

発熱による巨視的温度場変化を考慮した 熱可塑性樹脂複合材の分離型マルチスケール解析

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 波多野 僚
東北大学工学研究科土木工学専攻 正会員 松原 成志朗
東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎
東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二

1. はじめに

近年、高強度・高剛性・軽量かつ耐腐食性を有する繊維強化樹脂（FRP）が土木業界のみならず、自動車や航空機業界などでも注目を集めている。例えば、FRPを橋梁に使用した場合、死荷重の軽減と耐震性能・耐候性能の向上などが期待できる。一方で、母材に熱可塑性樹脂を使用したものをFRTPと呼び、靱性・リサイクル性能により優れたFRPとして注目されている。しかし、FRTPは母材の自己発熱に起因する熱・機械特性が従来のFRPよりも複雑であるため、いまだ力学挙動を予測する有効な数値計算手法が確立されていない。そこで本研究では、球状充填材によって強化された熱可塑性樹脂を模擬したユニットセルに対して数値材料実験を行い、そこから得られるマクロな機械特性から決定されるマクロな発熱特性を算出することで、FRTPからなる構造物の自己発熱を考慮した熱・機械連成解析の枠組みを提案する。

2. 粘弾性・粘塑性複合構成則と自己発熱原理

本研究ではユニットセルの母材部分を非晶性熱可塑性樹脂とし、図-1に示すレオロジーモデルを参照して構築された粘弾性・粘塑性複合構成則を使用する。具体的には、まず次式に示すような熱力学的非平衡温度 T と状態変数の時間変化率を独立変数とした時刻 $t_0 \rightarrow t_1$ における全エネルギー増分 Ψ の停留値問題を考える。

$$\Psi = \inf_{\text{path}} \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_{B_0} (\rho_0 \dot{\psi} + \rho_0 \dot{T} \eta + \varphi^{ve} + \varphi^{vp} - \chi) dV - G^{\text{ext}} \right] dt \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\psi}$, η , φ^{ve} , φ^{vp} , χ はそれぞれ自由エネルギー密度速度、エントロピー密度、粘弾性双対散逸ポテンシャル、粘塑性双対散逸ポテンシャル、Fourierポテンシャルであり、 G^{ext} は単位時間当たりの外的操作によるエネルギー供給である。特に、非弾性変形による発熱量 h は次式で示すように、双対散逸ポテンシャル φ の T による勾配によって算出される。

$$h = \nabla_T \varphi = \nabla_T \varphi^{ve} + \nabla_T \varphi^{vp} \quad (2)$$

なお、 φ^{ve} , φ^{vp} に関連する材料パラメータは、それぞれ粘弾性と粘塑性の力学挙動を再現しうる構成則が決定されれば必ず決定される。つまり、材料構成則の機械特性に関

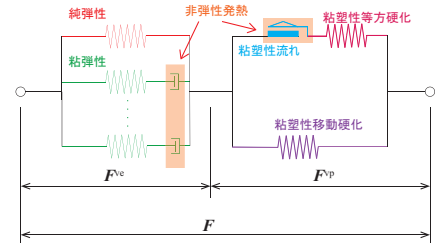


図-1: 粘弾性・粘塑性複合構成則のレオロジーモデル

する材料パラメータを決定することで、同時に自己発熱特性もわかることになる。

3. 数値材料試験による材料パラメータ同定

本研究では、図-2に示すような球状充填材の体積分率が25.7%であるFRTPの微視的構造を模擬した、四面体二次要素2046、節点数3357で構成されるユニットセルモデルに対して動的粘弾性及び負荷・除荷引張を模擬した数値材料試験を実施する。また、充填材には次式の圧縮性Neo-Hookeanモデルを使用し、弾性係数 E とポアソン比 ν はそれぞれ224[GPa], 0.2とする。

$$\psi = \frac{\mu}{2} [\text{tr}(\mathbf{C}) - 3] - \mu \ln J + \frac{\lambda}{2} (\ln J)^2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{C}$, J はそれぞれ右Cauchy-Greenテンソル、体積ヤコビアンであり、 μ , λ はラメ定数である。

3.1 動的粘弾性試験

環境温度 $T=30\sim 170^\circ\text{C}$ 、角速度 $\omega=3.26\sim 62.8[\text{rad/s}]$ の条件で、せん断ひずみ振幅0.1%を与える動的粘弾性を模擬した数値材料実験を行った。まず、得られた貯蔵せん断弾性率 G' と損失せん断弾性率 G'' に対して、FanとKazmerの一般化WLF則[1]を用いることでマスターカーブを描画する。そして、このマスターカーブを用いて、各Maxwell要素の緩和時間とせん断弾性率を同定する。図-3に示すようなマスターカーブのフィッティング結果を観察すると、粘弾性材料パラメータは精度よく同定できていることがわかり、本研究で設定したFRTPの場合では、母材と同じ温度時間換算則が適用可能であることがわかった。なお、緩和スペクトルも母材と同等になることも確認した。これは、充填材に粘性がないため母材の弾性特性が継承されたものだと考えられる。

