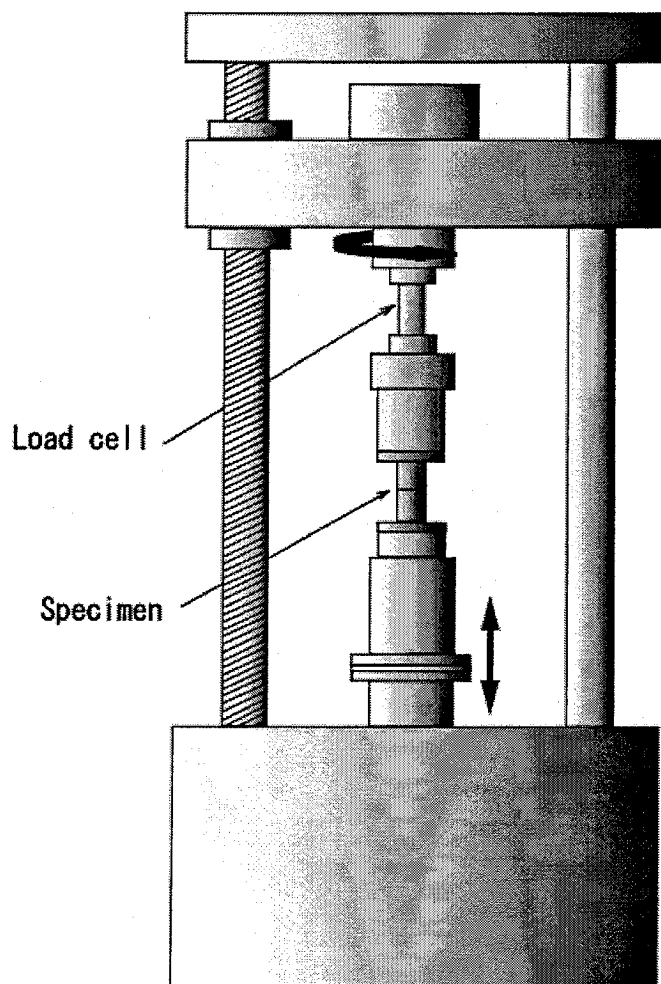


図 2.5 引張りねじり試験の概略図

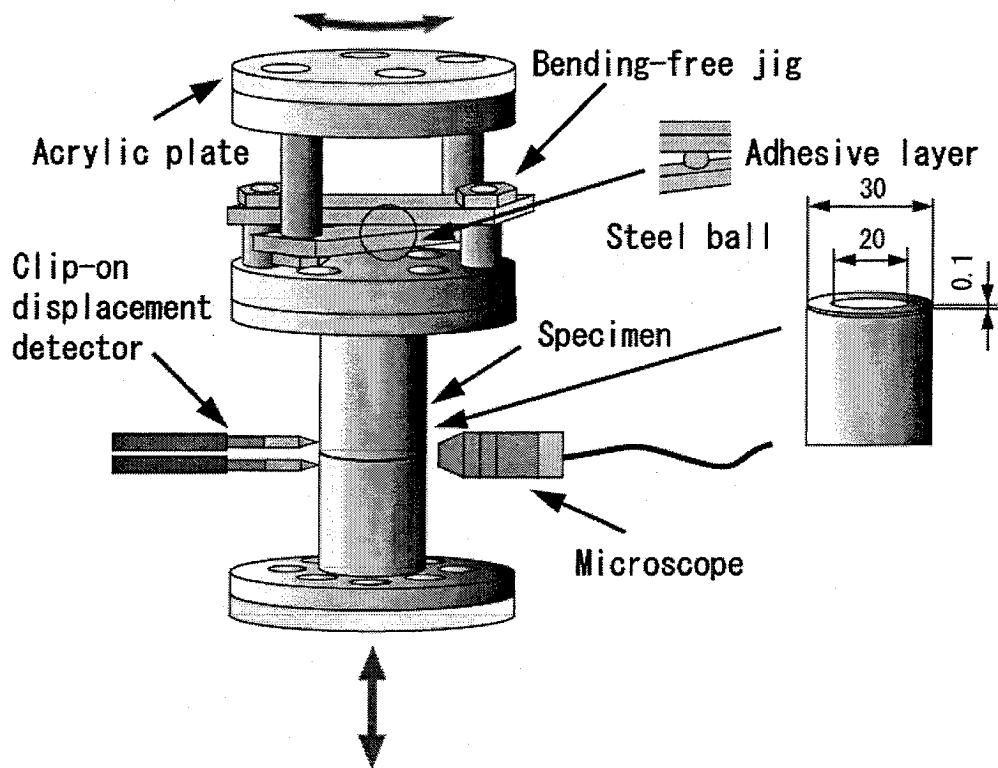


図 2.6 引張りねじり試験概略図

2.4 実験結果と考察

2.4.1 せん断強度の温度・速度依存性

図 2.7 に引張りせん断試験における破断面を示す。いずれの実験においても、本接着接合部の破面については、わずかに界面破壊の部分も見られるが、ほぼ凝集破壊となる。したがって、本接着剤のせん断強度は被着体金属表面と接着剤の接着強度でなく、接着剤自体のせん断強度である。

図 2.8～2.11 に引張りせん断試験により得られた接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。それぞれ温度 T が、 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C の場合である。なお、図中のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の値は $\dot{\gamma} = V/t_a$ により求めたものである。接着層厚さは、 0.1mm を目標にしたが、実測値は $0.097\sim 0.128$ にばらついていた。この図から本接着剤には、非常に強い温度依存性とせん断ひずみ速度依存性があることがわかる。このせん断強度の温度・速度依存性には、次の特徴があることがわかる。温度が低くひずみ速度が大きいほど、せん断強度は一定値に収束し高くなる反面、限界せん断ひずみ（接着層のはく離の開始に伴い、せん断応力が急速に低下しはじめる時点のひずみ）は小さくなる。また、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど、わずかに硬化率 $d\tau/d\gamma$ が大きくなる傾向がある。速度依存性に関する特徴は、瀧口らによる研究で報告されている。温度依存性に関する特徴は、本研究での新たな知見である。

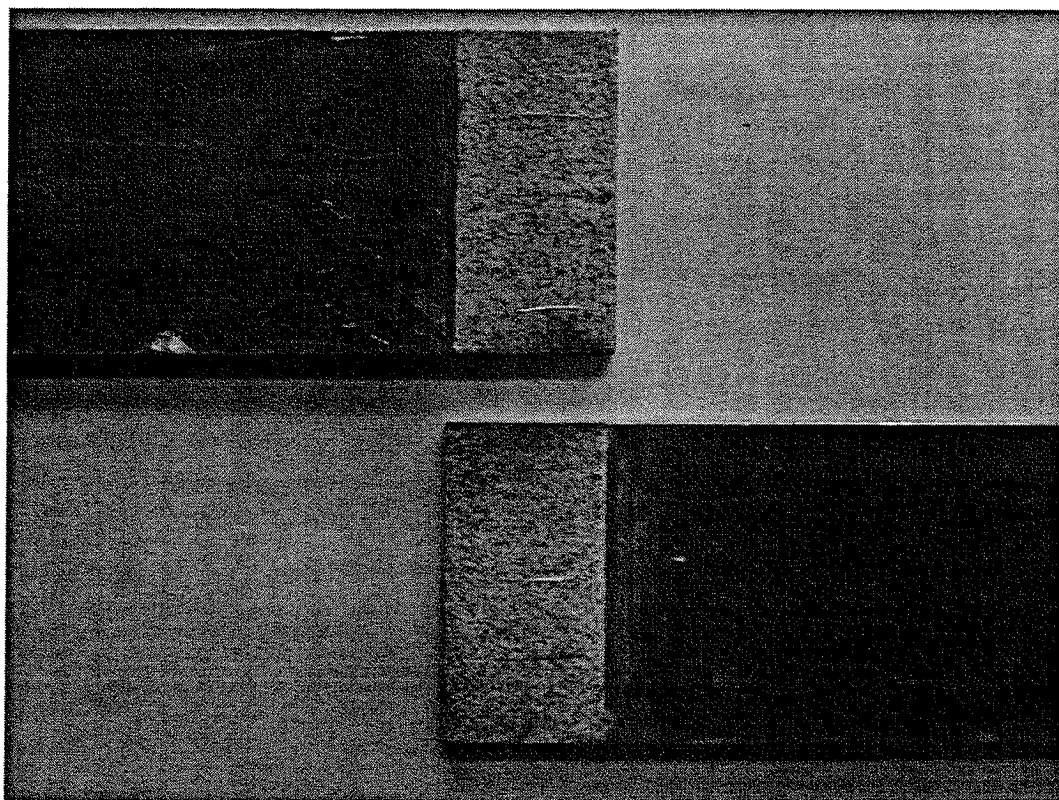


図 2.7 引張りせん断試験における破断面

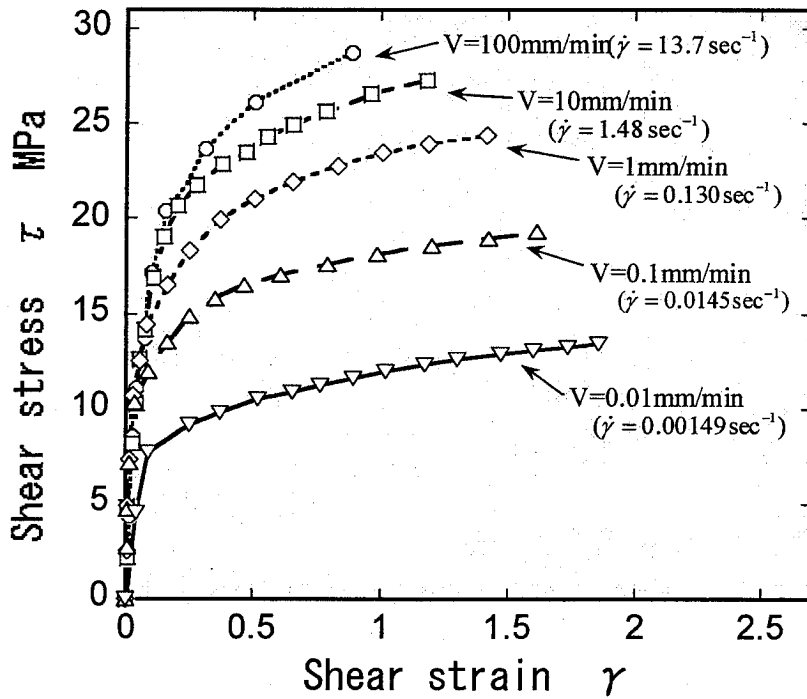


図 2.8 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 10°C の場合)

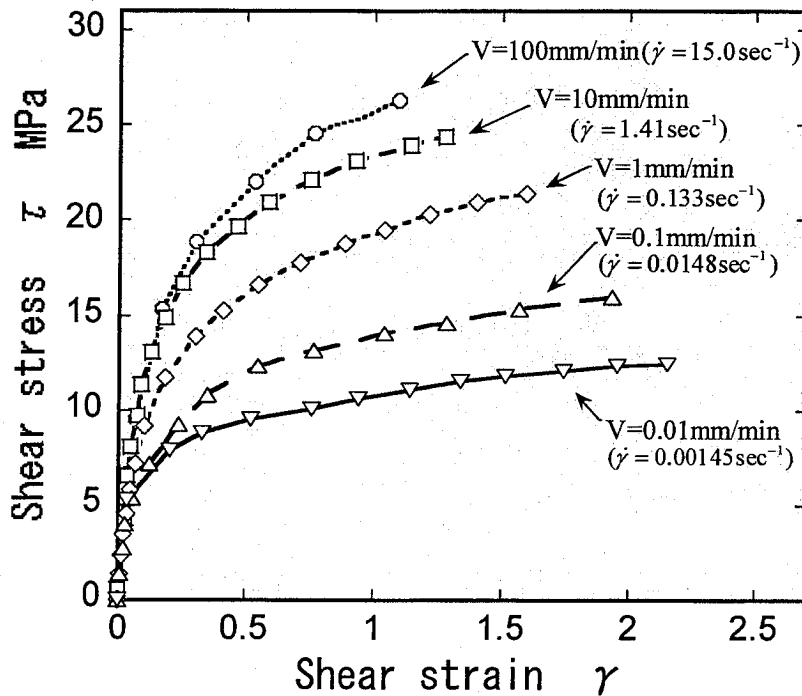


図 2.9 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 20°C の場合)

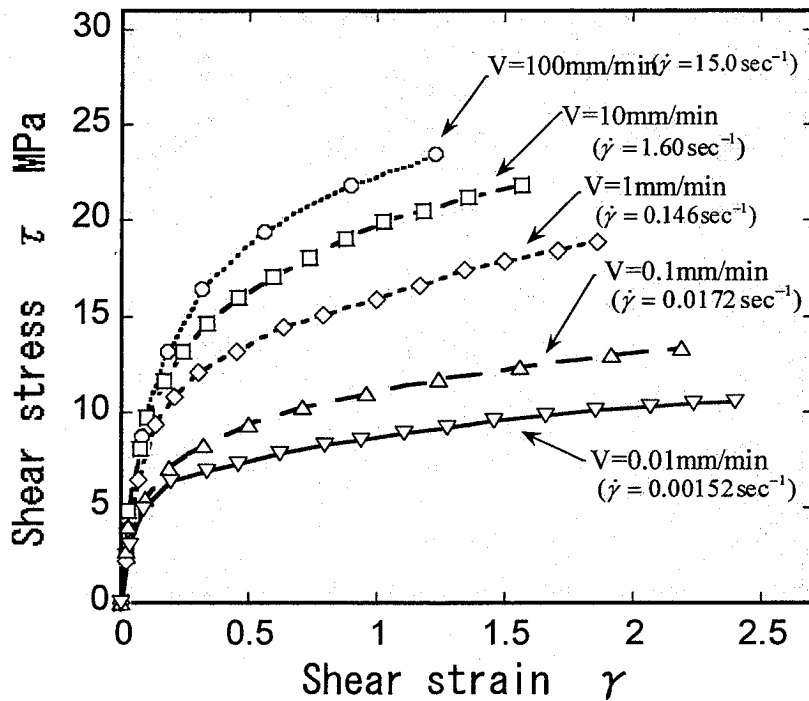


図 2.10 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 30°C の場合)

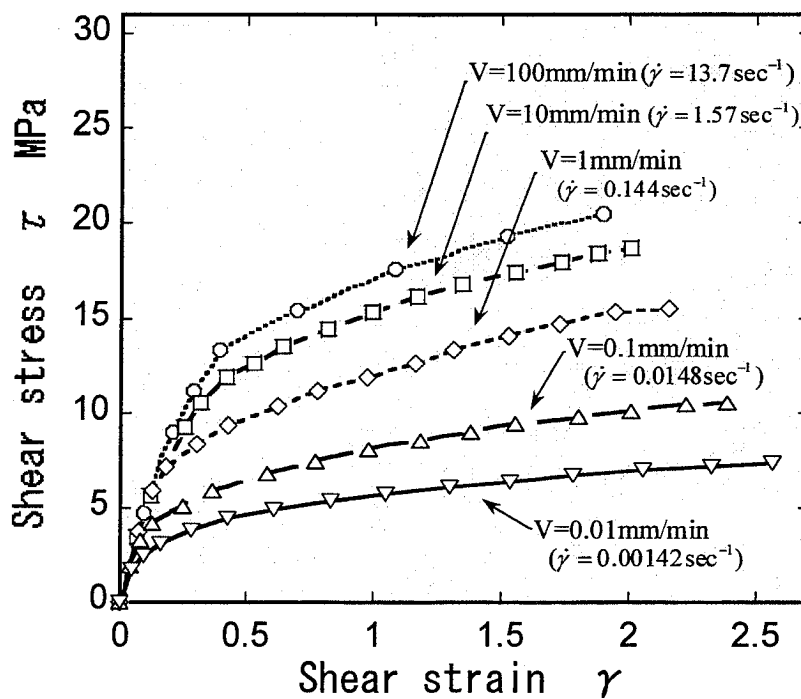


図 2.11 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 40°C の場合)

