

成形条件が FRP の成形誘起ひずみに与える影響に関する研究

Effect of molding condition on process-induced strain of FRP

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1205060 山崎 平弥

1. 諸言

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics : FRP)は、ガラスや炭素などの繊維を合成樹脂で固めて補強した複合材料であり、軽量性と強靭さを兼ね備えている。そのため FRP は、航空分野、電子機器材料、スポーツ用品など多くの分野で扱われている。さらに近年では、複雑な形状や大型の FRP 製品も数多く登場し、FRP の需要が年々増加している。FRP の成形過程では強化繊維に残留応力が生じ、それが損傷特性に影響を与えることが知られている。FRP の損傷はその製品の品質に影響するため、損傷が生じにくい FRP が望まれている。筆者らは、成形中の樹脂の力学モデルを提案し、強化繊維に生じる変形の予測が可能であることを示している。また、埋め込み FBG (Fiber Bragg Grating) センサを用いた成形ひずみのその場測定手法を提案し、GFRP の強化繊維に生じる成形ひずみの測定に成功している。

本研究では、温度や圧力などの成形条件が FRP 強化繊維の成形誘起ひずみに与える影響を明らかにすることを目的として、温度・構造・硬化度連成解析によって GFRP の成形中における強化繊維に生じるひずみの FEM シミュレーションを行った。

2. GFRP の成形ひずみシミュレーション

2.1 構成方程式

GFRP を構成する樹脂を硬化によって物性の変化する線形等方性粘弾性体として扱い、FEM 解析を行った、その構成方程式は以下のように表される。

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\alpha, \tau - \tau') \dot{e} d\tau' + I \int_0^t K(\alpha, \tau - \tau') \phi d\tau' \quad (1)$$

ここで、 σ は応力テンソル、 e は偏差ひずみテンソル、 G はせん断弾性率、 K は体積弾性率、 I は単位テンソル、 ϕ は体積ひずみ、 τ は擬似時間である。ここで、硬化中の粘弾性特性の式を、硬化度をパラメータとするプロニー級数で以下のように表した。

$$G(\alpha, t) = G_0 A_\alpha(\alpha) \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right\} \quad (2)$$

ここで、 g_i はプロニー級数の係数、 τ_i は緩和時間であり、DMA を用いた実験により求めた。また、 A_α は正規化長期弾性率の硬化度依存性を表す係数であり、本研究では剛性シフトファクタと呼ぶ。このパラメータはレオメータにより測定した。以上の式を差分化し、汎用有限要素法ソフトウェア ABAQUS にユーザーサブルーチンとして組み込んだ。

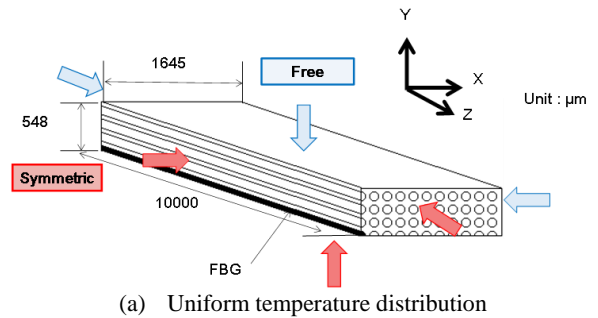
2.2 FEM 解析

本研究では、FEM により熱・構造・硬化度の連成解析を行った。硬化度の計算には Kamal モデルを用い、ユーザーサブルーチンとして組み込んだ。また、負荷条件として境界面に温度を、樹脂に硬化収縮ひずみを与えた。なお、硬化収縮ひずみはディラトメータを用いた実験により、硬化度の関数として求められている。

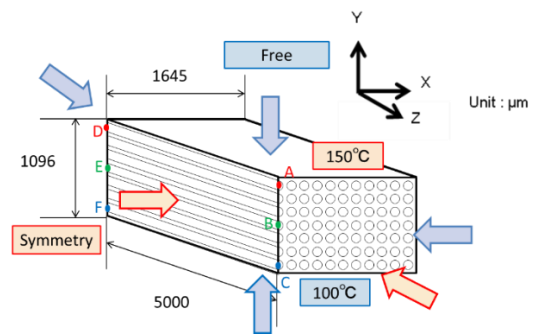
図 1(a) に温度一律の条件で用いた FEM モデルを示す。このモデルは GFRP の一方向強化モデルであり、光ファイバセンサを用いて繊維に生じる成形ひずみを測定することで解

