

## 論文の内容の要旨

論文題目 複合材料積層板の多層層内損傷挙動

氏名 横関 智弘

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) は、その優れた比強度・比剛性のため、様々な構造部材に適用されているが、一般に FRP は繊維方向への耐荷能力は高いものの、それ以外の方向に関しては破壊しやすいため、様々な方向へ繊維を配向させた積層板の形態で使用される。積層板の損傷プロセスは独特かつ複雑であり、荷重方向以外に繊維を配向させた層は損傷を生じやすい。この層内損傷 (トランスバースクラック) は概ね最初の損傷モードであり、積層板の力学的特性を変化させる等のため、複合材の構造信頼性向上を目指す上で考慮の不可避な損傷モードといえる。また、複合材料積層板中の損傷累積挙動を考える場合、トランスバースクラックは1つの層内だけでなく、隣接する層など多層にわたり損傷が累積する。本論文では、実構造物への複合材料の適用のために、複雑な荷重下での層内損傷進展挙動や、各層に損傷が広がり累積していく挙動の把握を試みた。特に、多層にクラックが存在する場合の解析手法を提案し、効率的なパラメトリック解析法の開発を行い、多層層内損傷挙動の考察と、実験的な挙動把握を示した。

最初に、任意面内荷重下において、1つの層内にトランスバースクラックを有する任意の対称積層板の応力解析手法をまとめた。本論文では、shear-lag モデルを適用し、層間せん断特性は、パラメーターとして扱うのではなく、変分原理から導かれた、層の材料特性から計算する手法を用いて決定した。また、クラック層の有効剛性を定義することにより、熱残留応力を含めた形で簡易にモード別のエネルギー解放率を求める方法を示した。本手法により、破壊基準以外のパラメーターは不必要であり、任意面内荷重下における、1つの層内でのトランスバースクラック累積挙動を予測することが可能であることを示した。

2層にわたりトランスバースクラックが存在する場合、一般に各層のトランスバースクラックは斜交する。そこで、斜交形状に沿った斜交座標系を定義し、斜交座標系成分を用いた応力解析手法を提案した。解析に便利な3種類の基底ベクトルを紹介し、それぞれについてのベクトルやテンソルの斜交座標系成分を導出した。これらは、図1に示すように、形状の長さや間隔、面積の一定条件下でのパラメトリック解析に便利であり、基底ベクトルを工夫することで、各種のパラメトリック解析が可能であることを述べた。変位・歪みの共変成分、力・応力の反変成分を用い、構成方程式もそれに対応する成分

を用いることにより、支配方程式を表し、図 2 に示すように任意の斜交角を有する斜交形状問題は、直交形状問題に変換可能であり、直交問題とみなして解析が行えることを示した。また、この手法を汎用的な有限要素法へ適用することを試みた。全体座標系として斜交座標系を用い、有限要素法の定式化を行い、直交座標系における通常の有限要素法と同一の剛性方程式が得られることを示した。これにより、1つの直交形状のメッシュを用いて、境界条件や剛性成分を変化させるだけで、任意の斜交角を有する形状のパラメトリック有限要素解析が行えることを示し、汎用コードを利用して可能であることを示した。傾斜材、傾斜クラック、平板翼の応力解析へ適用した例を示し、本手法の妥当性とパラメトリック解析の有効性を示した。

この斜交座標系を用いた解析手法を用い、各層を貫通する斜交トランスバースクラックを有する積層板に関する解析解について述べた。この手法を 2次元 shear-lag 解析に適用することで、 $\theta^\circ$  層及び  $90^\circ$  層に貫通する斜交トランスバースクラックを有する  $[\theta_m/90_n]_s$  や  $[S/\theta_m/90_n]_s$  積層板の応力分布の解析解を得た。3次元有限要素解析結果と比較することで、斜交クラックを有する積層板の応力解析手法としての妥当性を確認した。平均的な境界条件を適用しているため、境界付近で一致しない部分もあるが、直交クラック問題として解けるため、 $[\theta_m/90_n]_s$  積層板等の解析手法と同程度の手間で解を得ることができ、非常に簡易で有効である。

