

数値材料試験の材料モデルが一方方向 CFRP の界面強度の 予測精度に及ぼす影響

日大生産工(院) ○佐藤智, 染宮聖人 日大生産工 平山紀夫
サイバネットシステム(株) 山本晃司 名古屋大・工 松原成志朗
東北大・災国研 石橋慶輝, 寺田賢二郎

1. 緒言

炭素繊維を一方方向に配向した一方方向炭素繊維強化プラスチック (以下, UD-CFRP) の主な破壊挙動は, 繊維と樹脂の接着界面に生じる界面剥離を起点とした亀裂進展破壊挙動によるものであり, 構造材料として使用する際にはこの界面強度の評価が必要となる。

このため先行研究では, 均質化法に基づく数値材料試験¹⁾とニューラルネットワーク (以下, NN) を利用した界面強度の予測手法が提案された²⁾。この手法はUD-CFRPの界面強度の予測に対し有用であったが, 数値材料試験において母材樹脂を線形弾性体と仮定しているため, 破壊近傍の材料挙動に誤差を生じ, これが界面強度の予測値に影響する可能性が挙げられた。

そこで本研究では, 母材樹脂を弾塑性体でモデル化し, 繊維と母材樹脂の間に界面層を設けたUD-CFRPのマイクロモデルを作成し, Off-axis引張試験を均質化理論に基づく数値材料試験により実施した。そして, 繊維と母材樹脂の界面強度, 母材樹脂の破壊強度, 繊維配置および繊維体積含有率の組み合わせを変化させ, 得られたマクロなUD-CFRPの破壊強度との関係性をNNに学習させた。その後, 学習済みのNNを用いて, 実際に成形したUD-CFRPのOff-axis引張試験の結果から界面強度と母材樹脂の破壊強度を予測した。

最後に, 得られた界面強度と母材樹脂の破壊強度を入力値として数値材料試験を行い得られた結果と, 実際に成形したUD-CFRPのOff-axis引張試験の結果とを比較して予測精度の評価を行い, 数値材料試験の材料モデルが界面強度の予測精度に及ぼす影響を調査した。

2. 数値材料試験

本研究では, UD-CFRPマイクロモデルの母材樹脂に相当する要素に, 従来の研究成果と比較するために, 従来通り母材樹脂を線形弾性損傷

構成則でモデル化した場合 (以下, Model I) と本研究対象である弾塑性損傷構成則でモデル化した場合 (以下, Model II) の2種類の材料モデルで数値材料試験を実施した。また, 繊維と母材樹脂間の界面に2直線挙動を示す接触モデルを定義し, 界面の剥離挙動を表現した。この接触モデルは接触面に対して法線方向と接線方向の2つの剥離モードを有しており, 各方向の最大接触応力 $\sigma_i^{\max}, \tau_i^{\max}$ と剥離完了点における変位量 u_i にて定義される。しかしながら剥離完了点における変位量の計測が困難であるため, 本研究では剥離完了点における変位量は一定値として固定した。

この2種類のマイクロモデルModel I, IIに対し, Off-axis引張試験を数値材料試験により実施して学習データを生成した。このとき, マイクロモデルには周期対象拘束条件を定義し, 繊維配置, 体積含有率 V_f , 母材樹脂強度 σ_m^{\max} , および界面接着強度 $\sigma_i^{\max}, \tau_i^{\max}$ の組み合わせを乱数により500通り作成した。

3. ニューラルネットワーク

本研究では, 各方向の最大接触応力 $\sigma_i^{\max}, \tau_i^{\max}$ と母材樹脂強度 σ_m^{\max} の計3つを出力信号とするNNを構築する。重みパラメータの学習には, 一般的な誤差逆伝播法を用いた3層フィードフォワード型ニューラルネットワークを採用し, 活性化関数にはReLU関数, 出力信号の誤差評価には平均二乗誤差関数を用いた。本研究においてOff-axis引張試験の試験方向は, UD-CFRPの繊維配向方向 ($\theta=0^\circ$) から, $\theta=15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3方向とし, NNの入力信号は繊維体積含有率 V_f と各試験方向における見かけの弾性率 E_c , UD-CFRPの破壊強度 σ_f および破断ひずみ ε_f の計10種類とした。入出力比は10:3

Effect of Material Model of Numerical Material Test on Prediction Accuracy of Interfacial Strength of Unidirectional CFRP

Tomo SATO, Masato SOMEMIYA, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO, Seishiro MATSUBARA, Yoshiteru ISHIBASHI and Kenjiro TERADA

