繊維強化複合材料の配向度評価装置の開発

Development of Fiber-Orientation-Estimation System using Magnetic Torque

○学 細田 茂光 (信州大学) 非 薛 武 (信州大学)
正 渡辺 義見 (信州大学) 非 清水 義雄 (信州大学)

Shigemitsu Hosoda, Shinshu University, Tokida 3-15-1, Ueda 386-8567, Japan

Xue Wu, Shinshu University

Yoshimi Watanabe, Shinshu University

Shimizu Yoshio, Shinshu University

1. 緒論

繊維強化複合材料の力学物性は強化繊維の体積分率と分布状態とによって支配される。したがって、繊維強化複合材料中の配向度の評価は、繊維強化複合材料の力学物性を予測するうえで重要である。

現在、最も広く用いられている 2 次元配向度評価方法は、ヘルマンの配向度と呼ばれているものである。ヘルマンの配向度を計測するには、繊維強化複合材料の顕微鏡観察が不可欠であり、そのためには種々の前処置が必要である。また、この方法では、繊維一本一本の配向角を測定しなければならず、測定に時間がかかるという欠点を有していた。

ところで、繊維形状の強磁性体はその長手方向が容易磁化方向となる。この磁気異方性を利用すると、短繊維強化複合材料中の配向度を評価することが可能であることが分かっている¹⁾。本研究では、この理論をもとに評価装置の開発を行った。

2. 測定原理

繊維形状の磁性体は、形状磁気異方性が支配的となる。繊維形状の磁性体の静磁エネルギー E_s は

$$E_s = \frac{1}{4\mu_0} I_s^2 v (3N - 1) \cos^2 \theta \quad (1)$$

であらわされる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 v は磁性体の体積、 I_s は自発磁化の大きさ、 θ は印加磁場方向と磁性体の長手方向との角度である。また、 N は反磁界係数であり、強磁性体が非常に長い回転楕円体である場合、寸法比を k とすれば、

$$N = \frac{1}{k^2} (\ln 2k - 1) \quad (2)$$

となる。

自発磁化が、ある面内で θ の増す方向に $\delta\theta$ だけ回転したとき、異方性エネルギーが $\delta E(\theta)$ だけ増したとする。このとき、自発磁化には θ の減少する方向に単位体積あたりの $-L(\theta)$ の磁気トルクが働く。

また、 $-L(\theta)\delta\theta = \delta E(\theta)$ の関係があるので、単位体積あたりの磁気トルク曲線 L は、

$$L = \frac{1}{4\mu_0} I_s^2 v (3N - 1) \sin 2\theta \quad (3)$$

となる。したがって、繊維形状の磁気トルク曲線 L_{fiber} は、

$$L_{fiber} = K \sin 2\theta \quad (4)$$

と表すことができる。ここで K は定数であり、繊維形状の場合 N が $1/3$ 以下になるため負の値をとる。また、 θ は印加磁場方向と長手方向との角度である。

次に配向角 ϕ を有する i 番目の繊維の寄与によるトルク曲線を求めてみる。反時計周りに磁気トルクを測定し、繊維配向角 ϕ が、基準方向と測定中の磁場印加方向との角度すなわち測定時の磁石の回転角を θ とすると、 i 番目の繊維の寄与によるトルク曲線 L_{ith} は

$$L_{ith} = K \sin 2(\theta + \phi_i) \quad (5)$$

となる。したがって、強磁性体繊維強化複合材料の磁気トルクは、

$$L_{comp} = \frac{\sum n_\phi}{N_{total}} K \sin 2(\theta + \phi) \quad (6)$$

となる。ここで n_ϕ は配向 ϕ 角を有する繊維の本数である。

5 種類の異なる配向度を有する繊維強化複合材料の磁気トルク曲線をコンピューターシミュレーションによって求めた。Fig.1 に測定時の磁石の回転角と測定されるトルクとの関係を示す。図中の f_p はヘルマンの配向度を示し、すべての繊維が基準方向に配向した場合、配向度 f_p の値は 1 に、すべての繊維が完全無秩序な場合、配向度 f_p の値は 0 を示す。ここで、簡単のため、トルクは $K = -1$ として規格化してあるが、通常、複合材料において、強化繊維相の形状、体積分率は既知であり、これらの値と繊維の自発磁化の値とを代入すれば実際の K 値は求まる。

Fig.1 のように磁気トルク曲線は、180 度周期のサイン曲線となっており、配向度が大きくなるに従い、振幅も大きくなる。従って、配向度決定のためには磁気トルク曲線を 180 度に渡って測定する必要はなく、最大振幅における値を求めればよい。

Fig.1 Rotation Angle vs Normalized Torque

3. 測定装置

測定装置の概略図²⁾³⁾を Fig.2 に示す。

実験方法は、軸を一定磁場中で回転させ、それぞれの角度でトルクの検出を行った。

このときの軸は、磁場のかかる部分に石英のガラス棒、トルクを検出する部分に中空のアルミパイプを使用している。

ひずみゲージの周りは、肉厚を薄くしてトルクを検出しやすくした。

Fig.2 Experimental Apparatus

4. 実験結果および考察

直径 1.7mm × 長さ 10mm の鉄繊維を 1 本使った $fp=1$ のモデル試料で測定を行った。その結果を Fig.3 に示す。

Fig.3 Rotation Angle vs Volt

Fig.3 より、 $fp=1$ の理論値とほぼ一致したが、わずかに軸が偏心しているために周期が 180 度にならないと考えられる。また、出力電圧の大きさがずれているのは、試料を固定した位置が中心から少しずれているためと考えられる。

5. 結論

本研究では、磁気異方性を利用した繊維強化複合材料中の配向度評価装置の開発を行った。その結果、配向度 $fp=1$ では、ほぼ理論値を満たすことのできる装置が開発できた。

6. 参考文献

- 1) Y.Watanabe; Proceedings of ICARM
- 2) 近角聡信; 実験物理学講座 17 磁気, p302 (1965), 裳華堂
- 3) 飯田修一, 大野和郎; 磁気測定, p86 (1967), 朝倉書店