

炭素繊維の異方性弾性係数の同定

日大生産工(院) ○土田 翔夢 日大生産工 平山 紀夫

1 緒言

母材に樹脂、強化材に炭素繊維を用いた一方向炭素繊維強化プラスチック(一方向強化CFRP)は直交異方性の弾性係数を有するため、一方向強化CFRPを使用した構造部材の構造設計を行うためには、一方向強化CFRPの5つの異方性弾性係数($E_L^C, E_T^C, G_{LT}^C, \nu_{LT}^C, \nu_{TZ}^C$)を事前に予測する必要がある。一方向強化CFRPの異方性弾性係数を予測する手法としては、複合則や均質化解析等の手法が挙げられるが、どの手法を用いて予測する場合でも、構成材料である炭素繊維と母材樹脂、それぞれの材料定数が既知である必要がある。母材樹脂の弾性係数やポアソン比は、材料試験により測定することは容易だが、強化繊維の材料定数を材料試験により測定することは、形状の問題から困難である。特に、炭素繊維の弾性係数は強い異方性を有し、直交異方性を仮定しても独立な弾性係数をすべて材料試験により測定することは現実的ではない。

そこで本研究では、材料試験により測定した一方向強化CFRPの異方性弾性係数からニューラルネットワーク(NN)を用いて、炭素繊維の異方性弾性係数($E_L^f, E_T^f, G_{LT}^f, \nu_{LT}^f, \nu_{TZ}^f$)の同定を行う逆問題解析を試みた。本報告では逆問題解析による同定精度について報告する。

2 NNによる同定方法

2.1 NN

本研究で採用したNNは、入力層、中間層、出力層の3層で構成される階層型NNを採用し、学習方法は誤差逆伝播法を用いた。中間層及び出力層の伝達関数にシグモイド関数を用い、学習係数は0.01で固定値とした。

2.2 均質化解析による学習用データの作成

Fig.1に示す一方向強化CFRPを模擬した解析モデルを用いて、均質化理論¹⁾に基づく数値材料試験により、一方向強化CFRPの異方性弾性係数を算出する順方向解析を行い、学習用データを収集する。順方向解析を行う際の入力パラメータは、炭素繊維の異方性弾性係数と、母材樹脂の弾性係数、さらに繊維体積含有率 V_f が必要である。母材樹脂の弾性係数は”3 材料試験”で述べる実験値を採用するため、残りのパラメータをどのように変化させるかでNNの学習効率に大きな影

響を及ぼす。以下に、順方向解析を行う際の入力パラメータの設定について述べる。

最初に、”3 材料試験”で述べる一方向強化CFRPの試験片の V_f が試験ごとに異なるため、順方向解析を行う際の V_f の値はそれぞれの試験の各試験片と同様の値を用いる必要がある。このため、Fig.1に示す一方向強化CFRPのマイクロ解析モデルは、それぞれの試験の各試験片と同様の V_f の値を設定して作成した。次に、炭素繊維の異方性弾性係数は各々取りうる範囲を想定し、その範囲の中で5水準を定め、実験計画法による直交表L50を用いて、50の組み合わせパターンを決定し、順方向解析を行った。そして、均質化解析の入力パラメータである炭素繊維の異方性弾性係数と、算出結果である一方向強化CFRPの異方性弾性係数のペアをNNに与える学習用データとし収集した。

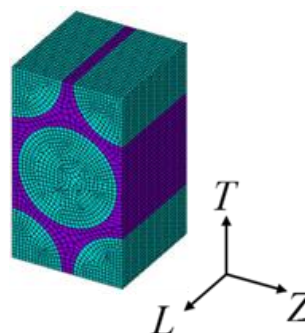


Fig.1 Micro FEM model of carbon fiber unidirectionally-reinforced plastics

2.3 逆問題解析手順

本研究で行った逆問題解析手順は3つのステップから構成される。”2.2 均質化解析による学習用データの作成”で述べたように、第1ステップでは均質化解析により学習用データを収集し、第2ステップで、それらのデータをNNに学習させる。そして、第3ステップで学習済みNNを用いて、”3 材料試験”で述べる一方向強化CFRPの実験値から、炭素繊維の異方性弾性係数を同定する。この逆問題解析では、3種類の異なる V_f における一方向強化CFRPの実験値から炭素繊維の異方性弾性係数を同定できる点に特徴がある。

