

FRPの硬化収縮を考慮したマルチスケールシミュレーション

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 齋藤 理沙
 東北大学大学院工学研究科 学生会員 山口 裕矢
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. はじめに

FRP（繊維強化プラスチック）の成形時において基質材料である樹脂の硬化収縮により発生する残留応力や変形が問題となっており、それらの数値シミュレーションによる精度の高い予測が求められている。複合材料であるFRPにはマルチスケール解析が適しているといえるが、樹脂の硬化収縮を考慮した均質化法に基づくマルチスケール解析手法は未だ確立されていない。本研究では樹脂の硬化に依存した材料挙動の変化を考慮したFRPの非線形マルチスケール解析手法の構築を目的とし、ユニットセルの数値材料試験方法を提案する。

2. 樹脂の構成則

本研究では、樹脂の硬化を引き起こす化学反応の反応率である硬化度 z を硬化の尺度として用いる。硬化度は温度依存の反応速度モデル¹⁾を用いて算出され、図-1のように時間や温度に依存して変化する。

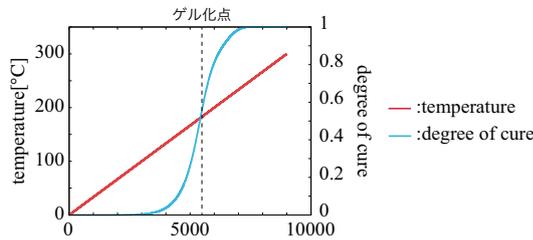


図-1 温度、硬化度時刻歴

樹脂は粘弾性を仮定し、構成則には図-1に示すような一般化 Maxwell モデルを採用する。硬化に伴う材料挙動の変化を考慮するために、次式のように平衡部のせん断弾性係数 G_∞ 、熱膨張係数 α 、ガラス転移温度 T_g を硬化度に依存した関数²⁻⁴⁾とする。

$$G_\infty = \left(\frac{z^2 - z_{gel}^2}{1 - z_{gel}^2} \right)^{8/3} \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} (-133.56z + 174.27) \cdot 10^{-6} & T \leq T_g \\ 84.6 \cdot 10^{-6} & T > T_g \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{T_g - T_{g0}}{T_{g\infty} - T_{g0}} = \frac{\lambda z}{1 - (1 - \lambda)z} \quad (3)$$

また、硬化収縮によるひずみ量は硬化度に対して線形変化するものとし、その係数(CCS)を β とする。

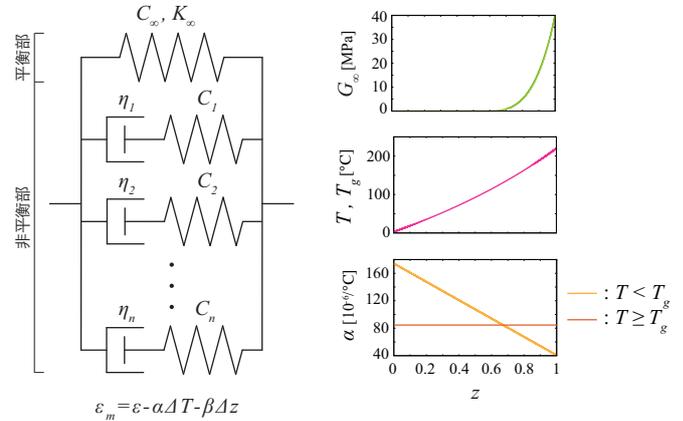


図-2 樹脂の構成則の概略図

3. マクロ材料パラメータ同定

3.1 パラメータ同定方法

粘弾性モデルにおいて一定ひずみ \bar{E} を加えた場合、応力緩和曲線を表す以下の緩和弾性係数テンソル C_r を算定することができる。

$$\Sigma = C_r(t) \bar{E} \quad (4)$$

$$C_r = C_\infty + \sum_{i=1}^{n_{Maxwell}} C_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (5)$$

本研究では粘弾性構成則における均質化係数を緩和弾性係数 C_r と数値材料試験結果の各計測ステップの二乗和を最小化することによって導出する。

均質化熱膨張係数と均質化硬化収縮係数を求めるには簡略化の為にダッシュポット部分を排除し、弾性材料とみなして温度や硬化度の変化を与える数値材料試験を実施する。また、熱膨張ひずみと硬化収縮ひずみを分離するために硬化収縮係数を0にした場合の非機械ひずみを熱膨張ひずみとし、全非機械ひずみと熱膨張ひずみの差を硬化収縮ひずみとして算出する。

2節で述べたとおり、樹脂の弾性係数が硬化度によって変化するため、均質化係数も硬化度に依存する。したがってパラメータ同定はいくつかの硬化の程度を選定して各硬化度ごとに行なった上で、最終的にマクロ係数と硬化度の関係を導出する。

3.2 数値材料試験

解析対象とするユニットセルを図-3に示す。樹脂がゲル

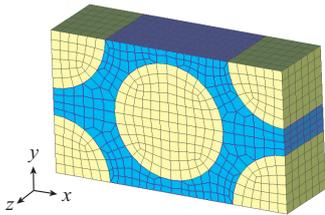


図-3 一方向繊維強化材のユニットセル

状態となるゲル化点（本解析では $z = 0.577$ ）までは液体状態であるため内部応力は生じないと仮定し本研究ではゲル化点以降の範囲で解析を行う。

緩和弾性係数によって同定されるパラメータは平衡部と非平衡部の係数テンソル C_∞ , C_i ($i = 1, \dots, n_{Maxwell}$) である。数値材料試験の結果と同定されたパラメータを成分ごとに図-4, 図-5 に示す。ここで、成分 C_{3333} は樹脂の緩和挙動に対して繊維の剛性ははるかに強く、ほとんど緩和しない為パラメータ同定からは除外する。また、ユニットセルは z 軸方向が繊維配向と一致する横等方性であるため、 C_{xxxx} と C_{yyyy} , C_{yyzz} と C_{zzxx} , C_{yzyz} と C_{zxxz} はそれぞれ同程度の値となっている。

