

ニューラルネットワークと数値材料試験を用いた一方向 CFRP の界面強度評価

日大生産工(院) ○鷹見 凌 日大生産工 平山 紀夫
サイバネットシステム(株) 山本晃司 東北大 寺田賢二郎

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 (CFRP) は、非常に高い強度と剛性を有するため、航空機や自動車等の構造部材として積極的に利用されている。この CFRP の力学的特性は、強化繊維と母材間の界面特性に大きく依存することが知られている。特に、CFRP の材料破壊は強化繊維と母材間に生じる亀裂を起点とした亀裂進展破壊挙動を示すことが知られおり、界面特性の評価は CFRP の材料評価の重要なファクターである。

界面特性の評価には、DCB (Double Cantilever Beam) 試験のような界面はく離破壊靱性試験や単繊維を滴下した樹脂から引き抜き、界面のせん断強度を評価する単繊維引抜試験¹⁾などが考案されている。しかしながら、これらの界面評価法は、試験片として採用した限定された成形条件の CFRP の特定の破壊モードに依存した界面特性の評価には有効であるが、繊維強化材の配置や体積含有率、そして母材樹脂の特性等を考慮した様々な CFRP の界面特性を評価することは難しい。

そこで本研究では、一方向強化 CFRP (以下、UD-CFRP) の off-axis 引張試験結果とニューラルネットワークを用い、界面の剥離閾値の推定を試みる。材料特性の推定では、必要となる学習データを、数値材料試験²⁾から作成し、界面の材料パラメータと off-axis 引張試験結果の相関性をニューラルネットワークに学習させることで、off-axis 引張試験結果から UD-CFRP の界面剥離閾値の推定および評価を行った。

2. 有限要素モデルにおける界面剥離の再現

本研究では解析モデルにおいて UD-CFRP の界面剥離を繊維外周と樹脂間に剥離を許容する接触要素を定義することで再現した。パラメータは、接触面に対する法線/接線方向の最大表面力 σ_i^{\max} , τ_i^{\max} 2 種類である。

また UD-CFRP の破壊挙動は要素の剛性低下によって再現した。本研究で用いた破壊則は、要素に生じる相当応力が閾値 σ_m^{\max} を超えた際に発生し、剛性を 90% 低下させる。これによって、疑似的に UD-CFRP の亀裂進展挙動を再現可能であり、供試体自体の剛性も低下する。

3. ニューラルネットワークの概要

本研究では一般的な、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た。入出力比は 10 : 3 で、活性化関数は ReLU 関数とした。中間層におけるノード数は第 1 層と第 2 層ともに 10^3 とし、 10^4 epoch の学習を実施した。また、局所解への収束防止のために、学習率を Adam アルゴリズム³⁾にて調整した。Table 1 に本研究で用いるニューラルネットワークの入出力関係を示す。Table 1 より、本ニューラルネットワークは、UD-CFRP の off-axis 引張試験の結果を入力し、界面層の各方向の最大表面力および母材樹脂の強度が出力される構成とした。

Table 1 Input / Output signals of neural network.

Input signal	
V_f [%]	Fiber volume fraction
E_c [GPa]	Young's modulus ($\theta=15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)
ϵ_c^f [MPa]	Fracture strain ($\theta=15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)
σ_c^f [MPa]	Fracture stress ($\theta=15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)
Output signal	
σ_m^{\max} [MPa]	Matrix resin strength
σ_i^{\max} [MPa]	Interfacial layer strength (normal)
τ_i^{\max} [MPa]	Interfacial layer strength (tangent)

4. 数値材料試験による学習データの生成

本研究では、数値材料試験による off-axis 引張解析にて学習データを生成した。作成したマイクロモデルには周期対称条件を定義し、繊維は乱数によりランダムに配置し、繊維-樹脂界面に接触要素を適用した。そして、繊維体積含有率と母材樹脂強度および界面剥離閾値の組み合わせを乱数により 300 通り作成し、解析結果より弾性率と破壊応力および破断ひずみを収録した。また、今回は母材に熱硬化性エポキシ樹脂 (XNR6805, ナガセケムテックス(株))、強化繊維に炭素繊維 (T700SC-12K60E, 東レ(株)) を用いた UD-CFRP を仮定し、入力値の範囲を設定した。

解析を行う軸は繊維配向方向を 0° とすると、 0° 方向の破壊値には界面特性が影響しないため、 $\theta=15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 3 方向とした。解析上は、上記の 3 方向への引張解析を模擬するために外部節点へ分解荷重を定義し、同一モデルに 3 方向への off-axis 引張解析を実行した。

Evaluation of Interfacial Strength of Unidirectional CFRP
Using Neural Network and Numerical Material Test

Ryo TAKAMI, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO and Kenjiro TERADA