次に、斜交座標系成分を用いた有限要素法により、斜交クラックを有する積層板の 3次元応力解析を行い、トランスバースクラックの多層累積プロセスに関する考察を行った。 $90^\circ$  層に貫通トランスバースクラックが存在し、それに斜交する  $\theta^\circ$  層クラックを有する  $[S/\theta_m/90_n]_s$  積層板について、図 3 に示す代表体積を定め、直交モデルに変換し、斜交座標系成分を適用することで、各クラック密度が一定条件下における  $\theta$  についてのパラメトリック解析を行った。 $\theta^\circ$  層クラックの進展挙動や S 層の応力分布などについて、 $\theta$  や  $\theta^\circ$  層クラック長さ、各層のクラック密度を変化させて、調査した。その結果、図 4 に示すように、 $\theta^\circ$  層クラック先端投影位置が  $\theta^\circ$  層厚さの約半分所で、 $90^\circ$  層クラックの存在によりエネルギー解放率がピークを迎え、その後クラックが長くなるにつれて定常値に収束することがわかった。定常値と増加値の差が大きいほど、誘発された  $\theta^\circ$  層クラックは、ある長さで停滞し、負荷が増加するまで繊維方向へ不安定的に進展しないことを意味するため、定常値と増加値の差が大きいと誘発された  $\theta^\circ$  層内微小き裂が観察されると考えられ、差が小さいと微小き裂は観察されず、進展したクラックが観察されると考えられる。 $\theta$  を変化させたパラメトリック解析結果を図 5 に示すが、これから、 $\theta$  が大きい場合、つまり  $90^\circ$  層と隣接層の成す角度が小さいほど、定常値と増加値の差が大きいことがわかり、 $\theta$  が大きい場合に誘発された  $\theta^\circ$  層内微小き裂が観察されやすいことが判明した。この増加値と定常値の比は S 層や与えられた歪みにはあまり依存しないが、斜交クラックのなす角度により支配されており、積層角により隣接層誘発クラック形態が異なることが判明した。また、 $\theta^\circ$  層厚みには大きく依存し、厚みが薄いほど、微小クラックの形態をとりやすいことが判明し、環境温度にも影響されるこ

とがわかった。続いて、 $[0/\theta_2/90]_s$  について、 $0^\circ$  層の繊維に垂直方向の応力分布も計算した。 $0^\circ$  層クラックの起こりやすさは、 $\theta^\circ$  層にクラック長さにはあまり影響されず、したがって、短い $\theta^\circ$  層クラックが存在しただけでも、斜交クラック交点部付近から発生しうることが判明した。 $90^\circ$  層クラック密度が増加しても $0^\circ$  層クラック誘発に影響は少なく、 $0^\circ$  層に対して隣接する $\theta^\circ$  層クラック密度が大きいほど $0^\circ$  層クラックは誘発されやすいことが示された。以上から、トランスバースクラックにより隣接層に層内損傷は誘発され、誘発されたクラックの長さに関係なく、次々と層内損傷が連鎖的に厚み方向へ繋がっていくことが危惧されると考えられる。

トランスバースクラックの累積挙動について、実験的にも把握を試みた。まず、最初にトランスバースクラックが発生し、その層内に累積する場合について、積層板の中央層に $90^\circ$  層または $\theta^\circ$  層を有する平板試験片の一軸引張試験を行い、混合モード下を含めたトランスバースクラック累積挙動を把握し、エネルギー解放率による予測法により予測可能であることを確認した。また、中央層に $90^\circ$  層を有する平板試験片と円筒試験片における $90^\circ$  層クラック累積挙動の比較により、平板試験片では自由端の影響でクラックが発生しやすく（図6）、自由端のない場合と異なる挙動を示すことが判明した。3次元有限要素解析によっても自由端の影響を考察し、平板試験片において繊維方向へ十分に進展したクラックのみが自由端の影響を受けない実構造部での評価に適合することを示した。