図 2.12 には、一例として、せん断ひずみ $\gamma=1.0$ の時のせん断応力 τ に及ぼす試験温度と引張りせん断速度（せん断ひずみ速度）の影響を示す。この図から本接着剤のせん断応力に与える温度の影響が、 10°C から 40°C の範囲で引張りせん断速度と温度に関わらずほぼ線形的に変化することがわかる。

図 2.13 に温度の違いによるせん断ひずみ速度と限界せん断ひずみの関係を示す。図より温度が高くせん断ひずみ速度が小さいと限界せん断ひずみは大きく、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど限界せん断ひずみは小さいことがわかる。接着層のはく離を考える上での重要なデータである。

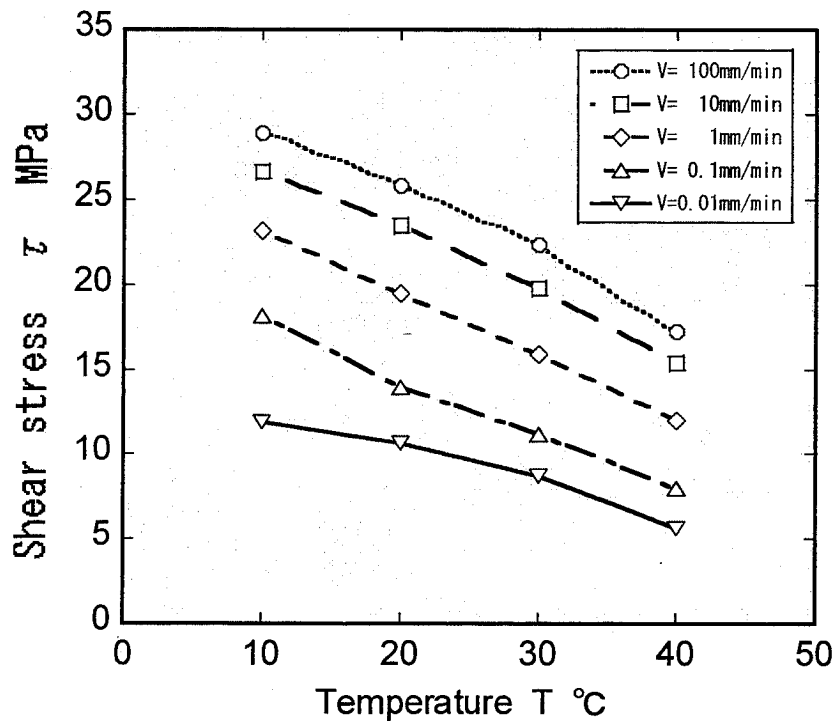


図 2.12 引張りせん断試験におけるせん断ひずみ $\gamma=1.0$ の時のせん断応力 τ に及ぼす試験温度と引張りせん断速度の影響

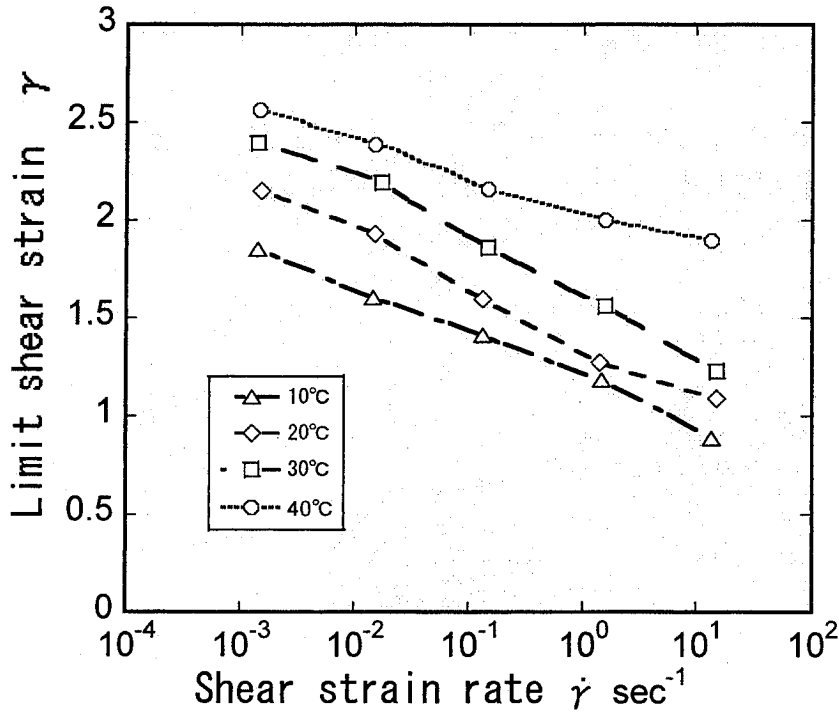


図 2.13 引張りせん断試験における限界せん断ひずみに及ぼす
試験温度とせん断ひずみ速度の影響

2.4.2 組合せ応力下におけるせん断強度の温度・速度依存性

図 2.14 に引張りねじり試験における破断面を示す。いずれの実験においても、本接着接合部の破面については、わずかに界面破壊の部分も見られるが、ほぼ凝集破壊となる。したがって、組合せ応力下においても本接着剤のせん断強度は被着体金属表面と接着剤の接着強度でなく、接着剤自体のせん断強度となる。図 2.15～2.18 に引張りねじり試験により得られた接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。それぞれ温度 T が、10°C、20°C、30°C、40°C の場合である。この図の引張りねじり試験における純せん断の場合 ($\sigma = 0$) と図 2.8～2.11 の引張りせん断試験の結果を比較すると、引張りねじり試験結果の方が、限界せん断ひずみがわずかに小さくなるが、実験結果はよく一致していることが確認できた。引張り応力が作用する組合せ応力下においても、せん断強度に関して非常に強い温度依存性とせん断ひずみ速度依存性があることがわかる。このせん断強度に関する温度・速度依存性には、次の特徴があることがわかる。

せん断応力は、本研究で行った全ての温度・せん断ひずみ速度において引張り応力が増加すると減少し、その減少に対する引張り応力の影響は、せん断ひずみ速度が小さい場合ほど大きくなる。また、限界せん断ひずみは、引張り応力に強く影響され引張り応力の増加により減少し、その影響はせん断ひずみ速度が小さいほど顕著となる。これは、引張り応力とせん断ひずみ速度を一定とした実験条件により、引張り応力が大きくなるほど、軸ひずみが大きくなりせん断ひずみが、小さくなるためと考えられる。

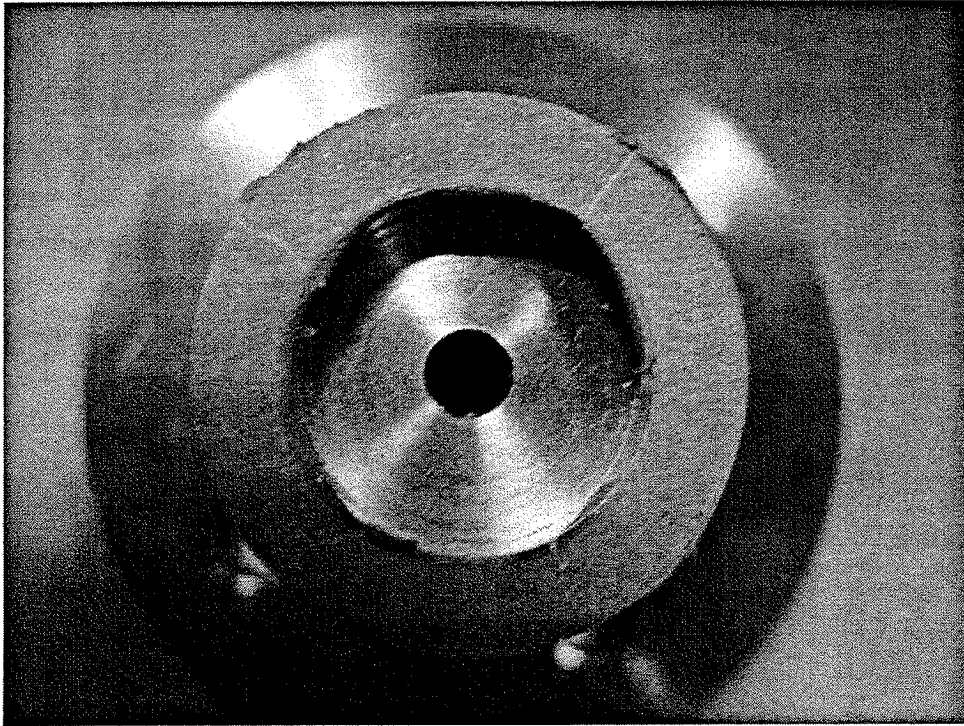


図 2.14 引張りねじり試験における破断面

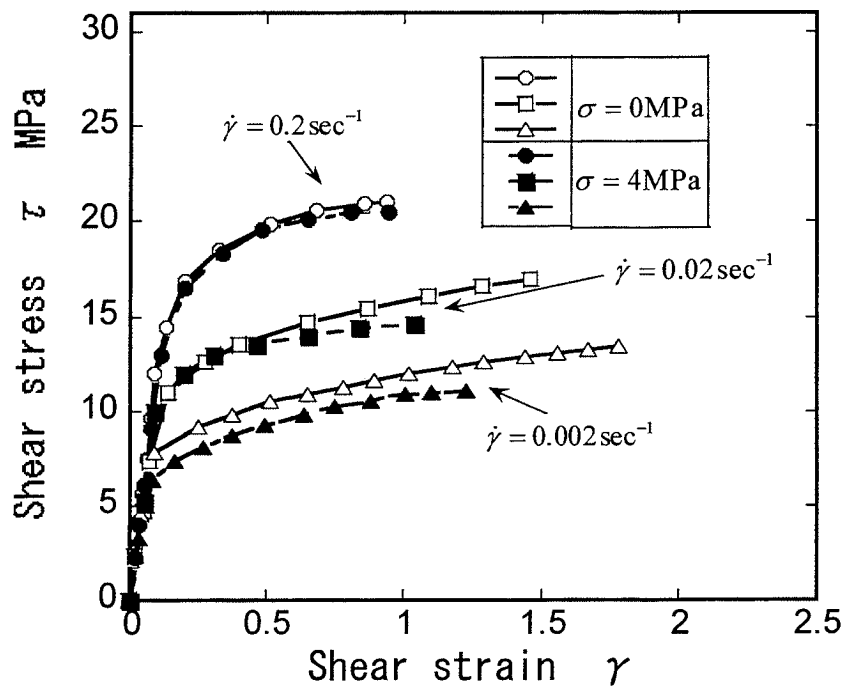


図 2.15 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 10°C の場合)

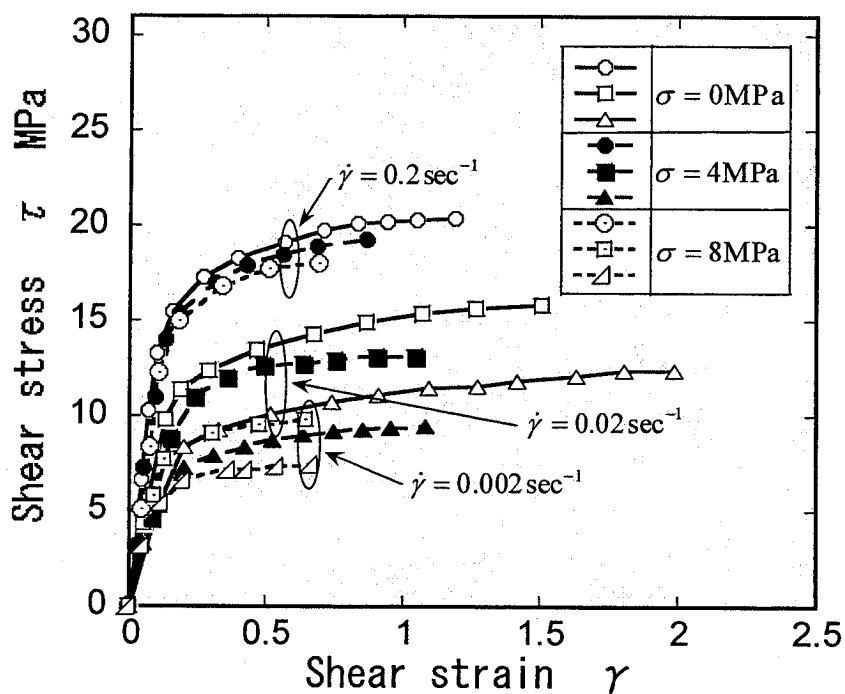


図 2.16 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 20°C の場合)

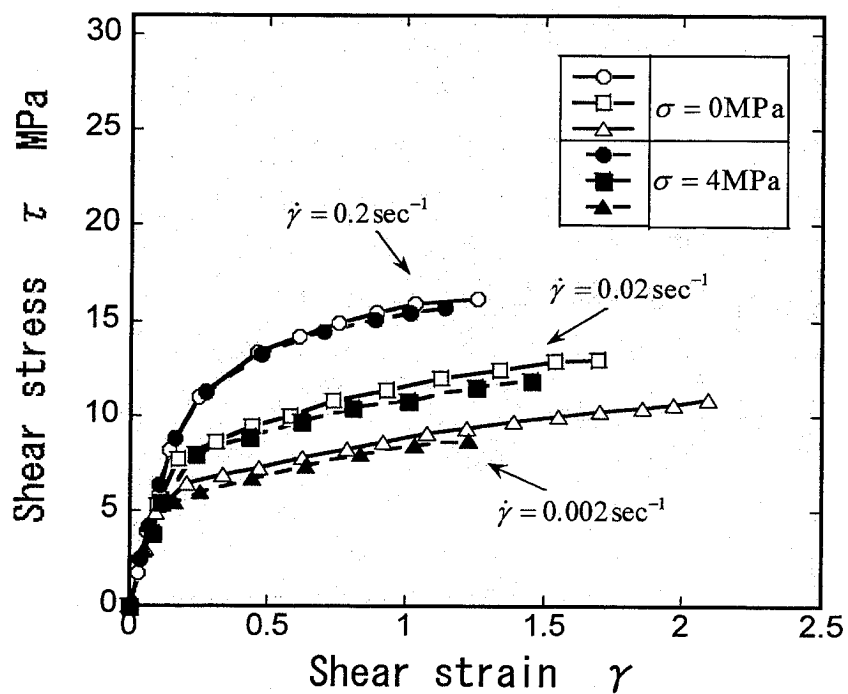


図 2.17 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 30°C の場合)

