

異方性粘塑性挙動を考慮した繊維強化熱可塑性樹脂のマルチスケール解析

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

東北大工

松原成志朗

東北大災害研

寺田賢二郎

1. 緒言

炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (以下, CFRTP) は, 高比強度・高比剛性という優れた材料特性に加え, 材料の再利用が可能であるため炭素繊維強化熱硬化性樹脂 (CFRP) の代替に向けて研究開発が活発に行われている. しかし, 母材である熱可塑性樹脂は降伏応力を超える荷重を受けると, ひずみに対する応力の挙動が速度に依存する粘塑性挙動を示す. そのため, 熱可塑性樹脂へ炭素繊維を配向したCFRTPは各材料主軸方向で粘塑性挙動が変化する異方性粘塑性挙動を示す.

このため, CFRTPを用いて構造解析を実行する際には, 先述した異方性粘塑性挙動を再現する材料モデルを適用する必要があるが, 適用の際に必要なすべての材料パラメータを実際の材料試験によって取得することは, 材料試験片の作製上の制約や試験機の制約から困難を極める.

そこで本研究では, まず母材樹脂の単軸引張試験結果から等方性粘塑性パラメータの同定を行い, 同定した樹脂材をマトリックスとする一方向強化CFRTP (以下, UD-CFRTP) のマイクロモデルに対し, 数値材料試験¹⁾を実行することでUD-CFRTPの異方性粘塑性挙動を予測した. そして, 予測したUD-CFRTPの異方性粘塑性挙動から, 異方性粘塑性構成則の適用に当たって必要となる材料パラメータを予測する手法を提案し, その予測手法の妥当性について検討した.

2. 母材樹脂の材料パラメータ同定

2.1 等方性粘塑性構成則

本研究では, 母材樹脂のひずみ速度依存性を再現する材料モデルにPerićが考案した等方性粘塑性構成則²⁾を採用する. モデルの粘塑性流れ則は, 塑性ポテンシャルと降伏関数に異なる式を採用したため, 以下に示す非関連流れ則となる.

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \dot{\gamma}_{vp} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_{vp} = \dot{\gamma} \left[\left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^{1/m} - 1 \right] \quad (2)$$

ここで, $\dot{\gamma}_{vp}$ は塑性乗数, $\mathbf{s}$ は偏差応力テンソル, q は相当応力, σ_y は降伏応力を表す. また, $\dot{\gamma}$ と $1/m$ はそれぞれ粘性パラメータ, 速度感度パラメータと呼ばれ, 本章で述べる材料パラメータの同定対象である.

2.2 材料のパラメータ同定

本研究では, UD-CFRTPの母材に熱可塑性エポキシ樹脂XNR 6805A (ナガセケムテックス(株))を用いることを仮定し, JIS-K7161に準じて単軸引張試験を行った. 試験時の速度水準値はひずみ速度 $\dot{\epsilon}=10^{-3}, 10^{-1}$ の二水準とし, 試験結果から等方性粘塑性構成則の材料パラメータを多点探索アルゴリズムである差分進化法 (以下, DE) を用いて同定した. Fig.1に試験結果とパラメータの同定によって得られた応力-ひずみ曲線を示す. Fig.1より同定結果が試験結果に対して良好な一致を示していることが分かる.

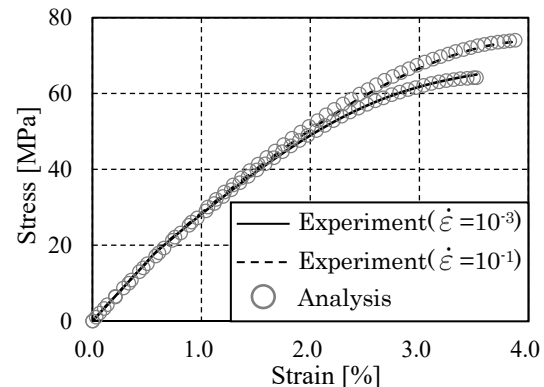


Fig.1 Analytical and experimental stress-strain curves.

3. UD-CFRTPのマルチスケール解析手法

3.1 UD-CFRTPの数値材料試験

本研究ではUD-CFRTPの異方性粘塑性挙動の予測を均質化法に基づく数値材料試験によって行った. 試験にはFig.2に示すUD-CFRTPの単位周期モデル (ユニットセル) を用い, 樹脂要素には前節で述べた等方性粘塑性体の同定結果を, 繊維要素には直交異方性弾性体の材料物性値³⁾を定義した. そして, 繊維体積含有率は $V_f=50\%$ としてUD-CFRTPのマイクロモデルを作成した. また解析条件として, ひずみ速度の水準は前節と同様 $\dot{\epsilon}=10^{-3}, 10^{-1}$ とし, 荷重条件はマクロひずみが5.0%となるような強制変位を定義した. さらに解析はL方向, T方向, LTせん断, TZせん断の計4方向に対し実行し, UD-CFRTPの異方性粘塑性挙動を予測した. なお, 数値材料試験の結果は4章にて, 異方性粘塑性体の材料パラメータの同定結果と併せて報告する.

