卒業論文要旨

均質化法を用いた FRP のマルチスケール成形誘起変形解析

Multiscale analysis of process-induced deformation of FRP using Homogenization Method

システム工学群
先端機械・航空材料工学研究室　1220183　若松　宗真

1　緒言

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics : FRP)とはエポキシ樹脂などの高分子材料を母材として炭素繊維(Carbon)やガラス繊維(Glass)を強化材として加えた複合材料である．FRP は軽量で高い強度，錆びない特性を持っていることから幅広い分野で用いられている．FRP を成形する際，脱型後に spring-in や spring-back といった意図しない変形が生じることがある．このような FRP の変形が予測できれば成形後品質向上が期待できると考える．

FRP の成形誘起変形解析にはその物性値が必要となるが繊維の強化形態や体積分率(Volume Fraction : VF)よって特性が大きく異なるため，強化形態や VF を変更するたびに試験により材料特性を得なければならない．特に樹脂の特性は成形中に大きく変化するので材料試験に大きなコストがかかる．そこで樹脂と繊維の特性からマクロ特性を予測できれば，効率的に成形誘起変形を予測することができると考えた．

本研究では均質化法を用いて一方向 GFRP のマクロ特性の予測を試みた．また，高温時の樹脂の完全緩和状態を考慮して，線形計算を行った．そして硬化度と VF がマクロ特性に与える影響を調べた．

2　解析方法

2．1　均質化法

均質化法とは FRP のような一様な周期構造を持つ材料に用いることができる．周期構造の最小単位ユニットセルからマクロ特性の予測をする手法であり，またマクロ応力分布やひずみ分布から，ミクロの応力分布を得ることができる．

仮想的な均質体のマクロ変位，応力についてその力学挙動を支配する方程式は次のようになる．[1]

$$\boldsymbol{\partial}_x^T\boldsymbol{\Sigma} + \overline{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{D}^H\boldsymbol{E}_M \tag{2}$$

ここで$\boldsymbol{\Sigma}$はマクロ応力，$\boldsymbol{E}_M$はマクロひずみ(機械ひずみ)，$\overline{\boldsymbol{B}}$は物体力である．$\boldsymbol{D}^H$は仮想的な均質体としての弾性係数行列，すなわち均質化弾性係数行列である．上付き添え字の H は均質化された(homogenized)を表している．

$$\boldsymbol{D}^H = \begin{bmatrix} D_{11}^H & D_{12}^H & D_{13}^H \\ D_{12}^H & D_{22}^H & D_{23}^H \\ D_{13}^H & D_{23}^H & D_{66}^H \end{bmatrix} \tag{3}$$

一方，ユニットセルでのミクロ変位，ひずみの支配方程式は

$$\boldsymbol{\partial}_y^T\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{0} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{5}$$

となる．ここで$\boldsymbol{\sigma}$はミクロ応力，$\boldsymbol{\varepsilon}$はミクロひずみである．
本研究では，以下のようにひずみ $\boldsymbol{E}$ は

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_M + \boldsymbol{E}_T + \boldsymbol{E}_C \tag{6}$$

とする．機械ひずみ$\boldsymbol{E}_M$に加えて熱ひずみ$\boldsymbol{E}_T$と硬化ひずみ$\boldsymbol{E}_C$の和として考える．

熱ひずみ$\boldsymbol{E}_T$，マクロ熱膨張係数$\boldsymbol{A}^H$とすると

$$\boldsymbol{E}_T = \Delta T\mathbf{A}^H \tag{7}$$

と表される．これより$\Delta T = 1$，$\boldsymbol{E}_M = 0$として，

$$\mathbf{A}^H = -(\boldsymbol{D}^H)^{-1}\overline{\boldsymbol{\Sigma}}^{(1)} \tag{8}$$

