

I-10

クロス・プライ積層円筒パネルの衝撃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 先進複合材料である繊維強化型複合材(FRP)は高い比剛性や比強度を有し、また耐衝撃性や減衰特性に優れ、古くから幅広い産業分野で用いられている。著者ら¹⁾は、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を行っている。しかしながら、積層複合円筒パネル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節縮退型シェル要素モデルと横せん断変形と回転慣性の影響を考慮した異方性シェル理論を用いて、グライフト/エボキ材から成る一方向繊維強化型積層円筒パネルの衝撃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)域の伝播などの破壊特性について検討している。

2. 解析手法 図-1に示すような積層円筒パネルを横せん断変形と回転慣性などの影響を考慮したアイハマトリックス要素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、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層のうけの構成式は、 $\sigma = D \varepsilon$ 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。

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

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad \dots (3)$$

塑性ひずみ増分は、塑性流れ則より、次式で与えられる。

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad \dots (4)$$

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イフト/エボキ材の材料特性値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。

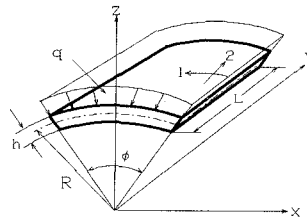


図-1 繊維強化型積層円筒パネルと座標系

表-1 複合材料(グライフト/エボキ材)の材料特性値及び降伏応力³⁾

E1= 25E10 ⁶ psi	σ_{e1} = 25.0 psi
E2=1.0E10 ⁶ psi	σ_{e2} = 5.0 psi
G12=0.5E10 ⁶ psi	σ_{e45} = 6.0 psi
G13=0.2E10 ⁶ psi	τ_{e12} = 3.5 psi
ν_{12} =0.25	τ_{e13} = τ_{e23} =3.0 psi
L=50 inch, ρ =1.0,	$E_p=G_p=0.0$
R=37.5 inch, ϕ =90°	

ここで、 τ_{ij} のi, jは、材料主軸(1, 2, 3)

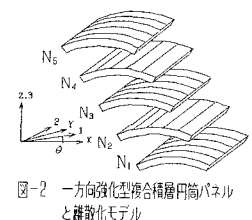
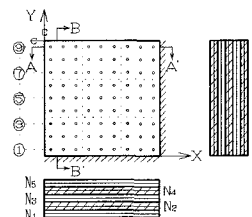


図-2 一方向強化型複合積層円筒パネルと離散化モデル

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クロス・プライ積層円筒パネル($R/L=0.75$, $\phi=90^\circ$)の中央点での荷重-たわみ曲線が示してある。ここで、シェル厚比

, h/L は0.1にとり、積層数, N を4層と5層に仮定している。円筒シェルは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、対称積層円筒シェルは、逆対称積層円筒シェルと比較して、剛性が高く、大きな耐力を示している。また、図-4は、各荷重レベルでの逆対称円筒シェルの各積層（ N_i ）の塑性域の進展状況を示している。これより、強化層の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。また、内側の強化層（ N_1 ）と他の強化層（ N_3 ）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には、最初の下層から円周方向に繊維強化した層を積層した場合と逆に下層を円筒軸方向に繊維強化した場合の対称及び逆対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの中央点での動たわみ曲線に与える積層組の影響が示されている。これより、対称積層シェルの応答値が積層組により大きな影響を受け、また、下層を円周方向の強化層にした場合の方が小さな応答値を示している。

図-6のa), b)には、同じ条件での対称積層円筒シェルの各時刻, t での各積層の塑性域の進展が示してある。これより、対称積層円筒シェルでは、円周方向の強化積層に塑性が生じ、時間の経過に従って、直線固定辺とシェル中央から円筒軸方向へ塑性域が伝播している。また、円筒軸方向の積層には、塑性域の進展が見られない。

