

初期損傷を持つ繊維強化型積層板の 剥離応答解析について

中日本建設コンサルタント(株) 正会員 ○ 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 繊維強化複合材料(FRP)から成る繊維強化型積層板は、高い比強度や比剛性を持ち、繊維を一方方向に揃えた薄板を積層状にして成形される。この種の材料では、衝撃や疲労、また初期損傷により層間で剥離が生じてくる。著者らは、これまでも、衝撃荷重を受ける積層板や積層シェル¹⁾の弾塑性応答解析を行い、その破壊特性について検討¹⁾を行っている。しかしながら、一次部材としての安全性や信頼性を確保するためには、層間剥離による破壊挙動も明らかにする必要がある。

本研究では、層間にボンド層(接着層)を考慮し、衝撃等分布荷重を受ける周辺固定された積層板の剥離応答解析を行い、2層から成る逆対称クロス・プライ積層板の曲げ荷重による剥離挙動や剥離の進展状況に与えるボンド層の面外せん断強度や局部的な初期損傷の影響について明らかにしている。

2. 解析手法 図-1に示すように、逆対称クロス・プライ積層板の各層の間(層間)に、ボンド層を設けることにより界面のせん断破壊を考慮し、層間の剥離応答解析を行う。式の定式化にあたり、以下のような仮定を設ける。1) 各ラミナは直交異方性材料とし、エポキシ樹脂などの接着層は等方性材料であると仮定する。2) 各層と接着層の界面では相対すべりは無視する。3) 破壊(塑性域)は、Hillの異方性理論に基づくMisesの降伏条件を用いて判定する。4) 衝撃荷重は、等分布ステップ荷重で仮定し、ひずみ硬化、粘弾性や減衰の影響は無視する。弾塑性解析には、横せん断変形や回転慣性の影響を考慮した縮退7変位パラメトリック要素を用い、中間加速度法と増分・反復法を用いて応答解析を行っている。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クス, Dは、次式で与えられる。 $D = T^T D_0 T$... (1) ただし、D₀は弾性マトリクス、Tは座標変換マトリクスである。したがって、k層の層の構成式は、 $\sigma = D \epsilon$ 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。降伏判定は、Misesの降伏条件を適用すると、k層での相当応力、 σ 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)
また、ひずみ増分は、式(3)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。
塑性ひずみ増分は、塑性流れ則より、次式で与えられる。
$$d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_p$$
 ... (3)
ただし、 $f(\sigma)$ は塑性ポテンシャル、 $d\lambda$ は正のスカラー量である。
$$d\epsilon_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}$$
 ... (4)

3. 数値計算例及び考察 衝撃荷重を受ける逆対

称クロス・プライ積層板の剥離応答解析を行い、ボンド層を考慮した積層板の破壊モードや剥離(塑性)域の進展状況などの力学特性について検討する。また数値計算例で用いたFRP層とボンド層の材料特性値は表-1に示してある。図-2には、衝撃荷重を受ける逆対称クロス・プライ積層板のボンド層の面外せん断強度を $\tau_{23} = 3.0$, τ_{23}

=1.5 (psi)に変化させた場合の板中央点での動たわみ曲線、各時刻での面内方向への塑性域の進展状況が示してある。これより、ボンド層の面外せん断強度を減少させると、各FRP層の強化繊維方向と平行な固定辺中央部のボンド層が横せん断応力の影響により剥離し、急激に固定辺周辺に沿って剥離が進展する。また、時間の経過とともに、その剥離域が板中央部に向って伝播し、面外せん断強度により異なった剥離パターンが示されている。一方、FRP層は、ボンド層の剥離にともない各層の固定辺中央部より塑性化し、時間の経過に伴って

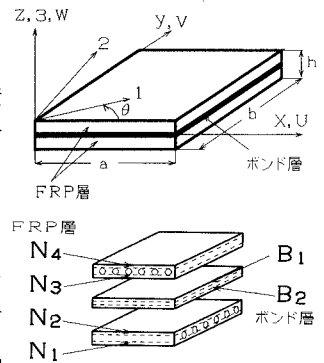


図-1 繊維強化型積層板の接着モデル

表-1 複合材料の材料特性値及び降伏応力¹⁾

GFRP (ガラス繊維/エポキシ)	E11=25E10 ⁶ psi (172.3 GPa)	$\sigma^*11=25.0$ psi (172.3 KN/m ²)
	E22=1.0E10 ⁶ psi (6.89 GPa)	$\sigma^*22=5.0$ psi (34.5 KN/m ²)
	G12=0.5E10 ⁶ psi (3.45 GPa)	$\sigma^*45=6.0$ psi (41.3 KN/m ²)
	G13=G23=0.2E10 ⁶ psi (1.38 GPa)	$\tau^*12=3.5$ psi (24.1 KN/m ²)
Eポキシ樹脂	$\nu_{12}=0.25$	$\tau^*13=\tau^*23=3.0$ psi (20.7 KN/m ²)
	a=b=50 in (1.27 m), $\rho=1.0$ lb-s ² /in ⁴ , $E_p/G_p=0.0$	
	E=1.0E10 ⁶ psi (6.89 GPa)	$\sigma^*11=5.0$ psi (34.5 KN/m ²)
	G=0.36E10 ⁶ psi (2.48 GPa)	$\sigma^*22=5.0$ psi (34.5 KN/m ²)
Eポキシ樹脂	$\nu=0.38$	$\sigma^*45=5.0$ psi (34.5 KN/m ²)
	$\tau_{12}=3.0$ psi (20.7 KN/m ²)	$\tau^*13=\tau^*23=3.0$ psi (20.7 KN/m ²)
	$\rho=1.0$ lb-s ² /in ⁴ , $E_p/G_p=0.0$	

