CFRP を伝搬する超音波のモデル化と可視化実験による検証

愛媛大学大学院 学生員 〇溝上尚弥, 非会員 小畠一朗, 正会員 中畑和之

1. はじめに

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic:FRP)は金属に比べて軽量であり、高強度で耐食 性に富むことから, 土木構造材料への導入が進んで いる. FRP 部材の安全性を担保するために、その内 部損傷の検出および評価は、超音波探傷 (Ultrasonic Testing: UT) が用いられることが多い. 一般的な土 木用鋼材は、音響的に等方的な性質を有するものが多 く,超音波の音速はどの方向に対しても一定であるた め、きずエコーの発生箇所は予測しやすい.しかし、 FRP の場合、繊維の配向や積層方法に依存して異方 性を呈するため、超音波の伝搬は複雑になる¹⁾. UT の信頼性を向上させるためにも, FRP 中の超音波の 伝搬特性を予め知ることができれば便利である. ここ では、炭素繊維を用いた FRP (Carbon FRP: CFRP) 中を伝搬する超音波を数理的にモデル化することを試 みる.計測実験と解析を比較するため,1方向に積層 した CFRP の供試体を作成した.数値解析では、炭 素繊維と樹脂の微視構造を数値的に考慮した均質化 法²⁾を用いて、巨視的な弾性スティフネスを推定す る. これを,これをボクセル FEM をベースとした陽 解法に入力し、波動伝搬シミュレーションを行う.シ ミュレーションの結果と計測結果とを比較すること で、CFRP 中の波動伝搬への均質化パラメータの適 用性について検討を行う.また、イメージベース処理 を用いて CFRP の微視構造を直接要素分割し、この 数値モデルを用いた場合の波動伝搬解析結果も示す.

2. ボクセル FEM

位置 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, x_3)$ における時刻 t の変位を $u_i(\boldsymbol{x}, t)$, 応力を $\tau_{ij}(\boldsymbol{x}, t)$ とすると, 異方性弾性体中 の支配方程式は, 以下のようになる.

$$\rho(\boldsymbol{x})\ddot{u}_{i}(\boldsymbol{x},t) = \frac{\partial\tau_{i\beta}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_{\beta}} \quad (i=1,2,3) \qquad (1)$$

$$\tau_{ij}(\boldsymbol{x},t) = c_{ij\alpha\beta} \frac{\partial u_{\alpha}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_{\beta}} \quad (i,j=1,2,3)$$
(2)

ここで、 $\{\}$ は時刻tに関する偏微分 $\partial^2/\partial t^2$, $c_{ij\alpha\beta}$ は 弾性スティフネス、 ρ は密度である.上式で $\alpha \geq \beta$ に 総和規約を適用する.

式(1)と(2)から重み付き残差式を作り、ガウスの 発散定理を用いて弱形式に変形する.次に、弱形式 を8節点6面体要素(ボクセル要素)を用いて離散化 する.離散化後は、次のような代数方程式となる.

$$M\ddot{d} + Kd = f \tag{3}$$

ここで, *d* は節点上の変位を格納した行列, *M* は質 量行列, *K* は剛性行列, *f* は表面力などの既知量が 保存される行列である.

次に、時間軸の離散化について述べる.式(3)を陽的に更新することを考える.そのためには、質量行列を集中化 ($M \approx \overline{M}$) する方法が最も効率的である. dについて、時間方向に中心差分近似を適用すれば、以下のような更新スキームとなる.

$$\boldsymbol{d}^{h+1} = (2\boldsymbol{E} - \Delta t^2 \bar{\boldsymbol{M}}^{-1} \boldsymbol{K}) \boldsymbol{d}^h + \Delta t^2 \bar{\boldsymbol{M}}^{-1} \boldsymbol{f}^h - \boldsymbol{d}^{h-1}$$
(4)

ここで、hは時間ステップを表す整数、Eは単位行 列、 Δt は時間間隔である.材料定数はボクセル要素 内で一定とし、表面力fも要素の辺上で一定とする.