で構成され、数値材料試験により生成した学習データを用いて学習を行った。

4. 結果及び考察

作成した学習データからNNの学習を行い、JIS K-7165に準じたOff-axis引張試験を試行し、試験結果から取得した各方向の引張特性を入力し、法線および接線方向の界面強度を推定した。NNで推定したパラメータはModel Iでは $\bar{\sigma}_m^{\max} = 91.8 \text{ MPa}$, $\sigma_i^{\max} = 58.4 \text{ MPa}$, $\tau_i^{\max} = 74.4 \text{ MPa}$ となりModel IIでは $\bar{\sigma}_m^{\max} = 79.7 \text{ MPa}$, $\sigma_i^{\max} = 39.4 \text{ MPa}$, $\tau_i^{\max} = 42.2 \text{ MPa}$ となった。このように、予測値は2種類の材料モデルで異なり、Model IIに比べModel IIは全ての予測値が低くなった。

これらの予測値の妥当性を評価するため、NNの推定値を入力値として行った数値材料試験の結果とOff-axis引張試験の試験結果を比較した。Fig. 1に数値材料試験とOff-axis引張試験の応力-ひずみ曲線を比較して示す。この図から明らかなように、材料挙動はModel Iよりも、Model IIの方が良好に再現出来ている。これはModel IIがより実際のUD-CFRPに近い材料モデルであるためと考えられる。更に、Table 1に各モデルの破壊値とOff-axis試験の破壊値との相対誤差を示す。この表より、Model IIに比べModel IIの各破壊値の相対誤差が小さいことが分かる。つまり材料挙動の再現精度が向上したことにより界面強度の予測値の妥当性が向上したと言える。なお、UD-CFRPの材料挙動は繊維配置によっても変化するが、本研究で構築したNNでは繊維配置を考慮していない。そのため、繊維配置の情報を学習パラメータに含めることで更なる精度向上が期待できる。

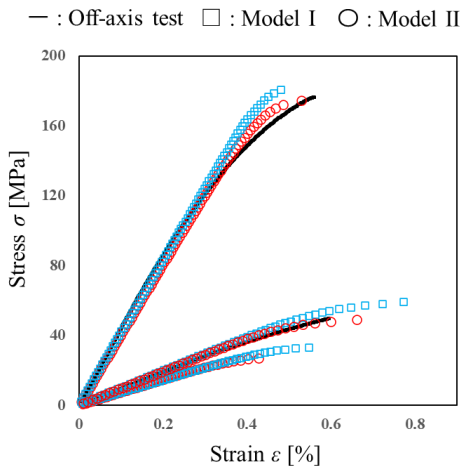


Fig. 1 Comparison of Analysis results and Experimental results by Stress-strain curves.

Table1 Relative error of Off-axis tensile test results and Model I and Model II numerical material test results.

	Error [%]	
	Model I	Model II
$\theta = 15^\circ$ $\varepsilon_c^{f,\theta=15^\circ}$	-13.9	-5.37
$\sigma_c^{f,\theta=15^\circ}$	-2.22	-1.14
$\theta = 45^\circ$ $\varepsilon_c^{f,\theta=45^\circ}$	22.7	5.09
$\sigma_c^{f,\theta=45^\circ}$	14.1	-5.22
$\theta = 90^\circ$ $\varepsilon_c^{f,\theta=90^\circ}$	32.1	11.8
$\sigma_c^{f,\theta=90^\circ}$	6.85	-7.69

5. 結言

本研究では、母材樹脂を線形弾性損傷構成則でモデル化した場合と弾塑性損傷構成則でモデル化した場合の2種類の解析モデルで数値材料試験実施し、界面強度および母材樹脂の破壊強度と、マクロなUD-CFRPの破壊強度との関係性をNNに学習させた。そして学習済みのNNを用いてOff-axis引張試験の試験結果から、母材樹脂強度と法線成分および接線成分の界面接着強度を予測し、予測したパラメータを用いて数値材料試験を行い、比較することで2種類の材料モデルの各方向の破壊値の再現精度を評価し、数値材料試験の材料モデルが界面強度の予測精度へ及ぼす影響を検証した。

検証結果から、学習済みのNNの推定パラメータは2種類の材料モデルで異なり、母材樹脂を線形弾性損傷構成則でモデル化した場合よりも弾塑性損傷構成則でモデル化した場合の予測パラメータの方が低い値となった。また、弾塑性損傷構成則でモデル化した場合には、UD-CFRPの非線形性を含む材料挙動が良好に再現でき、破壊値の予測精度が向上した。以上、UD-CFRPの数値材料試験において、母材樹脂の非線形材料モデルがNNの界面強度の予測精度に大きく影響することを確認できた。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 平山紀夫, 山本晃司: 数値材料試験 有限要素法によるマルチスケール解析, 丸善出版, (2021)
- 2) 鷹見凌, 平山紀夫, 山本晃司, 松原成志朗, 石橋慶輝, 寺田賢二郎, 数値材料試験とニューラルネットワークを用いた一方向CFRPの界面強度の予測, 第53回日本大学生産工学部学術講演会, (2020)1-12