また、複数の層に層内損傷が累積する場合について、実験的な損傷挙動の把握を試みた。 $[0/\theta_2/90]_s$  平板試験片を用意し、一軸引張試験を行うことで、 $90^\circ$  層にトランスバースクラックが累積した後の隣接層へのクラック累積について詳細な観察を行った。 $\theta=30$  の場合は、 $90^\circ$  層クラックが累積しても $\theta^\circ$  層クラックはしばらく観察されず、負荷の増大に従い、繊維方向に進展した $\theta^\circ$  層クラックが観察された（図7）。それに対し、 $\theta=45$  及び $60$  では、図8に示すように、 $90^\circ$  層クラックの発生と同時に $\theta^\circ$  層にも短い多数の網目状の微小クラックが観察され、特に $\theta=60$  では顕著であった。これらの微小クラックは負荷を増加させても繊維方向へなかなか進展せず、 $90^\circ$  層クラックの増加による $\theta^\circ$  層微小クラックが多く観察された。また、 $0^\circ$  層クラックは $\theta^\circ$  層クラックが繊維方向に進展した場合（ $\theta=30$ ）でも進展していない場合（ $\theta=45,60$ ）でも同様に観察された。有限要素解析結果による考察と一致した多層累積挙動が観察された。 $0^\circ$  層へのクラック誘発に関しても、 $\theta=30$  の場合のように $\theta^\circ$  層クラックが進展クラックであっても、 $\theta=60$  の場合のように微小クラックであっても、同様に誘発されている実験結果が得られた。したがって、実際の多層層内損傷累積挙動は、微小クラックが層内に発生すると、それが繊維方向に進展するかしないかに関わらず、次々と隣接層にクラックを誘発しうることがわかり、解析結果との一致が確認された。

従来取り扱いの難しかった斜交形状モデルに対し、斜交座標系と対応するテンソル成分を導入することによる簡易な解析手法を示すことができた。この手法と有限要素法などの各種解析法と組み合わせることで、広範な構造解析問題へのパラメトリック解析の

足がかりを明示したといえる。本研究では、複合材料積層板中に発生する斜交クラック問題へ適用し、多層層内損傷累積挙動について詳細な解析により考察するとともに、実験による累積挙動把握を行った。

