The Society of Materials Science, Japan

208 GFRP直交積層板におけるマトリックスき裂損傷の発達

大阪市立大学工学部　正　元木　信弥
正　福田　武人
神戸市立工業高等専門学校　正　○田中　基博

1. 緒言

FRPの積層板において，その損傷は，主に層内のマトリックスき裂の形で現れる場合が多い．したがって，積層板内の初期損傷を検知して破壊を未然に防ぐという意味で，初期損傷であるマトリックスき裂の発達を理論的，また実験的に解析することはきわめて重要である．このマトリックスき裂の発達には積層板内の応力が大きく寄与すると考えられるため，その発達を定式化するためには，まずその手始めとして積層板における応力場を評価する必要がある．

マトリックスき裂の存在する積層板における応力場を評価する際に，これまでの研究ではき裂の存在する層の平均応力が用いられてきた．しかし，この平均応力を用いた評価は，積層板の積層構成に依存するため，積層構成が変わるごとに試験評価を行わなければならず，このような方法は一般性および拡張性に乏しい．したがって，その評価に一般性を持たせるためには，積層板の積層構成に依存しないような評価を行うための新しい規準を考える必要がある．このような規準に基づいて，マトリックスき裂の発達の定式化を行うことにより，積層構成に依存しないき裂の発達の評価，ひいてはあらゆる積層構成に対応できる評価を行うことが可能となる．

そこで本研究では，まずGFRP直交積層板において，引張負荷を与えた場合に生じるマトリックスき裂の発生音の大きさに着目し，マトリックスき裂の発生を目視および発生音によりリアルタイムに計測して，発生したマトリックスき裂の密度と応力およびひずみとの関係を実験的に求めた．つぎに，積層板内の任意の一組のマトリックスき裂に囲まれた積層要素を考え，その要素内の応力場をき裂密度の関数として定式化し，理論および実験の両面からマトリックスき裂の発達について検討した．

2. マトリックスき裂の存在する積層板に対する応力解析理論

ここでは，本研究の参考とした，Hashinによるマトリックスき裂の存在する対称直交積層板に対する応力解析理論[1]について概説する．

図1に示すような一様な引張面内負荷N_{xx}を受ける直交積層板を考える．き裂が存在しない時，積層板は

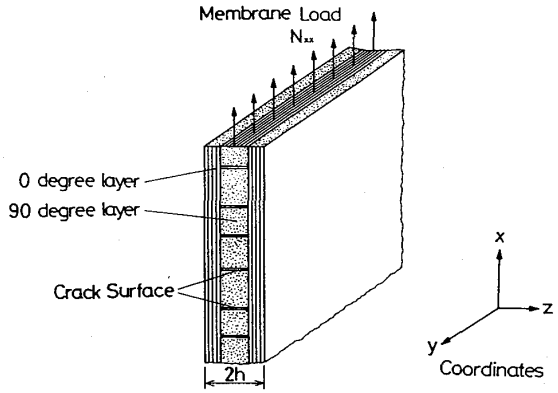

図1　一様な引張面内負荷を受ける直交積層板

一定平面応力$\sigma_{xx}^{0(m)}$および$\sigma_{yy}^{0(m)}$の状態にある．ここでmは層の指標であり，1は90°層，2は0°層である．き裂の存在する積層板には，$\sigma'^{(m)}_{xx}$，$\sigma'^{(m)}_{xz}$および$\sigma'^{(m)}_{zz}$という3つのじょう乱応力成分が現れ，き裂の存在する積層板における応力は次式で与えられる．

