

補助事業番号 2021M-116

補助事業名 2021年度 非破壊評価した粘弾塑性特性に基づく樹脂系構造材料の高精度破損寿命予測技術の開発 補助事業

補助事業者名 千葉大学・准教授・山崎泰広

1 研究の概要

樹脂材料の粘弾性特性を簡易に評価できる技術を確立した。さらに、樹脂材料の低サイクル疲労試験を実施し、疲労寿命を整理するパラメータを検討した。その結果、球状圧子押し込み試験と有限要素法を用いた逆解析により評価した粘弾性特性を考慮した応力振幅をパラメータと用いることにより樹脂材料の疲労寿命が良好に整理できることを明らかにした。さらに、得られた結果に基づき疲労寿命予測手法を検討し、従来の金属材料の低サイクル疲労寿命予測手法を適用した場合に比較して極めて高い予測精度で寿命が予測できる技術を開発した。

2 研究の目的と背景

環境負荷低減と燃料コスト削減の目的から、輸送機器構造材料への樹脂系材料の適用が求められている。しかし、耐久性の保証が難しいため、輸送機器構造材料への適用が制限されてきた。これは、鉄鋼に代表される金属材料に比べて、樹脂系材料の力学特性が製造条件に過敏でロット間差が大きく、さらに、温度・湿度や紫外線などの環境負荷に影響を受けて力学特性が大きく変化するため、樹脂系材料の破損寿命を予測することが困難であること起因している。そこで、樹脂系構造部材の粘弾塑性特性を非破壊で簡易評価し、粘弾性特性を考慮した疲労寿命予測する技術について検討した。

3 研究内容

粘弾性特性を考慮した樹脂材料の高精度疲労寿命予測手法の開発

(http://www.em.eng.chiba-u.jp/~yamazaki/research_jka.html)

開発した計装化押し込みシステム(図1)による球状圧子押し込み試験と、3並列マクスウェルモデルによる逆解析(図2)を実施し、粘弾性特性を評価した。実験と解析で得られた代表的な押し込み荷重曲線を比較して図3に示す。図3より、3並列マクスウェルモデルでは負荷中と保持開始時の挙動を高精度に再現できている。球状圧子押し込み試験と逆解析を用いて、粘弾性特性として緩和剛性率 G_i を評価した。結果を図4に示す。図4より、緩和剛性率 G_i の割合は材料や環境試験の影響を受けて変化している。

曲げ疲労試験装置1号機、2号機(図5)と3号機として環境試験機内疲労試験装置(図6)を試作した。試作した曲げ疲労試験装置を用いて低サイクル疲労試験を実施した。低サイクル試験中の代表的な応力-ひずみ関係において、従来の金属材料に認められるヒステリシスループとは形状が異なる、樹脂材料特有のヒステリシスループを呈していた。すなわち、負荷時にある程度ひずみが大きくなると変形抵抗が増加し、除荷時には急激に応力が減少した曲線(すなわち、引張除

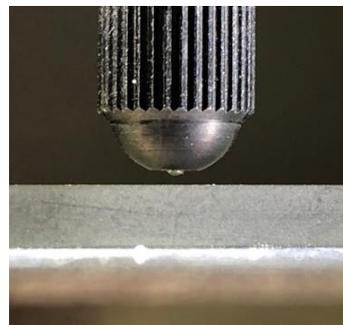
荷の際は下に凸、圧縮除荷の際は上に凸の曲線)を呈していた。また、応力がゼロにおいてひずみが残存し、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ が生じていた。ただし、試験を中断した場合、直ちにひずみが減少し、応力-ひずみ関係が原点に戻ったことから、ヒステリシスループに認められる非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ は、一般的な金属で主成分となる塑性ひずみ成分はほとんどなく、ほとんどが粘性成分と考えられる。

以上の検討結果に基づき、応力振幅 σ_a を緩和剛性率 G_3 で基準化した σ_a/G_3 をパラメータとして疲労寿命 N_f を整理した結果を図7に示す。図より、 σ_a/G_3 により、材料や環境試験の影響にかかわらず全ての試験片の疲労寿命 N_f を統一的に整理できている。緩和剛性率で基準化した応力振幅 σ_a/G_3 をパラメータとして疲労寿命を予測し、予測値と実験結果を比較した結果を図8に示す。緩和剛性率で基準化した応力振幅 σ_a/G_3 を用いることにより高精度に疲労寿命を予測できている。

緩和剛性率で基準化した応力振幅 σ_a/G_3 をパラメータとして疲労寿命を予測した際の実験値からの相違について、金属材料に対して一般的に適用されるひずみ振幅 ε_a 、応力振幅 σ_a の結果も含めて図9に示す。ひずみ振幅 ε_a をパラメータとしたとき環境試験により大きな相違が、応力振幅 σ_a をパラメータとしたときは材料が異なるとき大きな相違が生じ、どちらも多くのデータが予測精度20%を満たしていない。対して、緩和剛性率で基準化した応力振幅 σ_a/G_3 がパラメータ用いることにより、環境の影響を受けた場合30%程度の予測精度であったものの、20%の予測精度でほぼ低サイクル疲労寿命を予測できた。



