

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月26日現在

機関番号：55402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05742

研究課題名(和文) 高延性接着剤を使用した接着継手の粘塑性構成式による疲労強度の推定

研究課題名(英文) Estimation of Fatigue Strength of Adhesive Joints with High Ductility Adhesive by Simulation using Viscoplastic Constitutive Equation

研究代表者

吉田 哲哉 (YOSHIDA, Tetsuya)

広島商船高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：20182769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：高延性かつ高強度の接着剤を使用した接着継手の疲労強度を、シミュレーションにより推定することを目的として研究を実施した。具体的には、高延性アクリル系接着剤を用いた接着継手について温度と繰返し速度を変えて疲労試験を行い、その破壊挙動の観察により破壊のメカニズムを推測し、接着層の損傷を表現できるような繰返しせん断変形を考慮した材料モデル(構成式)を構築し、その材料モデルを用いたシミュレーションにより、接着継手の疲労強度の推定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で、対象とした高延性かつ高強度のアクリル系接着剤は、脆性破壊挙動を示すエポキシ樹脂系接着剤と大きく特性の異なる接着剤であり、これまで疲労強度に関し公表されている研究報告も僅かであり、接着継手の疲労強度をシミュレーションにより推定することを試みた研究も殆どなされていない。疲労実験では、温度と周波数と最大応力を変化させ接着継手の疲労実験を実施した。実験結果と材料モデルを使用したシミュレーション結果を比較検討した。シミュレーション結果と実験結果は、定量的には一致していないが、定性的には疲労強度、ひずみの進展挙動と共に良く一致し、疲労強度のシミュレーションによる推定の可能性が確認できた。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to estimate the fatigue strength of adhesive joints using high ductility and high strength adhesives by simulation. Specifically, a fatigue test was conducted on an adhesive joint using a high ductility acrylic adhesive while changing the temperature and the repetition rate. The mechanism of failure was inferred from the observation of the failure behavior, and a material model (constitutive equation) considering cyclic shear deformation that can express the damage of the adhesive layer was constructed. The fatigue strength of the bonded joint was estimated by simulation using the material model.

研究分野：工学

キーワード：接着剤 高延性接着剤 継手強度 疲労強度 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々は、非常に高い延性を有し、はく離強度や衝撃強度に優れているアクリル系接着剤に注目し、「接着接合した金属板の塑性加工」という技術の提案を行い、研究を進めてきた。研究過程において、アクリル系接着剤の基本的な強度特性を明らかにしてきた。アクリル系接着剤には、非常に強い温度と試験速度への依存性があり、さらに繰返しせん断変形時には、加工軟化挙動を示す。こうした特性を繰返し粘塑性構成式として構築し、各種のシミュレーションに用いてきた。さらに、接着継手の疲労試験を行い、疲労破壊挙動が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と、疲労強度が荷重の繰返し速度により変化することを明らかにした。しかし、その挙動をこれまでに構築してきた弾粘塑性構成式を用いてシミュレーションしたところ、定性的には実験結果を予測できたものの、厳密には理想的なシミュレーションができなかった。我々は、この違いの主たる原因が、接着層に生じる損傷であると捉えていた。本研究は、こうした経緯を踏まえて行われたものである。

2. 研究の目的

本研究では、高延性かつ高強度の接着剤を使用した接着継手の疲労強度を、シミュレーションにより推定することを目的とする。具体的には、脆性破壊挙動を示すエポキシ樹脂系接着剤と大きく特性の異なる高延性アクリル系接着剤を用いた接着継手について疲労試験を行い、その破壊挙動の観察と電子顕微鏡による破壊面の観察により、破壊のメカニズムを解明する。そして、接着層の損傷を表現できるような繰返しせん断変形を考慮した材料モデル(構成式)を構築し、その材料モデルを用いてシミュレーションにより接着継手の疲労強度の推定を行う。