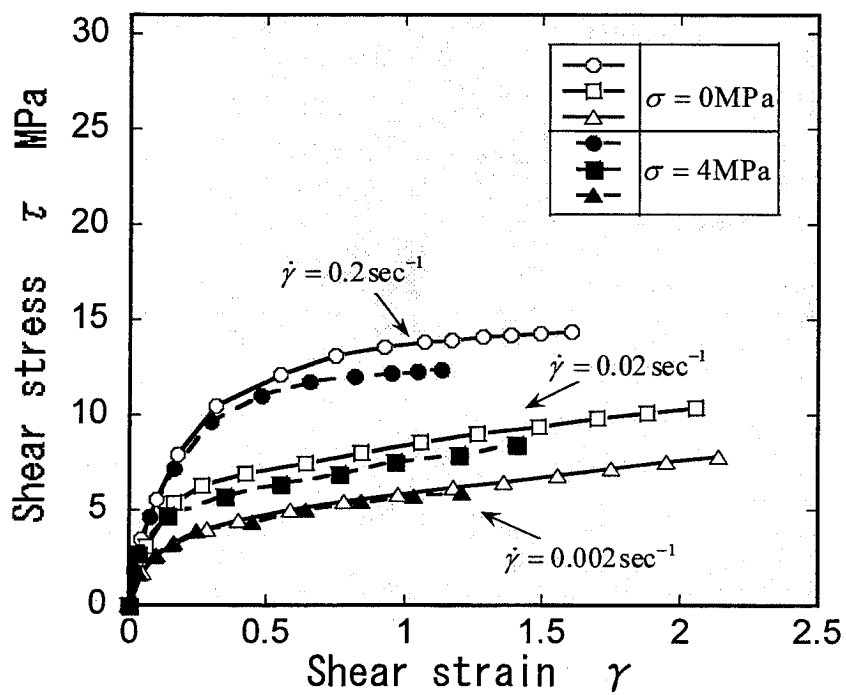


図 2.18 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 40°C の場合)

図 2.19 に、横軸を引張り応力、縦軸を最大せん断応力として整理した温度 20℃の場合の引張りねじり試験における破壊限界を示す。引張応力の増加により、最大せん断応力は減少する。せん断ひずみ速度が大きい場合、最大せん断応力の減少は、引張応力が小さい範囲で小さく、引張応力が大きい範囲で大きくなる。したがって、単純なせん断に比べ、引張り応力が増加すると、速度依存性が増加するように見える。この原因としては、引張り応力の増加に伴い、軸ひずみの増加分が増加し、結果として、相当塑性ひずみ速度が増加し、相当応力が増加するためと考えられる。

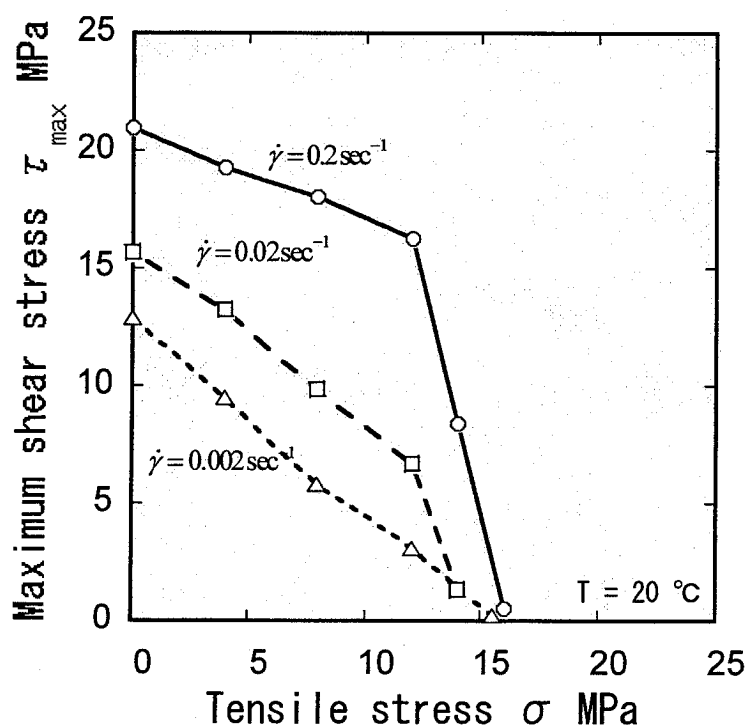


図 2.19 引張りねじり試験における破壊限界 (温度 20℃の場合)

2.5 結言

本章では、アクリル系高延性接着剤を用いた接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす温度・速度依存性について調べた。さらに、組合せ応力下における接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす垂直応力の影響と温度・速度依存性について調べた。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) せん断強度の温度・速度依存性は、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど、せん断強度は一定値に収束し高くなる反面、限界せん断ひずみは小さくなる。また、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど、わずかに硬化率が大きくなる。

(2) 組合せ応力下においてせん断応力は、本研究で行った全ての温度・せん断ひずみ速度において引張り応力が増加すると減少し、その引張り応力の影響は、せん断ひずみ速度が小さい場合ほど大きくなる。また、限界せん断ひずみは、引張り応力に強く影響され引張り応力の増加により減少する。そして、その影響はせん断ひずみ速度が小さいほど顕著となる。

第3章 接着剤の温度・速度依存性を考慮した単純せん断粘塑性構成式

3.1 緒言

第1章で述べたように、接着接合の信頼性や安全性を確立するためには、接着剤のせん断変形挙動を正確に表現できる構成式が必要不可欠である。しかしながら、第2章でも述べたように本研究で用いている接着剤には非常に強い温度・速度依存性があるが、これまで瀧口らによる研究^{5),6)}で、速度依存性を正確に表現できる粘塑性構成式が提案されているだけであり、温度依存性とせん断ひずみ速度依存性を同時に表現できる粘塑性構成式の提案は全く見あたらない。

そこで本章では、本接着剤の構成式を瀧口らが提案した構成式をもとに前章の引張りせん断試験の結果を使用し、温度・速度依存性を考慮した粘塑性構成式の定式化を行う^{43),44)}。さらに得られた構成式の妥当性を検証するため、これを用いてせん断応力-ひずみ応答の数値シミュレーションを行い、その結果と実験結果と比較する。

3.2 粘塑性構成式

前章で検討した本接着剤のせん断強度に関する温度・速度依存性の特徴を、あらためて整理すると次のようになる。

- 1) 温度が低くせん断ひずみ速度が速くなることによってせん断強度が高くなる反面、限界せん断ひずみは小さくなる。
- 2) 温度が低くせん断ひずみ速度が速くなると、せん断強度は一定値に収束する。
- 3) 温度が低くせん断ひずみ速度が速くなるにつれて、わずかに硬化率 $d\tau/d\dot{\gamma}$ が大きくなる傾向がある。

本節では、こうした接着剤の特徴を表現できる構成式の定式化について述べる。

まず、接着剤のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、次式に示すような弾性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ の和からなるものとする。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_p \quad (3.1)$$

弾性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ については Hooke の法則を仮定し、次式のように表す。

$$\dot{\gamma}_e = \frac{\dot{\tau}}{G} \quad (3.2)$$

ここで、 $\dot{\tau}$ はせん断応力速度、 G は横弾性係数である。

粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ については、基本的枠組みとして超過応力 (*overstress*) 理論を用いる。

$$\dot{\gamma}_p = \phi(\tau_{over}, \dot{\gamma}_p) \quad (3.3)$$

$$\tau_{over} = \text{overstress} = \langle \tau - \tau_{critical}(\dot{\gamma}_p) \rangle \quad (3.4)$$

ここで、 τ_{over} は超過応力、 $\dot{\gamma}_p$ は粘塑性ひずみ速度である。 $\tau_{critical}$ はそれ以下では粘塑

性変形を生じない限界応力であり平衡応力とも呼ばれる物である。〈 x 〉はマコーレカッ
コであり次式で定義される。

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{when } x > 0 \\ 0 & \text{when } x \leq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

すなわち、接着剤のせん断強度 τ は次式のように表すことができる。

$$\tau = \tau_{critical} + \tau_{over} \quad (\text{when } \tau_{over} > 0) \quad (3.6)$$

ここで、平衡応力 $\tau_{critical}$ を応力緩和試験において十分長い時間後収束する応力-ひず
み状態より、次式のように決定できた。

$$\tau_{critical} = \tau^* + C\gamma_p^n \quad (3.7)$$

ここで τ^* , C , n は材料定数である。

超過応力 τ_{over} は引張りせん断試験における応力-ひずみ関係の速度依存性(図 2.8
参照)より、次の形を仮定した。

$$\tau_{over} = D(1 + k\gamma_p^a) \left(1 - e^{-b\dot{\gamma}_p^m}\right) \quad (3.8)$$

この式中の $D(1 + k\gamma_p^a)$ はせん断速度が無限大 ($\dot{\gamma}_p = \infty$) 時の応力の値で、 D , k , a は

その値を決定するための定数、 b , m はひずみ速度感受性を決定する定数である。

なお、材料定数中 G , τ^* , C , および D については温度の影響を考慮するため、
20°Cにおける G_{20} , τ^*_{20} , C_{20} , および D_{20} の値を基準として用い、次に示す関数で表
した。

$$G = G_{20}\phi_1(T) \quad (3.9)$$

$$\tau^* = \tau_{20}\phi_2(T), C = C_{20}\phi_2(T) \quad (3.10)$$

$$D = D_{20}\phi_3(T) \quad (3.11)$$

$\phi_i(T)$ ($i=1,2,3$) は温度の影響を考慮する関数であり、前章で述べた実験結果をもとにこ
れを次式のように表す。

$$\phi_i = 1 + w_i \left(1 - \frac{T}{T_{20}}\right) \quad (3.12)$$

ここで T は温度であり、 $T_{20} = 20^\circ\text{C}$ である。 w_i ($i=1,2,3$) は材料定数である。これらの
式により、先に述べた応力-ひずみ挙動の特徴、すなわち温度が低く速度が速いほど
せん断応力は高くなるが、それは温度の下降と速度の上昇に伴い一定値に収束する、
同時にわずかに硬化率が上昇するなどを表現できる。

式(3.8)より、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ は、超過応力 τ_{over} と粘塑性ひずみ γ_p の陽な関数として次式のように表現することができる。

$$\dot{\gamma}_p = \left[-\frac{1}{b} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau_{over}}{D(1+k\gamma_p^a)} \right\} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.12)$$

3.3 材料定数の同定

前節で定式化した構成式中の温度 20℃時の材料定数を表 3.1 に示す。本構成式のパラメータは表に示した 9つのパラメータと温度の影響を考慮する 3つのパラメータからなる。表中 C , n は、応力緩和試験の結果をもとに決定した。 G は接着剤の横弾性係数であり、この値は実験ごとに多少のばらつきがあったが、20℃における平均値は 250MPa であった。材料定数 D , k , a , b , m については、20℃における引張りせん断試験の結果を用いて、Yoshida et al.⁴⁶⁾ が以前に提案した最適化手法にもとづくパラメータ自動同定法により決定した。また、温度の影響を考慮する w_i ($i=1,2,3$) の材料定数については、図 2.9 に示したせん断ひずみ $\gamma=1.0$ の時のせん断応力 τ に及ぼす試験温度と速度の影響をもとに決定した。温度の影響を考慮する材料定数は、 $w_1=0.85$, $w_2=0.72$, $w_3=0.05$ に決定した。

表3.1 構成式中の材料定数

G	τ^*	C	n	D	k	a	b	m
(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)				
250	4.0	3.0	0.60	2.67	5.65	0.183	2.39	0.352

図 3.1 にせん断ひずみ $\gamma=1.0$ の時のせん断応力 τ に及ぼす試験温度と引張りせん断速度（せん断ひずみ速度）の影響を示す。図 3.2～3.5 に式(3.12)の構成式と本節で同定された材料定数を用いて得られた各引張りせん断速度（せん断ひずみ速度）と試験温度に対するせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。それぞれ試験温度 T が、10℃, 20℃, 30℃, 40℃の場合である。

図 3.1～3.5 において、各プロット記号が実験結果であり、実線および破線は構成式で表したものである。図において実験結果とシミュレーション結果はいずれもおおよそ一致しており、本研究で提案した温度・速度依存性を考慮した粘塑性構成式が妥当であることがわかる。

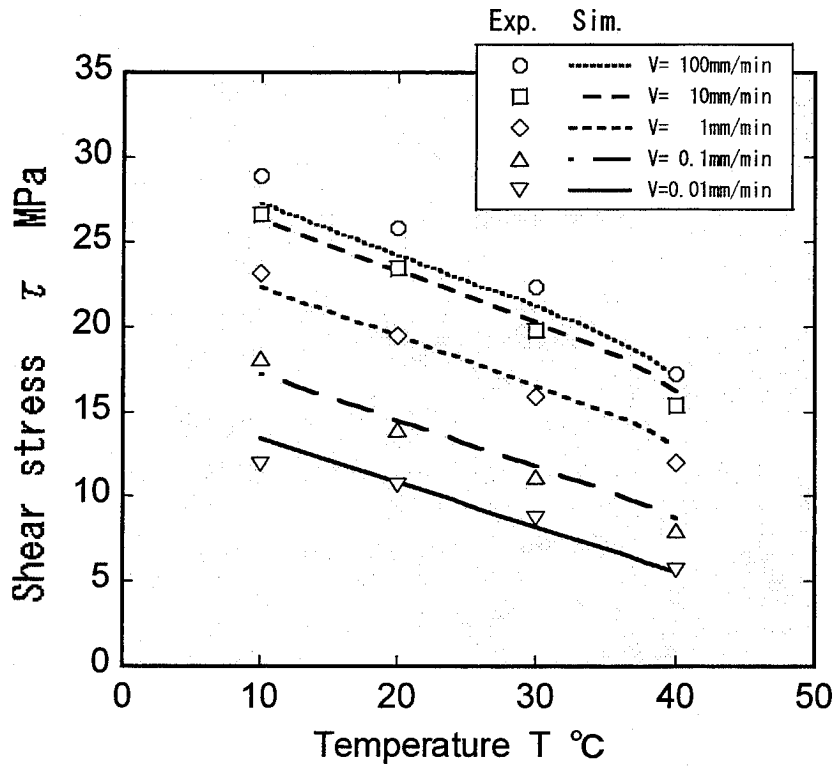


図 3.1 引張りせん断試験におけるせん断ひずみ $\gamma=1.0$ の時のせん断応力 τ に及ぼす試験温度と引張りせん断速度の影響 (実験結果とシミュレーション結果の比較)

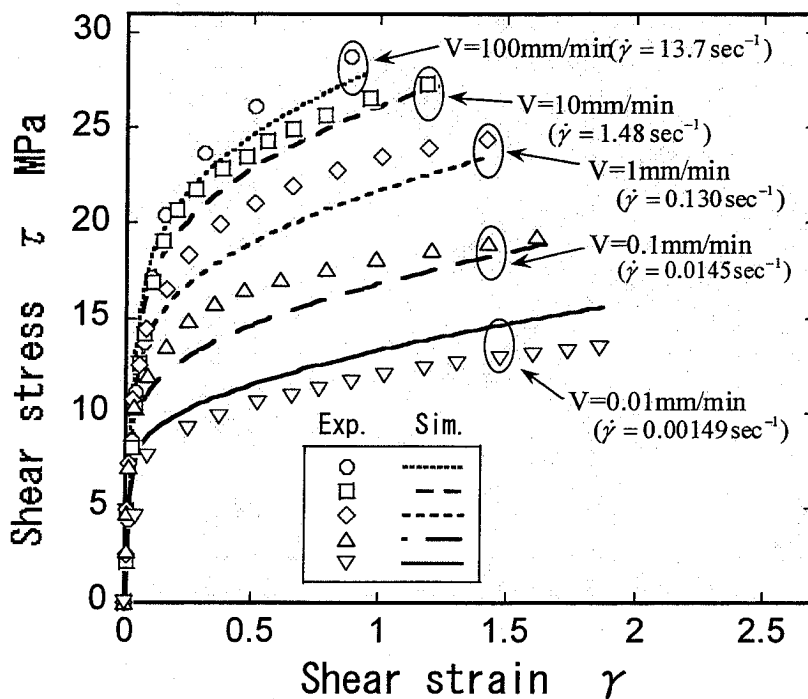


図 3.2 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 10°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