析結果の検証が行えるため、強化繊維を光ファイバとしたものである。また、光ファイバを横方向に 21 本並べた層を 7 層重ねた材料の 1/8 モデルであり、要素には 2 次の熱-構造連成要素を用いた。ひずみの評価には、中央の繊維の 5mm の平均ひずみを用いた。

図 1(b) に、温度分布を与えた条件で用いた FEM モデルを示す。図 1(b) と異なり 1/4 モデルであり、また全長を半分としている。このモデルでは、上面に 150°C、下面に 100°C の温度を与えて、温度分布を生じさせている。また、図中の A~F は、ひずみの計測点である。



(a) Uniform temperature distribution



(b) Non-uniform temperature distribution

Fig.1, FEM model of used for simulation

3. 結果および考察

3.1 昇温速度の影響

温度条件として、室温から 100 度まで加熱し、3 時間の間 100°C を維持し、その後 46 分かけて室温まで自然冷却する条件を与えた。昇温時間として、40 分、100 分、200 分の 3 パターンを与えた。その時の温度パターンを図 2 に、解析結果を図 3 に示す。図より、昇温区間が短い (昇温速度が速い) ものほど、成形残留ひずみが小さくなっていることが分かる。これは、昇温区間が短いものほど 100°C に達した時の硬化度が大きくそして剛性が高くなり、その結果加熱時の熱膨張が大きく、100°C の定温区間で生じる未反応分の硬化収縮ひずみが小さくなるためである。以上により、昇温速度を遅くすることによって、繊維に生じる成形残留ひずみが小さくなることが分かった。

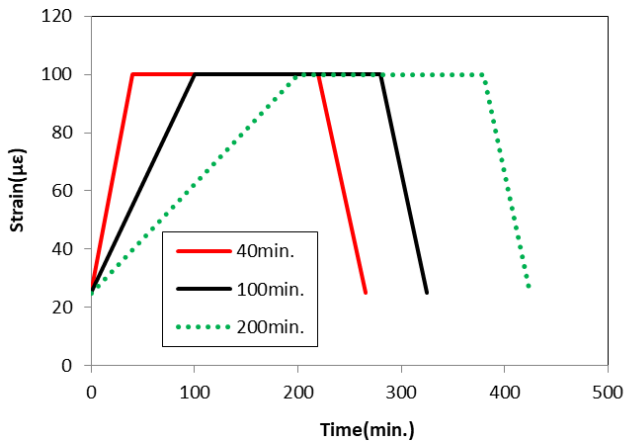


Fig.2, Temperature patterns as functions of molding time

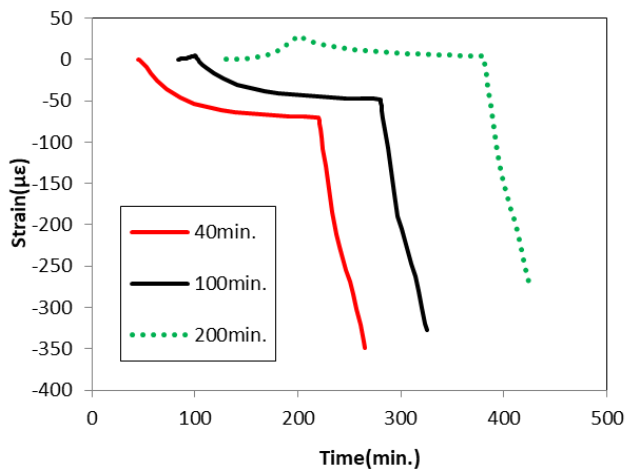


Fig.3, FEM simulation of process-induced strain of reinforcement fiber by different three temperature profiles

3.2 圧力条件の影響

続いて、一面より圧力を与えた場合の成形ひずみ解析を行った。硬化開始と同時に繊維と垂直方向に 1MPa, 3MPa, 5MPa の圧力を加え、冷却開始時に圧力を取り除いた。図 4 に解析結果を示す。図より、圧力を加えている区間で圧力に比例したひずみが生じるが、成形ひずみにはほとんど影響を与えておらず、その結果除圧後の繊維の残留ひずみへの影響はほとんどないことが分かった。