3. 研究の方法

(1)単純重ね合わせ継手(せん断破壊)、突き合わせ継手(引張破壊)、スカーフ継手(せん断と引張りの組み合わせによる破壊)を用い、その破壊挙動の観察と接着継手の破壊メカニズムの解明を行う。観察には、CCDカメラを用いた超高速デジタル画像センサを用いる。実験は、オートグラフを用いて行う。接着剤の強度に非常に強い速度依存特性があることから、試験速度を0.12(mm/min)と100倍の12(mm/min)で行う。破断面の破面観察をデジタルマイクロスコープで行う。

(2)単純重ね合わせ継手を用いた疲労試験を行い、そのひずみの進展挙動を詳細に観察し、破壊のメカニズムの解明を行う。変位の測定は、超高速デジタル画像センサを使用する。実験は、サーボパルサを用いて、温度、繰返し速度、最大応力を変えて行う。具体的には、温度30については、繰返し速度0.67Hzで最大応力10MPa、12MPa、14MPa、16MPa、18MPa、繰返し速度2Hzで最大応力14MPa、16MPa、繰返し速度6Hzで、最大応力14MPa、16MPa、18MPaで行った。温度20については、繰返し速度0.67Hzで最大応力14MPa、16MPa、18MPa、繰返し速度2Hzで最大応力16MPa、18MPa、繰返し数6Hzで、最大応力10MPa、12MPa、14MPa、16MPa、18MPaで行った。温度10については、繰返し速度6Hzで、最大応力18MPaと20MPaで行った。ひずみの進展挙動を詳細に観察するため、温度30、繰返し速度0.67Hzでの実験条件を多くした。また、疲労破断面の観察を走査線型電子顕微鏡で行う。

(3)観察結果をもとに繰返し負荷が作用する時の接着層損傷モデルの構築を行う。それを用いて接着層ひずみ進展挙動シミュレーションプログラムの開発を行い、作成したシミュレーションプログラムを用いて単純重ね合わせ継手の疲労強度の推定を行う。

4. 研究成果

(1)単純重ね合わせ継手、突き合わせ継手、スカーフ継手の破壊挙動を比較すると単純重ね合わせ継手では、接着層が大きく変形し延性破壊になるのに対し、突き合わせ継手では、接着層の変形が小さく脆性破壊となる。継手強度は、静的試験では突き合わせ継手と単純重ね合わせ継手の強度は、ほぼ等しくなるが、試験速度を大きくすると単純重ね合わせ継手では、継手強度の増加が顕著に現れるが、突き合わせ継手では、増加はわずかであり、試験速度の影響はせん断強度に対して大きくなる。

デジタルマイクロスコープを用いて行った破断面の破面観察では、突き合わせ継手と重ね合わせ継手では破断面が異なり、突き合わせ継手では、接着面に垂直に接着剤がクレータのように円形に変形したのに対し、重ね合わせ継ぎ手では、接着面に平行に接着剤が波状に変形していた。スカーフ継手では、接着面に対し45度方向に接着剤が粗い波のように変形した。

(2)単純重ね合わせ継手の疲労試験において、変位を超高速デジタル画像センサにより測定した結果、ひずみの進展挙動の詳細なデータを得ることができた。また、サーボパルサから出力される変位値を画像センサによる測定値に基づき補正することで、繰返し速度の大きい実験での変位の測定が可能となることが確認できた。

ひずみの進展挙動のデータより、ひずみの累積速度が、くり返しの初期に速く(1段階)、その後くり返しに伴い遅くなり(2段階)、最終破断に至る段階では急速なひずみ進行がみられる(3段階)ことが、確認できた。図1に温度30、繰返し速度0.67Hzの条件での最大応力の

違いによるひずみの進展挙動の比較の一例を示す。せん断引張試験におけるアクリル系接着剤の非常に強い温度と試験速度への依存性が、疲労試験においても影響し、破断時のせん断ひずみ値は、温度が高いほど、繰返し速度が遅いほど、最大応力が小さいほど大きくなる傾向があることが明らかになった。