$$\sigma_{ij}^{(m)} = \sigma_{ij}^{0(m)} + \sigma'^{(m)}_{ij} \tag{1}$$

今，図2に示すような任意の一組の典型的なき裂に囲まれた積層要素を考え，座標系を図のように取る．

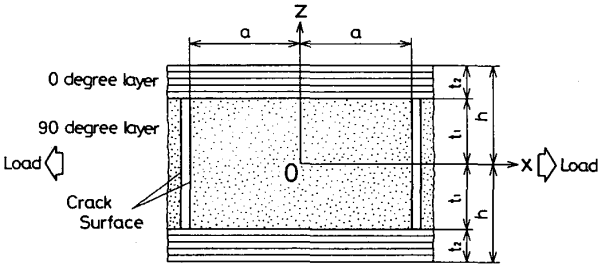

図2　1組のき裂に囲まれた典型的な積層要素

ここで，じょう乱応力に対して，$\sigma'^{(m)}_{xx}$はxのみの関数であり，厚さ方向には一定であるという仮定を設ける．この仮定のもとで，損傷を表わす関数$\varphi(x)$と，平衡方程式および境界条件等を用いると，じょう乱応力は次式のようになる．

$$\sigma'^{(1)}_{xx} = -\sigma_{xx}^{0(1)}\varphi(x) \tag{2}$$

$$\sigma'^{(1)}_{xz} = \sigma_{xx}^{0(1)}\varphi'(x)z \tag{3}$$

$$\sigma'^{(1)}_{zz} = \sigma_{xx}^{0(1)}(1/2)\varphi''(x)(ht_1 - z^2) \tag{4}$$

$$\sigma'^{(2)}_{xx} = \sigma_{xx}^{0(1)}(t_1/t_2)\varphi(x) \tag{5}$$

NII-Electronic Library Service

$$\sigma'^{(2)}_{xz} = \sigma^{0(1)}_{xx}\,(t_1/t_2)\,\varphi'(x)\,(h-z) \tag{6}$$

$$\sigma'^{(2)}_{zz} = \sigma^{0(1)}_{xx}\,(1/2)\,(t_1/t_2)\,\varphi''(x) \times (h-z)^2 \tag{7}$$

これらの応力を用いて，補足ひずみエネルギを求め，最小補足ひずみエネルギの原理に基づき，変分法を利用して損傷関数φの具体的な形を求めた．φはき裂密度を表わすt_1/a（$=\rho_c$）と積層要素内の負荷方向の位置の関数となる．φの具体形はここでは省略する．この損傷関数φを用いて，き裂の存在する直交積層板内の応力場を明らかにすることができる．

3．ＧＦＲＰ直交積層試験片に対する実験および理論的考察

3．1　実験の概要

本実験で使用した実験装置の構成図を図３に示す．

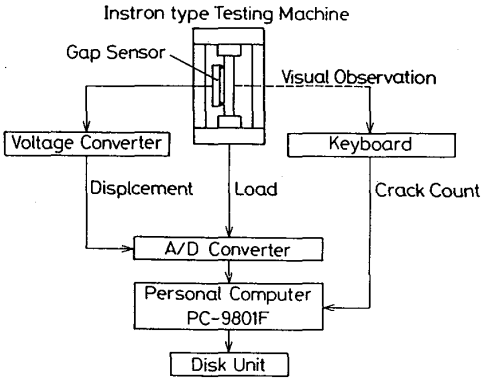

図3　実　験　装　置　の　構　成　図

試験片には，ＧＦＲＰの$[0,90_2]_s$，$[0,90_3]_s$および$[0,90_4]_s$の３種類の直交積層板を使用した．静的引張試験時の試験片の変位は，非接触変位計であるギャップセンサおよびＡ／Ｄ変換器を介して，またき裂数は目視および発生音により試験片の幅方向に貫通するき裂のみをキーボードを介して，それぞれパーソナルコンピュータに取り込んだ．

3．2　実験結果

まず，各積層構成における積層板全体の平均応力σとひずみおよびき裂数との関係の一例を図４から図６に示す．いずれの図においても，き裂が数個発生した後その数は急激に増加し，同時にその後の平均応力－ひずみ曲線の傾き（以下第２段階の傾き，それ以前を第１段階の傾きと称する）が低下していることがわかる．また，き裂がほぼ均一に分布するころからき裂の発達は緩和に向かい，その付近より平均応力－ひずみ曲線の傾き（以下第３段階の傾きと称する）が増加している点も各積層構成についてほぼ共通である．しかし，平均応力－ひずみ曲線の第２段階および第３段階の傾きの変化の割合は，９０°層厚さが増加するほど大きくなっている．