3.2 異方性粘塑性構成則

本研究で用いる異方性粘塑性構成則は、2.1節で述べた等方性粘塑性構成則と概ね同一のものを用いる。異なるのは異方性を考慮するために Hill マトリクス M_{vp} を導入し、等方性粘塑性構成則では相当応力を用いて計算されていた箇所を以下に示す Hill の等価応力 σ_{vpHill} に置換して計算を行う点である。

$$\sigma_{vpHill} = \sqrt{\sigma : M_{vp} : \sigma} \quad (3)$$

この Hill 型の異方性粘塑性構成則を適用した単位 FEM モデルの4方向に荷重を作用させ、各軸方向の数値材料試験の結果が、3.1節で述べたマイクロモデルの数値材料試験の結果と一致するように、DE を用いて異方性粘塑性構成則のパラメータを同定した。

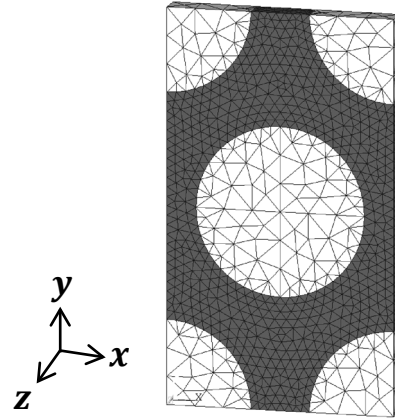


Fig.2 Analysis model [UD-CFRTP].

4. 解析結果

3.1節で述べた数値材料試験の結果と、3.2節で述べた同定結果の応力-ひずみ曲線を比較して Fig.3に示す。なお3.1節で述べた数値材料試験の結果は Fig.3の凡例において NMT (Numerical Material Test) と記述した。Fig.3から、本研究において採用した異方性粘塑性構成則を用いることで、UD-CFRTPの異方性粘塑性挙動を精度よく再現可能であるということが確認できる。

また、各軸で試験速度に応じて粘塑性挙動が変化しているのに対して、L方向の数値材料試験結果は降伏点が存在せず、試験速度を変化させても、応力-ひずみ曲線は同一の軌跡を描いた。これは今回、炭素繊維に線形弾性体の材料構成則を適用しているためであり、L方向の材料挙動は繊維の特性が支配的であることが要因であると考えられる。さらに、初期降伏点を越えた後の応力-ひずみ曲線の勾配は、各軸でその勾配の大きさが変化しているが、こちらもHillの異方性降伏曲面を適用することによって良好に再現することが可能であることが分かる。

5. 結言

本研究ではUD-CFRTPの母材に適用される熱可塑性樹脂の粘塑性挙動を材料試験と最適化手法を用いて同定し、UD-CFRTPの異方性粘塑性挙動を数値材料試験によって予測した。さらに、数値材料試験結果から異方性粘塑性構成則の材料パラメータの同定を行い、その予測精度の検証を行った。検証結果より、今回報告した材料パラメータの同定プロセスは、UD-CFRTPの異方性粘塑性挙動を良く表現できることがわかった。

今後は、この織物複合材等のより複雑な繊維形態を持つCFRTPの異方性粘塑性挙動の予測を試みる予定である。

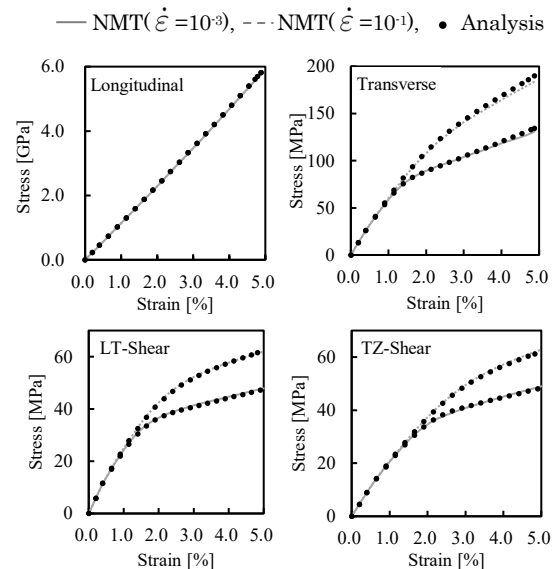


Fig.3 Stress-strain curve of analytical tensile test.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 寺田賢二郎, 非線形有限要素法－弾塑性解析の理論と実践－, 森北出版株式会社, 2012, pp.476-512.
- 3) 土田翔夢, 平山紀夫: 炭素繊維の異方性弾性係数の同定, 日本大学生産工学部第51回学術講演会概要, 4-22(2018), pp.405-406.
- 4) 山本晃司, 平山紀夫, 寺田賢二郎, 数値材料試験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, Vol82, No.840(2016), pp.16-00056.