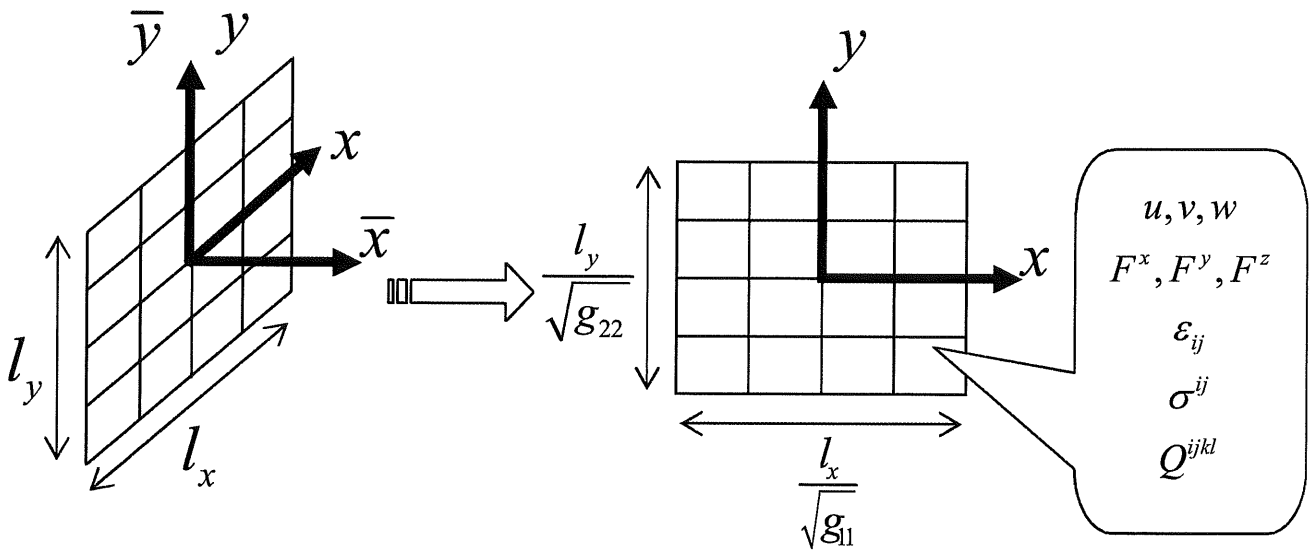


図1 斜交座標系成分を用いたモデル変換

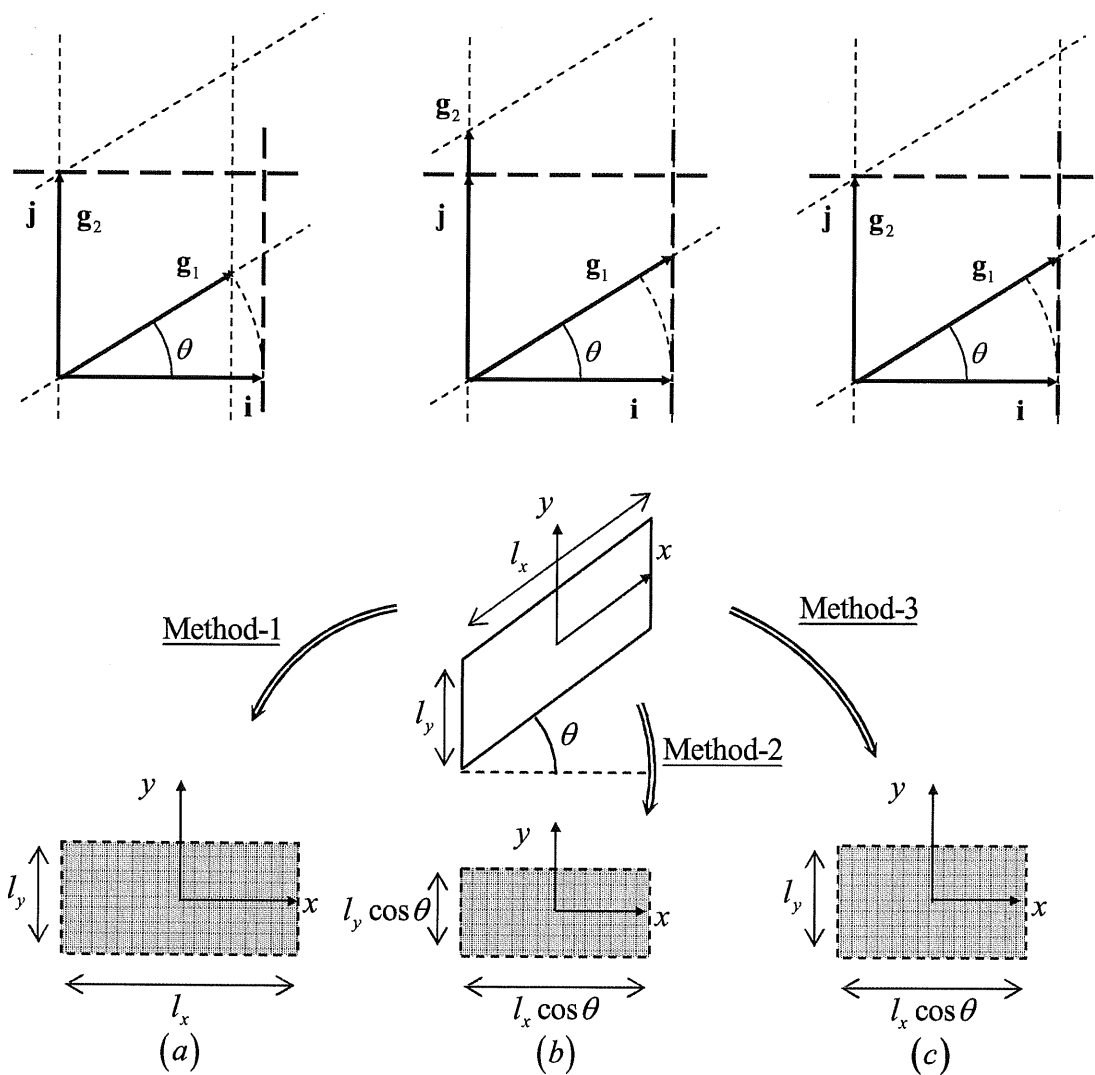


図2 直交基底ベクトルと斜交共変基底ベクトルの関係とモデル変換

