

衝撃荷重を受ける繊維強化型積層板の はく離応答解析について

大同工業大学大学院 学生員 ○鬼頭博史
大同工業大学 学生員 加藤年宏
大同工業大学工学部 正会員 水澤淳作

1. はじめに 繊維強化複合材料(FRP)を一次(強度)構造部材として用いる場合には、剛性や静的強度だけではなく³⁾、動的な破壊挙動の研究も重要になってくる。著者らは、これまでに、衝撃荷重を受ける積層複合板や積層シェル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、層間にボンド層を考慮し、等分布荷重を受ける周辺固定された積層板の静的及び動的な剥離挙動について検討を行い、2層から成る逆対称クロス・プライ積層板の剥離進展や剥離パターンに与えるボンド層の横せん断強度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イロ・マトリックス要素を用い、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層の層の構成式は、 $\sigma = D \varepsilon$ 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。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_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。

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

また、ひずみ増分は、式(3)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。

塑性ひずみ増分は、塑性流れ則より、次式で与えられる。

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

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。

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

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)域の進展挙動について検討する。ただし、数値計算例では、全領域を4x4要素に分割し、各層を3分割している。また、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、それぞれボンド層の面外せん断強度を $\tau_{23} = 3.0$, $\tau_{23} = 1.5$ (psi)に変化させたときの逆対称クロス・プライ積層板の板中央点での荷重-たわみ曲線と各荷重ステップでの面内方向への塑性域の進展状況が示されている。これより、ボンド層の面外せん断強度を減少させると、FRP層より先にボンド層が固定辺中央部で塑性化が始まり、固定辺に沿って急激に進展し、荷重の増加とともに板中央部に向かって剥離域が進展している。これは、ボンド層に大きな面外せん断応力が生じ、面外せん断破壊により剥離が生じている。

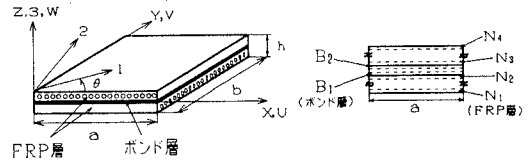


図-1 繊維強化積層板の接着モデルと座標系

表-1 複合材料の材料特性値及び降伏応力¹⁾

GFRP (Fiberglass)	E11= 25F10 ³ psi (172.3 GPa) E22= 1.0E10 ³ psi (6.89 GPa) G12= 0.5E10 ³ psi (3.45 GPa) G13= 0.2E10 ³ psi (1.38 GPa) $\nu_{12}=0.25$ a-b=50 in (1.27 m), $\rho=1.0 \text{ lb} \cdot \text{in}^3/\text{in}^3$, $E_p/G_p=0.0$	$\sigma^*11=25.0 \text{ psi}$ (172.3 KN/m ²) $\sigma^*22=5.0 \text{ psi}$ (34.5 KN/m ²) $\sigma^*45=5.0 \text{ psi}$ (34.5 KN/m ²) $\tau^*12=3.5 \text{ psi}$ (24.1 KN/m ²) $\tau^*13=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $\tau^*23=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $E_p/G_p=0.0$
	E= 1.0E10 ³ psi (6.89 GPa) G= 0.5E10 ³ psi (3.45 GPa) $\nu=0.38$ $\tau^*12=3.6 \text{ psi}$ (25.1 KN/m ²) $\tau^*13=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $\tau^*23=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $\rho=1.0 \text{ lb} \cdot \text{in}^3/\text{in}^3$, $E_p/G_p=0.0$	$\sigma^*11=5.0 \text{ psi}$ (34.5 KN/m ²) $\sigma^*22=5.0 \text{ psi}$ (34.5 KN/m ²) $\sigma^*45=5.0 \text{ psi}$ (34.5 KN/m ²) $\tau^*12=3.6 \text{ psi}$ (25.1 KN/m ²) $\tau^*13=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $\tau^*23=2.3 \text{ psi}$ (16.1 KN/m ²) $E_p/G_p=0.0$

ここで、E₁₁, E₂₂は、材料主軸(1,2,3)を示す。

一方、FRP層では、荷重の増加とともにボンド層に接する強化層（FRP層）の板中央部で厚さ方向に正負の異なった曲げ応力の分布がみられ、FRP層のボンドに曲げ破壊が生じている。

次に、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 $\tau_{23}^* = 3.0$ 、 $\tau_{23}^* = 1.5$ (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図-3に示してある。

