

アクリル系高延性接着剤を用いた単純重ね合わせ継手の 疲労試験における接着層せん断ひずみ進展挙動のモデル化

瀧口 三千弘^{*1}, 吉田 哲哉^{*2}, 上森 武^{*3}, 徳田 太郎^{*4}, 片平 卓志^{*5}, 吉田 総仁^{*6}

Modelling of Progressive Shear Strain Accumulation in Adhesive Layer under Cyclic Loading of Single-lap Joint using Highly Ductile Acrylic Adhesive

Michihiro TAKIGUCHI, Tetsuya YOSHIDA, Takeshi UEMORI,
Taro TOKUDA, Takashi KATAHIRA and Fusahito YOSHIDA

In this paper, the adhesive fatigue strength was investigated by performing repeated tensile lap shear experiments using single-lap joint bonded with highly ductile acrylic adhesive. From experimental observation in load-controlled cyclic tests, we can see three stages of strain accumulation: the primary stage where first the ratcheting progresses rapidly; the secondary stage where the rate is kept almost constant; and the tertiary stage where the rate increases rapidly with cycles, and it leads to final fracture of joint. This mode of fatigue fracture is completely different from the mode of fatigue crack propagation which is found in epoxy-type adhesive joints. In order to discuss the behaviour, the numerical simulation of shear strain accumulation of adhesive under cyclic loading considering damage of adhesive layer was conducted using our original elasto-viscoplastic damage model for the adhesive. From the simulation results, it was found that the behaviour of the experimental results from the primary stage to the tertiary stage can be expressed.

KEYWORDS : adhesive fatigue strength, highly ductile acrylic adhesive, single-lap joint,
temperature and rate-dependent shear strength, progressive shear strain accumulation

1. まえがき

著者らは接着接合板の塑性加工という技術の提案
を行い、その可能性や実現に向けた問題点を解明す

べく研究を進めてきた^{1~12)}。これまでの研究におい
て、本研究で使用しているアクリル系接着剤のせん
断強度特性に、非常に強い温度・速度依存性がある
ことが明らかになっている^{2,5)}。

*1 商船学科名誉教授

*2 電子制御工学科

*3 岡山大学大学院 自然科学研究科 産業創成工学専攻

*4 香川高等専門学校 機械工学科

*5 商船学科

*6 株式会社CEM 研究所

本報告においては、本接着剤のこうした特性に注目して、本接着剤を用いた接着継手（単純重ね合わせ継手使用）の疲労試験時の接着層のせん断ひずみの進展挙動について検討した。とりわけ、ひずみの進展挙動をシミュレーションするためのモデル化を試みた。なお、この疲労破壊挙動は、エポキシ系タイプの接着継手で見られる疲労き裂によるもの^{13~18)}とは全く異なる。これまでのアクリル系接着剤を用いた接着継手の疲労強度に関する研究は、木原らによる円筒突合せ継手を用いた繰返し衝撃負荷に対する引張強度測定¹⁹⁾が行われているくらいで、接着剤の温度・速度依存性を考慮した研究報告は極めて少ない。

2. 実験

2. 1 供試材及び試験方法

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（デンカ（株）製）を用いた。本接着剤には非常に強い温度・速度依存性があることがわかっている²⁵⁾。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1に、疲労試験に用いた試験片形状と寸法を示す。本試験片は、引張りせん断によって誘起される被着体の曲げ変形をより小さく抑えるために厚さ2.6mmの鋼板（SS400使用）を裏打ちしたものである。接着層の厚さは0.1mmとした。

図2に、疲労試験の概略図を示す。試験荷重の測定はロードセルを用い、接着層のせん断ひずみの進展挙動は、図3に示すように渦電流式変位センサを用いて測定した。疲労試験は応力比0.1の引張り片振りで行い、繰返し負荷に対する速度の違いによる影響を調べるために、0.22Hz、0.67Hz、2.0Hz及び6.0Hzの繰返し速度で行った。なお、本実験は冬場に室温で行われたものであり、温度のコントロールが十分でなかったことを付記しておく。

2. 2 実験結果と考察

図4に、疲労試験の結果を示す。本結果から、繰返し数が104回以下の低サイクル域では、0.22Hzと0.67Hzの疲労強度は2.0Hzと6.0Hzの疲労強度より明らかに低いことがわかる。これは、接着剤の速度

