

I - 3 界面剥離モデルを考慮した複合材料の解析手法とモデルの改善

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 樋口 耕平
東北大学大学院工学研究科 正 員 岩熊 哲夫

1. はじめに

複合材料の解析手法として、解析的平均化手法と有限要素法とを組み合わせるモデル¹⁾が提案されている。均質化手法のように正確に微視構造等をモデル化することはできないが、介在物の体積比率や形状を直接入力パラメータとして用いることができるので、取り扱いが非常に簡便であるというメリットがあり、設計の初期段階においては有効な手法であると言える。

一方、複合材料は材料界面における剥離現象が問題となる場合がある。そのような問題に対して Zhao and Weng は、界面における応力伝達に着目した界面剥離モデル²⁾を提案した。ここでは、その界面剥離モデルを上述の解析手法に導入し、複合材料の界面剥離を考慮できる数値解析手法を提案する。いくつかの解析例を示し、本解析手法の特性と可能性を検討する。

2. 界面剥離モデルと剥離基準

界面剥離モデルとしては、Zhao and Weng の提案したものを用いる。その手法では、通常の介在物の弾性テンソル C_I の代わりに、界面剥離が発生した方向へは応力を伝達しないという直交異方性を有する仮想ファイバーの弾性テンソル C_d を用いることで、界面剥離を表現する。 C_d の導出については文献²⁾を参照されたい。

本研究では有限要素解析を行うので、任意の応力状態に対する界面剥離の発生する条件を設定する必要がある。その条件は、介在物形状が円形と楕円形の場合で分けて考える。介在物形状が円形の場合、介在物内部の最大引張り主応力がある一定の値（ここでは剥離応力 σ_d と呼ぶ）に達したときに、その方向へ界面剥離が発生するとする。楕円形の場合は、界面剥離の方向は楕円短軸方向のみに限定し、介在物内部の楕円短軸方向の引張り応力が剥離応力 σ_d に達したときに発生するとする。

3. 解析的平均化手法による構成モデル

ここでは解析的平均化手法として、森・田中理論に増分型の J_2 流れ理論を厳密に組み込んだ複合材料の構成モデルを用いる。また介在物は補強材と考えるので、本研究では母材のみの降伏を考える。その場合、例えば平均ひずみ増分 $\dot{\epsilon}$ と平均応力増分 $\dot{\sigma}$ の関係は

$$\dot{\sigma} = X(C_M, C_I, S, I, f, \sigma_M^y, h_M, n_M) \dot{\epsilon} \quad \dots \dots \dots (1)$$

のように書ける。ここで X は、母材の弾性テンソル C_M 、介在物の弾性テンソル C_I 、介在物の形状を定義するエシェルビーのテンソル S 、単位テンソル I 、介在物の体積比率 f 、母材の降伏応力 σ_M^y 、母材の硬化パラメータ h_M 、 n_M で構成される4階のテンソルであり、非常に煩雑ではあるが、それらの関数として陽に表現される。界面剥離が発生した場合には、介在物の弾性テンソル C_I を仮想ファイバーの弾性テンソル C_d に置き換えるということに注意したい。

4. 解析例

(1) 問題の設定

最も基本的な構造部材である片持ち梁の解析例を示す。境界条件は図-1 に示したように設定し、要素分割は桁高方向に20分割、スパン方向に100分割の計2000分割とした。材料は、2124Al 母材中に、補強材としてSiC 繊維を体積比20%で介在させた材料を想定し、2124Al はヤング率 $E_M = 60\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_M = 0.3$ 、単軸初期引張り降伏応力 $\sigma_M^y = 290\text{MPa}$ 、硬化パラメータ $h_M = 700\text{MPa}$ 、 $n = 0.55$ 、SiC 繊維はヤング率 $E_I = 450\text{GPa}$ 、 $\nu_I = 0.2$ とした。剥離応力は様々な値が考えられるが、ここでは $\sigma_d = 200\text{MPa}$ とした。また介在物形状は円形および半径比1:5の楕円形とする。