これより、静的な荷重を受ける場合と同じように、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剥離し、急激に固定辺周辺に沿って剥離が進展する。時間の経過とともに、その剥離が板中央部に向かって伝播してくるが、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、ボンド層と接するFRP層が板中央部で強化繊維方向と垂直な方向に塑性域が発生してくる。これは、静的な場合と同じように、接着層のような弱層と接する強化層では、その厚さ方向の応力が正負の異なった分布を示し、FRP層のボンド応力が増大するために生じてくる曲げ破壊である。

4. あとがき 以上の結果より、逆対称クロス・プライ積層板の静的及び動的破壊パターンと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小さくすると、荷重の増加や時間の経過とともに変位は増大し、その耐荷力が減少してくる。
- 2) ボンド層では、その面外せん断強度を減少させると、FRP層より先にボンド層の固定辺中央部で塑性化し、剥離域が固定辺に沿って急激に進展する。これは、ボンド層に大きな面外せん断応力が生じ、面外せん断破壊により剥離が生じたためである。
- 3) 一方、FRP層の破壊特性は、荷重の増加とともにボンド層に接するFRP層に正負の異なった曲げ応力の分布がみられ、接着層と強化層の強度特性によって示されるFRP層の曲げ破壊である。
- 4) 衝撃荷重を受けた場合のボンド層は、その面外せん断強度を減少させていくと、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剥離し、急激に固定辺周辺に沿って剥離が進展する。時間の経過とともに、剥離域が板中央部に向かって伝播してくるが、面外せん断強度の減少とともに、固定辺からのくさび型の剥離域の進展がみられ、固定辺に沿って急速に剥離が進展する。
- 5) FRP層では、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ボンド層と接するFRP層が板中央部で強化繊維方向と垂直な方向に塑性域が発生してくる。ボンド層のような弱層と接する強化層では、その厚さ方向の応力が正負の異なった分布を示し、FRP層のボンド応力が増大するために生じてくる曲げ破壊である。

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. 3) 座古, 辻上: 積層複合材料の層間はく離シミュレーションプログラムの開発, 材料, Vol. 43, pp. 684-689, 1994.

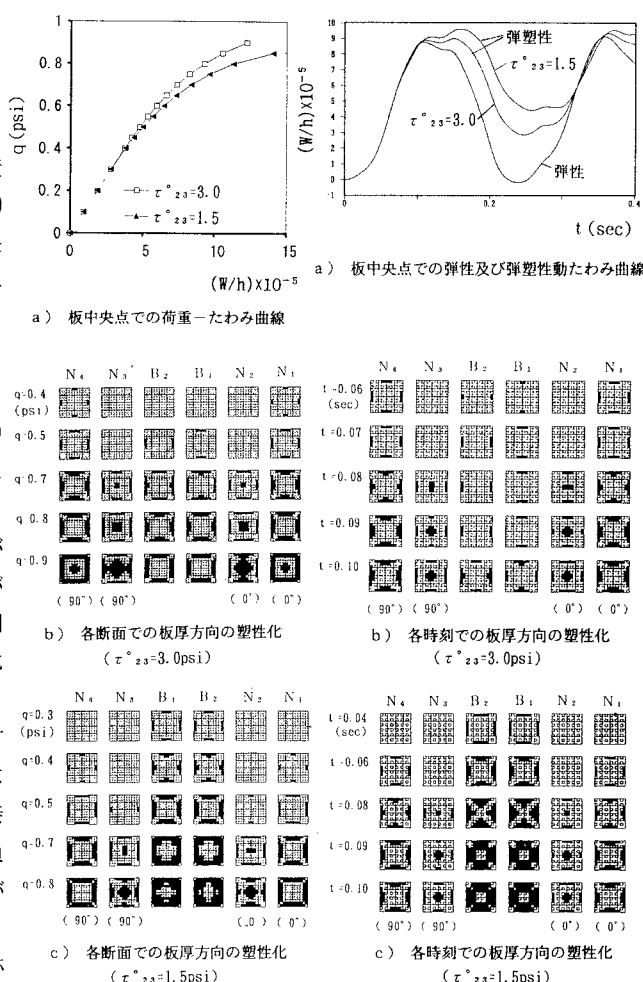


図-2 等分布荷重を受ける逆対称クロス・プライ積層板の荷重-たわみ曲線とその塑性性状: $a/b=1.0$, $h/a=0.1$.

図-3 衝撃荷重を受ける逆対称クロス・プライ積層板の荷重-たわみ曲線とその塑性性状: $a/b=1.0$, $h/a=0.1$, $q=0.45$ (psi).