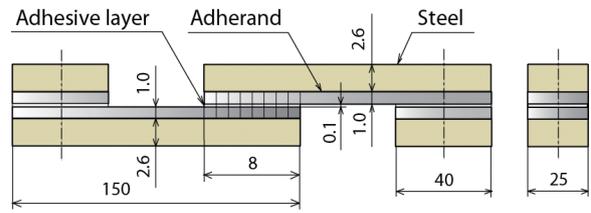


図1 試験片形状と寸法

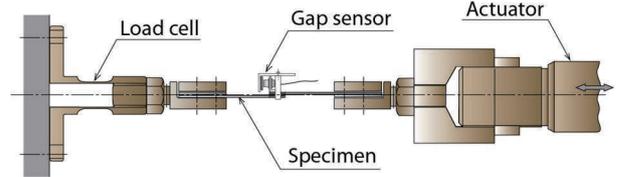


図2 疲労試験の概略図

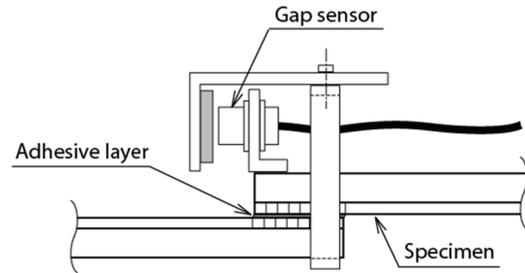


図3 渦電流式変位センサを用いた接着層のせん断ひずみ進展挙動の測定方法

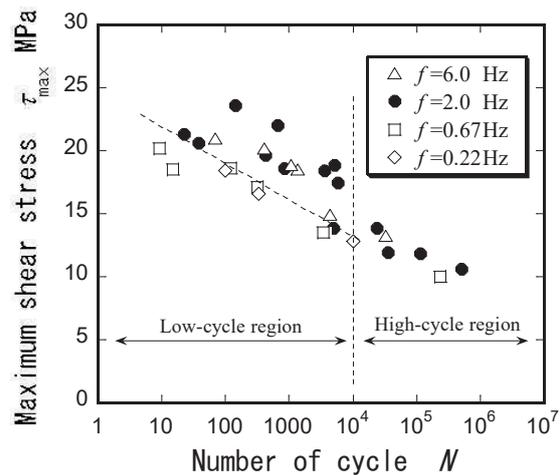


図4 疲労試験の結果

依存性による影響である。なお、0.22Hzと0.67Hzの疲労強度に差がないのは、両者は繰返し速度は異なるが、いずれもせん断速度が遅いためせん断ひずみが大きくなり、疲労試験中の接着剤のひずみ速度に

大きな違いが生じないためと思われる。また、2.0Hzと6.0Hzの疲労強度にもほとんど差がないことが確認できる。これは、接着剤の強度特性²⁵⁾において引張り速度が速くなるとせん断強度が一定値に収束するが、繰返し速度が2.0Hz以上になるとせん断ひずみ速度がほぼ収束値になっているためと思われる。一方、繰返し数が104回より大きな高サイクル域では、繰返し速度の影響はほとんどみられない。このことは次のように考えられる。接着剤の速度依存性は加えられた応力が平衡応力²⁾を越えた時に現れる。本疲労試験においては、高サイクル域での最大応力が平衡応力とほぼ同じレベルであった。その結果、高サイクル域における疲労強度は繰返し速度の影響を受けなかったものと思われる。最後に、本実験結果のばらつきには、本実験が十分な温度コントロールを行わずに行われたことによる影響も関係しているものと思われる。

図5に、疲労試験時の接着層のせん断ひずみの進展挙動の一例 ($\tau_{max}=17\text{MPa}$, $f=0.67\text{Hz}$) を示す。本結果から明らかなように本アクリル系接着剤の疲労破壊挙動は、エポキシ系タイプの疲労き裂によるものとは異なり、ひずみの累積によるものであることがわかる。

図6に、いくつかの実験条件下におけるひずみの進展挙動を示す。本結果より本接着継手のひずみの進展挙動は、いずれの場合も次に示す3段階の挙動を示すことがわかる。

- 第1段階：実験開始後に、ひずみは急激に大きくなる。
- 第2段階：繰返し数に伴い、ひずみの進展は遅くなる。
- 第3段階：破断直前には、ひずみの進行が急激に進む。これは、繰返し負荷による接着層内部の損傷によるものと思われる。

