

複合積層板の衝撃応答解析について

大同工業大学 正会員 水澤富作

1. はじめに 繊維強化複合材料(FRP)は、単一材料では得がたい大きな比剛性、比強度や耐衝撃などの優れた力学的特性を有するので、構造軽量化が重要な広い分野で使用されている。複合積層板は、金属材料の転位論による強化手段と異なり、単純な力学的強化機構に依存している。このような積層板は、強い異方性を示すとともに薄板であっても面内剛性と曲げ剛性に対して面外せん断剛性が極めて小さいのが特徴であり、その力学的特性を明らかにすることが重要な課題となっている。これまでに提案されている積層板理論には、異なった積層の構造・材料特性を等価な単一異方性板に置き換えたモデル(Smeared Model)や各積層を連続体と考える離散化積層モデル(Discrete Model)などがある²⁾。一方、複合積層板の曲げ、固有値解析や波動応答解析と比較して、動的応答解析に関する研究はさほど多く行われていないように思われる。本文では、前者のモデルに基づく一次せん断変形理論(YNS理論¹⁾)とスプライン帯板法を用いて、対称クロス・プライ積層板の弾性衝撃応答解析を行い、長方形積層板の衝撃応答特性に与える積層数、弾性比や衝撃荷重モデルなどの影響について検討を行っている。

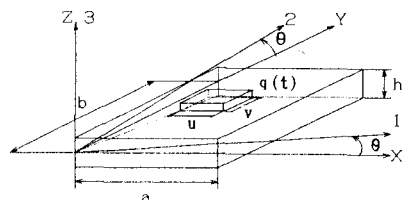


Fig. 1 Symmetrically cross-ply laminated plate and co-ordinate systems

2. 解析手法 YNS理論とスプライン帯板法³⁾を用いて、Fig. 1に示すようなN層から成る対称クロス・プライ長方形積層板の運動方程式を導いている。対称積層構造では、曲げと面内挙動の連成がないので、面内挙動は無視できる。ここで、積層(ラミナ)は均質な直交弾性異方性材料とし、また各積層間のすべりはないと仮定する。材料主軸(1, 2)方向の弾性係数 E_1, E_2 、 ν_{12} およびせん断弾性係数 G_{12}, G_{23}, G_{13} で与える。積層板の等価な剛性値は、次式で表される。

$$D_{ij} = (1/3) \sum Q_{ij}^{(K)} (h_K^3 - h_{K-1}^3) \quad (i, j = 1, 2, 6), \quad A_{ij} = \kappa \sum Q_{ij}^{(K)} (h_K - h_{K-1}) \quad (i, j = 4, 5) \quad (1)$$

ここで、 κ はせん断修正係数、 h_i はラミナの板中央面からの距離であり、 $Q_{ij}^{(K)}$ は第(K)層の平面問題の直交異方性材料の弾性値である。ただし、 $D_{16} = D_{26} = A_{45} = 0$ となる。

一次せん断変形理論に基づくスプライン帯板法では、たわみ W と2つの回転角 θ_x, θ_y を変位関数にとり、また各変位関数を固有関数とスプライン関数で仮定している。横せん断変形と回転慣性を考慮した全ポテンシャルエネルギー(汎関数)を最小化することにより、運動方程式が導かれる。

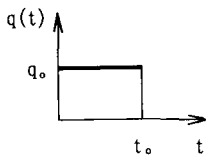


Fig. 2 Impact loading model

固有値解析を行えば、振動数 ω_{ij} と固有モード $W^{(i)}, \Phi^{(i)}, \Phi^{(j)}$ が得られる

ので⁴⁾、固有モード展開法を用いれば、動的応答解析ができる。衝撃荷重として、Fig. 2のようなステップ部分分布荷重モデルを用いる。詳細な式の定式化は、ここでは省略する。

3. 数値計算例及び考察 周辺単純支持された対称クロス・プライ積層板の弾性衝撃応答解析を行い、衝撃曲げ応答に与える積層数、弾性比や衝撃荷重モデルなどの影響について検討を行なう。なお、積層板の曲げ及び自由振動解析を行い、厳密解や他の数値解と比較して、良い精度が得られている⁴⁾。数値計算では、ガラス/エポキシ材料($E_1/E_2 = 3 - 40$, $G_{12}/E_2 = G_{13}/E_2 = 0.6$, $G_{23}/E_2 = 0.5$, $\nu_{12} = 0.25$)を仮定する。また、スプライン帯板法による固有値解析では、12帯板要素数と5次のスプライン帯板モデルを用いている。応答解析の精度は、解析解の与えられている等方性長方形板のたわみや曲げモーメントの応答解析を行い、採用固有モードを21項まで取れば、有効桁数が3桁まで収束した曲げモーメントやせん断力の応答値が得られている。

Fig. 3には、 $E_1/E_2=30$, $h/a=0.2$ と仮定したクロス・プライ積層板の中央でのたわみ W 、曲げモーメント M_x, M_y 及び単純支持辺中央でのせん断力の衝撃応答履歴曲線に与える積層数 N の影響が示されている。ただし、ステップ荷重の分布幅は、 $u=v=0.25a$ である。これより、積層数を7以上にとれば、これによる影響が小さくなる。

Fig. 4は、5層のクロス・プライ積層板($h/a=0.2$, $u=v=0.25a$, $t_0=\infty$)の衝撃応答に与える弾性比 E_1/E_2 の影響を示す。弾性比は応答履歴に顕著な影響を与えるが、ある値以上にとればその影響は小さくなる。