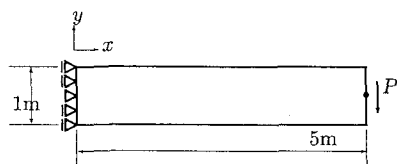


図-1 解析対象

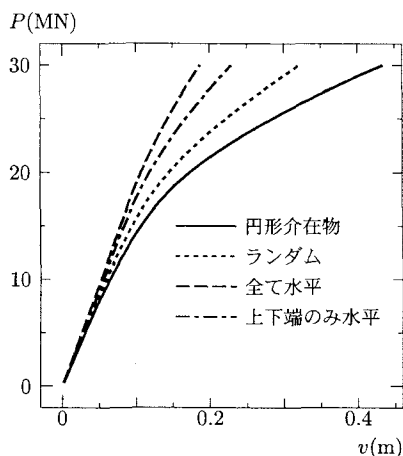
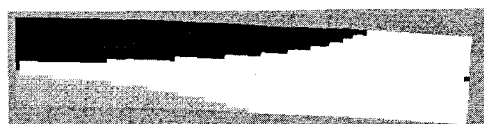


図-2 荷重変位関係



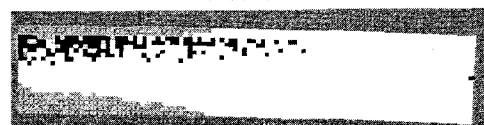
円形介在物の場合



ランダムな向きの場合



全て水平方向の場合



上下端のみ水平方向の場合

図-3 介在物の分布ごとの状態図 ($P = 24\text{MN}$)

(2) 介在物の形状・向きの影響

円形介在物の場合、楕円形介在物がランダムな向きに分布している場合、楕円形介在物が全て水平方向を向いている場合、楕円形介在物が上下表層側2層のみ合計4層に水平方向で中間層はランダムに分布している場合の4通りで解析を行う。荷重変位関係を図-2に、状態変形図を図-3にまとめて示す。状態変形図は、黒が界面剥離と母材の降伏が共に発生、濃い灰が界面剥離のみ発生、薄い灰が母材の降伏のみ発生を表す。

最も基本的な円形介在物が分布している場合の状態変形図を見ると、剥離領域は最も大きな引張り応力が作用する上縁左端から広がっており、母材の降伏領域は上下縁左端から広がっていることがわかる。ランダムな向きに分布させた場合の剥離領域と母材の降伏領域は、分布が疎になっているが、巨視的な広がりには円形介在物の場合とほぼ同じである。全て水平に分布させた場合では、介在物の楕円短軸方向には引張り応力がほとんど作用しないために界面剥離が発生しておらず、また上下端のみ水平に分布させた場合も上下端では界面剥離が発生していない。このように本解析手法では、意図的に界面剥離を制御させるようなことも可能である。

次に荷重変位関係であるが、円形介在物の場合よりも楕円形介在物がランダムな向きに分布している場合のほうが強度が大きく出ており、当然全て水平方向に分布させた場合はさらに強度が大きくなっている。しかし、上下端のみ水平に分布させたものもかなり大きな強度を示している。この結果から本解析手法は、複合材料構造物における介在物の最適な配置等を検討するような場合に非常に適していると考えられる。

5. おわりに

界面剥離モデルを考慮した複合材料の解析手法を提案し、いくつかの解析結果を示した。結果から本解析手法は、複合材料の微視構造を検討するような設計の初期段階においては非常に有効であると考えられる。

参考文献

- 樋口耕平, 岩熊哲夫, 京谷孝史, 寺田賢二郎: 解析的平均化手法を用いた複合材料の平面ひずみ要素, 応用力学論文集, Vol.6, pp.107-116, 2003.
- Zhao, Y.H. and Weng, G.J.: Transversely isotropic moduli of two partially debonded composites, *Int. J. Solids Structures.*, Vol.34, No.4, pp.493-507, 1997.