

積層複合曲面板の弾塑性応答解析について

大同工業大学大学院 学生員 ○鬼頭博史

大同工業大学工学部 正会員 水澤富作

1. はじめに 繊維強化型複合材料(FRP)は高強度、高剛性や耐久性に優れていることから、幅広い産業分野で用いられている。著者らは、これまでに、衝撃荷重を受ける積層複合板の弾塑性応答解析を行い、その破壊モードや進展などの破壊特性について研究¹⁾を行っている。しかしながら、積層複合曲面板の非線形応答解析の研究についてはあまり行われていないように思われる。

本研究では、9 節点縮退型シェル要素モデルと異方性シェル理論を用いてグラファイト/エポキシ材から成る一方向繊維強化型積層曲面板の弾塑性応答解析を行い、逆対称及び対称クロス・プライ積層円筒パネル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。

2. 解析手法 図-1 に示すような積層曲面板を横せん断変形や回転慣性などの影響を考慮したアイザワマトリックス要素¹⁾と Hill の異方性理論に基づく Mises 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する。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、 D_0 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 i 点の構成式は、 $\sigma = D \varepsilon$ 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²⁾。ここでは、次式で表される Mises の降伏条件を適用する。縮退シェル要素では、シェル厚方向の垂直応力、 σ_{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。

$f^2 = \sigma_e^2 = \{ \alpha_1 \sigma_{11}^2 + 2\alpha_2 \sigma_{11} \sigma_{22} + \alpha_3 \sigma_{22}^2 + \alpha_4 \tau_{12}^2 + \alpha_5 \tau_{13}^2 + \alpha_6 \tau_{23}^2 \} = 0$... (2)

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 $d\varepsilon_e$ と塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_p$ の和で与えられる。 $d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p$... (3)

塑性ひずみ増分は、塑性流れ則より、次式で与えられる。 $d\varepsilon_p = d\lambda \partial f / \partial \sigma$... (4)

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 図-1 に示すような周辺固定されたクロス・プライ積層円筒パネルの弾塑性応答解析と衝撃圧力を受ける弾塑性応答解析を行い、積層円筒パネルの破壊パターンや塑性域の進展に与えるシェル厚比や積層構造などの影響について検討を行う。なお、計算例に用いたグラファイト/エポキシ材の材料特性値³⁾が表-1 に示してある。また、図-2 には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、本手法の解の収束性などを確認している。

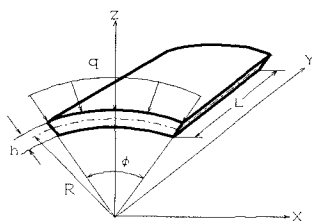


図-1 繊維強化型積層曲面板と座標系

表-1 複合材料(グラファイト/エポキシ材)の材料特性値及び降伏応力³⁾

$E1 = 25E10^6$ psi	$\sigma_{e1} = 25.0$ psi
$E2 = 1.0E10^6$ psi	$\sigma_{e2} = 5.0$ psi
$G12 = 0.5E10^6$ psi	$\sigma_{e45} = 5.0$ psi
$G13 = 0.2E10^6$ psi	$\tau_{e12} = 3.5$ psi
$\nu_{12} = 0.25$	$\tau_{e13} = \tau_{e23} = 3.0$ psi
$L = 50$ inch, $\rho = 1.0$	$E_p = G_p = 0.0$
$R = 37.5$ inch, $\phi = 90^\circ$	

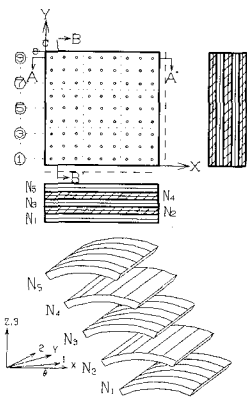


図-2 一方向強化型積層曲面板と離散化モデル

3.1 静的弾塑性解析

図-3 には、それぞれ等分布圧力を受ける周辺固定された対称及び逆対称積層円筒パネル($R/L = 0.75$, $\phi = 90^\circ$)の中央点での荷重-たわみ曲線がを示してある。ここで、シェル厚比、 h/L は 0.1 と 0.25 にとり、積層数、 N を 4 層と 5 層に仮定し

ている。ただし、円筒 γ の2軸対称性を考慮して、4分の1の領域を3x3要素に分割を行い、各積層を2層に分割している。これより、対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ は、逆対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ と比較して、剛性が高く、大きな耐力を示している。また、図-4は、各荷重レベルでの対称円筒 γ の各積層(ミミ)の塑性域の進展状況を示している。これより、円筒軸に平行な固定辺中央から円筒方向に向かって塑性化が進展し、荷重の増大に従って、円筒軸方向に塑性域が広がっていく。特に、円筒 γ の内側(N_1)と外側(N_5)では、その破壊パターンが異なる。