Identification of Anisotropic Elastic Modulus of Carbon Fiber

Shomu TSUCHIDA, Norio HIRAYAMA

Satoru OTA, Takayuki HAGIWARA and Kazuya OGURA

3 材料試験

3. 1 供試材

作製する一方向強化 CFRP は、母材樹脂としてナガセケムテックス（株）製の熱硬化エポキシ樹脂、強化材には東レ（株）製 T720SC ロービング材を使用して、フィラメントワインディング（FW）装置により、薄い平板（ $t=3\text{mm}$ ）、厚い平板（ $t=15\text{mm}$ ）、薄肉円筒殻の三種類を成形した。さらに、母材樹脂の平板（ $t=2\text{mm}$ ）を注型により成形した。

3. 2 引張試験

引張試験は JIS K 7165 に準じて行い、一方向強化 CFRP の引張試験で扱う試験片は FW 成形した薄い平板と厚い平板の両方から全長 $L=250\text{mm}$ 、幅 $b=15\text{mm}$ の短冊型に切り出したものを試験片とした。一方向強化 CFRP の薄い平板から試験片長手方向に繊維が配向された 0° 材を切り出し、 E_L^C 、 ν_{LT}^C を測定した。そして、同じ薄い平板から試験片幅方向に繊維が配向された 90° 材を切り出して E_T^C を測定した。さらに、厚い平板からは、試験片厚さ方向に繊維が 90° 方向に配向された面外方向の試験片を切り出し、 ν_{TZ}^C を測定した。次に注型により成形した樹脂板は、ウォータージェット加工によりダンベル形状の試験片を作成し、 E^m 、 ν^m を測定した。

3. 3 ねじり試験

一方向強化 CFRP の面内せん断弾性係数 G_{LT}^C は、FW 成形法により周方向に繊維を配向させた薄肉パイプのねじり試験により測定を行った。薄肉パイプの長さは 300mm で厚みは $t=3\text{mm}$ である。また、試験機のチャック部による応力集中を避けるため、一方向強化 CFRP の薄肉パイプの両端部に GFRP 製のタブを成形した。

3. 4 実験結果

Table 1 に引張試験とねじり試験の結果から算出した一方向強化 CFRP の直交異方性弾性係数を示す。引張試験では試験片本数を一方向強化 CFRP と樹脂板でそれぞれ $n=10$ とし、ねじり試験では $n=5$ とした。また、作成した三種類の試験片の繊維体積含有率 V_f を焼却法により測定した結果も併記した。

ここで、表中の、 E_L^C は繊維方向縦弾性係数、 E_T^C は繊維直交方向縦弾性係数、 ν_{LT}^C は面内ポアソン比、 G_{LT}^C は面内せん断弾性係数、 ν_{TZ}^C は面外ポアソン比、 E^m はエポキシ樹脂の縦弾性係数、 ν^m はエポキシ樹脂のポアソン比である。

4 同定結果と同定精度検証

”2. 3 逆問題解析手順”で述べた手順により Table 1 の値を用いて、炭素繊維の異方性弾性係数の同定を行った。その結果を Table 2 に示す。

また、同定精度の検証として、Table 2 の同定結果を順方向解析の入力値とし、算出した結果を実験値と比較した。その比較結果を Table 3 に示す。この表から解析結果と実験結果の誤差は非常に小さいことが確認できる。

5 結論

NN を用いた逆問題解析により、炭素繊維の異方性弾性係数の同定を試みた。その結果、 V_f の異なる一方向強化 CFRP の実験値の組み合わせから炭素繊維の異方性弾性係数の同定を精度よく行うことができた。

「参考文献」

- 1) 寺田賢二郎，犬養壮典，平山紀夫，機械学会論文集(A編)，第74巻，第744号(2008)，pp1084-1094

Table 1 Mechanical properties of CFRP and epoxy

Properties	Experimental	V_f [%]
E_L^C [GPa]	164.7	73.0
E_T^C [GPa]	10.28	
ν_{LT}^C [-]	0.32	
G_{LT}^C [GPa]	6.03	65.4
ν_{TZ}^C [-]	0.50	49.5
E^m [GPa]	4.18	-
ν^m [-]	0.38	-

Table 2 Identification result

Properties	Result
E_L^f [GPa]	225.3
E_T^f [GPa]	14.80
ν_{LT}^f [GPa]	0.31
G_{LT}^f [GPa]	34.40
ν_{TZ}^f [GPa]	0.33

Table 3 Validation result

Properties	Analysis	Experimental	error[%]	V_f [%]
E_L^f [GPa]	165.4	164.7	0.42	73.0
E_T^f [GPa]	10.5	10.3	2.31	
ν_{LT}^f [-]	0.33	0.32	3.01	
G_{LT}^f [GPa]	6.09	6.03	0.91	65.4
ν_{TZ}^f [-]	0.50	0.50	0.81	49.5