また、本結果より本接着剤のひずみの進展挙動は、繰返し最大応力や繰返し速度に大きく依存していることもわかる。

3. ひずみ進展挙動のシミュレーション (接着層内部の損傷考慮無し)

3.1 接着剤の温度・速度依存型弾粘塑性構成式

本接着剤の弾粘塑性構成式の定式化が、著者ら²⁵⁾により次のように行われている。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。

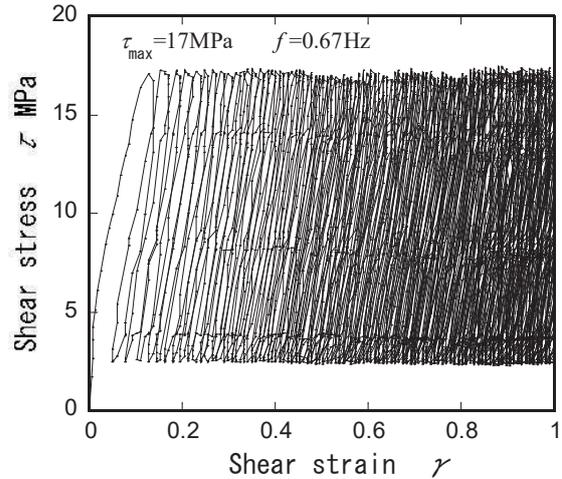


図5 疲労試験時の接着層のせん断ひずみの進展挙動の一例 ($\tau_{max}=17\text{MPa}$, $f=0.67\text{Hz}$)

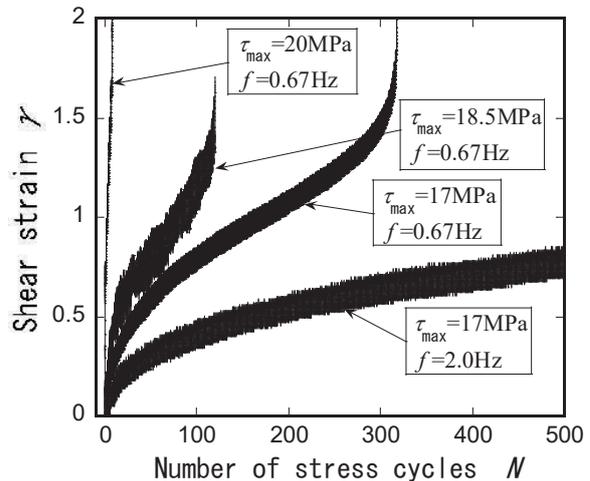


図6 いくつかの実験条件下におけるひずみの進展挙動

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。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_p \quad (1)$$

弾性ひずみ速度は Hooke の法則を仮定し、次式のように表す。

$$\dot{\gamma}_e = \frac{\dot{\tau}}{G\phi(T)} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\tau}$ はせん断応力速度、 G は横弾性係数である。また、 $\phi(T)$ は温度の関数であり、後述する。

粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ については、次式のように表した。

$$\dot{\gamma}_p = \left[-\frac{1}{b} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau - \tau_c}{D(1 + k\gamma_p^a)\phi(T)} \right\} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad \tau_c = C\gamma_p^n\phi(T) \quad (3)$$

ここで、 C, n, D, k, a, b 及び m は材料定数である。式(1)を数値積分することにより、接着層のひずみ進展挙動のシミュレーションを行う。なお、 $\phi(T)$ はせん断強度の温度依存性を表す係数であり、次式で与える。

$$\phi(T) = A - B(T/T_0), \quad (A = 1.12, B = 0.12, T_0 = 12^\circ\text{C}) \quad (4)$$

式中 T は温度($^\circ\text{C}$)であり、 12°C において $\phi(T) = 1$ となる。

なお、上述の弾粘塑性構成式には、繰返し負荷による接着層内部の損傷はとくに考慮されていない。

3. 2 シミュレーション結果と考察

図7に、図5の実験結果に対応したシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果は実験結果を比較的よく表せている。