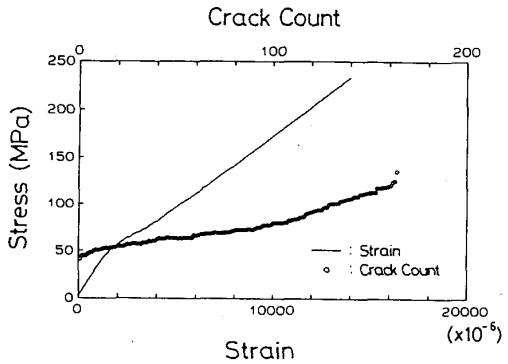

図４　$[0,90_2]_s$試験片の平均応力とひずみ，き裂数との関係

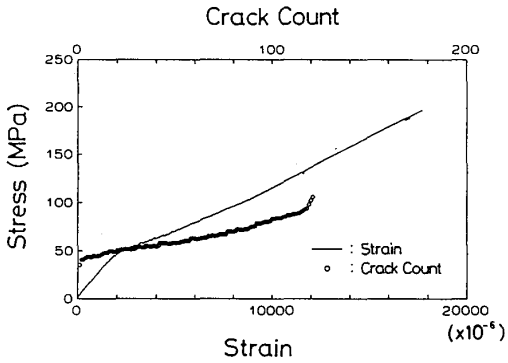

図５　$[0,90_3]_s$試験片の平均応力とひずみ，き裂数との関係

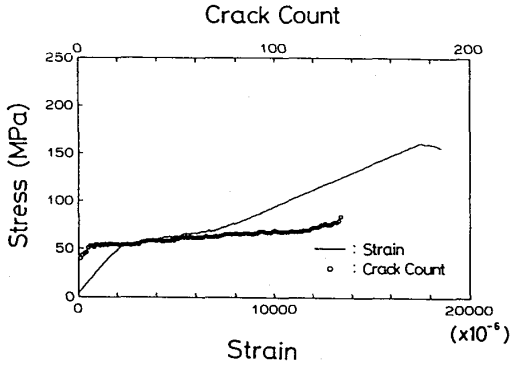

図６　$[0,90_4]_s$試験片の平均応力とひずみ，き裂数との関係

また，どの積層構成においても，き裂は平均応力がほぼ50[MPa] 付近より急激に発達しているが，その発達経過は積層構成によって大きく異なっていた．そのうち最も大きな違いは，$[0,90_2]_s$試験片では見られなかったような負荷方向に対して傾いたき裂（以下ななめき裂と称する）が，９０°層厚さの増加につれて多く発生したことである．また，そのななめき裂は，界面に垂直なき裂が１つ発生するとほぼ同時に，その両側に発生した．図７に，超音波顕微鏡による$[0,90_4]_s$試験片側面のななめき裂の写真を示す．

