

1. はじめに

21世紀に向けて、軽量・耐熱性に優れた材料としてC/C複合材料(Carbon Fiber Reinforced CarbonComposite)が注目され、開発されてきた。しかし、C/C複合材料は金属材料と異なり、その損傷が内部層・界面・マトリックス部等の外部から検知できない部分やミクロな部分で広がり、外見上は健全に見えても損傷(ダメージ)は大きく広がっている場合があり、結果的に突然破壊するという非常に特異かつ扱いにくい性質を持っている。

本研究では、実験と理論解析を併用することにより、この種の繊維強化複合材料の信頼性・健全性を評価する手法の検討を行っている。この報告書では、(0/90)積層C/C複合材料の変位制御型3点曲げ破壊試験結果と有限要素法による損傷劣化過程のシミュレーションとの比較検討結果を報告する。

2. 積層型複合材料に対する弾性理論

2.1 一方向強化板の構成方程式

一方向強化板では繊維に沿った(L)方向と繊維に垂直(T)方向の特性が異なる。いまL方向、T方向のヤング率をEL, ET,せん断弾性係数をGL, L方向に引張ったときのL方向の引張りひずみとT方向の圧縮ひずみの比をνn(逆の場合はνn)とすると、直交異方性薄板のLT軸に関する構成方程式は

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{TL}/E_T & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \dots \textcircled{1}$$

となる。正確には、これは平面応力状態の場合にのみ成立するものであるが、積層複合材料は一般に平面応力状態であるから本報告ではこの表記で統一する。ここで

$$\nu_{LT}/E_L = \nu_{TL}/E_T$$

という関係がエネルギー原理から成り立つから、この場合の独立な弾性定数は4つであることがわかる。この4つの定数を実験から求め、有限要素プログラム等に使用するわけである。

2.2 (0/90)積層板の構成方程式

(0/90)積層板エッジ方向から力を加えたとき、層全体として、ひずみ x・ y・ xyが発生したとすると、層間破壊がないとすれば、各層のひずみは一致する。しかし、各層の応力は異なり、それぞれ次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \tau_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{L0} & \nu_{TL0} E_{L0} & 0 \\ \nu_{TL0} E_{L0} & E_{T0} & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \dots \textcircled{2}$$

90°層

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{x9} \\ \sigma_{y9} \\ \tau_{xy9} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{T9} & \nu_{TL9} E_{L9} & 0 \\ \nu_{TL9} E_{L9} & E_{L9} & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT9} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \dots \textcircled{3}$$

よって、0°層・90°層を1:1で積層したすると、全体の応力は、どなる。すなわち、積層板の剛性マトリックスは0°層と90°層の剛性マトリックスから簡単に計算できるものであることがわかる。

3. 複合材料の実験的評価

3.1 弓1張試験

直交異方性体の場合、繊維に沿った0°(L)方向、繊維に垂直な90°(T)方向、さらに繊維の45°方向の単軸引張り試験を行うことにより、弾性定数が求まる。

本実験で得た値は、以下のとおりである。

- EL = 108.00 [GPa]
- ET = 10.00 [GPa]
- GLq、 = 5.25 [GPa]
- νLT = 0.3

3.2 変位制御型3点曲げ試験

C/C複合材料(0/90)積層板の亀裂が無い場合と有る場合について、エッジ方向への3点曲げ破壊試験を行った。3点曲げ試験は、モータで変位を徐々に増加させその反力を測定している。実験結果を図1に示す。ここで、スパン長さ: L=45mm,板幅: W=4 mm,板厚: B=3 mmである。

亀裂が無い場合は、変位に対し反力が直線的に大きくなり、ある変位で一気に入っている。その後、変位に対し反力はなだらかに下がるようになる。一方、亀裂の有る場合は、変位に対する反力の増加が緩やかで、ある変位で一気に入ることはなく徐々に下がりだし、その後、ある変位からは亀裂の無い場合とほぼ一致する傾向がある。

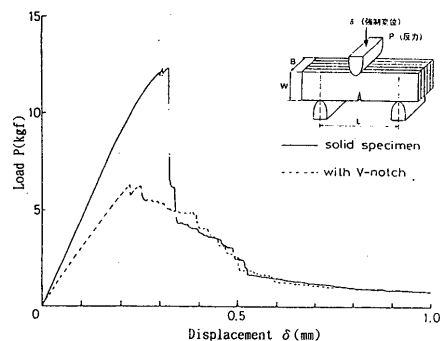


図1 3点曲げ試験結果

4. 損傷・劣化過程のシミュレーション

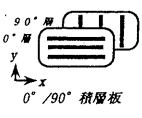
4.1 複合材料の破損則

一方向強化材を均質体とみなし、繊維方向の強さFL、繊維と直角方向の強さFT、せん断力強さFLTが既知のとき、斜めに力が作用した場合や組み合わせ応力が作用した場合の強さについて述べる。これは破損則と呼ばれ、今回採用した最大応力説は、主軸方向の応力が

$FL_c < L < FL_t$, $FT_c < T < FT_t$, $|LT| < LT$ の条件のうちどれかを破ったとき破壊とみなすものである。上式中の添字c, tは圧縮および引張を示す。この説では主軸方向の応力 L, T, LTは強さに関して相互に干渉しない。