ここで、E₁₁の1, 2は、材料主軸(1, 2, 3)を示す。

ボンド層と接するFRP層では、板中央部で繊維強化方向と垂直な方向に塑性域が発生してくる。これは、接着層のような弱層と接するFRP層で、その厚さ方向に正負の異なった曲げ応力の分布がみられ、その強化繊維方向と垂直な応力、 σ_y がFRP層のボンドを破壊した曲げ破壊である。

次にボンド層に局所的な初期損傷(ダメージ)を受けた逆対称クロス・プライ積層板の破壊モードや剥離域の進展性状について検討を行う。また、図-3には、ボンド層の損傷位置による2つの損傷タイプを示してある。ただし、損傷の大きさは損傷部分の弾性係数、 E_1 を1/10に低減させている。図-4には、それぞれ衝撃等分布荷重を受ける周辺固定された逆対称クロス・プライ積層板の各時刻での板中央の動たわみ曲線と面内方向の剥離域の進展状況に与えるボンド層の初期損傷タイプIとIIの影響が示してある。これより、板中央部に局所的な初期損傷をもつ場合(損傷タイプI)では、FRP層と接するボンド層の固定辺で強化繊維方向に垂直な方向に剥離が生じ時間の経過とともに支持辺に沿って剥離が伝播してくる。一方、固定辺に初期損傷をもつ場合(損傷タイプII)には、曲げ応力の応力集中によりボンド層の損傷域の周辺に剥離が生じてくる。またボンド層の剥離に伴い、ボンド層と接するFRP層の板中央部には、厚さ方向に正負の異なる曲げ応力の分布が示され、強化繊維方向に塑性域(FRP層のボンド破壊)が進展してくることが明らかになった。

4. あとがき 以上の結果より、逆対称クロス・プライ積層板の剥離特性は以下のようにまとめられる。

- 1) ボンド層の面外せん断強度を弱めた逆対称クロス・プライ積層板の剥離特性には、横せん断応力に依存する剥離パターンと曲げ応力に依存する剥離パターンがあり、ボンド層とFRP層の界面で層間剥離を生じさせる。
- 2) この積層板の剥離パターンは、面外せん断強度に依存し、これによりかなり異なる剥離特性が示される。ボンド層では、固定辺で大きな面外せん断応力が生じ、支持辺に沿って急激に剥離が進展する。一方、FRP層では、ボンド層との界面で正負の異なる曲げ応力の影響により板中央部が塑性化している。
- 3) ボンド層に局所的な初期損傷を受けた積層板の動的な破壊特性は、ボンド層の固定辺と損傷部分の周辺に剥離がみられ、界面のFRP層の強化繊維方向に剥離域が進展する。FRP層では、板中央部の界面で厚さ方向に不連続な曲げ応力勾配により曲げ破壊が生じている。

なお、本研究は平成6年度文部省科研費(一般研究(C))の援助を受けている。

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) 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.

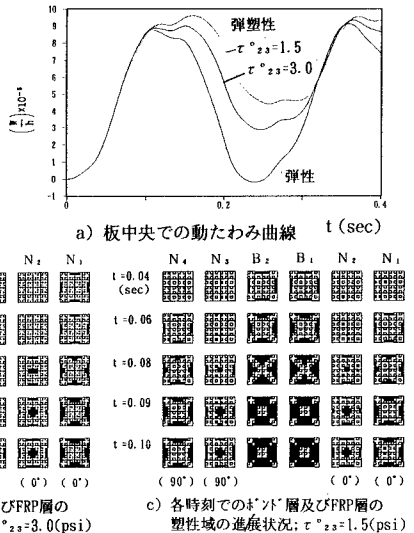


図-2 衝撃荷重を受ける逆対称クロス・プライ積層板のボンド層の面外せん断強度、 τ_{23} を変化させた場合の動たわみ曲線とその塑性性状:
N=2, a/b=1.0, h/a=0.1, q=0.45(psi)

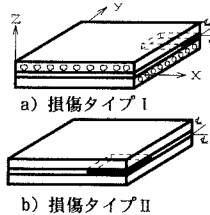


図-3 損傷モデル

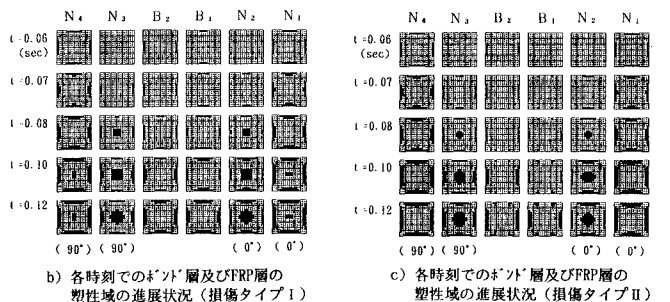


図-4 ボンド層に局所的な初期損傷を持つ場合の逆対称クロス・プライ積層板の動たわみ曲線とその塑性性状:N=2, a/b=1.0, h/a=0.1, q=0.45(psi)