単軸引張試験によるガラス繊維強化樹脂の異方性物性値の推定

鈴木 智久^{*1}, 寺崎 健^{*1}, 竹越 正明^{*2}, 田中 俊明^{*2}

Estimation of Anisotropic Material Properties of Glass Fiber Reinforced Plastic by Using Uniaxial Tensile Test

Tomohisa SUZUKI^{*3}, Takeshi TERASAKI
Masaaki TAKEKOSHI, Toshiaki TANAKA

^{*3} Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 832-2 Horiguchi, Hitachinaka, Ibaraki, 312-0034 Japan

We propose an estimation method for determining the anisotropic material properties of glass fiber reinforced plastic (GFRP) in this study. The anisotropic material properties had to be determined and taken into consideration to predict the GFRP deformation using finite element method (FEM). We used a homogenization method to calculate the anisotropic material properties. The material properties of the glass fiber and resin had to be inputted to do this. However, the material properties of the resin were sometimes unknown, due to the changes in the material properties based on the manufacturing condition. We predicted the anisotropic material properties of GFRP in this study by inputting the in-plane material properties of GFRP to response surface. The response surface was created by using an experimental design and a homogenization analysis. We applied this method to the GFRP for a print circuit board, and calculated the anisotropic material properties without any resin material properties.

Key Words : GFRP, Homogenization method, Design of experiments, Response surface method

1. 緒 言

ガラス繊維強化樹脂 (Glass Fiber Reinforced Plastic, 以下, GFRP と記す) は強度, 成形性, 絶縁性等の特性が優れていることから, プリント配線板等の材料に多く使用されている。プリント配線板では, 実装部品接続時の熱変形に起因する接続不良等が問題となる。このため, 有限要素法 (Finite Element Method, 以下, FEM と記す) 等のシミュレーションによってプリント配線板や実装部品の変形を予測することが重要となっている。

GFRP はガラス繊維の微細構造の影響により, 機械的特性が方向によって異なる異方性を有する。このため, プリント配線板の変形を FEM で高精度に予測するには, GFRP の異方性材料物性を考慮する必要がある。GFRP の異方性材料物性のうち, 面内方向の材料物性は引張試験等によって測定できる。しかし, プリント配線板に使用される GFRP は薄いので, 面外方向等の材料物性の測

定は困難である場合が多い。このような場合に, 均質化法^[1]を用いた数値材料試験 (以下, 均質化解析と記す) による異方性材料物性の計算が有効である。均質化解析では, 複合材料を構成する各材料の単体の材料物性を FEM モデルに入力する必要がある。しかし, ガラス繊維を含浸する樹脂 (以下, 基材樹脂と記す) は, 製造条件が材料物性に影響を与える場合があり, 必ずしも製造後の GFRP における基材樹脂の材料物性を入手できるとは限らない。

本研究では, 基材樹脂の材料物性を測定せずに, GFRP の面内方向の材料物性実験値から, GFRP の異方性材料物性を簡便に推定する手法を検討した。

2. 実験方法

Fig. 1 に計算対象とした GFRP の断面写真の 1 例を示す。ガラス繊維束が編みこまれた構造 (以下, ガラスクロス構造と記す) に基材樹脂を含浸している。繊維束の厚さを A , 繊維束の幅を B , 繊維束の間隔を D , 1 層あたりの GFRP の厚さを T とした。

GFRP の面内方向の縦弾性率 $E_x (=E_y)$ は引張試験で, 線膨張係数 (CTE, Coefficient of thermal expansion) $\alpha_x (= \alpha_y)$ は引張モードの TMA (Thermo Mechanical Analysis) にて

^{*1} 正員, (株)日立製作所 日立研究所 (〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口 832 番地 2)

^{*2} 日立化成工業(株) 筑波総合研究所 (〒300-4247 茨城県つくば市和台 48)

E-mail: tomohisa.suzuki.ec@hitachi.com

測定した。また、基材樹脂の推定値と比較するため、基材樹脂についても別途作成した基材樹脂の試験片を用いて、縦弾性率 E を引張試験で、線膨張係数 α をTMAの圧縮モードで測定した。なお、線膨張係数は常温からガラス転移温度（以下、 T_g と記す）までの平均値とした。

3. 推定方法

3・1 推定の流れ Fig. 2 に GFRP の異方性材料物性を推定する手順を示す。まず、GFRP の面内方向の縦弾性率 E_x と形状情報 (A, B, D, T) を測定する。続いて、これらの値とガラス繊維の種類を GFRP の面内方向の材料物性に関する応答曲面^[2] (Response surface method, RSM) に代入し、未知数である基材樹脂の縦弾性率 E を計算する。応答曲面は事前に実験計画法^[2]と均質化解析により、GFRP の異方性材料物性 (縦弾性率: E_x, E_y, E_z , ポアソン比: $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$, 横弾性率: G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}) のそれぞれについて作成しておく。最後に計算した基材樹脂の弾性率 E と形状情報をその他の方向の異方性材料物性に関する応答曲面に代入し GFRP の異方性材料物性を計算した。線膨張係数 ($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$) についても同様の方法で計算した。

3・2 均質化解析方法 Fig. 3(a)~(c)に GFRP の異方性材料物性の計算に用いた FEM モデルを示す。本研究で

Fig. 1 Cross section of GFRP

Fig. 2 Flowchart of prediction method for calculation of GFRP anisotropic material properties