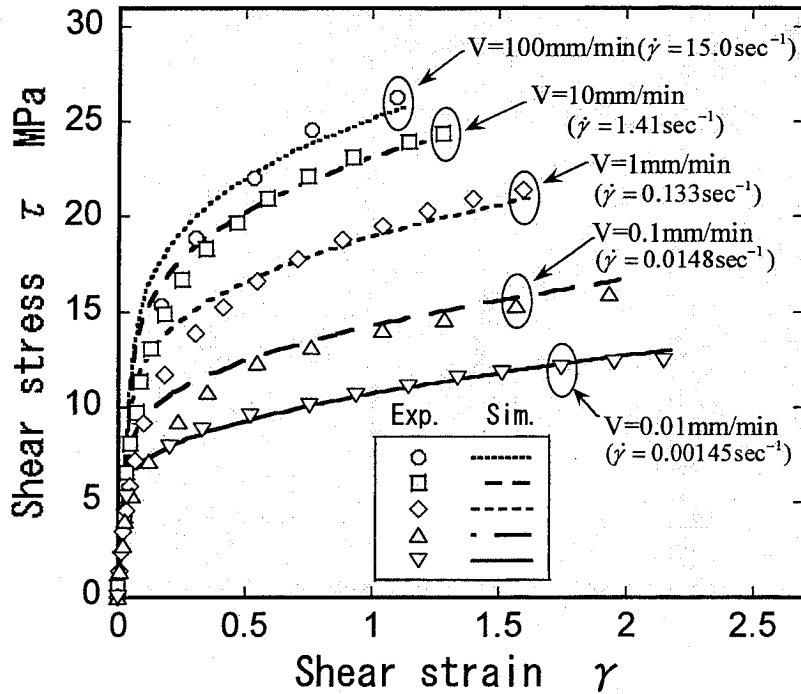


図 3.3 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 20°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

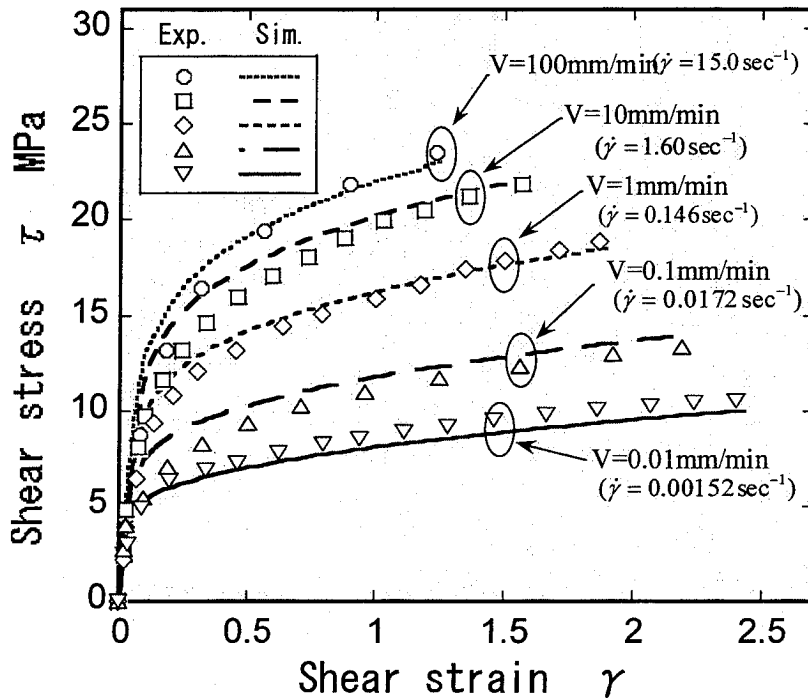


図 3.4 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 30°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

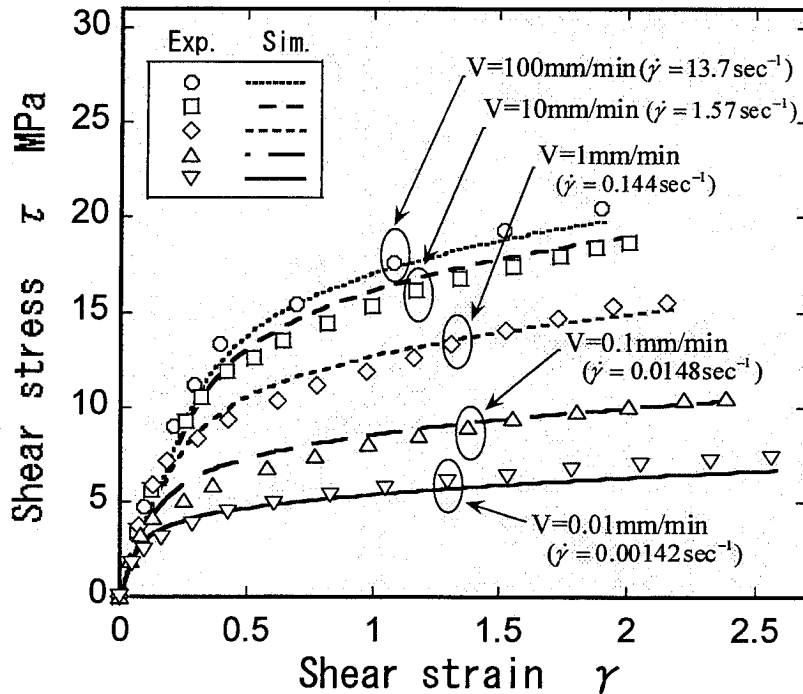


図 3.5 引張りせん断試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 40°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

3-4 結言

本章では、第 2 章での引張りせん断試験の結果をもとに、本接着剤の構成式の定式化を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 温度・速度依存性を考慮した、せん断強度に関する接着剤の弾粘塑性構成式を提案した。

(2) 提案した構成式を用いた引張りせん断試験についての数値シミュレーション結果は実験結果とおおよそ一致しており、得られた粘塑性構成式が妥当であることが確認できた。

第4章 接着剤の多軸粘塑性構成式

4.1 緒言

第1章で述べたように、接着層に作用する応力はせん断応力が支配的な場合が多いが、同時にピール応力（面に対する垂直引張応力）の影響も無視できない。こうした応力状態の解析を行うためには、引張りとせん断の組合せ応力下における構成式が不可欠となる。しかし、これまでの組合せ応力下における接着強度に関する研究は、線形弾性体としてモデル化されたエポキシ系接着剤を対象としたものがほとんどであり、しかも温度依存性と速度依存性が考慮された研究は極めて少ない。

そこで本章では、第3章で提案した単純せん断粘塑性構成式をもとに、温度・速度依存性を考慮した本接着剤の多軸粘塑性構成式の定式化を行う^{43),45)}。さらに得られた構成式の妥当性を検証するため、これを用いて応力-ひずみ応答の数値シミュレーションを行い、その結果と第2章の引張りねじり試験の実験結果と比較する。

4.2 多軸粘塑性構成式

第2章で検討した本接着剤の組合せ応力下におけるせん断強度に及ぼす垂直応力の影響の特徴をあらためて整理すると次のようになる。

1) せん断応力は、本研究で行った全ての温度・せん断ひずみ速度において引張り応力の増加により減少し、その影響はせん断ひずみ速度が小さい場合ほど大きくなる。

2) 限界せん断ひずみは、引張り応力に強く影響され引張り応力の増加により減少し、その影響はせん断ひずみ速度が小さいほど顕著となる。

本節では、こうした接着剤の特徴を表現できる多軸粘塑性構成式の定式化について述べる。

まず、接着剤のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、次式に示すようにそれぞれ弾性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ と粘塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ 、弾性垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ と粘塑性垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ の和からなるものとする。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_p, \quad \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_p \quad (4.1)$$

弾性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_e$ と弾性垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_e$ については Hooke の法則を仮定し、次式のように表す。

$$\dot{\gamma}_e = \frac{\dot{\tau}}{G}, \quad \dot{\epsilon}_e = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (4.2)$$

ここで、 $\dot{\tau}$ はせん断応力速度、 $\dot{\sigma}$ は垂直応力速度、 G は横弾性係数、 E は縦弾性係数である。

多軸応力状態における接着剤の接着強度を表すため、材料の異方性を考慮したヒル型で相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ を表す。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right\} + A(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (4.3)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ (\dot{\varepsilon}_x^p)^2 + (\dot{\varepsilon}_y^p)^2 + (\dot{\varepsilon}_z^p)^2 \right\} + \frac{1}{A} \left\{ (\dot{\gamma}_{xy}^p)^2 + (\dot{\gamma}_{yz}^p)^2 + (\dot{\gamma}_{zx}^p)^2 \right\}} \quad (4.4)$$

ここで、 A は異方性パラメータである。

降伏曲面を表す降伏関数（塑性ポテンシャル） f は次式のように表される。

$$f = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right\} + A(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (4.5)$$

式(4.3), (4.4), (4.5)において $\sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx} = 0$ を代入し、引張り荷重とトルクが作用する場合の組合せ応力状態を表すと次式のようになる。ただし、相当せん断応力 $\bar{\tau}$ と相当塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ で表す。

$$\bar{\tau} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{A}{3}\sigma_x^2} = \sqrt{\tau^2 + \frac{A}{3}\sigma^2} \quad (4.6)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(\dot{\gamma}_{xy}^p)^2 + \frac{3}{A}(\dot{\varepsilon}_x^p)^2} = \sqrt{\dot{\gamma}_p^2 + \frac{3}{A}\dot{\varepsilon}_p^2} \quad (4.7)$$

$$f = \frac{1}{2}\tau^2 + \frac{A}{6}\sigma^2 \quad (4.8)$$

塑性ポテンシャル f の関連流動則より、粘塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ と粘塑性垂直ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_p$ は次式のように表される。

$$\dot{\gamma}_p = \frac{\partial f}{\partial \tau} \dot{\lambda} = \tau \dot{\lambda}, \quad \dot{\varepsilon}_p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\lambda} = \frac{A}{3} \sigma \dot{\lambda} \quad (4.9)$$

式(4.9)を式(4.7)に代入すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}^2 &= \dot{\gamma}_p^2 + \frac{3}{A}\dot{\varepsilon}_p^2 = \left(\tau^2 + \frac{3}{A}\sigma^2 \right) \dot{\lambda}^2 = \bar{\tau}^2 \dot{\lambda}^2 \\ \therefore \dot{\lambda} &= \frac{\dot{\gamma}}{\bar{\tau}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

したがって、粘塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ と粘塑性垂直ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_p$ は、次式のように相当せん断応力 $\bar{\tau}$ と相当塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ で表されることがわかる。

$$\dot{\gamma}_p = \frac{\dot{\gamma}}{\bar{\tau}} \tau, \quad \dot{\varepsilon}_p = \frac{A\dot{\gamma}}{3\bar{\tau}} \sigma \quad (4.11)$$

相当せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ については、基本的枠組みとして超過応力（*overstress*）理論を用いる。

$$\dot{\gamma} = \phi(\bar{\tau}_{over}, \bar{\gamma}) \quad (4.12)$$

$$\bar{\tau}_{over} = \text{overstress} = \langle \bar{\tau} - \tau_{critical} \rangle \quad (4.13)$$

ここで、 $\bar{\tau}_{over}$ は超過応力、 $\bar{\gamma}$ は相当塑性せん断ひずみである。 $\tau_{critical}$ はそれ以下では粘塑性変形を生じない限界応力であり平衡応力とも呼ばれる物である。 $\langle x \rangle$ はマコーレカッホあり次式で定義される。

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{when } x > 0 \\ 0 & \text{when } x \leq 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

すなわち、接着剤の相当せん断応力 $\bar{\tau}$ は次式のように表すことができる。

$$\bar{\tau} = \tau_{critical} + \bar{\tau}_{over} \quad (\text{when } \bar{\tau}_{over} > 0) \quad (4.15)$$

ここで、平衡応力 $\tau_{critical}$ を応力緩和試験において十分長い時間後収束する応力-ひずみ状態より、次式のように決定できた。

$$\tau_{critical} = \tau^* + C\bar{\gamma}^n \quad (4.16)$$

ここで τ^* 、 C 、 n は材料定数である。

超過応力 $\bar{\tau}_{over}$ は引張りせん断試験における応力-ひずみ関係の速度依存性より、次の形を仮定した。

$$\bar{\tau}_{over} = D(1+k\bar{\gamma}^a)(1-e^{-b\bar{\gamma}^m}) \quad (4.17)$$

この式中の $D(1+k\bar{\gamma}^a)$ はせん断速度が無限大 ($\dot{\gamma}_p = \infty$) 時の応力の値で、 D 、 k 、 a はその値を決定するための定数、 b 、 m はひずみ速度感受性を決定する定数である。

なお、第3章と同様に材料定数中 G 、 E 、 τ^* 、 C 、および D については温度の影響を考慮するため、 20°C における G_{20} 、 E_{20} 、 τ^*_{20} 、 C_{20} 、および D_{20} の値を基準として用い、次に示す関数で表した。

$$G = G_{20}\phi_1(T), \quad E = E_{20}\phi_1(T) \quad (4.18)$$

$$\tau^* = \tau_{20}\phi_2(T), \quad C = C_{20}\phi_2(T) \quad (4.19)$$

$$D = D_{20}\phi_3(T) \quad (4.20)$$

$\phi_i(T)$ ($i=1,2,3$)は温度の影響を考慮する関数であり、次式のように表す。

$$\phi_i = 1 + w_i \left(1 - \frac{T}{T_{20}} \right) \quad (4.21)$$

ここで T は温度であり、 $T_{20}=20^\circ\text{C}$ である。 w_i ($i=1,2,3$)は材料定数である。

式(4.17)より、相当塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、超過応力 $\bar{\tau}_{over}$ と相当塑性せん断ひずみ $\bar{\gamma}$ の陽な関数として次式のように表現することができる。

$$\dot{\gamma} = \left[-\frac{1}{b} \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{\tau}_{over}}{D(1+k\bar{\gamma}^a)} \right\} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.22)$$

したがって、式(4.22)で求めた相当塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を式(4.11)に代入すると粘塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ と粘塑性垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ を求めることができる。

構成式中の温度 20°C時の材料定数を表 4.1 に示す。本構成式のパラメータは、第3章で決定した9つのパラメータと温度の影響を考慮する3つのパラメータに接着剤の縦弾性係数の E を加えた13のパラメータからなる。温度の影響を考慮する材料定数は、 $w_1=0.85$, $w_2=0.72$, $w_3=0.05$ である。

表4.1 構成式中の材料定数

G	E	τ^*	C	n	D	k	a	b	m
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)				
250	700	4.0	3.0	0.60	2.67	5.65	0.183	2.39	0.352

