繊維配置のばらつきを考慮した 一方向繊維強化複合材料のマルチスケール確率応力解析

Multiscale Stochastic Stress Analysis of a Unidirectional Fiber Reinforced Composite Material Considering a Random Variation of Fiber Arrangement

鳥越到・近畿大学理工学部

坂田誠一郎・近畿大学理工学部

Itaru Torigoe, Kinki University

Sei-ichiro Sakata, Kinki University

Key Words: Multiscale Stochastic Stress Analysis, Fiber Reinforced Composite Material, Microscopic Random Variation, Fiber Arrangement, Stochastic Homogenization

1. 緒言

近年、計算力学手法に基づくコンピュータシミュレーションの妥当性評価について注目が高まっている。特に、コンピュータシミュレーションと実験結果との整合性検証は、今後シミュレーションのさらなる利用拡大を図る上で重要な課題であると考えられる。この点において、現実問題をモデル化する際に、不確定因子や比較的影響が小さい因子については確率的に取り扱うことで、現実問題におけるシミュレーションの定量的利用に資することができると期待される。

本研究では、特に複合材料をはじめとする不均質材料のマルチスケール確率解析を想定する。複合材料等の不均質材では素材レベルのばらつきを有し、それが複合材料の平均的な力学特性または応力状態に予想し難い影響を及ぼす場合があることから、これまで行われてきたシングルスケールの力学問題における確率的解析に加え、微視的に複雑な構造を有する複合材料などの不均質材料を対象としたマルチスケール問題に確率的な解析を導入することは、複合材料構造物の力学的シミュレーションの信頼性向上に有効であると考えられる。このような複数のスケールを通じた確率変動の伝播解析として、確率均質化解析やマルチスケール確率応力解析などが報告されている^{(1),(2)}。

これまでの報告では、特に均質化法や等価介在物法など、微視構造の不均質性を等価弾性定数に反映させる手法を用いる場合、微視構造における確率変動は一様もしくは周期的であると仮定されている。また、確率変動を仮定する物理量としては材料定数の場合が多い。

これに対して、本報では、一方向繊維強化複合材料を対象とし、繊維配置がばらつく場合の解析を試みた。特に、ユニットセル内に複数の繊維を配置し、他の繊維との位置関係が変化する問題についてモンテカルロシミュレーションにより確率均質化およびマルチスケール確率応力解析を試みたので報告する。

2. 解析手法

2-1 均質化法による微視的応力解析 均質化法を用いた場合、均質化された弾性テンソル E^H は次式で与えられる。

$$E^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y E \left(I - \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) dY \quad (1)$$

ここで $|Y|$ はユニットセルの体積、 E はユニットセル中の各素材の弾性テンソル、 I は単位テンソル、 χ は弾性場の特性変位、 y は微視構造の座標変数を表す。なお χ は次式の特性方程式の解として得られる。

$$\int_Y \frac{\partial}{\partial y} E \frac{\partial \chi}{\partial y} dY = \int_Y E \frac{\partial}{\partial y} dY \quad (2)$$

また、見かけのマクロひずみを ε^{macro} と表すと、ミクロ応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = E \left(I - \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) \varepsilon^{macro} \quad (3)$$

2-2 モンテカルロシミュレーション 確率特性解析手法として、しばしばモンテカルロシミュレーション(MC)が用いられる。モンテカルロシミュレーションとはある確率特性の実現値を適当な分布に従う乱数により生成し、繰り返し応答を求めることで、応答の確率特性を求める手法である。例えばある確率変数の期待値を X^0 、正規化された確率変数を α とすると、確率特性の実現値 X^* は次式で表すことができる。

$$X^* = (1 + \alpha) \times X^0 \quad (4)$$

なお、本研究では素材の物性値のばらつきは正規分布に従うものと仮定した。ここで、正規乱数の生成には Box-Muller 法を用いた。

このとき、マクロ応力の確率特性である期待値 $\text{Exp}[\sigma^*]$ 、分散 $\text{Var}[\sigma^*]$ 及び変動係数 $\text{CV}[\sigma^*]$ は次式により計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Exp}[\sigma^*] &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sigma_j, \quad \text{Var}[\sigma^*] = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\sigma_j - \text{Exp}[\sigma^*])^2 \\ \text{CV}[\sigma^*] &= \sqrt{\text{Var}[\sigma^*]} / \text{Exp}[\sigma^*] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 n は MC の試行回数であり、 $n=1000$ とした。