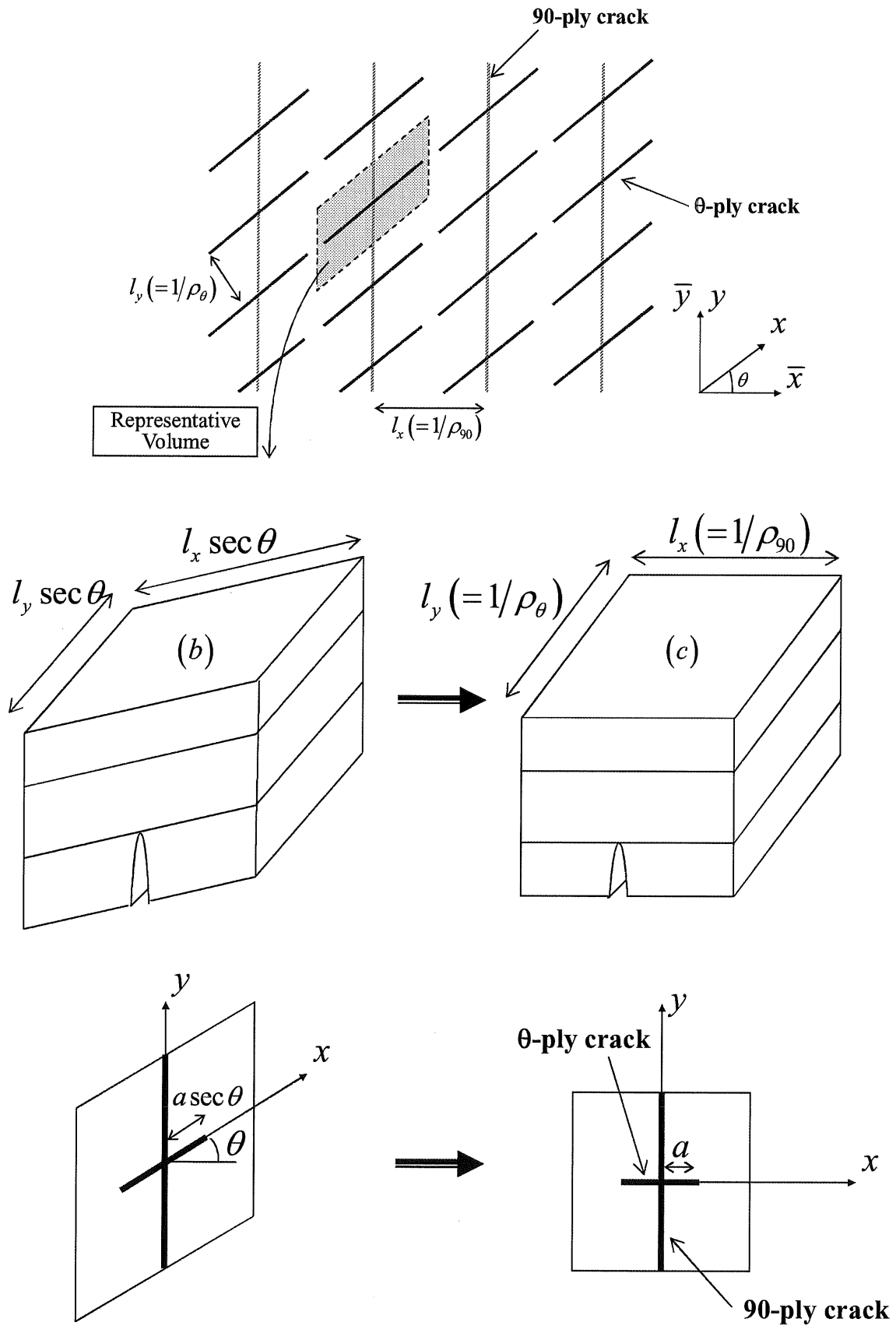


図3 斜交クラックを有する $[S/\theta_m/90_n]_s$ 積層板モデル

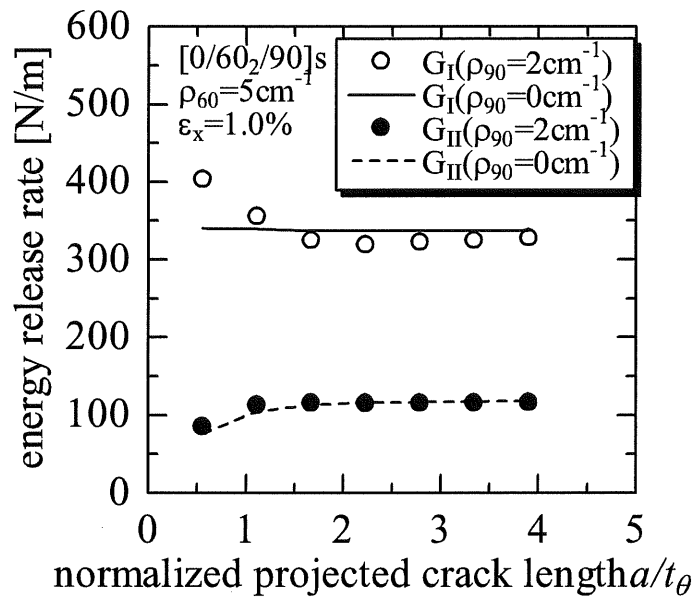


