

I-680 繊維強化型積層板の弾塑性応答解析について

大同工業大学工学部 正会員 ○ 水澤富作
 大同工業大学大学院 学生員 鬼頭博史
 (株)大成ロテック 正会員 岩田直紀

1. はじめに 高い比強度、比剛性を有する先進複合材料は、今日広い産業分野で用いられており、また吸振性や吸音性に優れている¹⁾。これまでに、強い異方性を持つ複合材料を積層材として用いた複合積層板の振動、座屈や曲げ解析が行われているが、複合積層板の非線形応答解析についてはさほど多く研究されていない。Owenら²⁾は、有限要素法を用いて周辺単純支持された積層板の弾塑性解析を行い、その破壊特性について検討している。

本研究では、縮退型有限要素モデルと異方性積層板理論を用いて

ガラス/エポキシ材から成る一方向繊維強化型積層板の弾塑性応答解析を行い、対称及び非対称積層板の破壊モードや破壊(塑性)域の進展などの破壊特性について検討している。

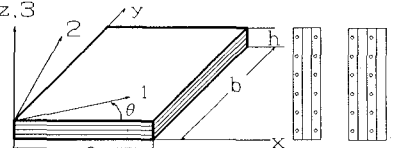


Fig. 1 繊維強化型積層板と座標系

2. 解析手法 Fig. 1に示すように積層の組方(配向)により、クロス・プライ積層板とアングル・プライ積層板になり、強化

繊維方向の弾性係数比、積層数や配向角などにより異なった力学的性状が示される。また、横せん断剛性が面内剛性や曲げ剛性と比較してかなり小さいので、薄板でも横せん断変形の影響が重要になる。ここでは、このような横せん断変形や回転慣性などの影響を考慮した縮退化したアイザワマトリックス³⁾とHillの異方性理論に基づくMises

Table 1. 複合材料(ガラス/エポキシ材)の材料特性値及び降伏応力²⁾

$E_1 = 25E10^6$ psi	$\sigma_{.1} = 25.0$ psi
$E_2 = 1.0E10^6$ psi	$\sigma_{.2} = 5.0$ psi
$G_{12} = 0.5E10^6$ psi	$\sigma_{.45} = 5.0$ psi
$G_{13} = 0.2E10^6$ psi	$\tau_{.12} = 3.5$ psi
$\nu_{12} = 0.25$	$\tau_{.13} = \tau_{.23} = 3.0$ psi
$a = 50$ inch, $\rho = 1.0$,	$E_p = G_p = 0.0$

の降伏条件を用いて、弾塑性解析を行っている。厚さを層要素に分割することにより、厚さ方向の塑性域の進展も考慮できる。また、衝撃応答解析には中間加速度法を適用し、非線形方程式は増分・反復法を用いて解いている。異方性材の弾性マトリックスとその降伏条件について示す。それぞれ直交する2つの材料主軸(1, 2)が全体座標系(x, y)と回転角(配向角) θ を成す積層の弾性マトリックス, Dは、次式で示される。

$D = T^T D_0 T$... (1)。ただし、D₀は弾性マトリックス、Tは座標変換マトリックスである。したがって、k層の力の構成式は、 $\sigma = D \epsilon$ で与えられる。材料の弾塑性挙動は、初期降伏条件、塑性流れ則やひずみ硬化則に支配される。いままでに、複合材のための種々の破壊(降伏)基準が提案されている⁴⁾。ここでは、次式で表されるMisesの降伏条件を適用する。縮退板要素では、板厚方向の垂直応力, $\sigma_{.33}$ を無視するので、k層での相当応力, σ_e は次式で与えられる。ここで、 α_i は、異方性パラメータである²⁾。

$f^2 = \sigma_e^2 = \{ \alpha_1 \sigma_{.11}^2 + 2\alpha_{12} \sigma_{.11} \sigma_{.22} + \alpha_2 \sigma_{.22}^2 + \alpha_3 \tau_{.12}^2 + \alpha_4 \tau_{.13}^2 + \alpha_5 \tau_{.23}^2 \} = 0$... (3)

したがって、x-y-z座標系での相当応力も、座標変換を行うことにより導ける。また、ひずみ増分は、次式のように弾性ひずみ増分 $d\epsilon_e$ と塑性ひずみ増分 $d\epsilon_p$ の和で与えられる。 $d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_p$... (4)

塑性ひずみ増分は、塑性流れ則より、次式で与えられる。 $d\epsilon_p = d\lambda \otimes f / \otimes \sigma$... (5)

ここで、 $f(\sigma)$ は塑性ポテンシャル、 $d\lambda$ は正のスカラー量である。ただし、歪硬化の影響は無視する。

3. 数値計算例及び考察 Fig. 1に示す対称クロス・プライ積層板、対称アングル・プライ積層板と逆対称アングル・プライ積層板の弾塑性応答解析を行い、また一方向繊維強化積層板の破壊パターンや塑性域の進展に与える幅厚比や積層数の影響について示す。Table 1には、数値計算例に用いたガラス/エポキシ材の材料特性値²⁾と解析モデルが示してある。はじめに、要素分割数、層要素分割数や時間ステップを変化させながら解析し、また他の手法との比較検討を行い、本解析手法の解の精度や収束性を確認している。

3・1 静的弾塑性解析 Fig. 2は、等分布荷重を受ける周辺単純支持された2、3の積層板の板中央での荷重-変位曲線を示す。ここで、幅厚比、 $a/h = 4$ 、積層数、 $N = 3$ または4である。ただし、板の対称性を

