

数値材料試験による一方向 CFRTP の非主軸方向材料挙動の予測

日大生産工 (院)
サイバネットシステム(株)

○染宮 聖人
山本 晃司

日大生産工
名古屋大
東北大 IRIDeS

平山 紀夫
松原 成志朗
寺田 賢二郎

1. 緒言

近年, 繊維が一方向に引き揃えられた一方向繊維強化熱可塑性樹脂 (UD-CFRTP ; Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics) はリサイクル性に優れ, 廃棄処分による環境への負荷が小さいため, スポーツ用品, 車体部材, 建築材料など様々な分野で用いられている. しかしながら, UD-CFRTP のマトリックスである熱可塑性樹脂は, 温度や時間に依存した粘弾性・粘塑性を有するため, UD-CFRTP も異方性の非線形挙動を示す. 特に, 非主軸方向に荷重が作用した場合には, 大きな材料非線形性が表れる. したがって, UD-CFRTP を適用した製品の設計開発では, 設計初期の段階で UD-CFRTP の非主軸方向における材料挙動を予測することが重要である.

そのため, 数値解析により UD-CFRTP の非線形的な材料挙動を予測する手法が提案されており, 例として, 数値材料試験と最適化手法を用いて, 計6方向 (3つの垂直方向と3つの純せん断方向) の数値材料試験を行い, 得られた6つのマクロ応力-マクロひずみの関係から, Hill 定数を同定する方法^{1,2)}などが挙げられる. この方法で, UD-CFRTP の主軸方向の非線形材料挙動の予測には可能となったが, 非主軸方向における非線形材料挙動が十分な精度で予測可能かどうかは, これまでの研究では明らかになっていない.

そこで, 本研究では UD-CFRTP の非主軸方向における非線形的な材料挙動の予測手法として, 先行研究で提案された6方向の変形パターンに, 新たに45° 方向の変形パターンを加えた計7方向の数値材料試験による同定方法を提案する. そして, 実材料試験の応力-ひずみ線図と

比較することで, 提案する同定手法の有用性について評価した.

2. 均質化理論に基づく数値材料試験

Fig.1に示すように, UD-CFRTP の繊維配列はランダムに配置されていると仮定し, ユニットセルモデルを作成した. このとき, マクロ的な非線形材料挙動はユニットセルモデル内の非均一性によって異なるが, 石橋らはユニットセルモデル内の強化繊維が13本以上であるとき, 非均一性が低減すると報告している³⁾. したがって, 炭素繊維の本数は15本とした. また, このユニットセルモデルの境界に周期対称条件とユニットセルモデルを制御するための節点 (以下, 制御節点) を作成した. この制御節点とユニットセルモデルの間に拘束方程式を定義し, ミクロ解析を実施することで, マクロな材料応答を得ることができる. なお, ミクロ解析には汎用有限要素法ソフトウェア ANSYS2019 R2を使用した.

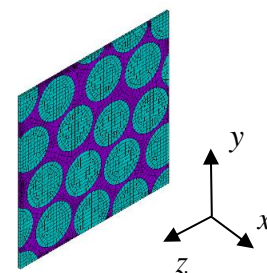


Fig.1 FE model of unit cells with randomly arranged carbon filaments of UD-CFRTP.

3. 同定結果と非線形材料挙動の計算

本研究では, Fig.1に示す UD-CFRTP のユニットセルモデルに対して, 非主軸方向の負荷除荷試験を模擬した数値材料試験を実施し, そのマクロ応力とマクロひずみの関係から, マクロ的

Prediction of Off-axis Material Behavior for Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Numerical Material Testing.

Masato SOMEMIYA, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO,
Seishiro MATSUBARA and Kenjiro TERADA.

な異方性材料構成則の材料パラメータを同定した。材料パラメータの同定には差分進化法を使用した。7方向の数値材料試験の結果と同定曲線をFig.2に示す。また、非主軸方向(30°, 45°)の数値材料試験の結果と同定曲線をFig.3に示す。Fig.2からわかるように、6方向と7方向の数値材料試験から同定した結果は、どちらもUD-CFRTPの非線形材料挙動を精度よく再現できていることがわかる。その一方で、Fig.3からわかるように、6方向の数値材料試験から材料パラメータを同定した場合、非主軸方向の数値材料試験の結果と同定曲線は一致しない。これに対して、7方向の数値材料試験の結果と同定曲線は良好な一致を示している。このことから、従来の6方向の数値材料試験による同定方法では、非主軸方向の非線形材料挙動を再現できず、本提案の7方向の数値材料試験による同定方法が必要であると考えられる。