4.3 解析結果と実験結果の比較および考察

図 4.1~4.4 に第2章の引張りねじり試験の実験結果と式(4.22)の構成式と材料定数を用いて得られたせん断ひずみ速度と垂直応力と試験温度に対するせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。それぞれ試験温度 T が、10°C, 20°C, 30°C, 40°Cの場合である。図において、各プロット記号が実験結果であり、実線および破線は構成式で表したものである。ここで異方性パラメータは 20°Cにおける実験結果より $A=3.7$ とした。これらの実験結果とシミュレーション結果はおおよそ一致しており、本研究で提案した温度・速度依存性を考慮した多軸粘塑性構成式が妥当であることがわかる。引張り応力が作用する多軸応力状態においても、せん断強度に関して非常に強い温度依存性と速度依存性があることがわかる。このせん断強度に関する温度・速度依存性には、次の特徴があることがわかる。

せん断応力は、本研究で行った全ての温度・せん断ひずみ速度において引張り応力が増加すると減少し、その減少に対する引張り応力の影響は、せん断ひずみ速度が小さい場合ほど大きくなる。また、限界せん断ひずみは、引張り応力に強く影響され引張り応力の増加により減少し、その影響はせん断ひずみ速度が小さいほど顕著となる。これは、引張り応力とせん断ひずみ速度を一定とした実験条件により、引張り応力が大きくなるほど、軸ひずみが大きくなりせん断ひずみが、小さくなるためと考えられる。

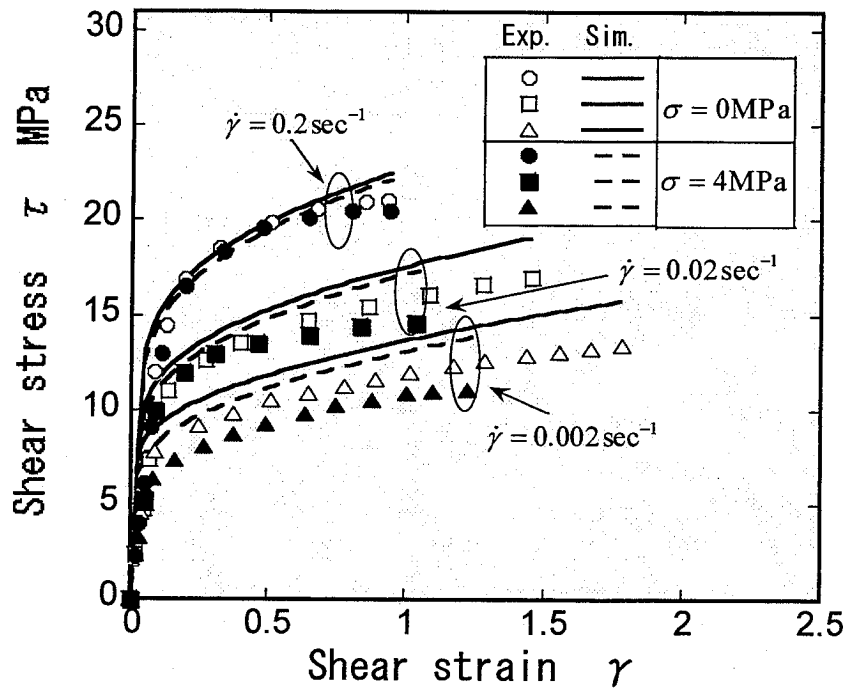


図 4.1 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 10°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

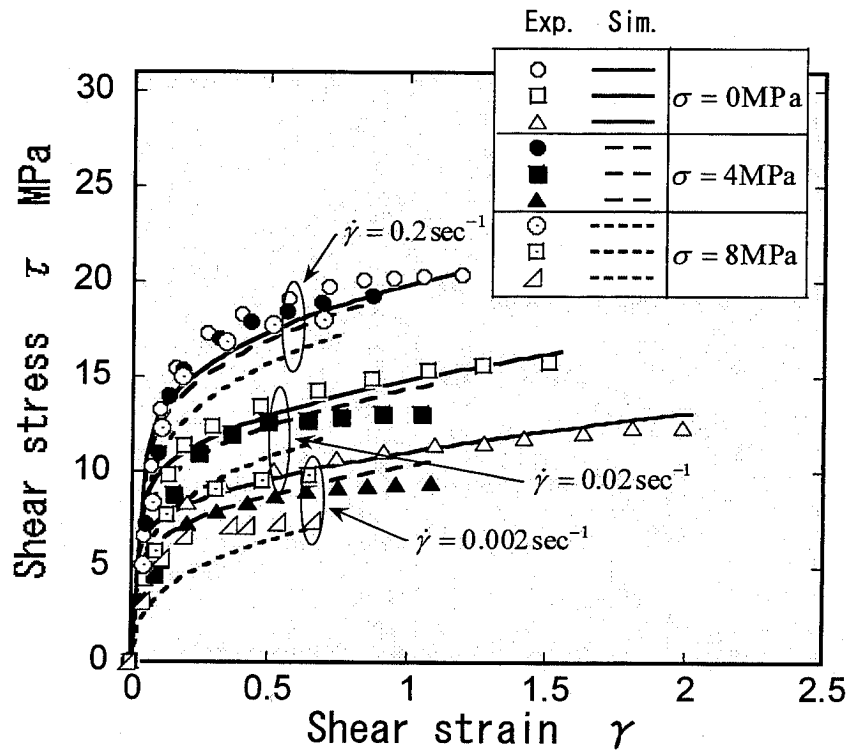


図 4.2 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線 (温度 20°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

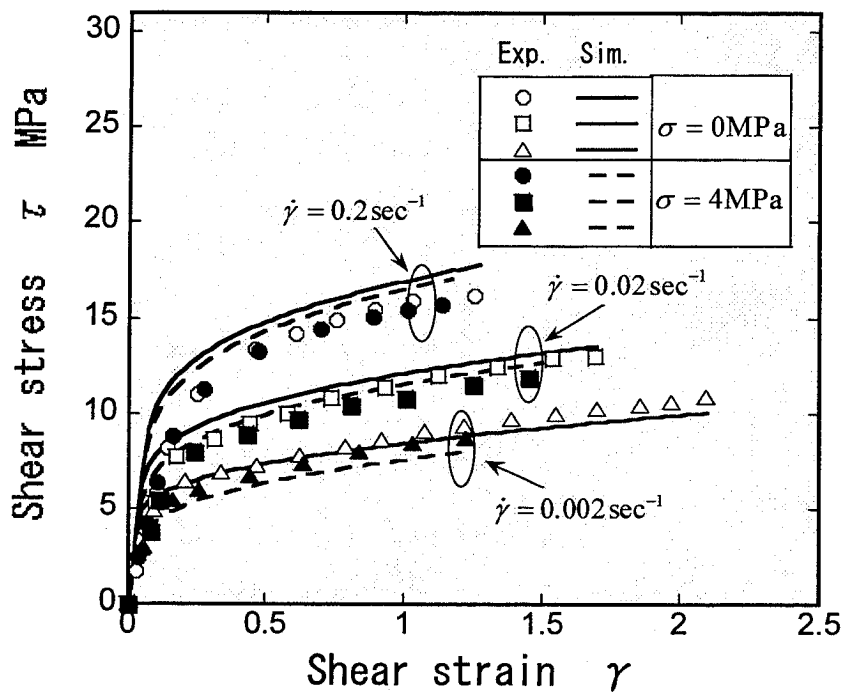


図 4.3 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 30°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

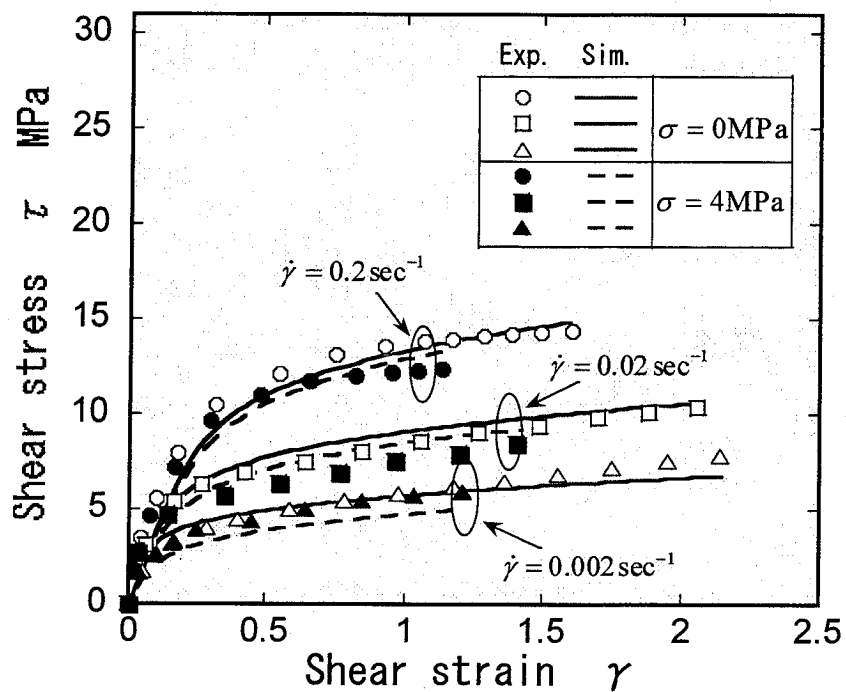


図 4.4 引張りねじり試験における接着剤のせん断応力-せん断ひずみ曲線
(温度 40°C の場合) (実験結果とシミュレーション結果の比較)

図 4.5 に、同様に横軸を引張り応力，縦軸を最大せん断応力として整理した温度 20℃ の場合の引張りねじり試験における破壊限界の実験結果とシミュレーション結果の比較を示す。図において、各プロット記号が実験結果であり，実線は構成式で表したものである。ただし，最大せん断応力の計算のための限界せん断ひずみは，実験で得られた値を使用した。引張り応力の増加により，最大せん断応力は減少する。せん断ひずみ速度が大きい場合，最大せん断応力の減少は，引張り応力が小さい範囲で小さく，引張り応力が大きい範囲で大きくなる。したがって，単純なせん断に比べ，引張り応力が増加すると，速度依存性が増加するように見える。この原因としては，引張り応力の増加に伴い，軸ひずみの増加分が増加し，結果として，相当塑性ひずみ速度が増加し，相当応力が増加するためと考えられる。

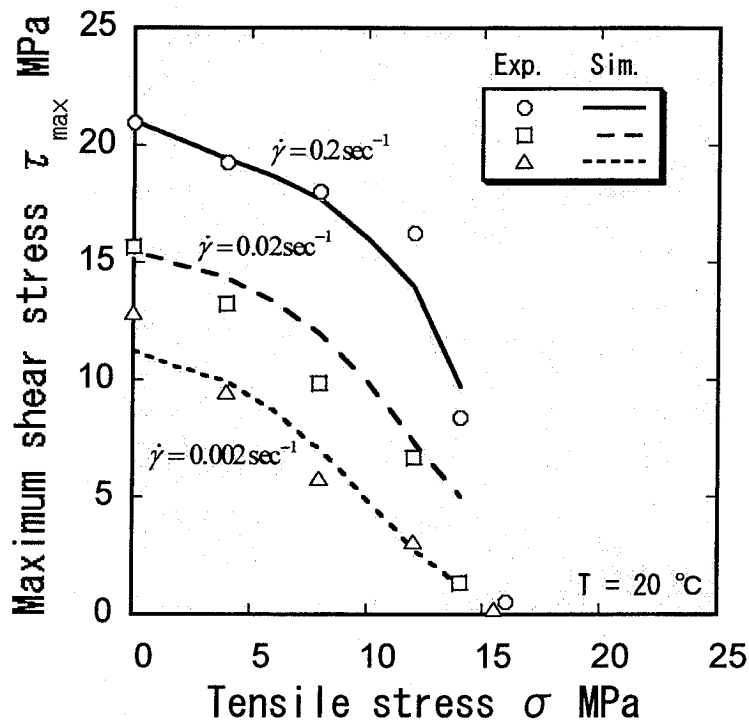


図 4.5 引張りねじり試験における破壊限界（温度 20℃ の場合）
（実験結果とシミュレーション結果の比較）

4.4 結言

本章では，第 2 章での引張りせん断試験の結果をもとに，本接着剤の温度・速度依存性を考慮した多軸粘塑性構成式の定式化を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 温度・速度依存性を考慮した，多軸粘塑性構成式を提案した。
- (2) 提案した構成式を用いた引張りせん断試験についての数値シミュレーション結果は実験結果とおおよそ一致しており，得られた構成式が妥当であることが確認できた。

第5章 接着板の塑性曲げに及ぼす温度・速度の影響

5.1 緒言

瀧口らは接着接合した金属薄板の塑性加工という、これまで構造接着の分野ではあまり議論されることのなかった技術の提案を行い、その可能性や実現に向けた問題点を解明すべく研究を進めている^{3),4)5),7)}。このときの最大の問題は、曲げ成形中の接着層のせん断変形（ずれ変形）であり、それに起因するはく離や形状不良（フランジ折れ曲がり、いわゆるカモメ折れ現象）⁴⁾である。それを抑えるために、接着ラップ長さに対してダイス肩幅を大きくすること⁴⁾と、接着剤の変形抵抗の速度依存性を利用して高速に加工することが有効であること⁷⁾を、実験と対応するシミュレーションにより確認している。

ところで、接着接合板の成形技術という応用を考えると、加工現場の雰囲気温度が必ずしも管理されているとは限らないので、温度が成形品の形状精度に及ぼす影響などを知っておくことは格別重要である。

本章では、第3章において得られた温度・速度依存性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式を用い、接着接合板の曲げ変形の数値シミュレーションを行い、接着接合板の加工に及ぼす温度と速度の影響について検討した。

5.2 実験方法

被着体には板厚が1mmのアルミニウム合金板（A5083P-O）を用いた。図5.1に被着体の引張試験から得られた応力-ひずみ曲線⁽¹⁾を示す。本結果は引張り速度0.1mm/minで行ったものである。この図において、プロット記号が実験結果であり、実線はそれを剛塑性近似式³⁾

$$\sigma = C_{a1} \varepsilon^{n_{a1}} \quad (C_{a1} = 643, n_{a1} = 0.316) \quad (5.1)$$

で表したものである。解析にはこれを被着体の構成式として用いる。なお、本アルミニウム合金板の引張強度には厳密には温度及び速度依存性があるが⁴⁸⁾、本実験の温度範囲（10℃から40℃）では、応力-ひずみ関係に及ぼす温度・速度依存性は極めて小さいので、本研究ではこれを無視した。

本研究におけるV曲げ試験は、これまでに行われた研究の成果^{3),4)}をもとに、接着層のずれを抑えるのに効果的な自由曲げ⁴⁹⁾で行った。図5.2(a)に試験片形状と寸法を、図5.2(b)にV曲げ試験の概略図を示す。実験はパンチ、ダイス、試験片の全てをペルチェ素子制御による恒温チャンバー内に入れて行った。図中 P はパンチ荷重、 l_p は接着ラップ長さ、 L はダイス肩幅、 x は曲げ中心からの距離、 λ_g は接着層のせん断ずれ量、 t_g は接着層の厚さである。接着層のせん断ひずみ γ は、図に示すように試験片の接着部側面に1mm間隔のけがき線を入れ、上下の被着体のずれ量をスキャナー（EPSON GT-7600U）で取り込み計測し、 $\gamma = \lambda_g / t_g$ により求めた。なお、 λ_g の読み取り誤差はおおよそ $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度であった。接着層の厚さは、接着ジグを作成し0.1mmになるようにス