より$\mathbf{A}^H$が求まる．

また，硬化に伴う熱収縮$\boldsymbol{E}_C$，硬化度α，熱収縮率$\frac{d\boldsymbol{E}_C}{d\alpha}\Delta\alpha$とすると

$$\boldsymbol{E}_C = \frac{d\boldsymbol{E}_C}{d\alpha}\Delta\alpha \tag{9}$$

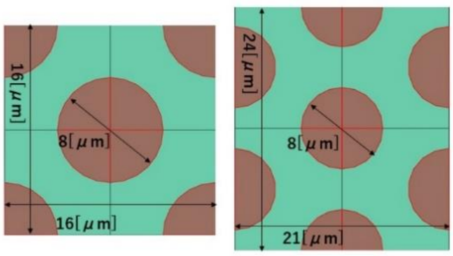
と表される．これより$\Delta\alpha = 1$，$\boldsymbol{E}_M = 0$とすると

$$\frac{d\boldsymbol{E}_C}{d\alpha} = -(\boldsymbol{D}^H)^{-1}\overline{\boldsymbol{\Sigma}} \tag{10}$$

より$\frac{d\boldsymbol{E}_C}{d\alpha}$が求まる．

2．2　FEM モデルと物性値

本研究では，一方向 GFRP の横方向断面について二次元のマクロ剛性の計算を行った．汎用有限要素法ソフトウェア ABAQUS を用いて図 1 のようなユニットセルを二つ作成した．図 1 はガラス繊維を四角形に配置したユニットセル((a) square)と六角形に配置したユニットセル((b) hexagon)である．ガラス繊維の直径は 8[μm]とした．それぞれ二つのモデルは繊維の VF を 40%～70%に変えてモデルを作成した．



(a)　square　　　　(b)　hexagon

Fig.　1　　Unit cell model (VF=40%)

Table. 1 Mechanical properties of fiber and resin

Glass	
Young's modulus E[GPa]	Poisson's ration ν
70	0.3
Epoxy Resin(cured, room temp)	
Shear modulus G_0[GPa]	Poisson's ration ν_0
0.978	0.38

また繊維と樹脂(硬化後，室温)の物性値は先行研究[2]より表 1 とした．先行研究から，無次元緩和せん断剛性$\bar{G}_\alpha$を

$$\bar{G}_\alpha = 3.179\alpha - 2.179(\alpha > 0.69) \tag{11}$$

とした．この時緩和せん断剛性G_∞は

$$G_\infty = G_0\bar{G}_\alpha \tag{12}$$

と表される．体積弾性率がほぼ変化しないと仮定すると各硬化度でのヤング率とポアソン比は表 2 のように得られた．

Table. 2 Mechanical properties of resin curing cure

Degree of cure α	Young's modulus E_α [GPa]	Poisson's ration ν_α
0.70	0.135	0.49
0.80	1.04	0.45
0.90	1.89	0.42
1.0	2.67	0.38

また先行研究[2]より，樹脂の硬化度に対する硬化ひずみε_αの割合を

$$\frac{d\varepsilon_\alpha}{d\alpha} = -0.01769 \tag{13}$$

とした．

3 解析結果

3．1 ミクロ応力分布

図 2 に硬化度 0.7，Vf40%の square モデルにひずみ$\varepsilon_x = 1$を与えたときのミーゼス応力の分布を示す．図より点 J で樹脂が最大応力 324[MPa]を示すことがわかる．図 3 は硬化度 0.7，Vf40%の square モデルにひずみ$\gamma_{xy} = 1$を与えたときのミーゼス応力の分布である．図より樹脂の最大応力は点 K で 251[MPa]となることがわかった．したがって引張りひずみを与えた場合は，45 度方向の繊維，樹脂界面から破壊が生じ，せん断ひずみを与えた場合は繊維間の樹脂が破壊すると予想できる．

3．2 マクロ特性

図 4 に VF40 の square モデルのマクロ剛性 Q を硬化度αに対して示す．図より剛性 Q11，Q12，Q66 ともに硬化度が上昇するにつれて剛性は非線形的に増加していることがわかる．Q12 と Q66 はほぼ同程度であり．また Q11 の約 45%の値を示していることがわかる．