3. 問題設定

図1(a)に示すような微視構造を有する一方向繊維強化複合材料(GFRP)に一方方向負荷を与える場合を解析対象とした。母材をEpoxy樹脂、強化材をE-glassとし、それぞれの物性値を表1に示す。

本研究では、素材の材料定数のばらつきは考えず、繊維配置のばらつきのみを考える。均質化法を用いた場合、単一の繊維のみを含むユニットセルでは繊維配置の影響が考慮できないため、今回は繊維含有率を0.3とし、図のように9本の繊維を配置し、中央の列の繊維配置が変動することによる複合材料の均質化特性およびミクロ応力状態の変化を解析した。

Fig. 1 Microstructure of a unidirectional GFRP

Table1 Thermoelastic properties of each component material

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
Epoxy	4.5	0.39
E-glass	73.0	0.22

4. 数値結果

4.1 繊維配置のずれによる微視的応力状態の変化 まず、繊維配置が一様な場合とずれが生じている場合について、応力状態の変化を確認する。例として、一方向繊維強化複合材料の繊維直角方向に一様負荷を与えた場合の荷重負荷方向の応力状態を図2に示す。図より、繊維間隔が変わることにより応力が高くなる箇所が生じていることが確認できる。この場合では、最大応力が約15%上昇した。

Fig. 2 Microscopic tensile stress for the loading direction

4.2 モンテカルロシミュレーションによる解析結果 次に、繊維配置のランダム変動を考慮した場合の、等価弾性定数の変動係数を図3に、各方向垂直マイクロ応力とせん断応力の期待値及び変動係数を図4,5に示す。なお、図中のx-direction, y-direction, xy-direction はそれぞれ中央の繊維配置がx方向, y方向およびx,yの両方向にランダムにずれる場合を表す。また、今回は繊維配置のずれは正規分布に従うとし、繊維のずれ量の変動係数を0.05とした。また、中央三本の繊維は各々独立にずれるものとした。

Fig. 3 CV of the equivalent elastic properties of the composite material considering randomness of fiber arrangement

Fig.4 Expectation of the microscopic stresses

Fig.5 CV of the microscopic stresses

図3より、今回想定した繊維配置のランダム変動による等価弾性率の変動は最大0.0004程度であることが分かる。

一方図4,5より、マイクロ応力成分については、0.03程度の変動が確認でき、特に複合材料の強度評価面で繊維配置のランダム変動を考慮する必要性があることが確認できた。

5. 結 言

本報では、一方向繊維強化材を対象とし、繊維配置のランダム変動が等価弾性定数及びマイクロ応力状態に及ぼす影響について調査した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 変動係数0.05の繊維配置変動に対して、等価弾性定数の変動は最大で0.0004程度となった。
- (2) 変動係数0.05の繊維配置変動に対して、変動の方向によっては0.03程度の変動係数となる応力成分があり、等価弾性定数に及ぼす影響よりかなり大きい。複合材料の強度評価においては繊維配置のランダム変動を考慮する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費若手研究(B) (課題番号: 23760097, 平成23~26年度) 及び文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成24年~平成26年)の援助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) S. Sakata, et al.: Three-dimensional stochastic analysis using a perturbation-based homogenization method for elastic properties of composite material considering microscopic uncertainty, IJSS, Vol.45 3/4 pp.894-907, (2008).
- (2) S. Sakata, et al.: Perturbation-Based Stochastic Microscopic Stress Analysis of a Particle- Reinforced Composite Material via Stochastic Homogenization Analysis Considering Uncertainty in Material Properties, IJMSE Vol.9, Issues 4, pp.395-408, 2011.