ペーサを用いてコントロールした。本実験に用いた試験片の接着層の厚さは 0.103～0.116 であった。

表 5.1 に V 曲げ条件を示す。なお、温度の違いによる影響を明確にするため、接着ラップ長さ 50mm に対してダイス肩幅を 20mm と短くし、カモメ折れを生じやすくした。パンチ速度は 500mm/min としたが、1mm/min, 20mm/min の場合（加工時の温度は 40℃）についても実験を行い、加工速度との関係についても比較検討した。押し込み量はいずれも 8mm とした。

5.3 曲げ解析

接着板の V 曲げの変形解析を自由曲げ（三点曲げ）として行った。本研究での解析における新規性は、接着層に対して第 3 章で示した温度・速度依存型構成式を用いているところにある。このことにより、変形挙動に及ぼす温度の影響を解析的に明らかにすることができる。なお、変形解析法については、これまでに行われた研究^{3),7)}を踏襲しているため、詳細はそれを参照されたい。

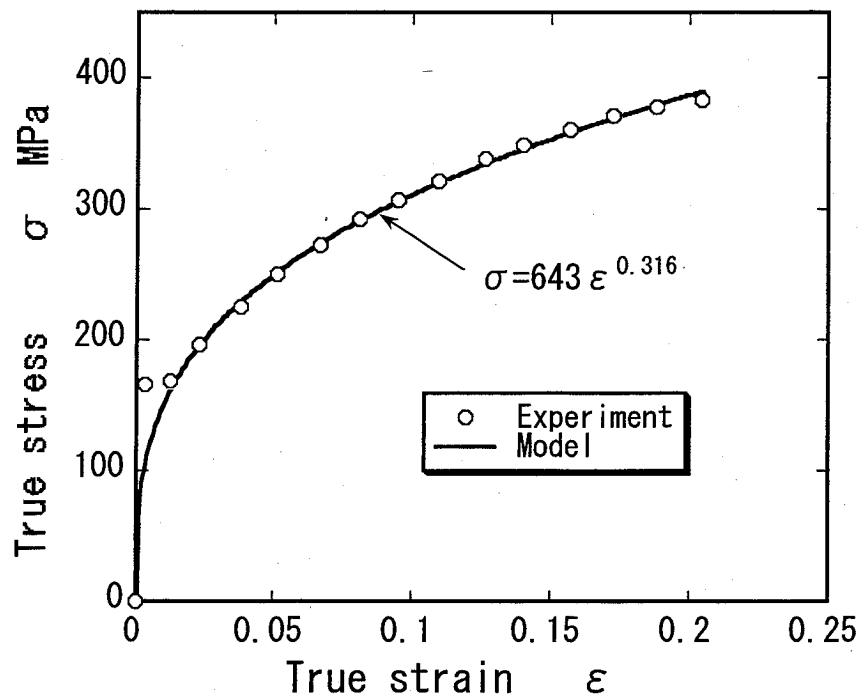
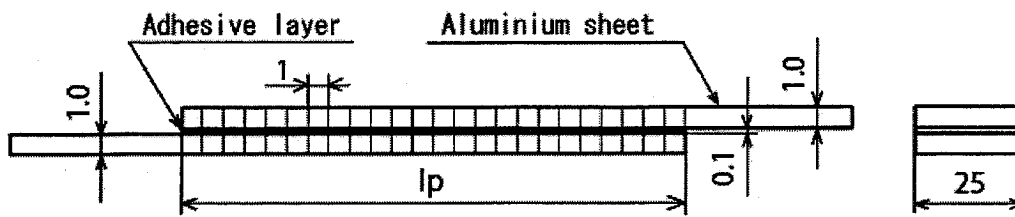
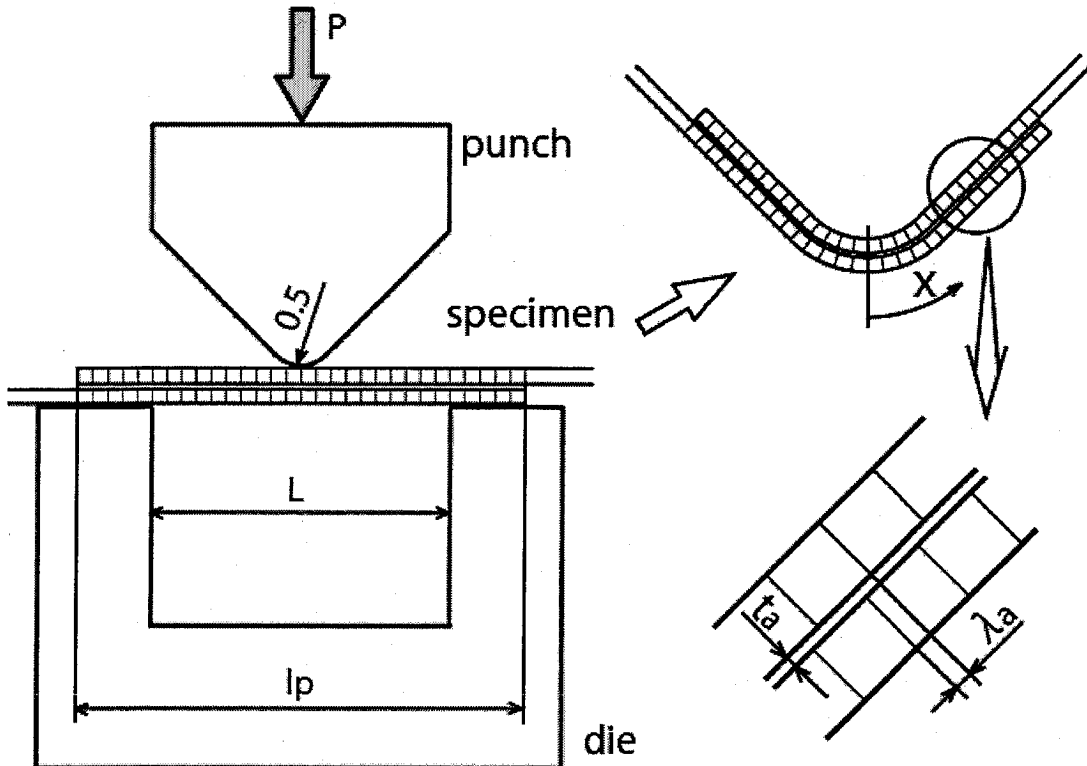


図 5.1 被着体(A5083)の応力-ひずみ曲線



(a) 試験片形状と寸法



(b) V 曲げ試験の概略図

図 5.2 V 曲げ試験の試験片と概略図

表 5.1 V 曲げ試験条件

Lap length lp (mm)	Die span L (mm)	Punch speed V (mm/min)	Temperature T (°C)
50	20	500 (1,20)	10
			25
			40

5.4 結果と考察

図 5.3 に温度の違いによるV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。この図から、温度が高いと、接着層のせん断ひずみ（ずれ変形）は大きくなるが、温度が低くなるとせん断ひずみはかなり小さくなることがわかる。これは温度が低くなるに従い接着層の変形抵抗が上昇し、せん断変形が生じにくくなるためである。図 5.4, 図 5.5 に温度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較を示す。図 5.4 が実験結果であり、図 5.5 が対応する解析結果である。それぞれ温度 T が、(a)10°C, (b)25°C, (c)40°C の場合である。また、図 5.6 に図 5.4 と図 5.5 に示したV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較を示す。これらの結果から明らかなように、温度が高い場合には非常に大きなカモメ折れが生じている。それに対して、温度が低い場合にはカモメ折れがかなり小さいことがわかる。このカモメ折れ現象は接着層のせん断変形（ずれ変形）によって上下のアルミニウム板それぞれに大きな曲げモーメントが生じることに起因するものであり、ずれ変形についての図 5.3 の結果と、カモメ折れについての図 5.4~図 5.6 の結果から、温度が高い場合は接着層のずれ量が大きく、その結果、大きなカモメ折れが生じていることがわかる。一方、温度が低くなるほど接着層のずれ量が小さくなり、カモメ折れも小さくなっている。

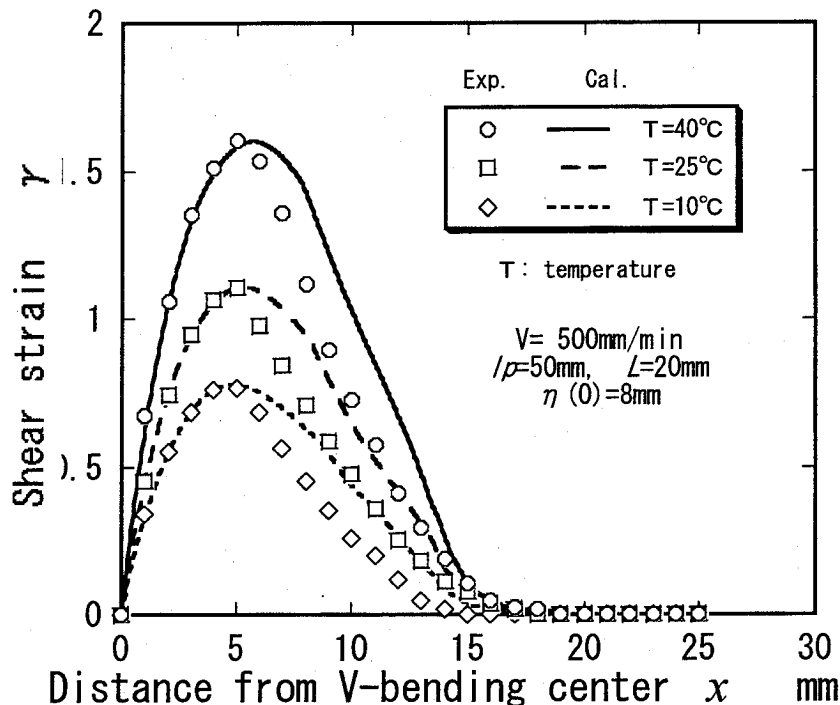
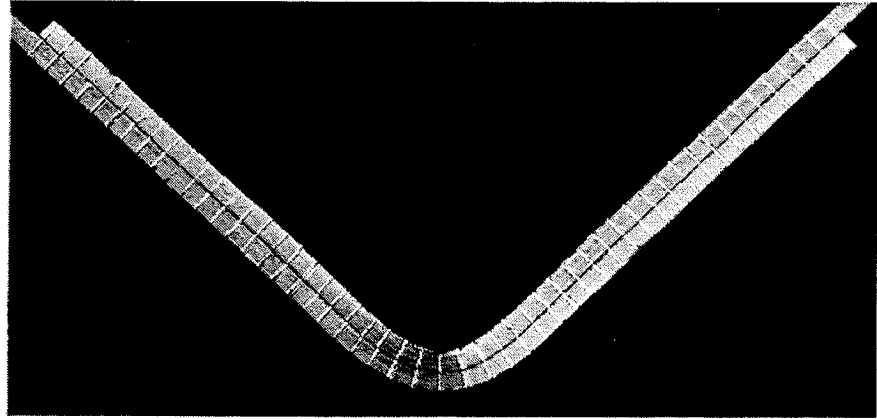
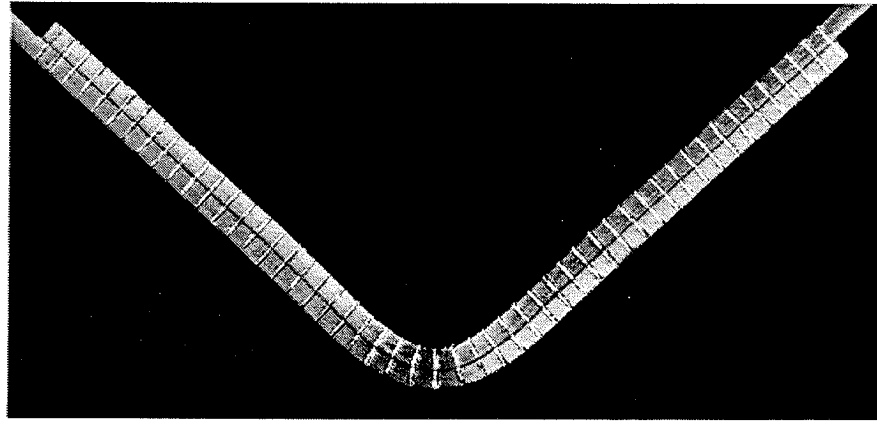


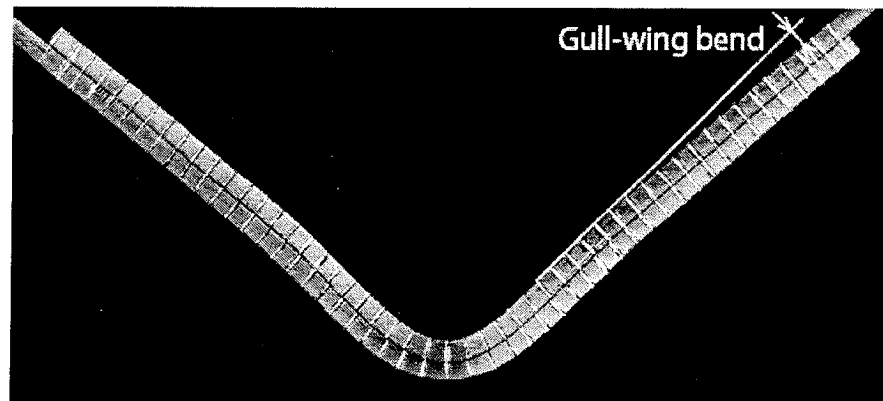
図 5.3 温度の違いによるV曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較



(a) $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$

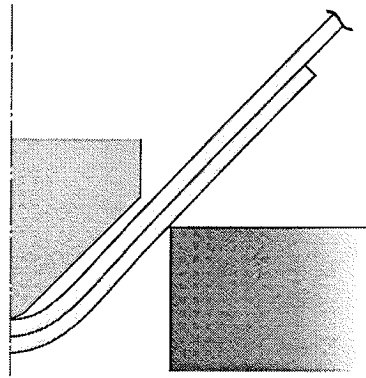


(b) $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

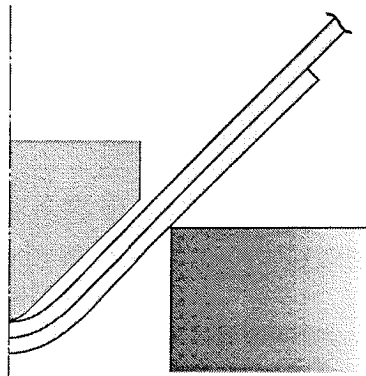


(c) $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

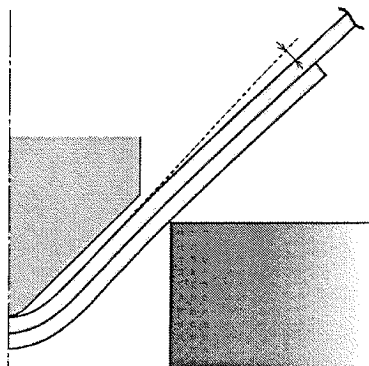
図 5.4 温度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較 (実験結果)



(a) $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

図 5.5 温度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較 (解析結果)