図-7には、5層から成る対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの動たわみ曲線に与える円周方向の強化層の厚さの影響が示してある。ここで、 N_1, N_3, N_5 の厚さを t_1 、 N_2, N_4 を t_2 とし、 t_1/t_2 で層厚を表している。これより、円周方向の強化層（ N_1, N_3, N_5 ）の厚さを円筒軸方向の強化層（ N_2, N_4 ）より厚くすれば応答値を減少させることができる。

4. あとがき

本研究で得られた主な結果を示すと以下になる。1) クロス・ブレイ積層円筒シェルの衝撃弾答特性は、積層の組み方によって、異なった破壊パターンと進展性状が示される。2) 円周方向の圧縮応力によって、円周方向の強化層が潰れるように降伏し、円筒軸方向に塑性域が伝播していくことがわかる。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: 繊維強化型複合積層板の衝撃弾塑性応答解析について, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 85-98, 1994. 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.

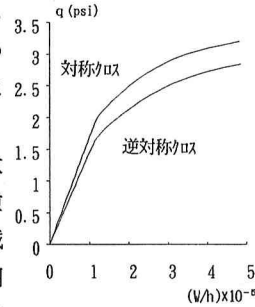


図-3 周辺固定された対称及び逆対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの荷重-変位曲線: $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$

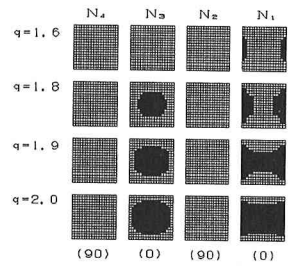


図-4 周辺固定された逆対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの各積層の塑性域の進展状況: $N=4$, $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$

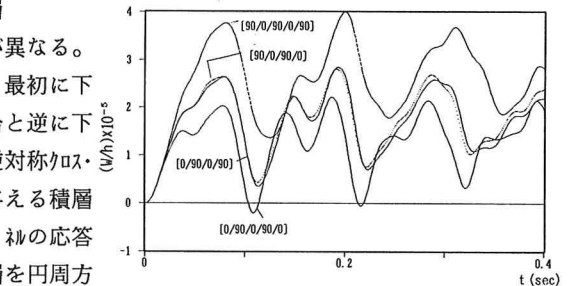


図-5 周辺固定された対称及び逆対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの動たわみ曲線に与える積層組の影響: $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$, $q=1.5$ (psi)

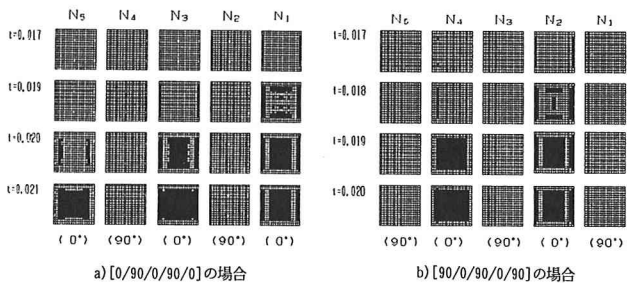


図-6 各時刻, t における周辺固定された対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの各積層での塑性域の進展状況: $N=5$, $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$, $q=1.5$ (psi)

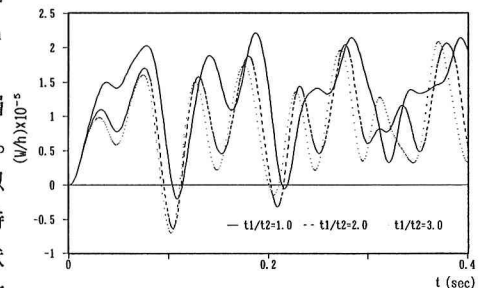


図-7 周辺固定された対称クロス・ブレイ積層円筒シェルの動たわみ曲線に与える積層の厚さの影響: $N=5$, $R/L=0.75$, $h/L=0.1$, $\phi=90^\circ$, $q=1.5$ (psi)