(a) 外観

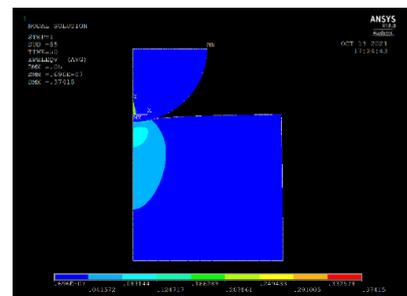


(b) 圧子押し込み部拡大

図1 球状圧子押し込み装置



(a) 導入したワークステーション



(b) 解析結果の例

図2 解析用ワークステーションと解析結果（ひずみ分布）の例

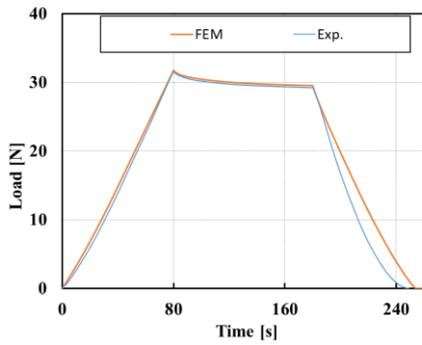


図3 球状圧子押し込み試験結果

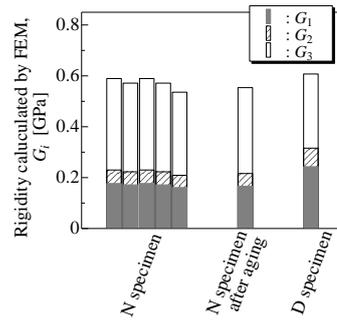


図4 緩和剛性率 G_i



図5 疲労試験装置(1号機(右)と2号機(左))



図6 疲労試験装置(3号機)

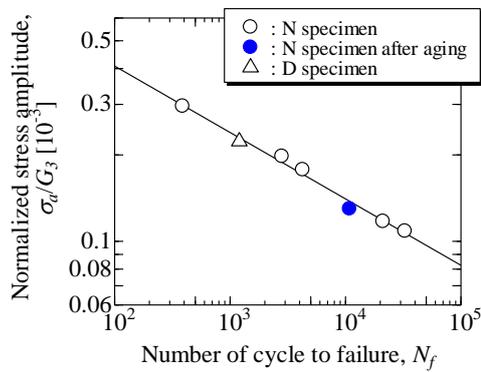


図7 疲労寿命 N_f 整理結果

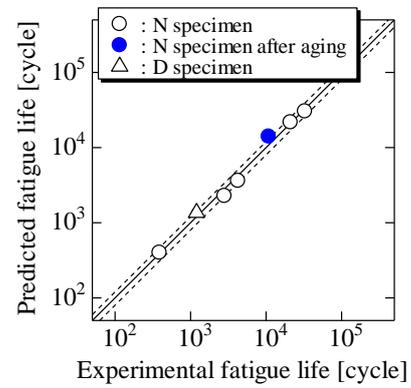


図8 寿命予測結果

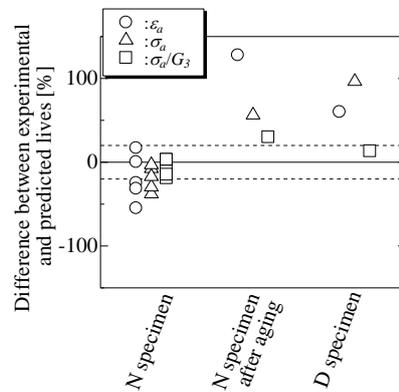


図9 各パラメータの寿命予測精度の比較

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により、押し込み試験と逆解析により樹脂材料の粘弾性特性を簡易に評価できる技術と、樹脂材料の粘弾性特性を考慮した高精度疲労寿命予測技術を確立できた。前者は、樹脂材料を構造材料として使用する際に最大のネックとなる材料のロット差の影響を非破壊的に定量評価する技術として活用でき、後者は同様に最大のネックとなる疲労寿命予測の高精度化に寄与するものである。これにより、構造材料としての樹脂材料の信頼性を大きく向上することが可能となり、従来、信頼性の観点から適用が制限された構造部材への樹脂材料の適用が加速度的に進むことが期待できる。樹脂材料を構造材料に適用が拡大されれば、電気自動車などの運輸機器やモバイル機器のさらなる軽量化が期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、金属材料、特に、超合金などの耐熱材料の低サイクル疲労、熱疲労、クリープ疲労の各強度特性、および、それらの環境下におけるき裂の進展機構に関する研究に取り組んできた。さらに、異材界面の強度特性について研究を行い、最近では樹脂系接着剤について注力してきた。また、日本機械学会発電設備規格委員会材料専門部会の副委員長として規格の制定・改訂に貢献し、日本材料学会高温強度部門委員会では委員長として耐熱材料研究に貢献してきた。これまでに蓄積して知見・経験に基づき、最近では樹脂材料の強度研究を実施するとともに、日本材料学会高温強度部門委員会樹脂強度評価小委員会幹事として、産学協働の樹脂材料の強度研究を推進してきた。本事業は、高温強度研究で培った「低サイクル疲労」や「クリープ(粘性特性)」に関する知見を樹脂材料の強度研究に展開し、樹脂強度評価小委員会と協力しながら実施した研究である。今後も研究を継続し、樹脂材料の強度研究を発展させ、信頼性向上に寄与することにより、樹脂材料の構造材料への適用拡大に繋げていきたい。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

なし。(今後、学術雑誌に論文を投稿予定)

7 補助事業に係る成果物

なし。(日本材料学会樹脂強度評価WG成果報告書中にて成果を公表予定)

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 千葉大学工学研究院(チバダイガク)

住 所: 〒263-8522

千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33

担 当 者 准教授 山崎 泰広(ヤマザキ ヤスヒロ)

担 当 部 署: 工学研究院(コウガクケンキュウイン)

E - m a i l: Y.yamazaki@chiba-u.jp

U R L: <http://www.em.eng.chiba-u.jp/~yamazaki/>