計算工学講演会論文集 Vol. 28 (2023 年 5 月) 計算工学会

繊維強化樹脂の損傷モデルを用いた力学特性評価

Evaluation of fiber reinforced resin using damage material

杉山裕文 [1)] 山田敦郎 [2)] 岡澤重信 [3)]
Hirofumi Sugiyama, Atsuro Yamada and Shigenobu Okazawa

[1)]博 (工) 山梨大学　総合研究部　工学域　助教（〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11, E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)
[2)]山梨大学　大学院医工農学総合教育部工学専攻機械工学コース（〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
[3)]博 (工) 山梨大学　総合研究部　工学域　教授（〒 400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11, E-mail: sokazawa@yamanashi.ac.jp)

Fiber reinforced plastics are being applied to structural members, and the prediction of mechanical properties is of great importance. Fiber reinforced plastics contain not only base resin but also fibers, so it is necessary to evaluate the effect of the fibers on the mechanical properties. In this study, we will conduct a multiscale analysis using a damage model in the microscopic domain to consider the degradation. We confirm the effect of the damage model under some types of fiber angles using tensile testing.

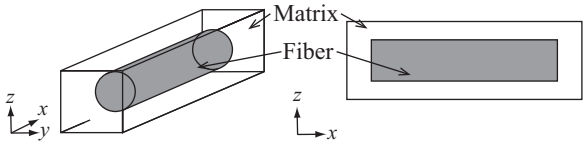
Key Words : *Short fiber reinforced plastics, Multi-scale analysis, Damage model*

1. はじめに

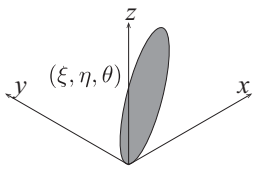
繊維強化樹脂（Fiber Reinforced Plastics, FRP）は軽量で比強度や比剛性が高いなど優れた性質を持っていることが知られている．そのため，構造部材を従来の金属材料から部分的に FRP に代替するなど輸送機器への利用が拡大している．複合材料の利用が拡大するにともない，力学特性や劣化など材料の特性を把握することが非常に重要である．しかし，材料試験をすべての条件に対して実施することは困難であり，数値シミュレーションを用いた予測が非常に有効である．

これを踏まえて，母材と繊維からなるミクロ構造に対して数学的均質化法を用いた巨視的な力学特性の評価がある [1,2]．著者らはこれまでにマルチスケール解析を用いて短繊維強化樹脂に対する材料特性の評価を行ってきた [3]．ここでは，3 つの繊維配向をもつ試験片を用いた異なる 2 つの引張速度による引張試験の試験結果に対して，力学特性の予測を行なってきた．その結果，速度が遅い場合の試験結果にたいしては精度よく予測できることを確認した．

樹脂の機械的特性予測において劣化や強度を予測するためには，内部で発生している破壊を考慮する必要がある．実際に破壊をモデル化して取り扱うことは計算コストが高いことや実験での確認が難しいことを踏まえて，連続体損傷力学に基づく損傷モデルに着目する．本研究では，ミクロ構造の母材に対して損傷モデルを採用したマルチスケール解析を行い，繊維配向の影響を考慮した巨視的な力学特性を評価できるか確認する．はじめに，マルチスケール解析について概説した後，損傷モデルを用いた材料構成則について説明する．数値解析例では，非線形性が強くない変形領域を対象として数値シミュレーション結果を検討する．マルチスケール解析については，Altair HyperWorks®Mechanical Solvers 2022 内の Multi-scale Designer を使用した．



図–1 Illustration of unit cell



図–2 Definition of the fiber direction

2. マルチスケール解析

本研究では Fig.1 に示すように樹脂材料が繊維を完全に覆った状態を想定したマルチスケール解析を行う．ミクロ構造に対して数値材料試験を実施し次数低減モデルによる計算コストを削減している [4]．繊維は丸棒としてモデル化しメッシュはテトラメッシュとしてモデル化する．ミクロ構造の弾性成分は引張試験より取得したデータを用いて最適化計算により取得する．

マクロスケール解析において繊維配向の影響を考慮するために繊維配向テンソルを導入する．均質化材料物性に対して Fig.2 に示す繊維配向テンソルを作用させることで配向を反映する．

3. 損傷構成則

本節では損傷モデルの定式化について説明する．使用する損傷モデルは等方性損傷モデルである [5]．

ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}$ が式 (1) に示すように弾性部分 $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{el}}$ と塑性部

© 一般社団法人日本計算工学会

分 $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}}$ に加算的分解できると仮定する．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{el}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}} \tag{1}$$

このとき，ひずみの偏差成分が次のように加算分解できるとする．

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{dev}} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{el}}_{\mathrm{dev}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{dev}} \tag{2}$$