図4 無次元化クラック投影長さ ( $a/t_\theta$ ) とエネルギー解放率の関係

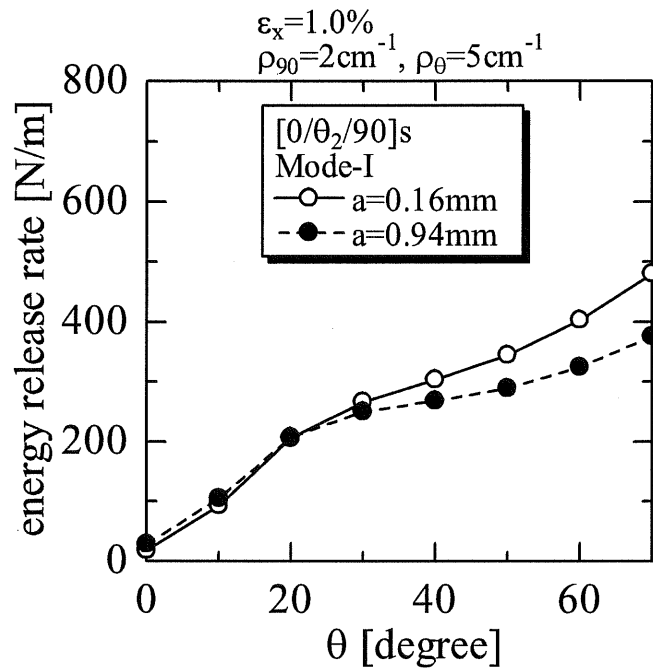
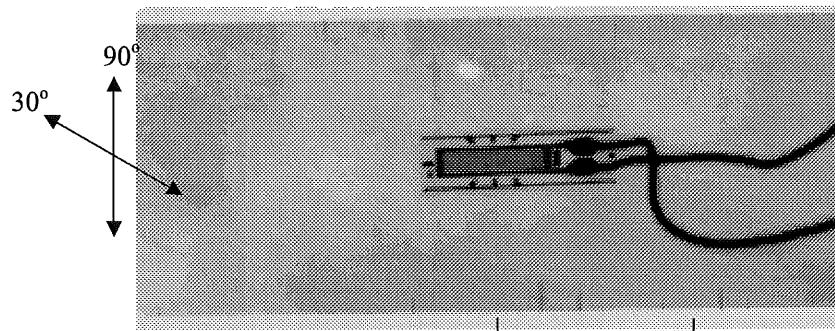