図 5 に VF40 の hexagon モデルのマクロ剛性 Q を硬化度αに対して示す．図より hexagon モデルも square モデルと同様な非線形的に増加していることがわかる．square モデルと同様に Q22 と Q66 は同程度の値を示していることがわかる．しかし square モデルと異なり Q11 と Q22 は異なる値となった． この理由は square モデルは 90° 対称のモデルだが，hexagon モデルは 60° 対称であるためである．

図 6 に，Vf に対する square モデルのマクロ剛性 Q11 を，硬化度 0.7,0.8,0.9,1.0 についてそれぞれ示す．図より，硬化度に関わらず VF が増加するにしたがって Q11 が非線形的に増加することがわかった．これは hexagon モデルでも同様であった。

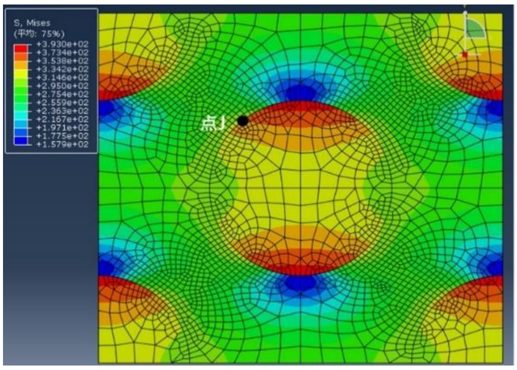


Fig. 2 Mises stress of square model
(α = 0.7, $\varepsilon_x = 1$, Vf=0.4)

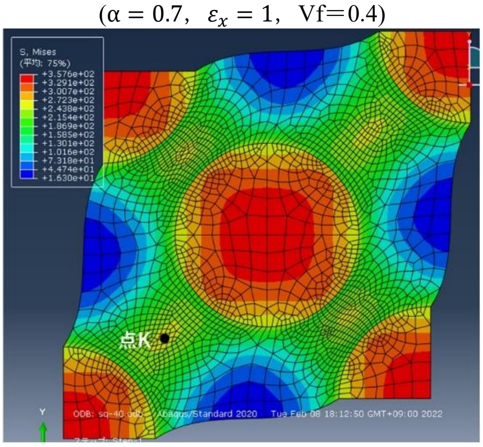


Fig. 3 Mises stress of square model
(α = 0.7, $\gamma_{xy} = 1$, Vf=0.4)

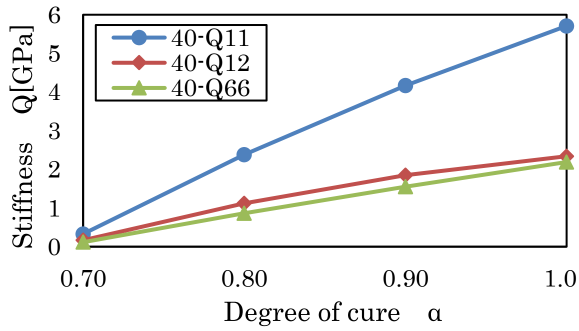


Fig. 4 Relationship between stiffness of square model and degree of cure (Vf=0.4)

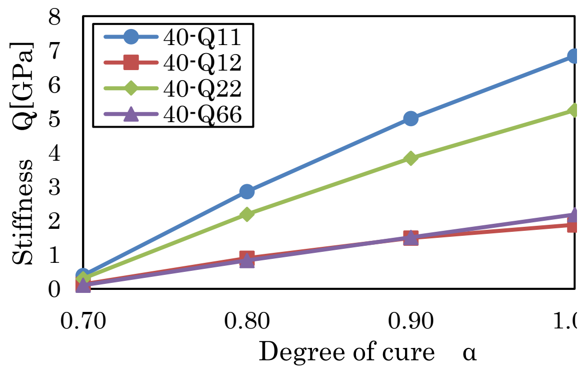


Fig. 5 Relationship between stiffness of hexagon model and degree of cure (Vf=0.4)

