

積層材の強度特性の簡易予測

A simple estimate of laminated composite materials' strength characteristics

グエン デュイ シン*

Nguyen Duy SINH

*構造強度学研究室 (指導教員: 岩熊哲夫 教授)

複合材料の材料開発における数値的支援のために、介在物の量や向きなどを陽に表現できる手法を用いて積層材の強度特性を検討した。ここでは、介在物の量や向きを考慮できる森・田中理論で得られる平均挙動を組み込んだ3次元有限要素法を用いた。得られた複合積層材の剛性と強度特性を実験値と比較した。さらに、複合積層材で強度を支配する現象としての層間剥離や曲げ破壊についても検討した。

Key Words : composite materials, laminate, strength characteristics, layers debonding

1. はじめに

繊維強化プラスチック複合材料 FRP は航空宇宙構造物をはじめ、数多くの分野で使われている。繊維強化プラスチック複合材料の代表的なものとして炭素繊維強化プラスチック (CFRP) とガラス繊維強化プラスチック (GFRP) と挙げられる。CFRP や GFRP プリプレグを交差させ形成された積層材はハイブリッド FRP 積層材と呼ばれる。FRP 積層材は、従来の土木材料としての鋼材やコンクリートを補強するものとして現在では用いられつつある。特に、上下フランジや床版などの補強に使われている。積層材は異方性材料であると同時に、強度を左右する問題となるのは層間に剥離が生じることである。材料開発段階では、ある程度以上の良い精度でそのような挙動を予測する必要がある。そこで本研究では、複合材料有限要素法を用いて、積層材の強度特性を予測し、実験結果と比較し、材料開発ツールとしての可能性を検討する。

2. 解析手法

使い易さからよく用いられる平均化手法の一つ、森・田中理論では、複合材料の平均弾性係数は次式で計算される。

$$\bar{C} = C_M \{C_M - (1-f)(C_M - C_I)S\}^{-1} \\ \times [C_M - (C_M - C_I)]\{S - f(S - I)\}$$

ここに f は介在物の体積比率で、 C_I 、 C_M はそれぞれ介在物、母材の弾性係数である。 S は母材のポアソン比と介在物の半径比とその向きで決まる Eshelby のテンソルである。本研究では、森・田中理論で得られた複合材料の平均弾性係数を取り組んだ複合材料の3次元有限要素法¹⁾を用いて解析する。

3. 検討対象

検討対象となる積層材は B1 ~ B5, F1 ~ F5, H1 ~ H5 である。これらの積層材について詳しくは文献²⁾を

参照されたい。図-1 は表されているハイブリッド積層材の H1 材である。

4. 積層材の特性予測

(1) 弾性係数の検討

積層材の弾性係数を求めるために、図-2 に示した引張り梁モデルを用いた。図-3 にそれぞれの積層材の第1主軸方向 (繊維の向きは x 軸方向と重なる、そのとき $\theta = 0^\circ$) の弾性係数の積層理論値、実験値、本解析値を示している。この図から本解析値は積層理論値よりも実験値に近い。その相対誤差は約 5% 以内に収まった。なお積層理論値は、1枚の材料の直交異方弾性係数には実測値を用いている。

(2) 異方性の検討

ハイブリッド積層材は直交異方性材料である。図-4 にロービングクロス4層 ((G₂)₄) の弾性係数の異方性の程度を表した。ここで、本解析値と実験値はほぼ一致している。ただし、実験条件のデータが無かったため、繊維の向きとして $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ 方向の剛性が合うように繊維量を推測して、残りの方向を求めたが、実測値を良く予測している。

(3) 曲げ剛性の検討

積層材の曲げ剛性を求めるために図-5 に示した片持ち梁モデルを用いた。図-6 にそれぞれの積層材の第2主軸 (y 軸) 方向単位あたりの曲げ剛性の積層理論値、実験値、本解析値が表されている。本解析値は実験値との相対誤差が 10% 以内に収まった。

(4) せん断試験

ハイブリッド複合積層材では、もっとも問題となるのは層間に剥離が生じることである。層間剥離の原因は層間方向とその垂直方向に働く力と層間方向に働くせん断力によるものだと考えられている。本研究では、層間のせん断力による剥離について検討するために、図-7 に示した短い梁3点曲げ試験モデルを用いた。各層の間