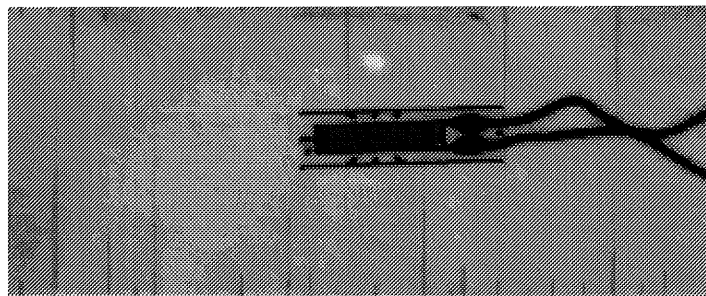
図5 エネルギー解放率の差とθの関係：[0/θ<sub>2</sub>/90]<sub>s</sub>、θ°層クラック



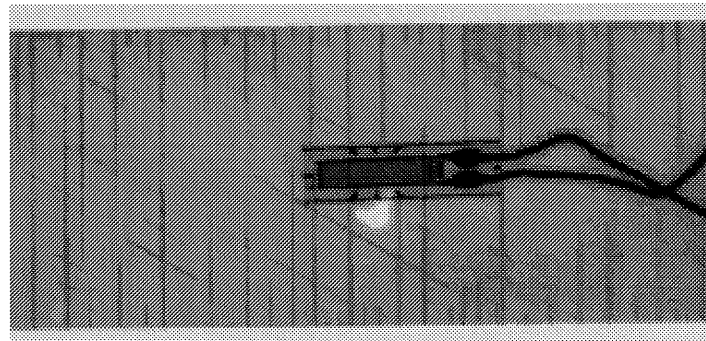
図6 [45/0/-45/90]<sub>s</sub> 積層板に発生する 90° 層エッジクラック



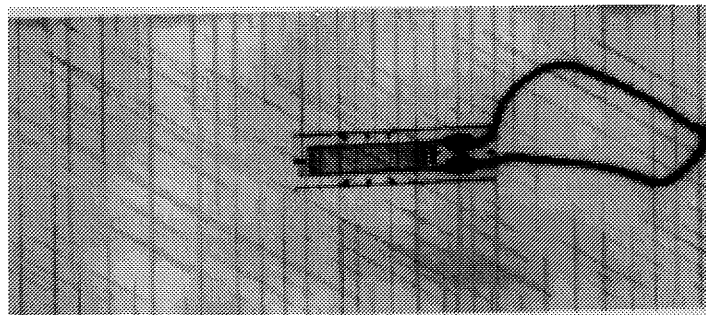
(a)  $\sigma_x=401$ [MPa]、 $\varepsilon_x=0.80\%$