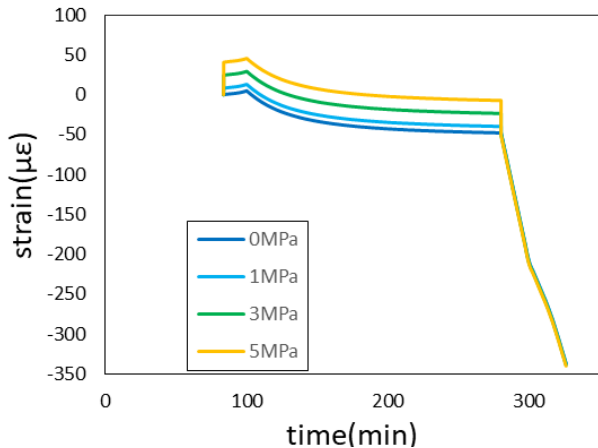


Fig.4, FEM simulation of process-induced strain of reinforcement fiber by different pressure profiles.

3.3 温度・硬化度分布の影響

温度に分布が生じた場合の繊維に生じる成形ひずみのふるまいを調べるために、昇温時間 40 分、最高温度を上層 150°C、下層 100°C として解析を行った。図 5 に、各計測点で測定されたひずみ履歴を示す。なお、計測点 A,B,C は材料中央部、D,E,F は端部であり、A と D が高温部、C と E が低温部となる。また、この条件で行ったシミュレーションに関しては、硬化度 0 の状態から計算を行っているため、昇温開始時からデータを取っている。

図より、端部の D,E,F に生じる値は、成形時の硬化収縮によるひずみ量 (40~240 分) と冷却時の値とともに、A,B,C の値よりもずっと小さいことが分かる。この理由は、端部ではシアラグ効果によって樹脂に大きなせん断変形が生じるためであると思われる。

一方、中央部では A,B,C の位置で互いに異なる成形ひずみが生じ、それが繊維の残留ひずみに影響を与えていることが明らかとなった。硬化プロセス終了時 (冷却開始時) の成形ひずみは高温部 (A) が最も大きく正のひずみを取る。冷却時圧縮熱ひずみは高温部が最も大きい、成形ひずみを考えた場合の残留ひずみ A と C の差は、成形ひずみを考えない、つまり冷却開始のひずみを 0 とした場合の値よりも小さくなることが分かった。

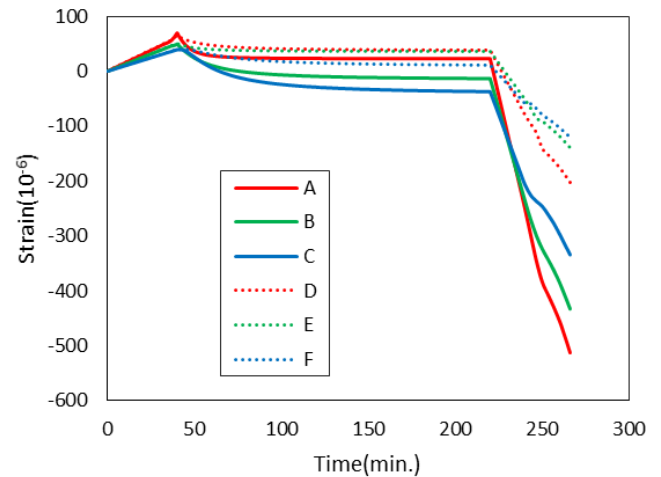


Fig.5, Process-induced strain of reinforcement fiber when non uniform temperature distribution is applied.

4. 結言

昇温区間を長くする、つまり昇温速度を小さくすることにより、強化繊維の成形残留ひずみが小さくなることが分かった。それに対して、圧力は成形残留ひずみにはほとんど影響を与えないことが分かった。温度および硬化度分布が生じる場合、成形残留ひずみにも分布が生じるが、成形ひずみの影響によって、それを考慮しない場合よりもひずみ分布の最大値と最小値の差は小さくなることが分かった。

文献

- (1) 高坂 達郎, 逢坂 勝彦, 澤田 吉裕, “光ファイバひずみセンサによる樹脂の硬化収縮ひずみ測定” 日本機械学会論文集, Vol.60, No.5(2011), pp.432-438
- (2) 高坂 達郎, 逢坂 勝彦, 澤田 吉裕, “FBG センサを用いた樹脂のポストキュア過程のモニタリング” 日本機械学会論文集, Vol.61, No.7(2012), pp.648-653
- (3) 吉田 淳, “エポキシ樹脂の物性に及ぼすポストキュアの影響” 2008 年 2 月大阪市立大学大学院研究科機械物理系専攻論文