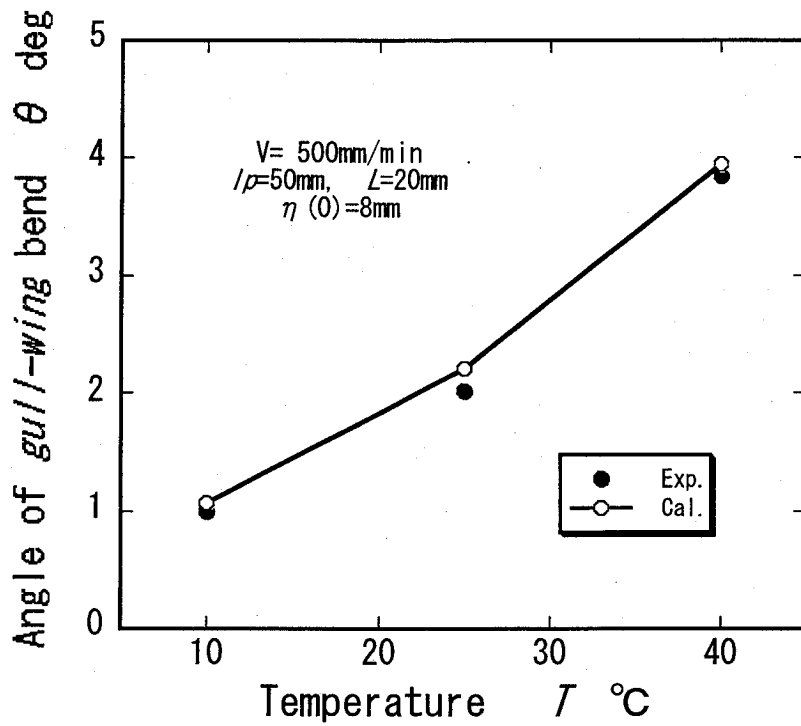


図 5.6 温度の違いによるV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較

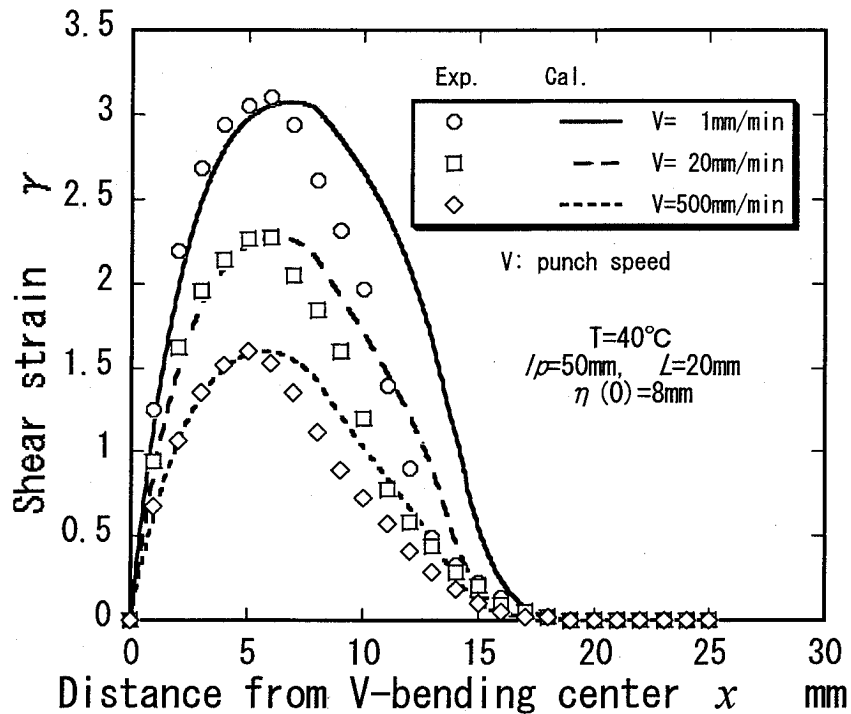
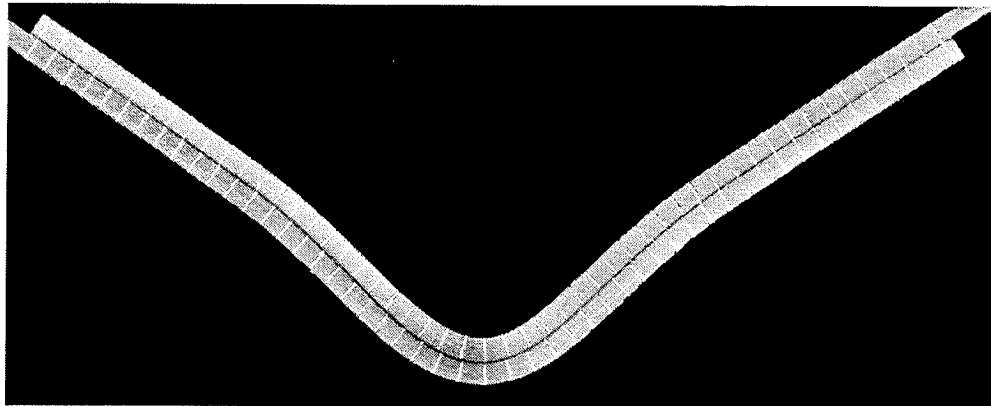
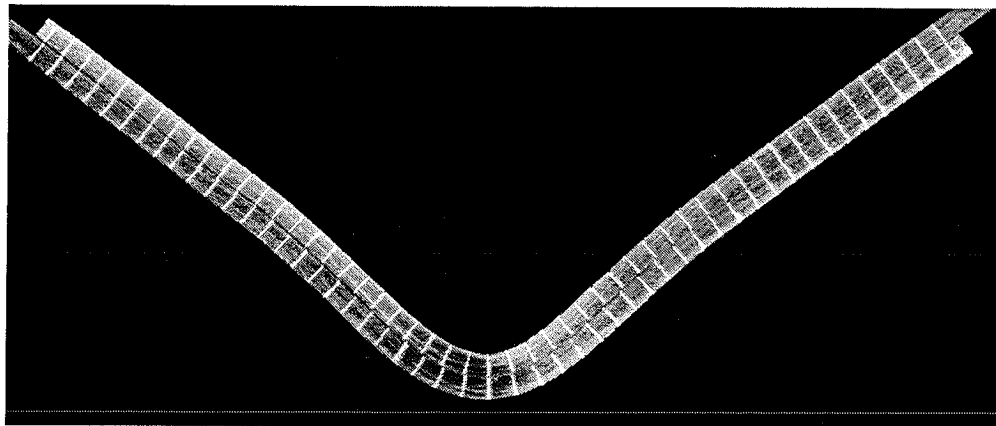


図 5.7 加工速度の違いによるV曲げ後の接着層のせん断ひずみの実験結果と解析結果の比較



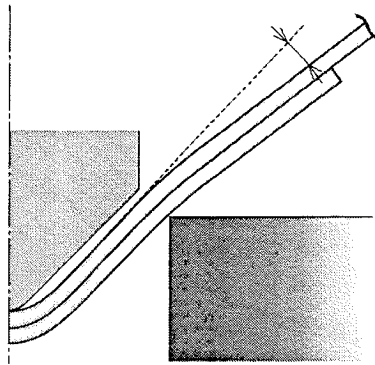
(a) $V=1\text{mm/min}$



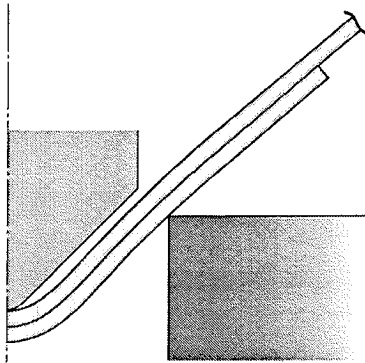
(b) $V=20\text{mm/min}$

図 5.8 加工速度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較 (実験結果)

加工速度の違いが接着板の曲げ加工に及ぼす影響については、これまでの研究⁴⁾で議論されたところであり、接着板の曲げ加工には加工速度が速いほうが好ましいとの結論が示されているが、加工時の温度は室温で行われたものであった。図 5.7 に温度が 40°C の場合の加工速度の違いによるV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。また、図 5.8、図 5.9 に図 5.7 に対応するところのV曲げ後のカモメ折れの比較を示す。図 5.8 が実験結果であり、図 5.9 が解析結果である。それぞれパンチ速度 V が、(a) 1mm/min 、(b) 20mm/min の場合である。なお、 $V=500\text{mm/min}$ の場合については、図 5.4 (c)と図 5.5 (c)を参照されたい。また、図 5.10 に図 5.8 と図 5.9 に示したV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較を示す。これらの結果から明らかなように、温度が高く加工速度が遅い場合には、予想通り接着層のせん断ひずみは非常に大きくなり、それに伴い接着板にも大きなカモメ折れが生じている。



(a) $V=1\text{mm/min}$



(b) $V=20\text{mm/min}$

図 5.9 加工速度の違いによるV曲げ後のカモメ折れの比較（解析結果）

なお、図 5.7 において $V=1, 20\text{mm/min}$ の場合は、図 2.13 に示した単純重ね合わせ継手における限界せん断ひずみを越えている部分があるが、外観からは接着層にはく離は見られなかった。これは、単純重ね合わせ継手では接合端部に応力集中が生じそこを起点としてはく離が生じるのに対して、V曲げ試験においてはこうした応力集中が生じないためと思われる。しかし、これまでの研究³⁾でも述べられているように、外観にはく離が認められないが接着強度はかなり低下しているものと思われる。塑性加工時には図 2.13 に示す限界せん断ひずみデータを参考に、加工時の接着層のひずみがそれ以下になるように加工条件を設定することが推奨される。

温度の影響について調べた図 5.3～図 5.6 の結果、さらには高温下での加工速度の影響について調べた図 5.7～図 5.10 の結果、そのいずれにおいても実験結果と解析結果とはおおよそ一致しており、接着剤の温度・速度依存型構成式を用いた本解析の妥当

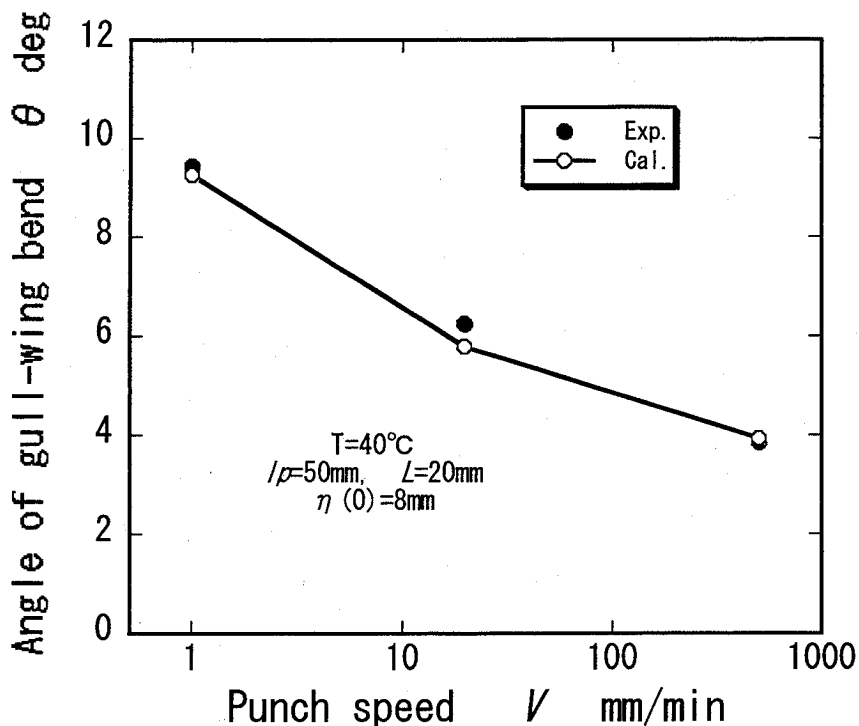


図 5.10 加工速度の違いによるV曲げ後のカモメ折れ角度の実験結果と解析結果の比較

性が明らかになった。なお、図 5.4 と図 5.5、図 5.8 と図 5.9 において、厳密にはV曲げ後の曲げ角度について、実験結果の方が解析結果に比べて少し大きくなっている(計算結果ではダイス間の曲げ角度がほぼ 90° なのに対し、実験結果ではそれ以上になっている)。これは、実験結果がV曲げ後に除荷した後の形状(スプリングバック後)であるのに対して、解析結果がV曲げ終了時の除荷前の形状(スプリングバック前)であることによる。また、図 5.3 と図 5.7 の実験結果と解析結果において、せん断ひずみのピーク以降に両者に差が生じている。このことについては現時点でその理由が明確ではないので、今後さらに細かく検討する必要がある。

これまでの一連の研究において、カモメ折れを抑えるためには、接着ラップ長さに対してダイス肩幅をできるだけ大きくすること⁴⁾と、加工速度を速くすることが有効であるということ⁷⁾が報告されているが、これらのことと加工現場の雰囲気温度は低い方がよいという本研究成果を併用することにより、接着板のV曲げ時に生じるカモメ折れをさらに小さく抑えることができるものと考えられる。

5-5 結言

本章では、温度・速度依存性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式を用いて、接着接合板の加工に及ぼす温度と速度の影響について検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) 接着板のV曲げの変形解析を、第3章で提案した接着剤の温度・速度依存型構成式を用いて行った。解析結果と実験結果はおおよそ一致し、提案した接着剤の構成式の妥当性が明らかになった。

(2) 加工現場の雰囲気温度を低くすることにより、接着層に生じるせん断ひずみ(ずれ変形)と、接着板に生じるフランジ折れ曲がり(カモメ折れ)を小さく抑えることができる。これは接着剤の強度特性に起因するものであり、低温で加工することにより接着剤の強度が増し、せん断変形抵抗が大きくなるため接着剤のせん断変形が生じにくくなるためである。

(3) 接着板の曲げ加工に関する本研究成果とこれまでの研究を通して、接着板の曲げ加工は低温かつ高速で行うことが望ましいということが明らかになった。

第6章 結 論

今日市販されている構造用接着剤の中には非常に高い延性を有し、しかもはく離強度や衝撃強度に優れているものがあり、構造組立物の接着接合に広く用いられるようになっていく。本研究では、こうした特性を有するアクリル系接着剤に注目し、組合せ応力下における接着強度について検討したものである。とりわけ、接着強度の温度依存性と速度依存性に注目した。

本研究では、第一に接着剤のせん断強度特性を、単純重ね合わせ継手を用い温度と引張りせん断ひずみ速度を変えて調べた。そして、得られた結果をもとに接着剤のせん断強度に関する温度・速度依存型の弾粘塑性構成式を提案した。第二に組合せ応力下での接着剤の強度特性を、円筒突き合せ接手を引張り応力とねじりによるせん断応力を作用させ、温度とせん断ひずみ速度を変えて調べた。そして、得られた結果をもとに、接着強度に関する組合せ応力下の温度・速度依存型の弾粘塑性構成式を提案した。第三に得られた温度・速度依存性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式の有効性を確認するために、接着接合板の塑性加工に及ぼす温度と速度の影響について検討した。本論文は全6章から構成されており、その内容を各章ごとに要約すると次のようになる。

第1章では、まず接着接合の工業界における位置づけを示し、その利点および問題点について述べた。次に、「アクリル系構造用接着剤」という、高延性接着剤の強度特性を調べるに至った経緯を述べた。そしてさらに、本接着剤の強度特性に関連する従来の研究を展望し、その問題点を提示している。とりわけ、高延性接着剤の接着強度に関する温度と速度依存性に関する把握が不十分であること、さらにはこうした特性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式が、高延性接着剤が使用される接着継手を含んだあらゆる構造物の応力解析・変形解析に不可欠であることを指摘した。そして、最後に本研究の目的と位置づけを明らかにするとともに研究の概要について述べている。