Fig. 3 FEM model of GFRP

対象とする GFRP はマクロなガラスクロス構造の内部にミクロなガラス繊維束が配向している。このため、GFRP の異方性物性値の計算では、まず Fig. 3(a)に示すガラス繊維束のユニットセルモデルを用いて、ミクロなガラス繊維束の異方性材料物性を均質化解析により計算する。次に、この異方性材料物性を Fig. 3(b)に示す GFRP のガラスクロス部に繊維の配向方向が一致するように割り当て、GFRP モデル (Fig. 3(c)) に 2 回目の均質化解析を実施して異方性物性値を計算する。繊維束モデルのガラス繊維の体積比率は、各繊維が最密充填されていると仮定し、各繊維間に微小な隙間を設けて 88.2%とした。

3・3 応答曲面作成方法 応答曲面は L18 直交表^[2]に基づいた 18 ケースの均質化解析結果から作成した。Table 1 に L18 直交表の因子と水準を示す。ガラス繊維は主に使用される 2 種類の材料を 2 水準で割り付けた。水準幅は製品で想定される最大最小値から決定した。応答曲面式には Chebyshev の直交関数^[3]である直交多項式を用いた。Table 1 の解析条件と 18 ケースの異方性材料物性計算結果の関係から式の係数を決定した。

4. 結果と考察

Table 2 に GFRP の面内方向と基材樹脂の材料物性を測定した結果を示す。基材樹脂に比べて GFRP の

Table 1 Parameters and levels

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Glass fiber	Glass-A $E=75(\text{GPa})$ $\alpha=5.5(10^{-6}/\text{K})$	Glass-B $E=85(\text{GPa})$ $\alpha=2.8(10^{-6}/\text{K})$	-
Aspect ratio of glass fiber bundle	5.9	21.6	37.3
Width ratio	1.7	2.4	3.1
Thickness ratio	1	4.7	8.4
Young's modulus of substrate resin (GPa)	2	8.5	15
CTE of substrate resin ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	10	20	30

Table 2 Experimental material properties of substrate resin and GFRP

Material properties	GFRP (In-plane)	Substrate resin
Young's modulus (GPa)	29.3	8.8
CTE ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16.6	36.2

縦弾性率は高くなり、線膨張係数は低いことがわかる。これは基材樹脂に比べてガラス繊維の縦弾性率が高く、線膨張係数が低いためである。なお、本 GFRP のガラス繊維はガラス A である。

次に Table 2 の GFRP の実験値を応答曲面を入力して GFRP の異方性材料物性を推定した結果を Table 3 に示す。このように、本手法では、GFRP の面内方向の実験値からその他の成分の材料物性を、FEM モデルを作成することなく簡便に計算することができる。

次に、GFRP の材料物性の推定値と実験値を比較した。従来手法として、基材樹脂物性の実験値を用いた均質化解析による結果も比較した。なお、面外方向等の異方性材料物性の測定が難しいため、面内方向の材料物性で比較した。比較結果を Fig. 4 に示す。本手法による推定結果は実験値に良く一致し、従来手法の計算結果は実験値に対して若干低くなる結果となった。

従来手法と実験値の差の原因を考察するため、基材樹脂の材料物性の推定値と実験値を Fig. 5 で比較した。これより、基材樹脂物性の縦弾性率の実験値は推定値より低く、線膨張係数の実験値は推定値より高いことがわかる。このような基材樹脂物性の違いが、従来手法と実験値で異なる結果となった一因であると考えられる。基材樹脂物性の実験値が実際と異なる要因としては、GFRP 製造時の製造条件の影響や基材樹脂物性測定時の測定誤差等が考えられる。

これに対して本手法では、GFRP の面内方向の実験値に一致するように基材樹脂の材料物性が決定される。その他の方向の材料物性は、この結果を用いて計算されるため、GFRP の実験値を反映した異方性物性の推定が可能である。

5 結言

GFRP の面内方向の材料物性実験値から基材樹脂の材料物性および GFRP の異方性材料物性を推定する手法を検討した。本手法をプリント配線板に使用

Table 3 Calculated GFRP anisotropic material properties

E_x (GPa)	29.3	G_{xy} (GPa)	9.5
E_y (GPa)	21.5	G_{yz} (GPa)	6.7
E_z (GPa)	21.5	G_{zx} (GPa)	6.7
ν_{xy}	0.26	α_x ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16.6
ν_{yz}	0.34	α_y ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16.6
ν_{zx}	0.25	α_z ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	26.6

Fig. 4 Comparison between proposed method and usual method for calculating GFRP material properties

Fig. 5 Comparison between experimental and estimated results of substrate resin material properties

される GFRP 材に適用し、異方性材料定数の推定を行った。

本手法を用いることで、基材樹脂の材料物性が分からない場合や、基材樹脂の実験値を省略した場合にも、GFRP の実験値を反映した異方性材料物性の計算が可能となる。また、設計者が複数仕様の GFRP の異方性材料物性を複雑な FEM モデルを作成することなく簡易的に計算することができる。

文 献

- (1) K. Terada, N. Kikuchi, Introduction to the method of homogenization, (2003), Maruzen
- (2) S. Yamada, Design of experiment Methodology, (2004), Union of Japanese Scientists and Engineers
- (3) Y. Kshiwamura, M. Shiratori, Y. Qianng, Optimization of Nonlinear Problem by Design of Experiments, (1998), Asakura