図8に、図6の実験結果に対応したシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果は実験結果の第1段階及び第2段階のひずみの進展挙動については定性的にはよく表せている。しかし、第3段階の破断の直前にひずみの進行が急激に進むという挙動は全く表せていない。これは、前節に示した著者らの提案した弾粘塑性構成式に、繰返し負荷による接着層内部の損傷が考慮されていないことによるものである。

なお、以上のシミュレーションは温度 12°C で行ったものである。

4. ひずみ進展挙動のシミュレーション (接着層内部の損傷考慮)

4. 1 損傷モデル

前章の結果を受けて、本章では接着層内部の損傷モデルを検討する。本研究では、基本的な枠組みとしては前章に示した著者らの提案した弾粘塑性構成式を用い、繰返し負荷によるひずみの進行によって接着強度の基本となる平衡応力が徐々に小さくなるというモデルを検討してみる。具体的には、いくつかの仮定を含めて次のように考える。

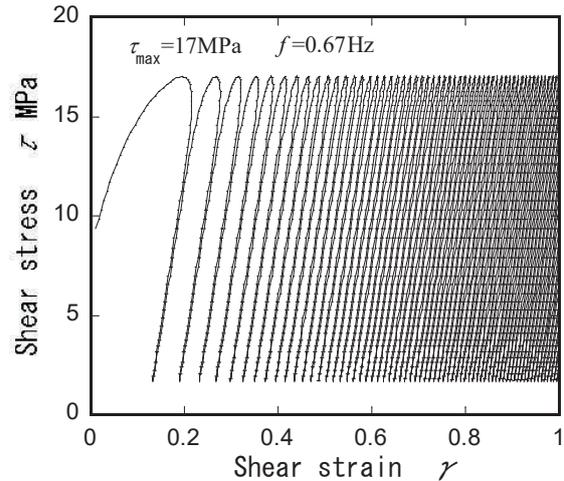


図7 図5の実験結果に対応したシミュレーション結果

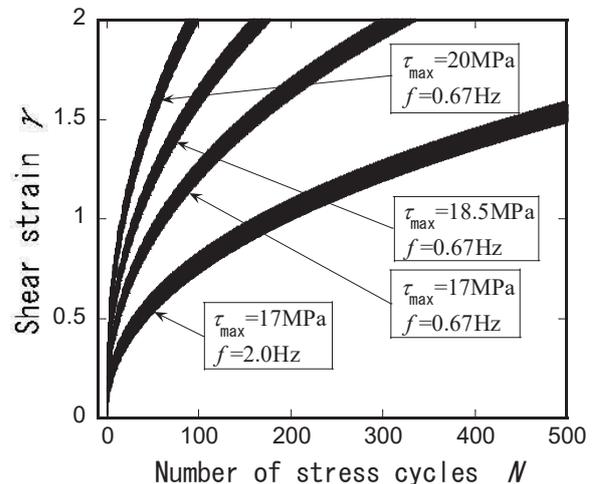


図8 図6の実験結果に対応したシミュレーション結果 (接着層内部の損傷考慮無し)

- ① せん断ひずみ γ_p が大きくなるほど、接着層内部の損傷が大きくなるものとする。
- ② せん断ひずみが $\gamma_p = 0.9$ になると急激にひずみが進行し、せん断ひずみが $\gamma_p = 1.5$ で破断するものとする。
- ③ 繰返し数 N の増加にともなって損傷が大きくなるものとする。

以上の考え方のもとに、式(3)における粘塑性ひずみ速度 $\dot{\gamma}_p$ の式の中に、損傷項を次式のように加える。

$$\dot{\gamma}_p = \left[-\frac{1}{b} \ln \left\{ 1 - \frac{\tau - (\tau_c - \text{Damage})}{D(1 + k\gamma_p^a)\phi(T)} \right\} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