NII-Electronic Library Service

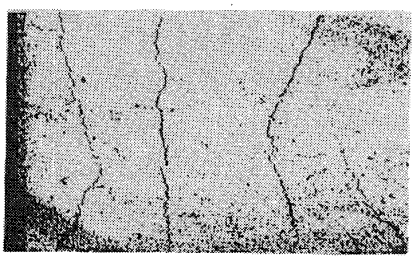

図7　$[0,90_4]_s$試験片に発生したななめき裂の超音波顕微鏡像

3．3　考察

まず，き裂密度ρ_cを算出する際に，き裂の発達の初期段階で実際には試験片内にランダムに発生するき裂を，均等に分布すると仮定した．

図8に複合則を用いて求めた90°層の平均応力$\sigma^{(1)}$とき裂密度ρ_cとの関係を示す．同図より，き

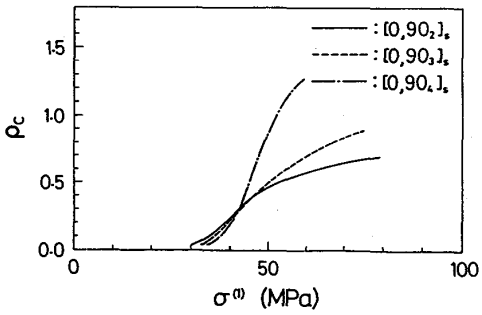

図8　90°層の平均応力$\sigma^{(1)}$とき裂密度ρ_cとの関係

裂密度が低いところではその曲線は積層構成に依存せずよく一致しているが，き裂密度が大きくなると明らかに差が生じていることがわかる．したがって，$\sigma^{(1)}$はき裂の発達を検討する上で十分満足できるものではない．

そこで，本研究では，前節で考えた積層要素において，き裂の発達に最も寄与すると考えられる，積層要素内の負荷方向の最大応力$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$を導入した．これは，(2) 式において$x=0$とすることにより求められる．図9に$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$とき裂密度との関係を示す．同図

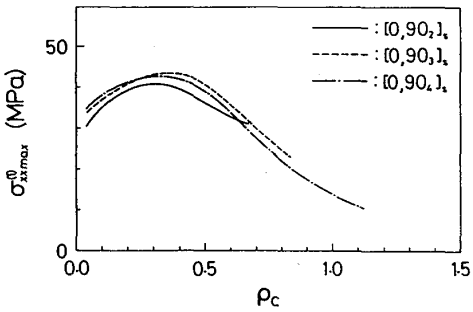

図9　$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$とき裂密度ρ_cとの関係

より，各曲線は一致し，したがって，き裂密度ρ_cを用いてき裂の発達を検討する上で，$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$は積層構成に依存せず，非常に有効であることがわかる．また，同図の特徴として，$[0,90_2]_s$の曲線において，き裂の急増し始める応力と貫通き裂の発達の停止する応力がほぼ等しくなっていることが挙げられる．そして，ななめき裂の発生率が大きいほど曲線が長く伸びていることより，ななめき裂が存在しない場合には，$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$があるしきい値以上であればき裂は発達し，それ以下ならば発生しないと考えられる．

4．結言

本研究では，Hashinが提案したき裂の存在する直交積層板に対する応力解析理論を発展させ，3種類の積層構成のGFRP直交積層板に対して，その応力場を解析し，積層構成に依存しないき裂発達の規準について検討した．その結果，以下のことが明らかになった．

（1）従来から用いられていた90°層の平均応力は，積層構成に依存する量であることが確認された．

（2）図2の積層要素において，き裂の発生に最も大きく寄与すると考えられる，積層要素の中央面に発生する負荷方向の最大応力$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$は，き裂の発達を支配しており，その発達の様子は積層構成に依存しないということがわかった．したがって，マトリックスき裂がどのように発達するかは，90°層内の負荷方向の最大応力によって決まることが明らかになった．

（3）き裂密度が低いところでは，$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$とき裂密度との関係は，積層構成に無関係にき裂発達の規準となる．すなわち，$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$があるしきい値を超えない限りき裂は発生しないという傾向を持つと考えられる．しかし，き裂密度が大きい場合には，$\sigma^{(1)}_{xx\,max}$とき裂密度の関係は積層構成によって異なってくる．これは，ななめき裂の発生によるものと思われる．

（4）ななめき裂の発生は，90°層厚さが増加するほど多く，またその発生状況も大きく異なる．

今後の課題として，一つは，（4）で述べたななめき裂の発達の定式化が挙げられる．もう一つは，き裂先端での応力集中を考慮した応力解析を行うことである．つまり，Hashinの理論による応力解析は，じょう乱応力に対する仮定により，マトリックスき裂先端の近傍における応力集中を考慮していない．そのため，き裂近傍の応力場を構築するためには，例えば負荷方向の応力に，負荷と垂直な方向の依存性を考慮することなどが考えられる．

参考文献

1) Z.Hashin, Mechanics of Materials, 4, 121 (1985)

NII-Electronic Library Service