

1. 緒言

繊維強化プラスチックは、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る。FRP の成形過程では強化繊維には残留応力が生じ、それが損傷特性に影響を与えることが知られている。しかし、成形中の残留応力の評価はほとんど行われていない。本研究では、強化繊維に光ファイバを使用することで、GFRP の残留応力の測定に成功している。また、成形中の樹脂の力学モデルを提案して、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。

本研究では、温度条件が残留応力に与える影響を調べることを目的として、FEM シミュレーションを行った。

2. 光ファイバを強化繊維としたモデル材料

本研究では GFRP の強化繊維に生じるひずみを測定するために、光ファイバを強化繊維に使用することで FBG センサと強化繊維の形状の差を無くし、その中央に光ファイバセンサを埋め込むことにより強化繊維に生じるひずみを測定することを可能としている。その形状と成形方法を紹介する。

まず、外枠 4.5cm×3cm で内枠 2.5cm×1cm に切った紙を 7 枚用意する。次に、市販の光ファイバの被覆を剥ぎ 3cm の長さに切断する。紙の中央部に光ファイバを 21 本一方向に並べてテープで固定したものを 6 枚と、20 本並べたものを 1 枚作る。次にエポキシ樹脂を塗り付けて含浸させ、積層していく。その際に、積層 4 枚目に 20 本並べたものを入れ、そこに繊維方向に沿って FBG センサと熱電対を埋め込む。最後に樹脂の硬化促進のためマルチオーブンの中で加熱処理を行い、最後に常温で冷却を行う。

3. GFRP の成形ひずみシミュレーション

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。

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

ここで、 σ は応力テンソル、 ϵ 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、 t は擬似時間である。ここで、硬化中の粘弾性特性の式を

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

と定義すれば、

$$S(t) = 2G_0(\bar{\epsilon} - \sum_{i=1}^{N_G} g_i \bar{\epsilon}_i) \quad (3)$$

が得られる。

また、求められたプロニー級数の係数 g_i と緩和時間 τ_i を硬化後の粘弾性特性として解析に用いた。温度が粘弾性特性に与える影響についてはアレニウスの式を用いて表した。

$$A_T = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

ここで、 A_T は反応速度定数、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度である。

以上の式を、汎用有限要素法ソフトウェアである ABAQUS にユーザーサブルーチンとして組み込んだ。解析に使用したモデルは、実験で作製されるモデル材料の 1/8 モデルであり、それを図 1 に示す。解析では、室温 25°C から 100°C までの加熱工程の時間を 50 分 (Case A)、100 分 (Case B)、200 分 (Case C) と変化させたシングルステップの温

度パターンを与えた。また、全ての温度条件で、100°C での温度保持時間は 3 時間、冷却工程は室温まで 46 分とした。

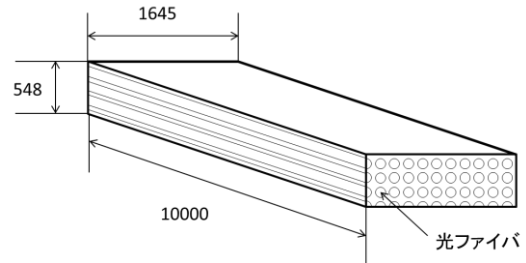


図 1 FEM モデル

4. 結果および考察

図 2 に、全ての温度パターンに対して計算した光ファイバに生じたひずみを、成形温度と共に示す。グラフより、繊維に生じる最終的な残留ひずみは、硬化過程で生じるひずみと冷却時の熱ひずみの組み合わせであることが分かる。

定温区間で生じる硬化収縮ひずみに着目すると、加熱工程が短いほど、つまり昇温速度が速いほど硬化収縮ひずみが大きくなっていることが分かる。この主な原因は、樹脂の硬化収縮ひずみは硬化度の変化に比例することから、100°C に達したときの硬化度が 1 に近いほど、定温区間で生じる硬化収縮ひずみ量が小さくなるためである。

加熱区間に着目すると、昇温速度が速くなるほど加熱区間に生じるひずみ変化が小さくなることが分かる。これは、加熱区間における硬化度が小さい場合は樹脂剛性が著しく低いので、繊維に伝達されるひずみが小さいためである。特に Case C においては、定温区間での硬化収縮ひずみが小さいだけでなく、加熱工程の樹脂の熱膨張によって繊維に引張ひずみが生じるので、結果として繊維に生じる残留ひずみが最も小さくなることが分かる。

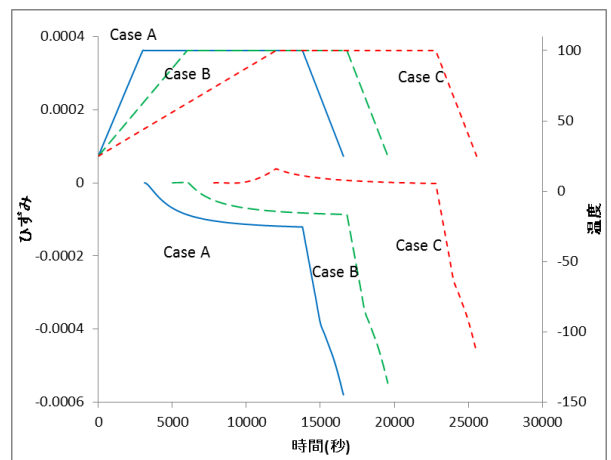


図 2 GFRP の成形ひずみ解析

5. 結論

温度条件が繊維の残留ひずみに与える影響を FEM 解析によって明らかにした。最終的には、成形中のひずみを FBG 光ファイバセンサにより実測して、モデルの検証を行いたい。