Fig. 5には、クロス・プライ積層板($N=5$, $E_1/E_2=30$, $h/a=0.2$)の衝撃応答に与える衝撃ステップ荷重の接触時間 t_0 及び荷重分布幅 $u=v$ の影響が示してある。いずれの場合にも、その影響が顕著に見られる。

Table 1には、解析パラメータを種々変化させて得られた動的応答倍率(DAF=動的最大値/静的最大値)が示されている。これより、DAF値は2を越えることはなく、また常に変位のDAFが曲げモーメントの値より大きい。

4. あとがき 一次せん断変形理論に基づくスプライン帯板法と固有モード展開法を用いて、クロス・プライ積層板の衝撃弾性応答解析を行った。得られた主な結果を示すと、以下のようになる。

- 1). 積層数が少ないほど、衝撃応答に与える影響が顕著に見られる。
- 2). 繊維強化方向とその横方向の弾性係数比、 E_1/E_2 は、応答値に大きな影響を与えるが、その値が30を越えると急激に小さくなる。
- 3). 衝撃荷重モデル(接触時間 t_0 , 接触幅 $u=v$)や幅厚比 h/a によっても、衝撃応答曲線に大きな変化が見られる。
- 4). 種々の条件での動的応答倍率を求めてみたが、2.0以下の値になり、変位の値が断面力の応答倍率と比較して、大な値を示している。

参考文献

- 1). Yang, P.C. et al.: Elastic wave propagation in heterogeneous plates. IJSS, vol. 2, 665-671(1966).
- 2). Abrate, S.: Impact on laminated composite materials, AMR, vol. 44, 155-190(1991).
- 3). 水澤: Vibration of Mindlin plates .. Comput. Struct. 1993.
- 4). 水澤, 鬼頭: スプライン帯板法を用いた積層板の振動解析. 土木学会中部支部概要集, 1993.

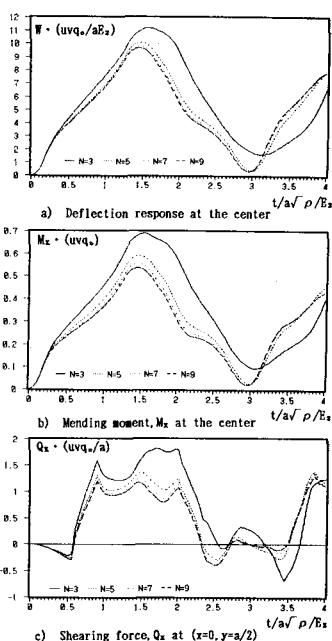


Fig. 3 The effects of the number of lamina, N on dynamic responses of cross-ply laminated plate; $E_1/E_2=30$, $h/a=0.2$, $u=v=0.25a$, $t_0=\infty$

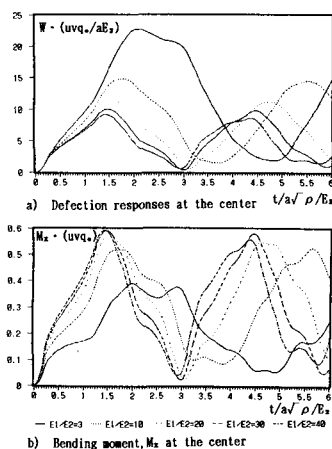


Fig. 4 The effects of E_1/E_2 on dynamic responses of cross-ply laminated plate; $N=5$, $h/a=0.2$, $u=v=0.25a$, $t_0=\infty$

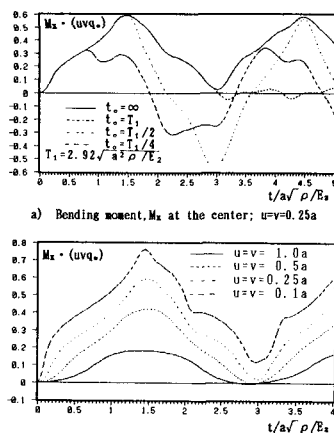


Fig. 5 The effects of the impact time, t_0 and impact time, t , on dynamic responses of cross-ply laminated plate; $N=5$, $h/a=0.2$, $a/b=1.0$

Table 1 Dynamic amplitude factors, DAF of cross-ply laminated plates

a) $E_1/E_2=30$, $h/a=0.2$, $u=v=0.25a$

積層数	W	DAF	M_x	M_y
3	1.83	1.81	1.73	
5	1.90	1.86	1.80	
7	1.90	1.86	1.82	
9	1.90	1.96	1.83	

b) $N=5$, $h/a=0.2$, $u=v=0.25a$

弾性比 E_1/E_2	W	DAF	M_x	M_y
3	1.86	1.76	1.81	
10	1.88	1.79	1.81	
20	1.90	1.86	1.81	
30	1.90	1.86	1.80	
40	1.88	1.86	1.80	

c) $N=5$, $E_1/E_2=30$, $u=v=0.25a$

幅厚比 h/a	W	DAF	M_x	M_y
0.05	1.87	1.73	1.75	
0.1	1.88	1.86	1.80	
0.2	1.90	1.86	1.80	

d) $N=5$, $E_1/E_2=30$, $h/a=0.2a$

分布幅 $u=v$	W	DAF	M_x	M_y
1.0	2.00	2.00	2.00	
0.5	1.99	1.99	1.98	
0.25	1.90	1.86	1.80	
0.1	1.77	1.72	1.61	