3. 均質化法から算出した弾性スティフネス

ユニットセルにおける微視的な構造を考え,この微 小領域が周期的に存在するとした場合の材料特性を 評価することで,巨視的な静的パラメータを推定す る方法が均質化法である.本研究では, x_3 方向に繊 維を配向させた供試体 ($20mm \times 50mm \times 50mm$)を 作成した.作成した供試体を模擬するために,均質化 法によって巨視的な弾性スティフネスを算出する.繊 維の密度は $1.8g/cm^3$ であり,樹脂のそれは $1.4g/cm^3$ である.また,供試体中の繊維の割合は約 61% と推 定し,繊維の直径は 5μ m とした.これらの条件から 設計したユニットセルを図-1 に示す.



図-1 x_3 方向に繊維を配向した CFRP のユニットセル

キーワード:超音波シミュレーション, CFRP, 均質化法, 音響異方性, ボクセル FEM 連絡先 〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

作成したユニットセルを用いて均質化法を実行す る.炭素繊維の縦弾性係数は、文献値より、E11=15 GPa, *E*₃₃=240 GPa であり, 横弾性係数は *E*₁₃=24.7 GPaとした.また、ポアソン比は $\nu_{12}=0.49$ 、 $\nu_{13}=0.28$ とした.一方,樹脂の縦弾性係数は, E₁₁=E₃₃= 3.5 GPa, ポアソン比は $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.35$ とした. 均質化 法で得られた巨視的な弾性スティフネスC_{ii}を図-2の 上図に, また, 推定した弾性スティフネスから解析 的に求めた x₁-x₃ 断面, x₂-x₃ 断面における群速度曲 線を下図に示す.音響異方性を有する波動場では、1 つの縦波(P波)と2つの横波(S1波とS2波)が発生 することが知られている.均質化法により推定した P 波の群速度は, x₃ 方向の音速が x₂ 方向にくらべて 3倍以上大きい. また, x_1-x_2 断面では, いずれの波 動も円筒状に拡がっていることから、面内等方的で あることがわかる.

4. 計測結果との比較

ボクセル FEM で用いた数値モデルを図-3 に示す. ボクセル長は 0.05mm とし,時間ステップは 2.75ns とした. 探触子を模擬して 6mm × 6 mm の領域から 超音波を発振する. ここでは, x₁ 方向に表面力を与 えることで中心周波数が 1MHz の超音波を発生させ た. 図-2 で算出した巨視的な弾性スティフネスを用 いたモデル (均質モデル)の 3 次元解析の結果を図-4 に示す. 図-4 では, 1.925µs と 3.8µs 後の数値モデル の上表面の変位をプロットしている. イメージベー ス処理を用いて CFRP の微視構造を直接要素分割し, この数値モデル (非均質モデル)を用いた場合の波動 伝搬解析結果を図-5 に示す. いずれも, x₃ 方向の P 波の伝搬速度が卓越して大きいことがわかるが,非 均質モデルでは,繊維と樹脂において微小な散乱波 が発生している.



図−2 均質化法によって計算した巨視的弾性スティフネ ス C_{ij} と、それから推定された群速度曲線





図-4 巨視的な弾性スティフネスを用いた数値モデル(均 質モデル)のFEM解析による表面の可視化結果



図-5 微視構造を要素分割した数値モデル(非均質モデル)のFEM 解析による表面の可視化結果



図-6 レーザー変位計によって表面変位を計測した結果

レーザードップラー振動計によって、供試体表面の 変位を計測し、これを時間の経過とともにプロット したものを図-6に示す. x₃方向のP波の速度が卓越 していることがわかる. x₂-x₃面における波動の拡が りは、均質モデルの方が実験結果を良好に模擬して いることがわかる.

参考文献

- R.M. Chiristensen, 複合材料の力学 (岡部朋永, 矢代 茂樹訳), 共立出版, 2015.
- 寺田賢二郎, 菊池昇, 計算力学レクチャーシリーズ1 均 質化法入門, 丸善出版, 2003.