(b)  $\sigma_x=449$ [MPa]、 $\varepsilon_x=0.90\%$



(c)  $\sigma_x=491$ [MPa]、 $\varepsilon_x=1.00\%$



(d)  $\sigma_x=531$ [MPa]、 $\varepsilon_x=1.10\%$

図7 [0/30<sub>2</sub>/90]<sub>s</sub> 平板試験片の損傷累積挙動



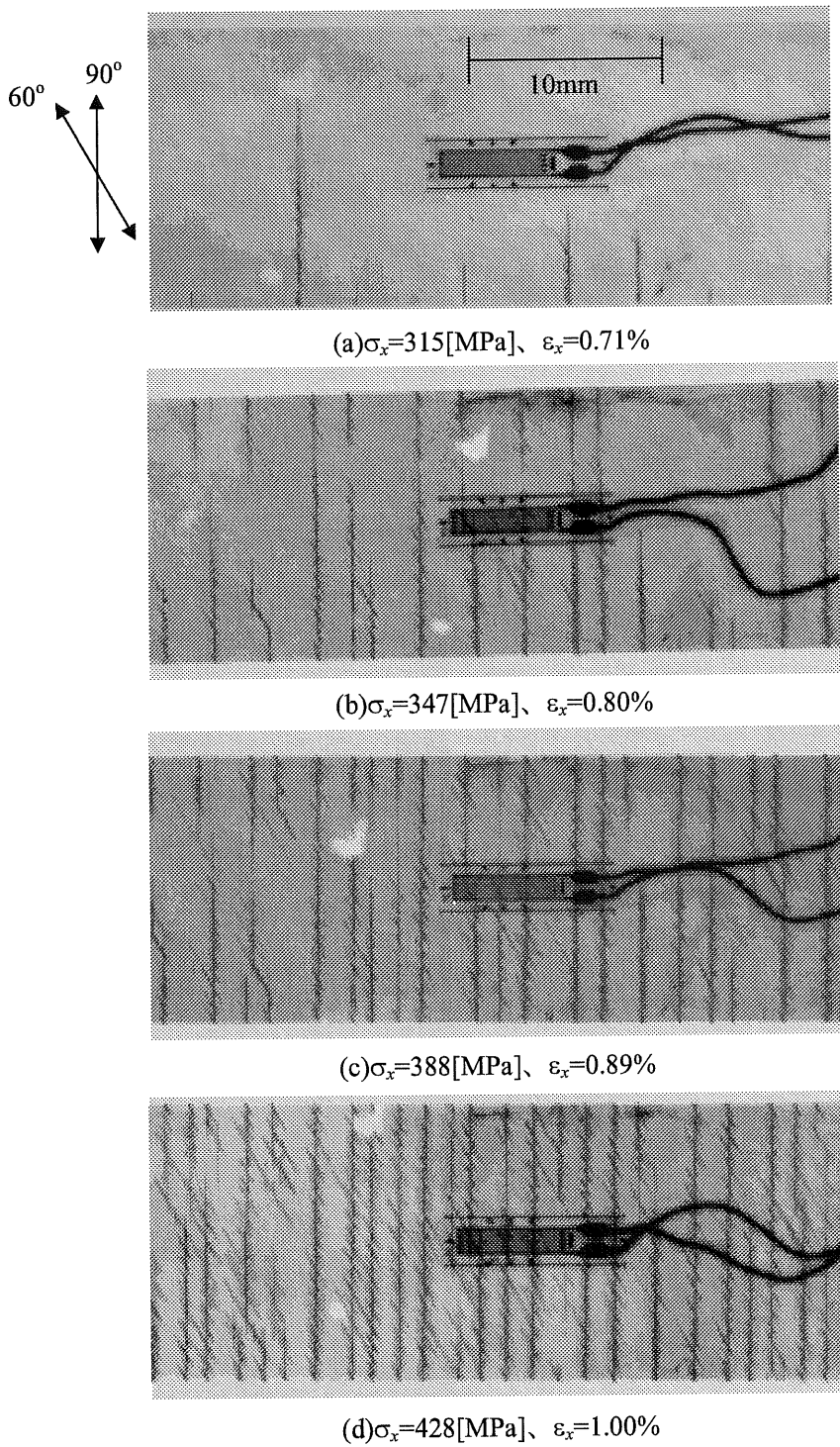


図8 [0/60<sub>2</sub>/90]<sub>s</sub> 平板試験片の損傷累積挙動