4.2 有限要素法プログラム

プログラムは、(0/90)積層板(直交異方性体)の2次元問題を解析対象とし、実際の破壊現象をシミュレーションするため外力を強制変位で与え、反力を計算しながら進める。損傷の広がりを表現する計算方法として、山田の方法(要素を1つずつ降伏させ要素剛性マトリックスを低下させながら、繰り返し計算する方法)、メモリ節約・計算時間短縮の観点からスカイライン法を採用した。要素の破損は、各層ごとの破損則に基づき判定する。各要素においては、L方向,T方向にわけて破損を判断し、低下させる剛性を決定している(図2)。なお,nについては引張・圧縮破損を区別し、それぞれ $n_t=105$, $n_c=10$ とする。



層	破損則	概念図	剛性低下方法
0°層	$\sigma_x > FL$	繊維破断	E_{L0}/n , E_{T0} ν_{LT0}/n , GL_{T0}/n
	$\sigma_y > FT$	マトリックス割れ	E_{L0} , E_{T0}/n ν_{TL0}/n , GL_{T0}/n
90°層	$\sigma_x > FT$	マトリックス割れ	E_{L9} , E_{T9}/n ν_{TL9}/n , GL_{T9}/n
	$\sigma_y > FL$	繊維破断	E_{L9}/n , E_{T9} ν_{LT9}/n , GL_{T9}/n

図2 要素の剛性低下方法

4.3 損傷・劣化過程のシミュレーション結果

強制変位1.0mmに対する解析結果を図3(平滑材)、図4(切欠材)に示す。解析結果は、試験結果に対応するグラフと0°層・90°層のマトリックス・繊維の損傷(引張・圧縮)を塗りつぶしで表示する要素図(左半分のみ表示)からなる。解析結果のグラフをみると、平滑材・切欠材ともに、試験結果の特徴を再現性良くシミュレートできた。平滑材について損傷の広がりを見ると、マトリックス損傷が0°層・90°層それぞれに大きく広がっている。繊維破損は0°層の強制変位直下で直線的に広がっている。

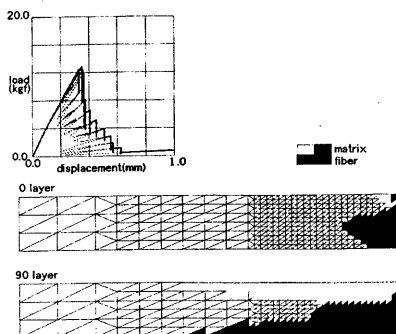


図3 解析結果(平滑材)

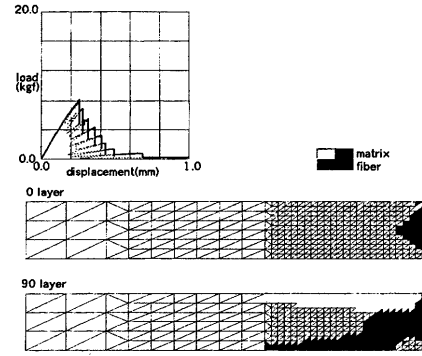


図4 解析結果(切欠材)

切欠材について損傷の広がりをみると、平滑材と比べ小さい。これは、切欠がある為少ない変位で応力が集中し繊維が破損するものと考えられる。

また、平滑材について最大荷重時の解析結果を図5に示す。強制変位に対する反力変化は、直線的で何の損傷も無い様であるが、損傷の広がりを見るとマトリックス損傷が90°層に大きく広がっている。最大荷重直後、0°層の繊維破損により反力が一気に減少する。

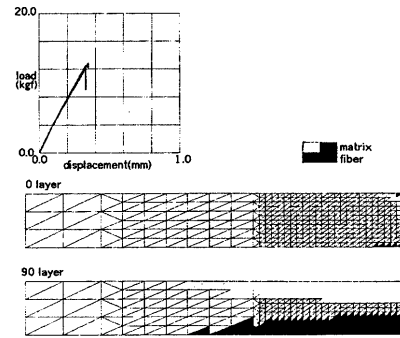


図5 解析結果(平滑材・最大荷重時)

5. まとめ

本研究では、(0/90)積層C/C複合材料を対象とし、室温における損傷進展シミュレーション手法を検討した。

0°, 90°の各層ごとに繊維方向とその直角方向の破損を分けて考えることによって、平滑材・切欠材ともに実験結果を再現性良くシミュレートできることが明らかとなった。

今後の課題としては、高温・疲労荷重下への拡張、さらに3次元問題への拡張による層間破壊の考慮が挙げられる。

付記

本報告書は、平成6年度の中小企業事業団の研修(中小企業技術指導員養成課程)で作成した実習報告書、及び日本複合材料学会1995年度研究発表講演会で発表したものを再構成したものである。

参考文献

- 1) 福田博・遺吾一著, 複合材料の力学序説, 古今書院2)
- 2) 三好後部著, 有限要素法入門, 培風館, 1978
- 3) 福田博・横田力男・塩田一路著, 複合材料基礎工学, 日刊工業新聞社, 1994
- 4) 三本木茂雄・吉村信敏著, 有限要素法による構造解析プログラム, 培風館, 1970