3・2 衝撃弾塑性応答解析 図-5の

a), b)には、それぞれ γ 厚比、 h/L が0.1と0.25の場合の対称及び逆対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ の中央点での弾性及び弾塑性動たわみ曲線の比較が示されている。これより、対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ が逆対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ と比較して小さな応答値を示している。また、図-6のa), b)には、対称及び逆対称積層円筒 γ の各時刻、 t での各積層の塑性域の進展が示してある。これより、対称積層

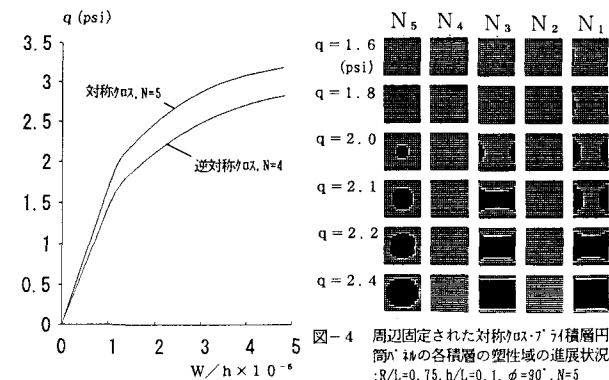
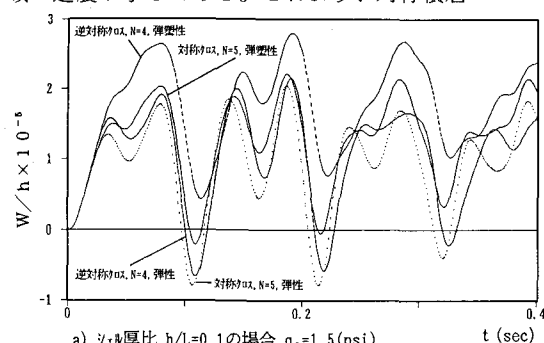
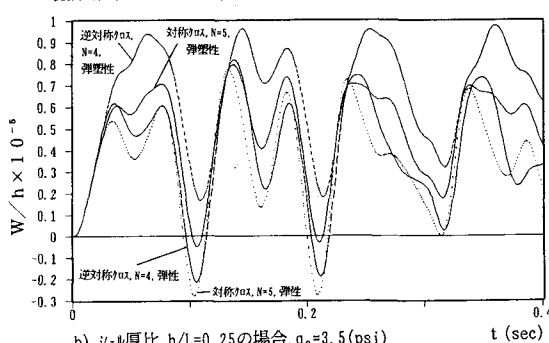


図-4 周辺固定された対称クロス・プ・ラ積層円筒 γ の各積層の塑性域の進展状況: $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$, $N=5$



a) γ 厚比、 $h/L=0.1$ の場合、 $q_0=1.5$ (psi)



b) γ 厚比、 $h/L=0.25$ の場合、 $q_0=3.5$ (psi)

図-5 衝撃圧力、 q を受ける周辺固定された対称及び逆対称クロス・プ・ラ積層円筒パネルの弾性及び弾塑性動たわみ曲線に与える h/L の影響: $R/L=0.75$, $\phi=90^\circ$

円筒 γ では、円周方向の強化積層に塑性が生じ、時間の経過に従って、固定辺と γ 中央から円筒軸方向へ塑性域が伝播している。また、塑性域の発生するラミナが対称積層円筒 γ と逆対称積層円筒 γ で異なっている。

4. あとがき

以上の結果より、クロス・プ・ラ積層 γ の衝撃応答特性は、積層構造や γ 厚比に大きく関係し、異なった破壊パターンと進展性状が示される。円筒 γ の幾何構造により、円筒方向に大きな応力が発生するので、円筒方向に塑性化が生じ、強化繊維を分離させるように円筒軸方向に塑性化が進展していくことがわかる。また、円筒方向の強化層には、塑性化が生じないことも、積層板と異なる点である。

なお、本研究は平成5年度科研費(一般研究(C))を受けている。

参考文献 1) 水澤, 鬼頭他: 繊維強化型積層板の弾塑性応答解析について, 土木学会第48回年次講演概要集, I-680, pp. 1508-1509, 1993. 2) 三木: 複合材料積層板の材料設計, 材料, vol. 30, pp. 93-98, 1982. 3) Li, Z.H. and Owen, D.R.J.: Elastic-plastic analysis of laminated anisotropic shells by a refined finite element laminated model, Computers & Structures Vol. 32, pp. 1005-1024, 1989.