ここで、式中の Damage が損傷を考慮する項であり、

次式のように仮定する。

$$Damage = f(\gamma_p)f(N) \quad (6)$$

式(6)中 $f(\gamma_p)$ はダメージの基本量を決める項であり、①と②の考え方をもとに次式のように仮定する。

$$f(\gamma_p) = \tau_c \times 0.085e^{-4(1-\gamma_p^{1.09})} \quad (7)$$

本式を用いたダメージ基本量を図9に示す。 γ_p の増加にともなってダメージ量が増加していく様子がわかる。

式(6)中の $f(N)$ はダメージに与える繰り返し回数の影響を考慮する項であり、③の考え方をもとに次式のように仮定する。ダメージ係数と呼ぶことにする。

$$f(N) = 1 - e^{-N/10} \quad (8)$$

本シミュレーションにおいては、 $N=100$ 回でダメージ係数がほぼ1になるものとした。

なお、次節に示すシミュレーションにおいては、破壊のクライテリオンとして、せん断ひずみ $\gamma_p=1.5$ で破断するものとした。

4. 2 シミュレーション結果と考察

図10に、損傷モデルを用いた図6に対応したシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果は定量的には実験結果をよく表せたとは言えないが、定性的には実験結果の第1段階から第3段階の破断に至るまでの挙動をよく表せている。

図11に、図4に対応した疲労強度についてのシミュレーション結果を示す。本結果も定性的には実験結果をよく表せている。なお、以上のシミュレーションも前章と同様に温度 12°C で行ったものである。以上のシミュレーション結果は接着剤の速度依存性に注目して行ったものであるが、次に温度依存性による影響に注目してみる。図12に、ひずみの進展挙動に及ぼす温度の影響についてのシミュレーション結果 ($\tau_{\max}=17\text{MPa}$, $f=2.0\text{Hz}$ の場合) を示す。本結果から疲労強度が温度の影響を強く受けることがよくわかる。図6に示した実験結果 ($T=\text{室温}$: 冬場) と、図10のシミュレーション結果 ($T=12^\circ\text{C}$) が定量的にあっていない原因の一つはこの温度による影響が考えられる。図6の実験結果と、図10のシミュレーション結果から推測すると、実験時の室温は 0°C 以下であったことも十分考えられる。

