

織物複合材料の巨視的な力学的特性の予測

信州大学工学部 学生員 ○鴨井彰宏
信州大学工学部 正会員 小山 茂
信州大学工学部 正会員 大上俊之

1. はじめに

炭素繊維やガラス繊維などの繊維材料を強化材とする繊維強化複合材料は、軽量かつ高強度であり、耐候性があるなどの特徴からスポーツ、自動車、土木分野など幅広い領域で用いられている。土木分野においては、施工性の良さから構造物の補強材料、主構造材料として使われている。その中でも、経糸と緯糸の繊維で織り込んだ織物構造(図1)に加工した織物複合材料は、耐衝撃性、形状への適応性に優れているという利点がある。

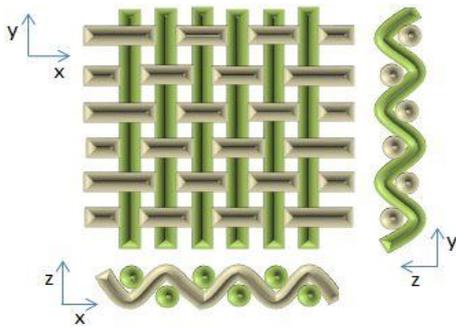


図1 織物構造

しかし、織物複合材料の場合、一方向強化材料を重ねて作る積層材料に比べて剛性が低下するという欠点がある。また、織物は経糸と緯糸が次の何本目の糸と交錯するかという糸目の繰返し数(n_g)によって平織($n_g=2$)、綾織($n_g=3$)、4枚縹子織($n_g=4$)と分類され、それぞれの力学的特性が異なることが知られている¹⁾が、解析にこの繰返し数を適切に組み込むことは容易ではない。

そこで本論文では、マイクロメカニクス分野で用いられる等価介在物法²⁾に基づく森・田中理論³⁾を応用することによって、織物複合材料の巨視的な力学的特性を予測する手法を提案する。

2. 解析方法

(1) 等価介在物法と森・田中理論

母材と介在物から成る複合材料の力学的特性を予測する一つの手法として、等価介在物法²⁾を

応用した森・田中理論³⁾がある。母材および介在物*i*の弾性定数テンソルをそれぞれ C_M, C_{ii} とする。この時、母材と介在物の応力 - ひずみ関係は、

$$\langle \sigma_M \rangle = C_M \langle \varepsilon_D \rangle, \quad \langle \sigma_{ii} \rangle = C_{ii} \langle \varepsilon_{ii} \rangle \quad (1)$$

と表せる。 $\langle \sigma_M \rangle, \langle \varepsilon_D \rangle$ は母材の応力、ひずみの体積平均を、 $\langle \sigma_{ii} \rangle, \langle \varepsilon_{ii} \rangle$ は介在物*i*の応力、ひずみの体積平均を表す。ここで母材のひずみの体積平均を $\langle \varepsilon_M \rangle$ と表記しないのは、 $\langle \varepsilon_D \rangle$ が母材における単なる体積平均ではなく、介在物が多数含まれることによる乱れを考慮しているためである。つまり、 $\langle \varepsilon_D \rangle$ には介在物同士の相互作用が多数含まれていることに注意する。

介在物のひずみは、母材のひずみに母材と介在物の相互作用による乱れ $\langle \gamma_{ii} \rangle$ を加えたものとして

$$\langle \varepsilon_{ii} \rangle = \langle \varepsilon_D \rangle + \langle \gamma_{ii} \rangle \quad (2)$$

と表す。介在物の形状が回転楕円体ならば、この乱れ成分は介在物内部で一定であるということが Eshelby⁴⁾によって示されている。

ここで、等価介在物法を適用すると

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ii} \rangle &= C_{ii} (\langle \varepsilon_D \rangle + \langle \gamma_{ii} \rangle) \\ &= C_M (\langle \varepsilon_D \rangle + \langle \gamma_{ii} \rangle - \langle \varepsilon_i^* \rangle) \end{aligned} \quad (3)$$

と書ける。ここに $\langle \varepsilon_i^* \rangle$ は、eigen ひずみと呼ばれる非適合ひずみであり、上式を成立させるために導入した量である。一方、ひずみの乱れ成分と eigen ひずみは線形関係にある。

$$\langle \gamma_{ii} \rangle = S_i \langle \varepsilon_i^* \rangle \quad (4)$$

ここに S_i は Eshelby のテンソルと呼ばれ、介在物の形状と母材のポアソン比のみから決まる定数である。

(2) 巨視的な力学特性

複合材料の巨視的な応力 $\bar{\sigma}$ 、ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は、介在物*i*の体積比率 f_i を重みとした平均によって

$$\bar{\sigma} = (1 - f_1 - f_2 - \dots) \langle \sigma_M \rangle + f_1 \langle \sigma_{11} \rangle + f_2 \langle \sigma_{12} \rangle + \dots$$

$$\bar{\varepsilon} = (1 - f_1 - f_2 - \dots) \langle \varepsilon_D \rangle + f_1 \langle \varepsilon_{11} \rangle + f_2 \langle \varepsilon_{12} \rangle + \dots \quad (5)$$