5. 解析結果

作成した学習データを用いてニューラルネットワークの学習を行った。誤差を算出したところ、学習データに対する誤差の値は平均で0.610%であり、良好な収束状況であった。しかし、未学習のテストデータを100通り用意し、ニューラルネットワークの汎用性を確認したところ樹脂強度 σ_m^{\max} の誤差が9.56%、界面剥離閾値(法線方向) σ_i^{\max} の誤差が16.9%、界面剥離閾値(接線方向) τ_i^{\max} の誤差が23.7%となり、特に界面剥離閾値の2種類が大きな誤差を示した。これは、繊維配置の不均一性による破壊値のバラツキが原因であると考えられる。またTable 2には、数値材料試験の結果から、ニューラルネットワークの入出力信号の相関関係を算出し、まとめたものを示す。なお表中の網掛けは相関係数が0.6以上の強い相関を意味する。Table 2から、今回比較的に誤差の小さかった樹脂強度 σ_m^{\max} は、各方向の破断ひずみや破壊応力と強い相関関係を示しているのに対し、誤差の大きい界面剥離閾値 σ_i^{\max} 、 τ_i^{\max} は相関性を示す入力信号が存在しないことがわかる。以上より、学習データとして用意した $\theta=15^\circ$ 、 45° 、 90° のoff-axis解析から求める各方向の剛性と破壊値では界面の剥離閾値を特徴づける情報としては不足していることが考えられる。また法線方向の界面剥離閾値 σ_i^{\max} に関しては、 $\theta=90^\circ$ の破壊値に対し多少の相関性を見せているが、接線方向の界面剥離閾値 τ_i^{\max} は全ての入力信号に対して相関性を示していないことから接線方向の界面剥離閾値 τ_i^{\max} はUD-CFRPのoff-axis試験の破壊値に影響を及ぼさないということがわかる。よって、今回の学習結果は学習データにのみ出力がフィッティングするようにパラメータが最適化された過学習状態であることが推測される。

最後に、実際にフィラメントワインディング成形法により成形したUD-CFRPのoff-axis引張試験結果をニューラルネットワークに入力し、得た母材樹脂強度と界面剥離閾値を用いて数値材料試験を行った結果をoff-axis引張試験結果と比較してFig.1に示す。Fig.1よりニューラルネットワークの出力を用いて行った数値材料試験結果が各方向の破壊応力と良好に一致していることから、ニューラルネットワークを用いてUD-CFRP成形時における母材樹脂強度と界面剥離閾値を推定することが可能であることが分かった。しかし、 15° 、 45° 方向の破断ひずみには誤差が生じていることから、母材の非線形性を考慮する等、対策を施す必要があると考える。

6. 結言

本研究では、ニューラルネットワークを用いてUD-CFRPの母材樹脂強度と界面剥離閾値を推定する手法を考案し、検証を行った。本手法

にて推定したパラメータを用いて数値材料試験を行った結果がoff-axis引張試験の結果と誤差は生じたものの、各方向の破壊値は概ね一致していることから、母材樹脂強度と界面剥離閾値の推定にニューラルネットワークを用いるのは有効な手段であるといえる。しかし、off-axis引張試験と数値材料試験で、材料挙動に誤差が生じていることから、良質な学習データを生成できたとは言えない。この点に関しては、学習データの選定を行っていく必要性を認識した。

Table 2 Input / output signal correlation.

Input signal	Output signal			
	σ_m^{\max}	σ_i^{\max}	τ_i^{\max}	
V_f	-0.02	0.04	0.05	
$\theta = 15^\circ$	$E^{\theta=15^\circ}$	0.06	-0.01	0.09
	$\varepsilon_f^{\theta=15^\circ}$	0.77	-0.02	0.05
	$\sigma_f^{\theta=15^\circ}$	0.87	-0.04	0.10
$\theta = 45^\circ$	$E^{\theta=45^\circ}$	0.08	-0.01	0.12
	$\varepsilon_f^{\theta=45^\circ}$	0.67	0.22	0.14
	$\sigma_f^{\theta=45^\circ}$	0.73	0.19	0.25
$\theta = 90^\circ$	$E^{\theta=90^\circ}$	0.03	0.06	0.13
	$\varepsilon_f^{\theta=90^\circ}$	0.59	0.40	0.20
	$\sigma_f^{\theta=15^\circ}$	0.46	0.48	0.23

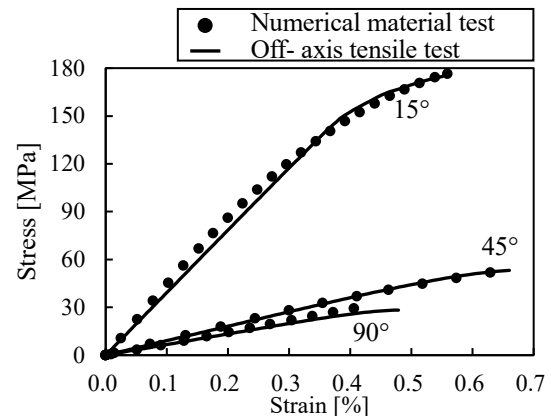


Fig. 1 Analysis results and off-axis tensile test results.

参考文献

- 1) 小柳潤, 河合純一, 萩原慎二, 渡辺賢一: 樹脂メニスカスの影響を考慮した単繊維引き抜き試験によるカーボン繊維/樹脂界面のせん断強度評価, 実験力学, 日本実験力学会誌, Vol 10, No.4, (2010) pp.407-412.
- 2) 寺田賢二郎: 複合材料の数値材料実験のススメその2~数値材料実験の理論と実際: 線形弾性体編~, 強化プラスチック, Vol.53, No.5, (2007) pp.246-253.
- 3) Kingma, D. P., Ba, J. L.: Adam: A Method for Stochastic Optimization, International Conference on Learning Representations, 1-13, (2015).