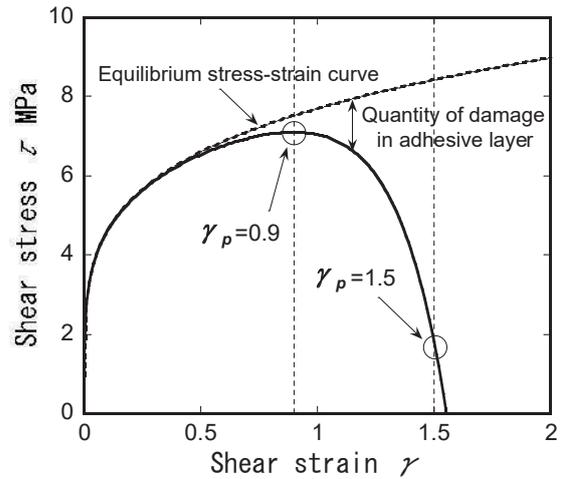


図9 ダメージ基本量

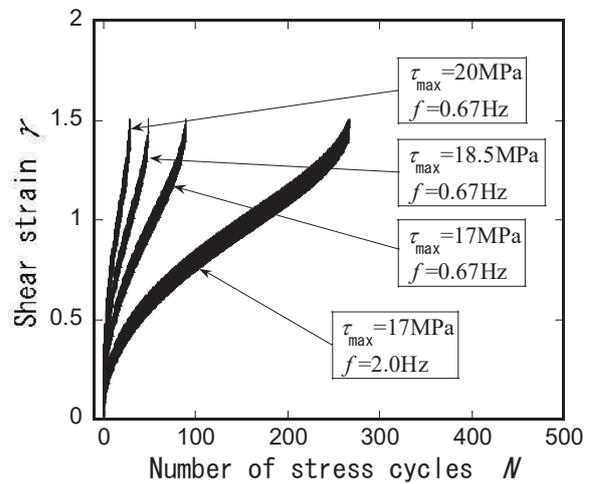


図10 損傷モデルを用いた図6に対応したシミュレーション結果

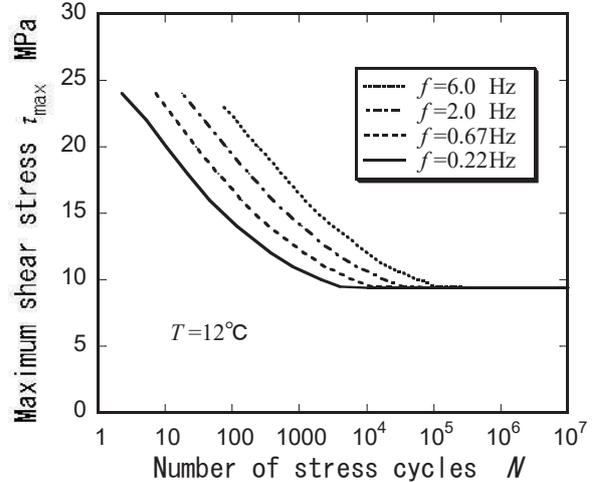


図11 図4に対応した疲労強度についてのシミュレーション結果

図13に、疲労強度に及ぼす温度の違いによる影響 ($f=0.67\text{Hz}$ の場合) を示す。本結果から温度が高くなるほど疲労強度が低下することがわかる。疲労限度も温度が高くなると、平衡応力が小さくなることによって低下している。

以上の結果から、今回提案した損傷モデルを用いることにより、温度と速度の依存性を考慮した繰返し負荷による接着層のひずみの進展挙動を表せることがわかった。今後、全節に示した①～③の仮定などをより力学的に検討することにより、さらに精度の高いシミュレーションが可能になるものと考えられる。

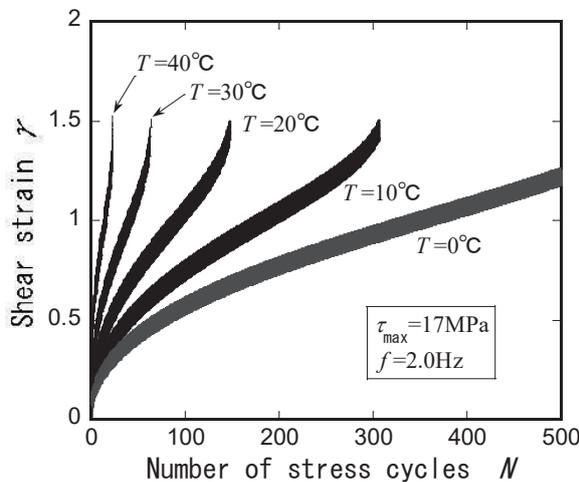


図12 ひずみの進展挙動に及ぼす温度の影響についてのシミュレーション結果 ($\tau_{\max}=17\text{MPa}$, $f=2.0\text{Hz}$ の場合)

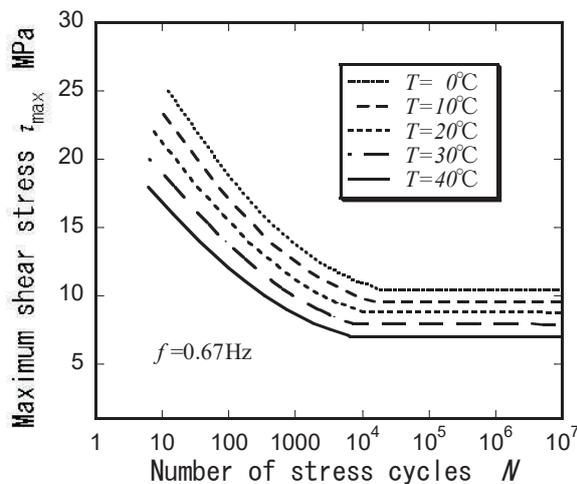


図13 疲労強度に及ぼす温度の違いによる影響 ($f=0.67\text{Hz}$ の場合)

5. あとがき

本研究においては、せん断強度特性に非常に強い温度・速度依存性を有するアクリル系接着剤に注目し、本接着剤を用いた接着継手（単純重ね合わせ継手使用）の疲労試験時の接着層のせん断ひずみの進展挙動について検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 本研究で使用したアクリル系接着剤の疲労破壊挙動は、エポキシ系タイプの疲労き裂によるものとは異なり、ひずみの累積によるものである。
- (2) 本接着継手のひずみの進展挙動は、いずれの場合も次に示す3段階の挙動を示す。