Vf40%のときの square モデルと hexagon モデルの硬化度に対するマクロ熱膨張係数と硬化収縮率を，図 7，8 にそれぞれ示す．図より，硬化度が上昇するにつれて熱膨張係数と硬化収縮率の絶対値は非線形的に減少することがわかった．しかし，その変化率は硬化度 0.7 から 1.0 までで 3-4%程度でしかないことが明らかになった．また，square モデルと hexagon モデルの熱膨張係数と硬化収縮率は，やや違いが見られるもののほとんど変わらないことがわかった．以上から，硬化進展によってマクロ剛性は大きく変化するが，マクロ熱膨張係数と硬化収縮率はほとんど変化しないことがわかった．

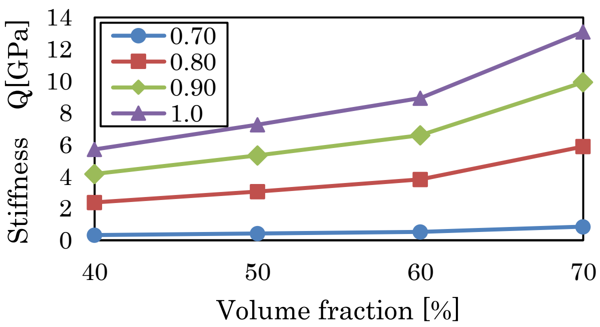


Fig. 6 Q11 of square model at various volume fraction and degree of cure

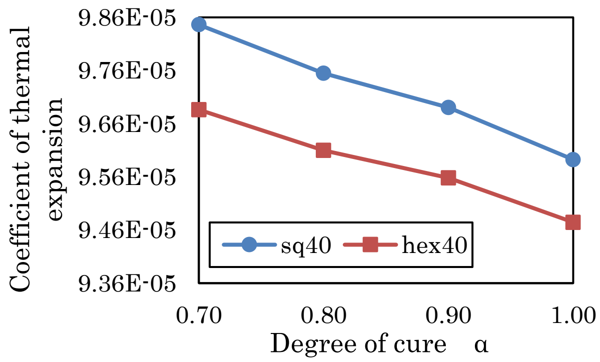


Fig. 7 Coefficient of thermal expansion as a function of degree of cure (Vf=40%)

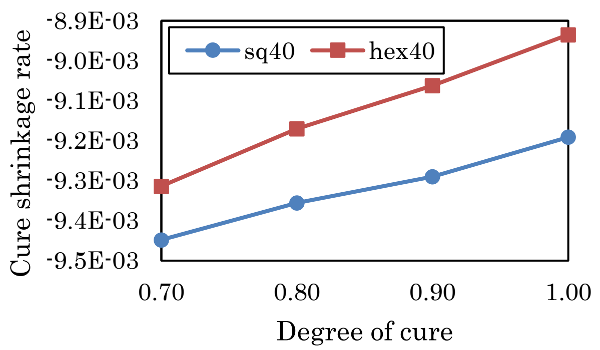


Fig. 8 Cure shrinkage rate as a function of degree of cure (Vf=40%)

4 結言

本研究では均質化法を用いて，成形中の完全緩和状態での一方向 GFRP のマクロ横方向剛性と熱膨張係数，硬化収縮率を，さまざまな硬化度，繊維含有率に対して調査した．また，ユニットセルモデルとして square モデルと hexagon モデルの 2 種類の配置を考慮した．その結果，以下の知見が得られた．

(1) 樹脂の緩和弾性が硬化度に対して線形的に変化する場合でも，FRP のマクロ緩和剛性は硬化度に対して非線形に変化する．

(2) square モデルと hexagon モデルでは，同じ Vf であっても Q11, Q22 の値は異なる．これは，square モデルが 90° 対称であるのに対して hexagon モデルが 60° 対称であるためである．

(3) 硬化進展によってマクロ剛性は大きく変化するが，マクロ熱膨張係数と硬化収縮率はほとんど変化しない

参考文献

(1) 寺田賢二郎，平山紀夫，山本晃司，数値材料試験 有限要素法によるマルチスケール解析，丸善出版株式会社，2021，pp137

(2) 川上明哲 CFRP 積層板の成形誘起変形 高知工科大学 2019，pp14，pp15