せん断引張試験における破断面と疲労試験における破断面を走査線型電子顕微鏡により比較したが、大きな違いを見つけることはできなかった。

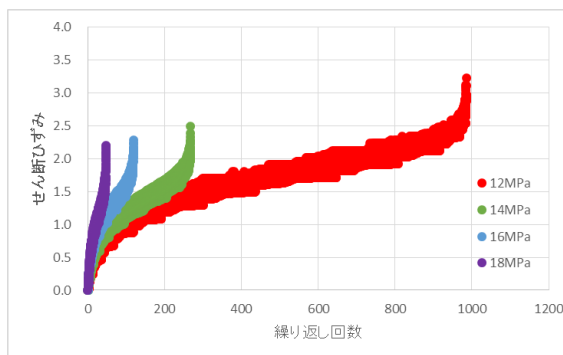


図1 ひずみの進展挙動の最大応力による比較（温度 30、繰返し速度 0.67Hz）

(3) 疲労試験時のひずみの進展挙動における実験結果と従来の材料モデルでのシミュレーション結果を比較すると、疲労試験開始後の接着層のせん断ひずみの急激な進展挙動を表現できたが、破断前におけるせん断ひずみの急激な増加を表現することができなかった。この違いの原因と考えている接着層に生じる損傷を考慮した材料モデルを検討し、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、接着強度の基本なる平衡応力が徐々に小さくなるモデルとした。粘塑性ひずみ速度を求める式の中に、損傷項を加えた。損傷を損傷の量を表す項と損傷に与えるくり返し回数の影響を考慮する項で仮定した。

(4) 接着層内部の損傷を考慮した材料モデルを使用したシミュレーション結果と実験結果を比較検討した。図2に温度 30 の条件でのシミュレーション値と実験値の比較の一例を示す。シミュレーション結果と実験結果は、定量的には一致しているとは言えないが、定性的には疲労強度（S-N 曲線）、ひずみの進展挙動と共に良く一致していることが確認できた。試験温度、繰返し速度、最大応力の違いによる、破断時のせん断ひずみ値の変化を考慮する必要があるが、今後の材料モデルの検討等の研究の進展により、疲労強度のシミュレーションによる推定の実現の可能性が確認できた。

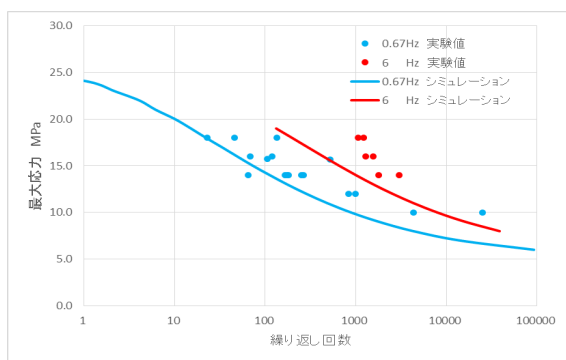


図2 疲労強度の実験値とシミュレーション値の比較（温度 30）

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

吉田哲哉、高延性接着剤を用いた単純重ね合わせ継手の接着層疲労強度における温度・速度の影響、日本接着学会、第 56 回年次大会、講演要旨集、P35A、2018

吉田哲哉、高延性接着剤を用いた単純重ね合わせ継手接着層の疲労強度推定、日本接着学会、第 55 回年次大会、講演要旨集、P46B、2017

徳田太郎(吉田哲哉)、高延性接着剤を用いた金属接着板塑性曲げ加工解析の高精度化 - 接着層せん断変形挙動の実験結果と解析結果の違いに関する一考察 -、日本接着学会、第 55 回年次大会、講演要旨集、P47A、2017

徳田太郎(吉田哲哉)、金属接着板の非対称曲げ加工、日本接着学会、第 54 回年次大会、講演要旨集、pp.61-62、2016

吉田哲哉、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、日本接着学会、第 54 回年次大会、講演要旨集、pp.196-197、2016

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：瀧口三千弘

ローマ字氏名：Michihiro TAKIGUCHI

所属研究機関名：広島商船高等専門学校

部局名：商船学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10163346

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。