ここで，偏差成分は次式で与えられる．

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{dev}} = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{3}\mathrm{tr}\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{I} \tag{3}$$

ここで，$\boldsymbol{I}$ は 2 階の恒等テンソルである．

さらに，損傷変数として w を導入する．w は 0 から 1 までをとる変数である．損傷を考慮した材料定数 λ, μ はそれぞれ次式のように表せる．

$$\lambda = (1-w)\lambda_0 = (1-w)\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{4}$$

$$\mu = (1-w)\mu_0 = (1-w)\frac{E}{2(1+\nu)} \tag{5}$$

ここで，E はヤング率および ν はポアソン比である．これを踏まえると応力-ひずみ関係は次式のよう表せる．

$$\boldsymbol{\sigma} = (1-w)C_0 : \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{el}} = (1-w)C_0 : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{p}) \tag{6}$$

C_0 は 4 階のテンソルであり等方性材料の場合は次式で与えられる．

$$C_0 = \lambda_0 \boldsymbol{I} \otimes \boldsymbol{I} + \mu_0 \mathcal{I} \tag{7}$$

ここで，$\mathcal{I}$ は 4 階の恒等テンソルである．

式 (2)，(5) を考慮すると応力の偏差成分 $\boldsymbol{s}$ は以下のように与えられる．

$$\boldsymbol{S} = 2\mu\left(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{dev}} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{dev}}\right) \tag{8}$$

さらに，式 (8) を用いると降伏関数 f は次のようになる．

$$f = \|\boldsymbol{S}\| - \sqrt{\frac{2}{3}K(\alpha)} \tag{9}$$

ここで，K は硬化則，α は硬化に関連した内部変数である．

次に，損傷の発展則について説明する．まず，相当ひずみを以下の式から取得する．

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \tag{10}$$

この時任意に設定したしきい値 w_{cri} を用いて損傷の発展を以下の式で評価する．

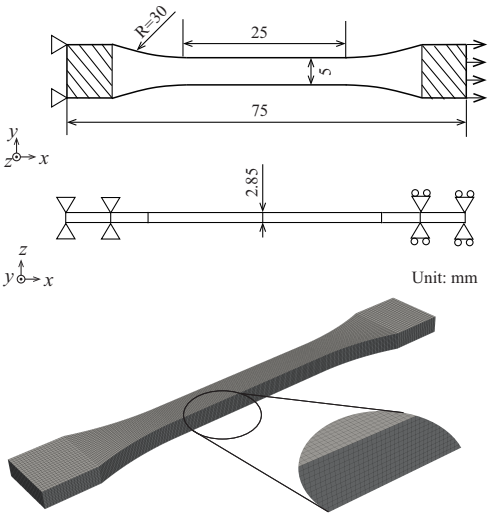
$$g(\bar{\varepsilon}, r) = \bar{\varepsilon} - w_{cri} \tag{11}$$

損傷の発展則は次のように与える．

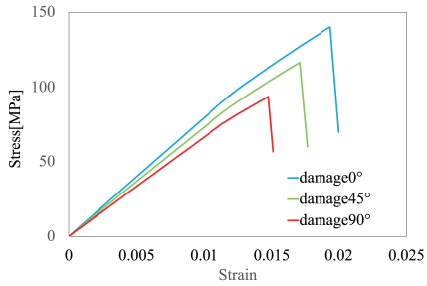
$$\dot{w} = \gamma G(\bar{\varepsilon}) \tag{12}$$

$$\dot{\gamma} = \gamma \tag{13}$$

ここで，G は単調関数である．



図–3 FE model in macro simulation



図–4 Stress–Strain curve

4. 数値計算例

平板引張試片を用を想定して，繊維配向 0°，45°，90° の 3 種類に対して計算を行う．Fig.3 に示す解析モデルを用いて解析を行い得られた結果を 4 に示す．この結果より角度による影響が確認できる．

5. まとめ

本研究ではミクロ構造に損傷モデルを用いたマルチスケール解析を実施し，繊維配向による違いについて検討した．今後さらに，損傷モデルのパラメータ決定や速度依存性などを考慮した検討を進めていく．

参考文献

[1] Zheng Yuan and Jacob Fish, Hierarchical model reduction at multiple scales, *Int. J. Numer. Methods in Eng.*, Vol. 79, pp.314–339, 2009.

[2] 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，Vol. 82，No. 840，2016.

[3] 杉山裕文，大石哲，岡澤重信，短繊維強化樹脂の機械的特性評価に関する基礎的検討，計算工学講演会論文集，Vol. 25，2020.

[4] Altair Engineering Inc, Altair Multiscale Designer User Manual, 2022.

[5] J.C. Simo and J.W. Ju, Strain- and stress-based continuum damage models I. formulation, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 23, No. 7, pp. 821–840, 1987.

© 一般社団法人日本計算工学会