係数 C_∞ は式 (1) でも表される樹脂のせん断弾性率の硬化度依存性と同様の傾向を示すものとして同定されている。また、非平衡部の係数 C_i のうち成分 C_{1122} , C_{2233} , C_{3311} は平衡部と同じく式 (1) と同様の硬化度依存性を示す関数で同定され、その他は硬化度に対して依存性を示さなかった。

一方、非機械ひずみと熱膨張また硬化収縮の均質化係数は図-6 の通りの同定結果となった。先述した通りユニットセルの横等方性により x 方向と y 方向の非機械ひずみと各係数は同程度の値となった。

繊維の剛性が一定であるのに対して樹脂の剛性は硬化度の上昇に伴って高くなる為、樹脂で発生する非機械ひずみに対するユニットセル全体の繊維方向のひずみ量は硬化するにつれて増加すると考えられる。したがって硬化収縮ひずみの変化率が硬化によって上昇することになり、結果として硬化収縮ひずみの絶対値は硬化度に対して増加する傾向が得られている。また、ポアソン効果によって横方向にもその傾向が現れたものと推察される。同様の理由で熱膨張ひずみに関しても硬化するにつれて樹脂単体での値に近づく傾向が得られている。

4. 結論

本研究では、硬化に伴う樹脂の力学挙動の変化に対応するために硬化の程度ごとの段階的なマルチスケール解析を行い、硬化度依存のパラメータを導出する手法を提案した。例として行なった数値材料試験では、硬化によって樹脂単体での変化傾向だけでなく繊維との相互作用によるマクロ係数の変化も捉えることができた。今後は、求められた係

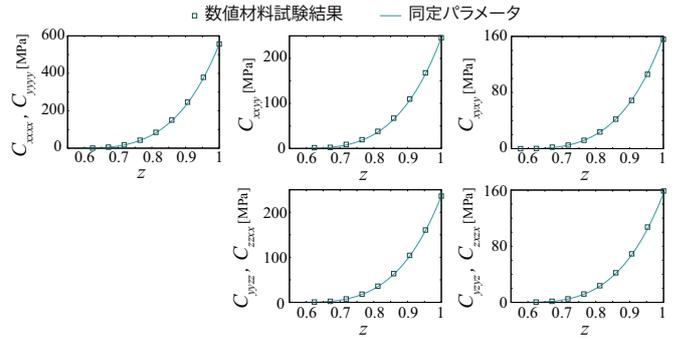


図-4 平衡部 (C_∞) の均質化係数

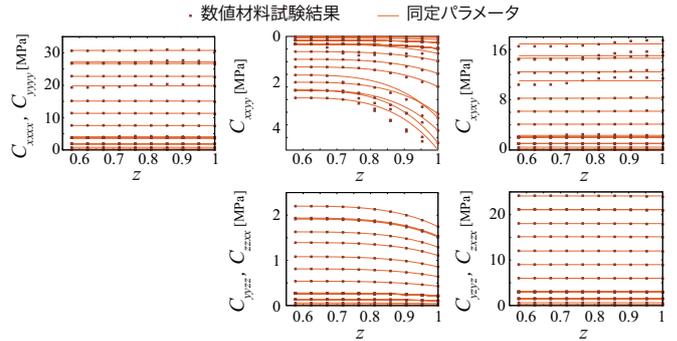


図-5 非平衡部 (C_i) の均質化係数

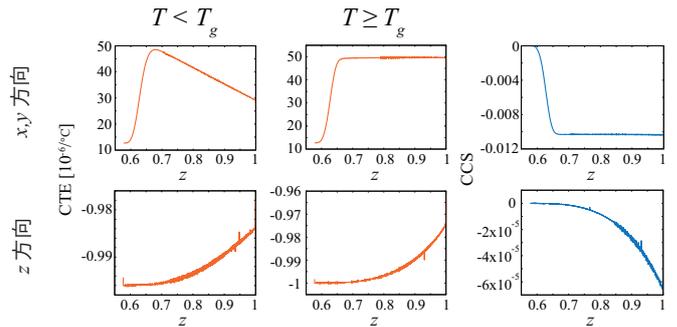


図-6 マクロひずみと均質化係数

数を適用してマクロ解析を行い、実験との比較検証を行うことで本手法の妥当性を確認することにする。

参考文献

- 1) NCAMP ACG MTM45-1 Material model. Vancouver, Convergent manufacturing technologies Inc.
- 2) Douglas B. Adolf, James E. Martin, Robert S. Chambers and Steven N. Burchett: Stresses during thermoset cure, *J. Mater. Res.*, Vol.13, No.3, 1998.
- 3) Oleksandr G. Kravchenko, Segii G. Kravchenko and Aaron Casares: Digital image correlation measurement of resin chemical and thermal shrinkage after gelation, *J. Mater. Sci.*, pp.1-9, 2015.
- 4) J.P. Pascault and R.J.J. Williams: Glass-transition temperature versus conversion relationships for thermosetting polymers, *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, Vol.28, pp.85-95, 1990.
- 5) 寺田賢二郎, 濱名康彰, 平山紀夫: 繊維強化プラスチックの粘弾性マルチスケール解析手法 日本機械学会論文集, 75 巻, 760 号, pp.2009-2012.