第2章では、アクリル系高延性接着剤を用いた接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす温度・速度依存性について調べた。さらに、組合せ応力下における接着継手の接着層のせん断強度に及ぼす垂直応力の影響と温度・速度依存性について調べた。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) せん断強度の温度・速度依存性は、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど、せん断強度は一定値に収束し高くなる反面、限界せん断ひずみは小さくなる。また、温度が低くせん断ひずみ速度が大きいほど、わずかに硬化率が大きくなる。
- (2) 組合せ応力下においてせん断応力は、本研究で行った全ての温度・せん断ひずみ速度において引張り応力が増加すると減少し、その引張り応力の影響は、せん断ひずみ速度が小さい場合ほど大きくなる。また、限界せん断ひずみは、引張り応力に強く影響され引張り応力の増加により減少する。そして、その影響はせん断ひずみ速度が小さいほど顕著となる。

第3章では、第2章での引張りせん断試験の結果をもとに、本接着剤のせん断強度についての構成式の定式化を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 温度・速度依存性を考慮した、せん断強度に関する接着剤の弾粘塑性構成式を提案した。

(2) 提案した構成式を用いた引張りせん断試験についての数値シミュレーション結果は実験結果とおおよそ一致しており、得られた粘塑性構成式が妥当であることが確認できた。

第4章では、第2章での引張りとねじりによる組み合わせ負荷による試験結果をもとに、本接着剤の温度・速度依存性を考慮した多軸粘塑性構成式の定式化を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 温度・速度依存性を考慮した、多軸粘塑性構成式を提案した。

(2) 提案した構成式を用いた引張りせん断試験についての数値シミュレーション結果は実験結果とおおよそ一致しており、得られた構成式が妥当であることが確認できた。

第5章では、温度・速度依存性を考慮した接着剤の弾粘塑性構成式を用いて、接着接合板の加工に及ぼす温度と速度の影響について検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) 接着板のV曲げの変形解析を、第3章で提案した接着剤の温度・速度依存型構成式を用いて行った。解析結果と実験結果はよく一致し、提案した接着剤の構成式の妥当性が明らかになった。

(2) 加工現場の雰囲気温度を低くすることにより、接着層に生じるせん断ひずみ(ずれ変形)と、接着板に生じるフランジ折れ曲がり(カモメ折れ)を小さく抑えることができる。これは接着剤の強度特性に起因するものであり、低温で加工することにより接着剤の強度が増し、せん断変形抵抗が大きくなるため接着剤のせん断変形が生じにくくなるためである。

(3) 接着板の曲げ加工に関する本研究結果とこれまでの研究を通して、接着板の曲げ加工は低温かつ高速で行うことが望ましいということが明らかになった。

第6章では、本研究で得られた結果を各章ごとに総括した。

本研究では、「アクリル系構造用接着剤のせん断強度に関する温度・速度依存型の弾粘塑性構成式の提案」を行った。そして、得られた構成式を「金属接着板の塑性曲げ加工」という新しい技術の解析に用いた。その結果、今回提案した構成式の妥当性を明らかにすることができた。

そしてさらに、「同接着剤の多軸応力状態下の温度・速度依存型弾粘塑性構成式の提

案」も行った。

これらの成果は、今後、アクリル系の構造用接着剤を用いた様々な接着継手の解析に用いられるであろう。また、得られた構成式を用いることにより接着接合の強度についての信頼性が高くなり、こうした延性の大きなアクリル系の構造用接着剤の用途がさらに広がってくるものと思われる。こうしたことも含めて、本研究成果が産業界へ大きく貢献できることを期待したい。

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-, (1997), シーエムシー.
- 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-, (1997), シーエムシー.
- 3) 瀧口三千弘, 吉田総仁: 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, 日本機械学会論文集 (A編), 67-655 (2001), pp.580-587.
- 4) M. Takiguchi and F. Yoshida: Plastic bending of adhesive-bonded sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 113/1-3 (2001), pp.743-748.
- 5) 瀧口三千弘, 和泉淳, 吉田総仁: 接着継手のせん断強度の速度依存性と応力緩和挙動, 日本機械学会論文集 (A編), 68-665(2002), pp.126-131.
- 6) M. Takiguchi, S. Izumi and F. Yoshida: Rate-dependent shear deformation of ductile acrylic adhesive and its constitutive modelling
Journal of Mechanical Engineering Science, 218 Part C(2004), pp.623-629.
- 7) 瀧口三千弘, 吉田総仁: 接着接合した金属薄板の塑性加工に及ぼす加工速度の影響, 日本機械学会論文集 (A編), 68-672(2002), pp.1236-1242.
- 8) 瀧口三千弘, 吉田総仁: 金属接着板の塑性曲げ加工, 日本接着学会誌, 41-6(2005), pp.242-249.
- 9) 日本機械学会 RC99 接着接合技術応用研究分科会編: 研究成果報告書(2)接着強度の文献集とデータベース, (1993).
- 10) 日本機械学会接着接合研究会編: 構造接着文献抄録集 1990年~1996年, (1998).
- 11) 池上皓三: 接着継手—最近の研究の趨勢, 日本接着学会誌, 40-11 (2004), pp.526-529.
- 12) 木原幸一郎, 渡辺剛, 杉林俊雄, 安西哲也, 山辺秀敏: 十字接着継手を用いたせん断強度の評価方法, 日本接着学会誌, 36-10 (2000), pp.397-402.
- 13) 木原幸一郎, 杉山竜之, 杉林俊雄: 矩形接着面を有する十字形接着継手による接着剤のせん断強度評価方法, 日本接着学会誌, 38-9 (2002), pp.321-328.
- 14) 根本尚生, 田口広一, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄: アルミニウム合金製の被着体を用いたアクリル系接着剤の低温化における衝撃強度評価, 軽金属, 55-10 (2005), pp.473-478.
- 15) 田口広一, 根本尚生, 木原幸一郎, 磯野宏秋, 杉林俊雄: アルミニウム合金製の被着体を用いたアクリル系接着強度の温度および負荷速度依存性の評価, 軽金属, 57-1 (2007), pp.6-11.
- 16) 今中誠, 原賀康介, 西川哲也, 山辺秀敏: 接着およびリベット/接着併用継手の強度分布, 材料, 41-470 (1992), pp.1662-1667.
- 17) 今中誠, 原賀康介, 西川哲也: 接着・リベット併用継ぎ手の引張り並びに疲労強度に及ぼす被着体鋼板強度の影響, 日本機械学会論文集 (A編), 58-546(1992), pp.237-241.

- 18) M. Imanaka, K. Haraga and T. Nishikawa: Fatigue strength of adhesive/rivet combined lap joints, *Journal of Adhesion*, 49-3 (1995), pp.197-209.
- 19) K. Haruna, H. Hamada and Z. Maekawa: Strength prediction of adhesively bonded carbon/epoxy joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10-10 (1996), pp.1089-1104.
- 20) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三: スカーフ接着継手の強度評価 (第1報、被着体が同種金属材料の場合, 日本機械学会論文集(A編), 53-487(1987), pp.499-505.
- 21) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三: スカーフ接着継手の強度評価 (第2報、被着体が異種金属材料の場合, 日本機械学会論文集(A編), 53-487(1987), pp.506-513.
- 22) 竹下達郎, 松雄圭造, 杉林俊雄, 池上皓三: GFRP と金属材料の接着スカーフ継手における引張強度, *材料*, 37-420(1988), pp.1057-1063.
- 23) 樋口泉, 沢俊行, 志村穰: 衝撃引張り荷重を受けるスカーフ接着継手の三次元有限要素応力解析, *日本接着学会誌*, 35-12(1999), pp.562-569.
- 24) 樋口泉, 沢俊行, 志村穰: 衝撃曲げモーメントを受けるスカーフ接着継手の三次元有限要素応力解析, *日本接着学会誌*, 36-6(2001), pp.209-216.
- 25) 藤並明德, 今中誠, 鈴木靖昭: 3軸応力下における接着層の降伏および破壊挙動, *材料*, 48-5 (1999), pp.512-519.
- 26) 今中誠: 接着層の多軸応力状態と強度特性, *接着*, 45-5 (2001), pp.213-218.
- 27) 今中誠, 原賀康介, 西川哲也: 2軸荷重下におけるエポキシ接着層の応力-ひずみ特性の測定, 日本機械学会論文集 (A編), 67-654(2001), pp.335-341.
- 28) 誉田登: 混合モード下における薄板接着継手強度評価法の開発, 日本機械学会論文集 (A編), 61-584(1995), pp.823-828.
- 29) E. Sancaktar: Fracture aspects of adhesive joints: material, fatigue, interphase, and stress concentration considerations, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 9-2 (1995), pp.119-147.
- 30) E.D. Reedy, Jr and T.R. Guess : Butt joint strength: effect of residual stress and relaxation, *Journal of Adhesion Science Technology*, 10-1 (1996), pp.33-45.
- 31) G.K. Hu, F. Schmit, D. Baptiste and D. Francois : *Journal of Applied Mechanics*, 63 (1996), pp.21-26.
- 32) 藤並明德, 逢坂勝彦, 和田隆郎, 福田武人, 今中誠: 機講論, 00-36 (2000), pp.203-204.
- 33) P.D. Chalkley and W.K. Chiu: An improved method for testing the shear stress/strain behaviour of adhesive, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13-4 (1993), pp.237-242.
- 34) A.D. Crocombe: Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 15-1 (1995), pp.21-27.
- 35) M. Kleiner and V. Hellinger : *Annals of the CIRP*, 48-1(1999), pp.217-220.

- 36) 西本昭彦, 由田征史 : 樹脂複合鋼板のせん断密着特性とプレス加工性, *NKK 技報*, 127 (1989), pp.14-19.
- 37) 由田征史 : 樹脂複合鋼板のプレス成形性, 塑性と加工, 32-360 (1991), pp.41-47.
- 38) 伊藤耿一, 高津宣夫, 寺田正徳 : 樹脂複合型制振鋼板のコア樹脂のせん断変形特性同定のためのリングねじり試験, 塑性と加工, 31-352 (1990), pp.618-624.
- 39) 伊藤耿一, 佐川武俊, 寺田正徳 : 制振鋼板のコア樹脂のせん断変形特性の同定—樹脂複合型制振鋼板の成形性-1-, 塑性と加工, 34-386 (1993), pp.259-264.
- 40) 牧野内昭武, 北條英典 : 塑性構成式-9-プラスチックおよびプラスチック系複合材料の構成式, 塑性と加工, 29-333 (1988), pp.997-1003.
- 41) 大上哲郎, 橋本浩二, 江嶋瑞男, 滝田道夫 : 樹脂複合鋼板の角筒深絞り成形性に及ぼす温度の影響(薄鋼板の低温成形法の検討-1-), 塑性と加工, 31-352 (1990), pp.639-644.
- 42) 富田佳宏 : 非晶性ポリマの分子鎖網目理論による構成式とその応用, *日本機械学会論文集 (A 編)*, 66-643(2000), pp.420-427.
- 43) T. Yoshida, T. Oishi, M. Takiguchi and F. Yoshida : Viscoplastic Behavior of Acrylic Adhesive in Butt-Joint at Various Temperatures under Complex Loading : Experimentation and Modelling, *Key Engineering Materials*, 340-341(2007), pp.1485-1490.
- 44) 吉田哲哉, 瀧口三千弘, 吉田総仁 : 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, *日本機械学会論文集 A 編*, 73-726 (2007), pp.292-299.
- 45) T. Yoshida, M. Takiguchi and F. Yoshida : Strength of Highly Ductile Acrylic Adhesive in Butt-Joint under Combined Tension and Torsion, *Key Engineering Materials*, 274-276(2004), pp.993-998.
- 46) F.Yoshida, M.Urake and V.V.Toropov : Identification of material parameters in constitutive model for sheet metals from cyclic pending tests, *Int.J.mechanical Sciences*, 40-2 (1998),pp.237-249
- 47) 由田征史 : 樹脂複合鋼板のプレス加工, 塑性と加工, 26-291 (1985), pp.394-399.
- 48) Naka, T. and Yoshida, F., Tensile Behavior of Al-Mg Alloy Sheet at Wide Range of Strain Rate at Various Temperature, *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Symposium on Advances in Engineering Plasticity and Its Applications*, (1996), pp.413-418.
- 49) 例えば, 日本塑性加工学界編, 曲げ加工 (塑性加工技術シリーズ 14), コロナ社, (1995), pp.46.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬ懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻・知能化生産工学講座・弾塑性工学研究室の吉田総仁教授に深甚の謝意を表します。

本論文作成に際して、数々の重要なご指摘やご教授を頂いた広島大学大学院工学研究科澤俊行教授，佐伯正美教授並びに日野隆太郎准教授，多大なご協力を頂いた近畿大学工学部上森武講師並びに広島大学大学院工学研究科濱崎洋助教に厚くお礼申し上げます。

また，こうした研究の機会を与えてくださり，いつも温かく励まして頂いた広島商船高等専門学校名誉教授の富島俊彦教授と，同じく広島商船高等専門学校の瀧口三千弘教授に心から感謝の意を表します。

さらに，試験片および実験装置の製作を行って頂いた広島商船高等専門学校学生課実験実習係の森下義博氏，解析や実験等に関して数々の有益なご助言やご協力をして頂いた弓削商船高等専門学校の中哲夫先生，広島商船高等専門学校の舟木弥夫先生に深く感謝申し上げます。

なお，本研究を遂行するにあたって広島商船高等専門学校の教職員の皆様には，多大なご協力とご援助を頂きました。喪心より厚くお礼申し上げます。

最後に，本研究の遂行に多くのご協力を頂いた野尻裕士氏，大石隆之氏，水谷憲彰氏をはじめ広島大学工学部第一類弾塑性工学研究室の学生諸氏，さらには広島商船高等専門学校の私の卒業研究生であった有原智裕氏，児島剛志氏，寺内智氏，藤本準氏，大石健二氏，古賀直也氏，貞森健一氏，為重裕也氏，彦坂厚史氏，向谷恵介氏，池田孝則氏，大下貴玄氏，寺田克浩氏，佐々木亮氏，桧山裕佑氏，行友隆裕氏，綾目光貴氏，久保田大輝氏，田中雅彦氏，面谷考一朗氏，住井直人氏，田中康平氏，藤見将太氏，榎川洋貴氏，三島基氏に心から感謝致します。

本研究に関する公表論文

- (1) T. Yoshida, M. Takiguchi and F. Yoshida : Strength of Highly Ductile Acrylic Adhesive in Butt-Joint under Combined Tension and Torsion, *Key Engineering Materials*, 274-276(2004), pp.993-998. 【第2, 4章】
- (2) T. Yoshida, T. Oishi, M. Takiguchi and F. Yoshida : Viscoplastic Behavior of Acrylic Adhesive in Butt-Joint at Various Temperatures under Complex Loading : Experimentation and Modelling, *Key Engineering Materials*, 340-341(2007), pp.1485-1490. 【第2, 3, 4章】
- (3) 吉田哲哉, 瀧口三千弘, 吉田総仁 : 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, 日本機械学会論文集 A 編, 73-726 (2007), pp.292-299. 【第2, 3, 5章】