

数値材料試験を用いた一方向 CFRTP の界面強度の予測に おける非線形材料特性の影響

日大生産工(院) ○佐藤智¹, 染宮聖人² 日大生産工 平山紀夫³
サイバネットシステム(株) 山本晃司⁴ 名古屋大・工 松原成志朗⁵
東北大・災国研 寺田賢二郎⁶

1. 緒言

母材に樹脂, 強化材に炭素繊維を用いた炭素繊維強化プラスチックの破壊は, 主に母材樹脂と繊維間の界面剥離を起点に生じる. なかでも, 繊維を一方に配向した一方向炭素繊維強化プラスチック (以下, UD-CFRP) においては, 各材料間の界面強度がUD-CFRPの強度特性に与える影響がより顕著であり, 界面強度の評価が重要となる.

鷹見らは, UD-CFRPの界面強度の評価法として, 均質化法に基づく数値材料試験とニューラルネットワーク (以下, NN) を用いて, UD-CFRPの界面強度を予測する手法を提案し, その有用性が示された^{1,2)}. しかしながら, 鷹見らの提案手法では数値材料試験におけるUD-CFRPの母材樹脂を線形弾性体と仮定しているため, 母材樹脂の非線形性が大きい炭素繊維熱可塑性樹脂 (以下, CFRTP) 等に対して適用する場合, 予測精度が低下する可能性がある.

そこで, 本研究では母材樹脂を弾塑性体でモデル化し, 繊維と樹脂間に界面層を定義した一方向CFRTP (以下, UD-CFRTP) のマイクロモデルを作成した. そして, Off-axis引張試験を模擬した数値材料試験を, 界面強度と母材樹脂の破壊強度, 体積含有率の組み合わせを変えて繰り返し実施し, 得られたマクロなUD-CFRTP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に対して未知の破壊値を与え, 界面強度の予測値を算出した. 最後に, 従来モデルを用いて同様の手順により界面強度の予測値を算出し, その結果と比較することで母材樹脂の非線形性が界面強度の予測精度に与える影響について調査した.

2. 数値材料試験

本研究では, UD-CFRTPマイクロモデルの母材樹脂に相当する要素に, 従来通り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直線粘着領域材料を定義し, 界面の剥離挙動を表現した. この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 $u_i^{\max}$ 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, ミクロモデルには周期対象拘束条件を定義し, 体積含有率 V_f , 母材樹脂強度 $\sigma_m^{\max}$, 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600通り作成し, 結果から得た破壊値と共に記録して学習データとした. また, 学習データとは別に100通りの組み合わせで解析を実施し, 学習精度を検証する際に用いるテストデータを作成した.

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 $\sigma_m^{\max}$ の計3つを予測値として出力するNNを構築した. 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-CFRTP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-CFRTPの破壊強度 σ_c^t および破断

Effect of Nonlinear Material Properties on Prediction of Interfacial Strength of
Unidirectional CFRTP using Numerical Material Test
Tomo SATO, Masato SOMEMIYA, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO,
Kenjiro TERADA

ひずみ ε_i^l の計10種類とした．入出力比は10 : 3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

2種類のマイクロモデルから作成した各学習データを用いてNNの学習を行い, それぞれに同じ破壊値を入力して界面強度の予測値を算出した．NNで算出したパラメータはModel Iで $\sigma_m^{\max} = 52.5$ MPa, $\sigma_i^{\max} = 165$ MPa, $\tau_i^{\max} = 76.8$ MPaとなりModel IIでは $\sigma_m^{\max} = 53.2$ MPa, $\sigma_i^{\max} = 101$ MPa, $\tau_i^{\max} = 62.7$ MPaとなった．このように, 各予測値は2種類のモデルで異なるのが分かる．

また, Table 1にModel IとModel IIにおける予測値の, テストデータに対する平均二乗誤差を示す．Table 1から, 平均二乗誤差を指標とした学習精度は, 全てのパラメータでModel IIの方が高いことが分かる．つまり, 母材樹脂の非線形性をモデル化したことにより, 学習精度が向上したと言える．これは, Model IIにおける母材樹脂の非線形性がCFRTPの破壊強度と関連性があり, 数値材料試験において入力した界面強度と母材樹脂強度に対して, より高い精度で破壊強度を算出できたためと考えられる．

更に, NNにより算出した界面強度を入力値として与え, Model IとModel IIのそれぞれで数値材料試験を実施した．Fig. 1に, 各数値材料試験の結果を応力 - ひずみ線図で比較したものを示す．Fig. 1から, Model IIの方がModel Iよりも低い剛性を示し, とくに $\theta=90^\circ$ において, 材料挙動が大きく異なるのが分かる．これは, 母材樹脂の非線形性によりUD-CFRTPが初期段階で降伏を生じるためである．これにより, 見かけの弾性率が大きく変化するため, 材料挙動や学習精度に影響したと考えられる．

このように, 母材樹脂の非線形性はNNの学習結果に大きく影響することが分かった．今後は, 実際のOff-axis引張試験の結果からUD-CFRTPの界面強度を予測し, NNの予測値の妥当性を評価していく必要がある．

Table 1 Root mean square percentage error of parameters (Model I and Model II).

	RMSPE [%]	
	Model I	Model II
$\sigma_m^{\max}$	27.7	4.00
$\sigma_i^{\max}$	15.5	11.0
$\tau_i^{\max}$	19.4	15.8

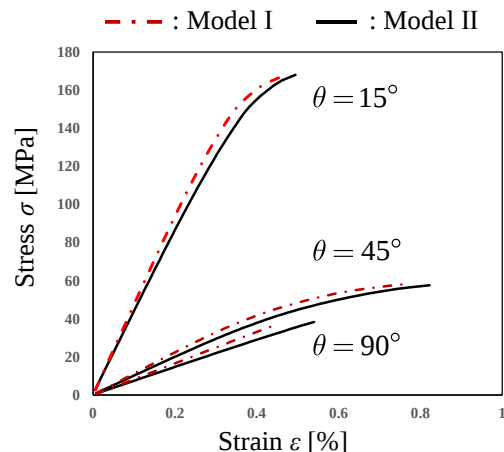


Fig. 1 Comparison of Analysis results by Stress-strain curves (Model I and Model II).

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を実施し, 界面強度および母材樹脂の破壊強度と, マクロなUD-CFRTP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を用いて未知の破壊値に対する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, 学習精度を比較した．そして, 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材料挙動を評価し, 母材樹脂の非線形性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の予測パラメータは2種類の材料モデルで異なり, テストデータに対する平均二乗誤差は, 母材樹脂を弾塑性損傷構成則でモデル化した場合の方が小さく, 母材樹脂の非線形性を考慮したことで学習精度が向上することがわかった．また, 各モデルでの材料挙動は $\theta=90^\circ$ において顕著に異なり, 母材樹脂の非線形性によって生じる見かけの弾性率の変化が, 学習精度に影響している可能性が示された．

参考文献

- 1) 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
- 2) 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)