4. 実材料試験との比較

7方向の数値材料試験の同定精度を繊維が25°方向に配向したUD-CFRTPの実材料試験の結果と比較することで同定精度の検証を行った。実材料試験の結果と7方向の数値材料試験から同定した材料パラメータで計算した結果をFig.4に示す。この図に示すように、7方向の数値材料試験の結果から同定した材料パラメータによる応力-ひずみ線図は、実試験の負荷除荷試験とよく一致している。このことから、本研究で提案した7方向の数値材料試験による同定手法は、実際のUD-CFRTPの非主軸方向における非線形材料挙動を精度良く予測できるといえる。

5. 結言

本研究では、UD-CFRTPのマイクロモデルに対して、計6方向の変形パターンに非主軸方向である45°方向の変形パターンを加えた計7方向の数値材料試験を実施し、材料パラメータを同定した。その結果、UD-CFRTPの非主軸方向における非線形材料挙動を精度よく表現することができた。

参考文献

- 1) K.Terada, J.Kato, N.Hirayama, T.Inugai, K.Yamamoto, A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyperelastic composite materials,

Computational Mechanics, Vol.52, pp.1199-1219.

- 2) 山本晃司, 平山紀夫, 寺田賢二郎, 数値材料データに基づく異方性 Hill 定数の同定, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.82, No.840, 2016, pp. 16-00056.
- 3) 石橋慶輝, 寺田賢二郎, 平山紀夫, 山本晃司, 小谷拓磨, 森口周二, データマイニングを用いた一方 CFRP の静的強度に関するばらつき抑制の検討, 計算工学講演会論文集, 22(2017).

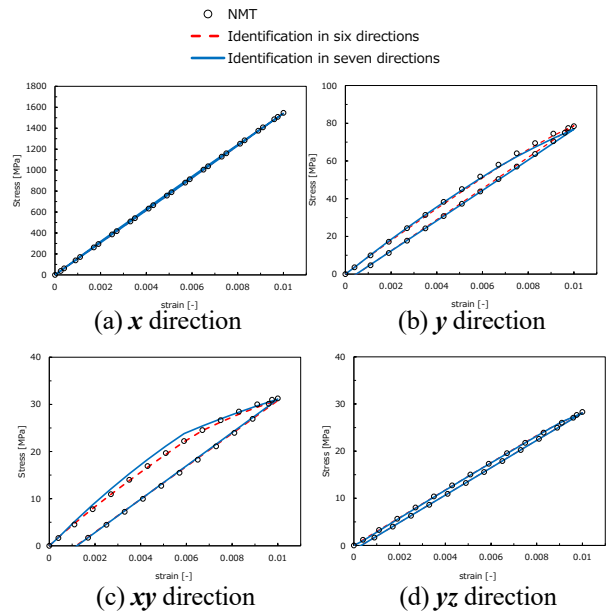


Fig.2 Identification of UD-CFRTP in principal direction

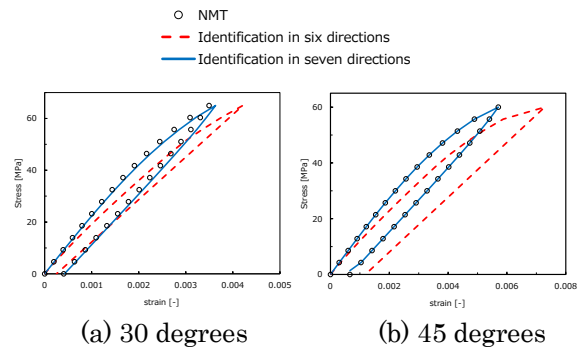


Fig.3 Behavior of Off-axis UD-CFRTP

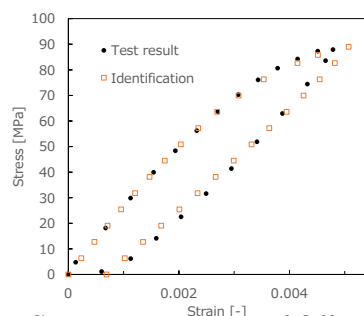


Fig.4 Stress-strain curve of Off-axis UD-CFRTP 22.5 degrees