第1段階：実験開始後に、ひずみは急激に大きくなる。

第2段階：繰返し数に伴い、ひずみの進展は遅くなる。

第3段階：破断直前には、ひずみの進行が急激に進む。これは、繰返し負荷による接着層内部の損傷によるものと思われる。

- (3) 本接着剤のひずみの進展挙動は、繰返し最大応力や繰返し速度に大きく依存している。
- (4) 著者らが先に提案した接着剤の温度・速度依存性を考慮した弾粘塑性構成式を用いたシミュレーションは、実験結果の第1段階及び第2段階のひずみの進展挙動については定性的にはよく表せた。しかし、第3段階の破断の直前にひずみの進行が急激に進むという挙動は表せなかった。
- (5) (4)の結果を受けて、新たに接着層内部の損傷モデルを検討した。基本的な枠組みとしては著者らが先に提案した弾粘塑性構成式を用い、繰返し負荷によるひずみの進行によって接着強度の基本となる平衡応力が徐々に小さくなるというモデルを考えた。
- (6) 損傷モデルを考慮したシミュレーション結果は、定量的には実験結果をよく表せたとは言えないが、定性的には実験結果の第1段階から第3段階の破断に至るまでの挙動をよく表せた。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K05742 の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- 1) 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, pp.580-587 (2001)
- 2) 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, pp.126-131 (2002)
- 3) 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加工速度の影響, 日本機械学会論文集 A 編, 68-672, pp.1236-1242 (2002)
- 4) 瀧口三千弘, 吉田総仁:金属接着板の塑性曲げ加工(解説), 日本接着学会誌, 41-6, pp.242-249 (2005)
- 5) 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, pp.292-299 (2007)
- 6) 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, pp.1485-1490 (2007)
- 7) 瀧口三千弘・吉田哲哉・舟木弥夫・吉田総仁: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, 日本接着学会誌, 48-12, pp.430-435 (2012)
- 8) 徳田太郎・吉田哲哉・瀧口三千弘・舟木弥夫, 水谷憲彰・吉田総仁:アクリル系高延性接着剤の繰返し粘塑性挙動とそのモデル化, 日本接着学会誌, 49-12, pp.441-445 (2013)
- 9) 瀧口三千弘・徳田太郎・吉田哲哉・舟木弥夫, 浜崎洋・吉田総仁:異種金属接着板のV曲げ加工に及ぼす速度と温度の影響, 日本接着学会誌, 50-1, pp.4-11 (2014)
- 10) 徳田太郎・吉田哲哉・上森武・瀧口三千弘, 吉田総仁: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, 日本接着学会誌, 51-7, pp.347-354 (2015)
- 11) M. Takiguchi, T. Tokuda, T. Yoshida, T. Uemori and F. Yoshida : Die-bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, Key Engineering Materials, 626, pp.103-108 (2015)
- 12) T. Tokuda, T. Uemori, T. Yoshida, M. Takiguchi and F. Yoshida : Asymmetric-shaped Bending of Adhesively Bonded Sheet Metals, Key Engineering Materials, 725, pp.630-635 (2017)
- 13) J.A. Harris and P.A. Fay : Fatigue life evaluation of structural adhesives for automotive applications, Int. J. Adhesion & Adhesives, 12-1, pp.9-18 (1992)
- 14) P. Briskham and G. Smith : Cyclic Stress Durability Testing of Lap Shear Joints Exposed to Hot-Wet Conditions, Int. J. Adhesion & Adhesives, 20, pp.33-38 (2000)
- 15) H. Hadavinia, A.J. Kinloch, M.S.G. Little and A.C. Taylor : The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic fatigue loading. Part I: Experimental studies, Int. J. Adhesion & Adhesives, 23-6, pp.449-461 (2003)
- 16) H. Hadavinia, A.J. Kinloch, M.S.G. Little and A.C. Taylor : The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic fatigue loading. Part II: Analytical and finite element studies, Int. J. Adhesion & Adhesives, 23-6, pp.463-471 (2003)
- 17) P.R. Underhill and D.L. DuQuesna : The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation, Int. J. Adhesion & Adhesives, 26, pp.62-66 (2006)
- 18) M. Quaresimin, M. Ricotta : Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in composite material, Composites Science and Technology, 66, pp.176-187 (2006)
- 19) 木原幸一郎・石井一茂・高橋拓也・磯野宏秋・杉林敏雄:円筒突合せ接着継手を用いたアクリル系接着剤の繰返し衝撃負荷に対する引張強度, 日本接着学会誌, 49-1, pp.11-16 (2013)