考慮して、4分の1の領域を3x3に分割し、また板厚方向を9層要素に分割している。これより、対称クロス・プライ積層板と逆対称アングル・プライ積層板が対称アングル・プライ積層と比較して、剛性が大きく、大きな強度を示している。これは、対称アングル・プライ積層板では、曲げとねじりの連成効果によるためである。これらの積層板の塑性域の進展には、大きな違いが見られる。Fig. 3には、対称クロス・プライ積層板の各断面での厚さ方向の塑性進展状況が示してある。これより、面外せん断応力が卓越する強化方向に垂直な支持辺の中央で塑性化が生じ、急激に板厚方向に塑性化が進展する。荷重の増大に従い、曲げ応力の大きな板中央部の弱層が塑性化し、支持辺方向に進展している。

3・2 衝撃弾塑性応答解析 ステップ荷重でモデル化した衝撃分布荷重を受ける対称クロス・プライ積層板の弾塑性応答について示す。Fig. 4には、強化方向に垂直な相対する2が単純支持され、他の2辺が固定された正方形積層板($a/h=4$, $q=2.0$)の中央点の動的たわみ曲線に与える積層数の影響が示されている。ここで、積層数を3, 5, 9と変化させている。これより、積層数を5層以上にとれば、その影響が小さくなる。しかし、塑性化により複雑な応答性状が示されている。Fig. 5は、各時刻における各断面での板厚方向の塑性化状態を示す。衝撃荷重の載荷と同時に塑性化が急激に進展するが、時間の経過とともに、破損が進展しなくなる。他にも、幅厚比、配向角や境界条件などを変化させてみたが、積層板の弾塑性応答特性に大きな変化が見られた。

Fig. 4 対称クロス・プライ積層板の動的たわみ応答曲線に与える積層数の影響: SS-CC, $a/h=4$, $a/b=1$, $q=2.0$

4. あとがき 一方向繊維強化型積層板の弾塑性応答解析を行い、積層板の破壊モードや破壊(塑性)域の進展などの破壊特性に与える積層数、幅厚比や境界条件などの影響について検討し、次のような結果を得た。

- 1) 対称クロス・プライ積層板と逆対称アングル・プライ積層板が対称アングル・プライ積層と比較して、剛性が大きく、大きな強度を示している。
- 2) その破損の進展は、薄い積層板では、板中央面より曲げ応力によって表層がまたは弱層が降伏し、支持辺方向に進展して行くが、板厚が増大すると、面外せん断応力により支持辺の板厚方向に急激な塑性化が生じることなどが明らかにされた。なお、本研究は平成4年度科研費(一般研究(C))を受けている。

参考文献 1) 小林: 先進複合材料と次世代航空機, 機械の研究, Vol. 44(2), pp. 1-4, 1992.

2) Owen, D.R.J. et al.: Elasto-plastic numerical analysis of anisotropic laminated plates by a refined finite element model, Computational Plasticity, Part 1, pp. 749-775, 1987. 3) 水澤他: 構造工学論文集, Vol. 37A, 1991. 4) 三木: 複合材料積層板の材料設計, 材料, vol. 30, pp. 93-98, 1982.

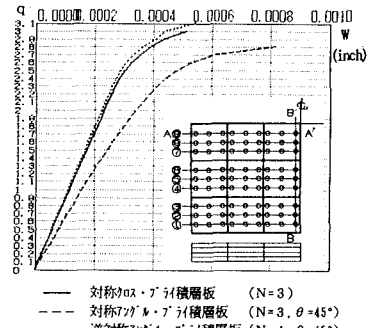


Fig. 2 対称及び非対称積層板の荷重-変位曲線: SS-SS, $a/b=1$, $a/h=4$

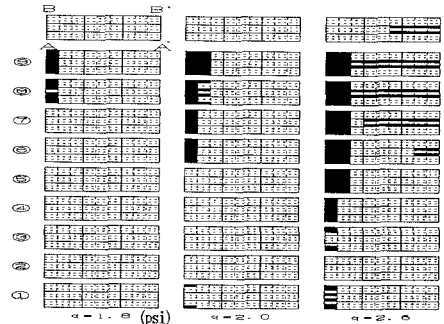


Fig. 3 各断面での板厚方向の破損(塑性)域の進展状況

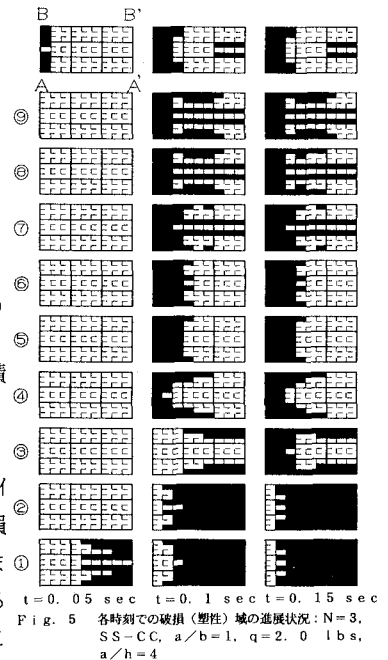


Fig. 5 各時刻での破損(塑性)域の進展状況: N=3, SS-CC, $a/b=1$, $q=2.0$ lbs, $a/h=4$