と定義する. 式(1)から式(5)により, 巨視的な応力-ひずみ関係が,

$$\bar{\sigma} = \bar{C} \bar{\varepsilon}$$

と書ける. \bar{C} は平均弾性テンソルであり, これから巨視的な力学特性を求めることができる.

(3) 織物複合材料への適用

一方向強化材料と積層材料は, 繊維を独立な回転楕円体と仮定できるため, 森・田中理論をそのまま適用することができる. しかし, 織物複合材料は, 図1の様に経糸と緯糸が交錯することによるうねりの影響が出るため, 森・田中理論を単純に適用することはできない.

そこで本論文では, 織物複合材料の力学的特性の予測に, 体積比率が0(%)であるヤング率が $EMvt$, ポアソン比が νMvt の架空の母材を導入する⁵⁾. このとき, 介在物を織物複合材料の経糸と緯糸の二種類の繊維材および元々の母材であるプラスチックの合計三つとした上で, 森・田中理論を適用する. この方法によると, 架空の母材の体積含有率が0(%)であるにも関わらず, 平均弾性テンソルは $EMvt$ と νMvt の関数として表されるという特徴がある.

上記の方法で求められる巨視的な弾性係数が既存の織物複合材料の実験値と等しくなるように, $EMvt$ と νMvt を求め, これらの値が織物複合材料のうねりによる影響を表しているものとする.

3. 既存の実験値との比較

本論文で比較対象とした石川らの織物複合材料である平織の実験¹⁾では, 繊維方向のヤング率の $\overline{E}_{0,90}$, ポアソン比の $\overline{\nu}_{0,90}$, 繊維方向から45°のヤング率の \overline{E}_{45} , ポアソン比の $\overline{\nu}_{45}$ が求められている. また, 材料となるエポキシ樹脂の材料定数は示されているが, カーボンの材料定数は示されて

いない. しかし, カーボンとエポキシ樹脂から成る一方向強化材料の材料定数は示されている(表1)ため, この一方向強化材料に通常森・田中理論を適用して逆算することによってカーボンの材料定数を求めた(表1).

表1 材料定数

(単位: E, G は GPa)

| | | | | | | |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------|
| 平織 | $\overline{E}_{0,90}$ 49.8 | $\overline{\nu}_{0,90}$ 0.068 | \overline{E}_{45} 13.4 | $\overline{\nu}_{45}$ 0.76 | V_f 0.52 | |
| 一方向強化材 | E_L 137 | E_T 9.81 | G_{LT} 4.81 | ν_{TL} 0.26 | ν_{TT} 0.46 | V_f 0.65 |
| エポキシ樹脂 | E_m 4.12 | ν_m 0.38 | | | | |
| カーボン (解析値) | E_{fL} 208.5 | E_{fT} 16.52 | ν_{TL} 0.2015 | ν_{TT} 0.3125 | | |

次に, 求めたカーボンとエポキシ樹脂を介在物として架空の母材を導入した森・田中理論を用いて平織の実験値(表1)と比較することで架空の母材のパラメータを求めた(表2).

表2 架空の母材のパラメータ

(単位: E は GPa)

| | | |
|------------|--------|-----------|
| | $Emvt$ | νMvt |
| 0°, 90° 方向 | 24.15 | 1.045 |
| 45° 方向 | 21.41 | 1.014 |

4. 結論

架空の母材パラメータの物的な解釈や, 織物複合材料のうねりとの関係, 織物の種類による関係, 架空の母材導入した織物複合材料の力学特性の評価方法の結論については, 発表時に示す.

参考文献

- 1) 石川隆司, 松嶋正道, 林洋一: 織布強化型複合材料の弾性係数の理論とその実験的検証, 航空宇宙技術研究所報告808号, 1984.
- 2) Mura, T.: *Micromechanics of Defects in Solids*, Martinus Nijhoff Publ, 1982.
- 3) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Act. Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 4) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proc. Roy. Soc. London.*, Vol.A241, pp.376-396, 1957.
- 5) 小山茂, 片野俊一, 大上俊之, 岩熊哲夫: 複合材料や多結晶金属の平均弾塑性挙動予測の一手法, 土木学会論文集No.100/I-100, pp.101-112, 2008.