また、図-4、図-5を参照すると、損失正接は同程度で

あるのに対して貯蔵せん断弾性率が大きくなっていることから、充填材による剛性の増加が確認できる。さらに、ポリカーボネートは 170℃ 以降で貯蔵せん断弾性率が低下しているが、ユニットセルでは貯蔵せん断弾性率が上昇している。これは、母材単体では高温環境下において準溶融域に達してしまうため、受け持てる応力が劇的に低下するが、FRTP の場合は充填材が応力を受け持つことを示している」と解釈できる。

3.2 負荷・除荷引張試験

真ひずみ 30% を与える負荷・除荷引張試験を模擬した数値材料実験を、環境温度 $T=30, 60, 90[^\circ\text{C}]$ 、変形速度 $\dot{\epsilon}=0.3, 3.0, 30[\text{mm}/\text{min}]$ の条件下で実施する。そして、得られたマクロ真ひずみ-マクロ真応力関係に対して、粘弾性材料パラメータを既知量としてパラメータフィッティングを行った結果の一部を図-7 に示し、母材単体と FRTP に対する負荷・除荷引張試験の比較結果を図-6 に示す。まず、真応力が大きくなっていることから、充填材によって剛性が増すことが確認できた。また、背応力による応力増加は充填材を入れることによって顕著になることがわかった。これは、充填材によって母材の一部に応力が集中し、同時にその部分の背応力が支配的になったためであると考えられる。

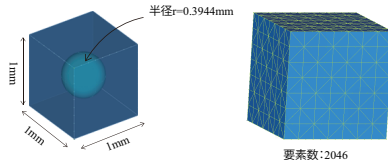


図- 2: FRTP のユニットセル (右) とその有限要素モデル (左)

4. 結論

本研究では、球状充填材で強化された PC のマクロな機械特性を算出するために、関連する材料パラメータを動的粘弾性と負荷・除荷引張を模擬した数値材料試験によってそれぞれ同定した。そして結果を観察すると、充填材による機械特性の変化が考慮された材料パラメータを同定することができた。なお発表では、同定した FRTP の材料パラメータを用いて図-8 に示すような熱・機械強連成解析を実施した結果も示すことにする。

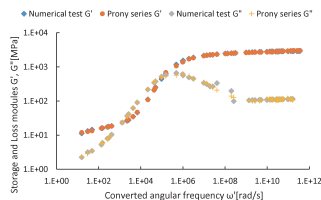
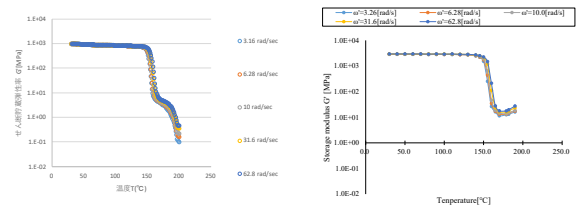


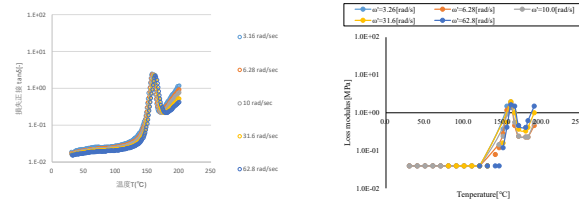
図- 3: 粘弾性材料パラメータの同定結果



(a) 母材単体

(b) FRTP

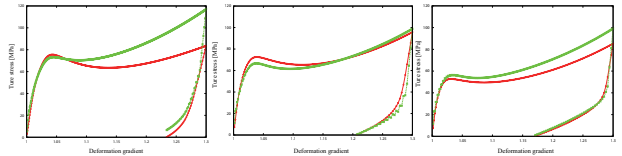
図- 4: 母材単体と FRTP の貯蔵弾性率 G'



(a) 母材単体

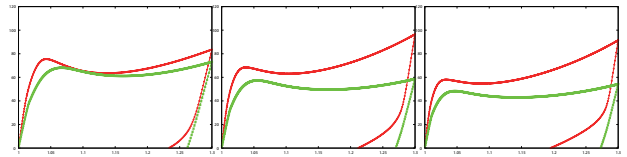
(b) FRTP

図- 5: 母材単体と FRTP の損失正接 $\tan(\delta)$



(a) $T=30^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.3$ (b) $T=60^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=3.0$ (c) $T=90^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=30$

図- 6: 真応力-ストレッチ関係のカーブフィッティング結果 (緑: ユニットセル, 赤: 同定した材料パラメータ)



(a) $T=30^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.3$ (b) $T=60^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=3.0$ (c) $T=90^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=30$

図- 7: 母材単体と FRTP の真応力-ストレッチ関係 (緑: 母材単体, 赤: FRTP)

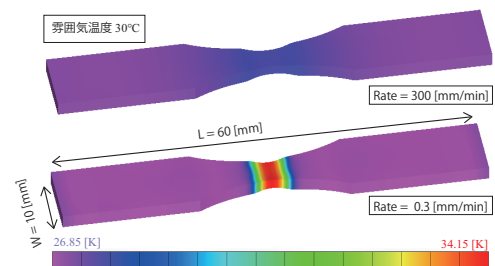


図- 8: 2. の枠組みで解析した母材のみからなる構造物の自己発熱の様子 (引張量: 11[mm])

参考文献

- 1) Bingfeng Fan, David O. Kazmer: Low-temperature modeling of the time-temperature shift factor for polycarbonate, Advances in Polymer Technology, Vol.24(2005), No.4, pp.278-287.