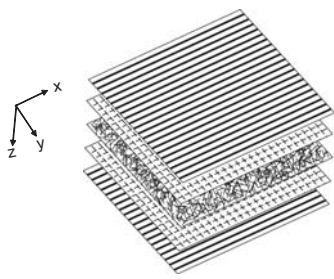


図-1 H1材： $(G1/G3/\sqrt{G2})_S$

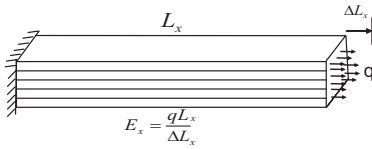


図-2 引張り梁モデル

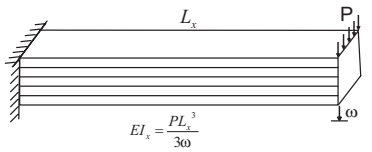


図-5 片持ち梁モデル

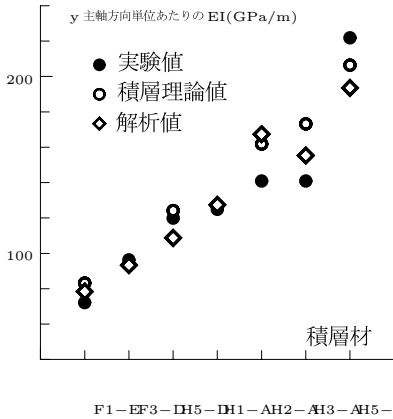


図-6 積層材の曲げ剛性

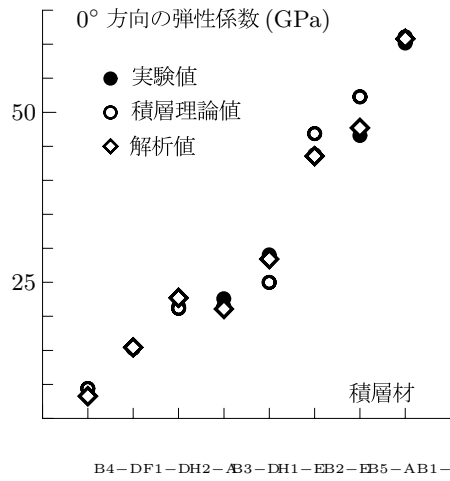


図-3 積層材の弾性係数

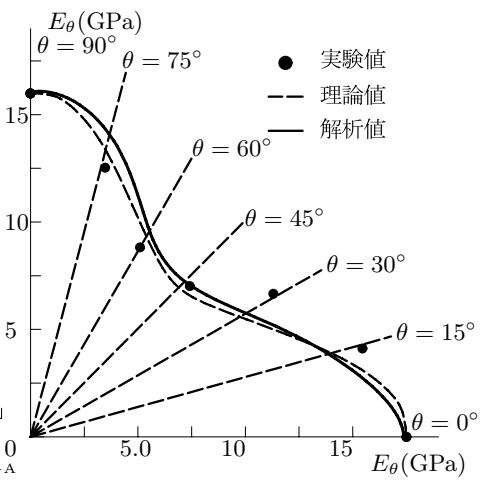


図-4 ロービングクロス4層の方向の弾性係数

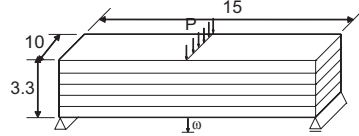


図-7 3点せん断モデル (mm)

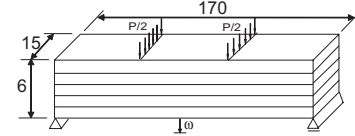


図-9 4点曲げモデル (mm)

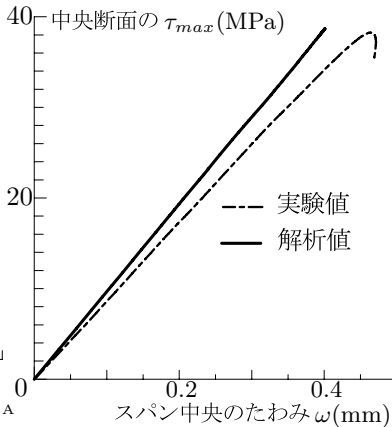


図-8 F1材のせん断

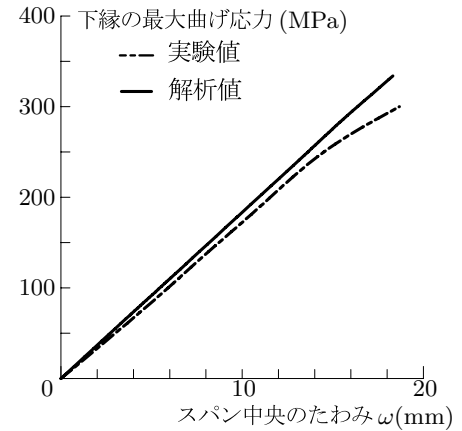


図-10 F2材の曲げ

に十分な薄い境界層を挿入することで、この境界層のせん断応力は元の層間のせん断力であると考えても良い。

図-8には、F1材の中央面の最大せん断応力とスパン中央のたわみとの関係が表されている。この図から解析曲線と実験曲線は非常に一致していることが分かる。なお実験では、ピークにおいて層間剥離が生じている。F1材はG2とG3の単層材の組み合わせでできた積層材なのでF1材のせん断試験で得られたG2とG3の層間の剥離強度を用いてF1材の同様な積層材の剥離破壊を予測できる。

(5) 曲げ試験

最後に積層材の曲げ強度を調べるために、図-9に示した4点曲げ試験モデルを用いた。図-10にF2材の最下縁の最大曲げ応力とスパン中央のたわみとの関係を示している。これも全体挙動は本解析値と実験値はほぼ一致している。せん断と曲げの実際の挙動はほとんど線形

なので、本プログラムに破壊応力を入力すれば、その破壊も予測できると期待できる。

5. 終わりに

森・田中理論を組み込んだ複合材料有限要素法を用いてハイブリッド複合材料板の弾性係数や曲げ剛性および層間剥離応力をおよそそれぞれ5～10%程度の誤差で予測できることが分かった。また、本解析プログラムを用いれば複合材料内部の応力を計算できるので、複合材料から成る構造部材の設計に大きく期待されるだろう。

参考文献

- 1) 王峰, 岩熊哲夫, 岸野佑次, 鈴木基行, 寺田賢二郎: 解析的手法を用いた複合材料・複合構造の3次元有限要素, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, 2005.
- 2) ハイブリッドFRP調査研究専門委員会.: ハイブリッド(GF/CF)FRP積層板の力学的に関する研究報告書, 強化プラスチック協会, 1984.

(2005年2月15日提出)