

## 論文の内容の要旨

論文題目 : 複合材料の損傷評価とアコースティック・  
エミッションに関する研究

氏 名 : 大 澤 勇

複合材料が構造材としての用途へ拡大されるに伴ない、複合材料の破壊に関する研究が近年増加の一途をたどっている。しかしながら、高分子系複合材料の強度範囲は広範に渡り、また強度に及ぼす影響因子も多く、破壊機構が複雑かつ多様である。

本研究において用いたアコースティック・エミッション (AE) 法は、材料が変形もしくは破壊する時に発生する弾性波を材料表面で検出して解析しようとする研究手段である。この方法が材料研究の手段として系統的に取り上げられたのは、比較的近年のことである。複合材料の AE 研究は金属材料の研究の後を追う形で進んできており、複合材料のように内部構造が複雑で材質判定の難しい材料に対しては、極めて有力な手法になりうるものである。

本研究では先進複合材料に対して実験的アプローチにより、積層材料の損傷過程を明らかにすること。また同時に、AE 技法を効果的に適用し、損傷の発生から最終段階に至るまでを追跡し、繊維強化複合材料の破壊進展過程と AE 挙動、さらに力学特性との相関を実験的に解明することを目的とした。従って可能な限り実験の対象も広範に捉え、単繊維の破損レベルから巨視的積層板レベルへと発展させた。更に現状においては公的機関による AE 試験方法の標準化がなされていないことから、著者の経験に基づき主張を採り入れた形の AE 試験法の提言を行った。主要となる要旨を以下に記述する。

### 1. 界面強度を変えた単繊維埋め込み試料の引張り損傷

繊維強化複合材料においては、繊維／樹脂界面の接着強度が物性に影響を及ぼすと言われている。ここでは高強度・高弾性タイプの Pitch 系炭素繊維を用い、界面強度の低い繊維「HM-L」、および高界面強度繊維「HM-H」を試料として用い、界面特性が破壊へ及ぼす影響をAE振幅値解析により、破壊メカニズムの違いについて考察を行った。

その結果、同じ引張強度を持ったPitch系炭素繊維強化の一方複合材料であっても、繊維の表面接着性が異なることで破壊様式及び引張強度の異なることを確認した。更に、単繊維埋め込み4点曲げ試料の結果から、「HM-L」では高せん断応力場が繊維に沿って拡大するのみであるが、「HM-H」では繊維破断箇所が増え、この繊維破断からのAE振幅値は、繊維界面のはく離に起因するAEに比べ高い振幅値であることを明らかにした。

### 2. 積層材層間界面のはく離破損とはく離エネルギー

FRPは積層構造であるために特に層間接着強度が低い。そのため静的強度特性として層間強度を捉えるには、従来の方法では見掛けの強度評価にとどまり、有効な材質比較パラメータとして確立するには困難があった。ここでは層間剥離抵抗を表す基本パラメータとして界面剥離エネルギーを導入し、これを測定する方法として切欠き4点曲げ試験を提唱した。

界面剥離エネルギーは外スパン／板厚比の試験条件にほとんど依存しない定数となり、積層材の各種界面特性を定量的に評価するのに有用であることを明らかにした。はく離発生の判定条件としては、荷重－たわみ曲線の比例限をとる方法が実用的と考えられるが、より高感度なAE法ははく離発生に対しては安全側の値を安定して表す有効な判定条件となる事を提示した。

### 3. 直交および擬似等方積層材の静的引張り損傷

積層板構造の寿命を左右する重要な破壊モードの1つに、負荷された繊維方向と直角方向の90°層において低応力レベルで発生する90°層割れがある。直交積層材の場合には、この90°層割れが積層板の0°層と90°層の層間へ進展する。更にこれから2次的に発生するのが端面からの層間はく離である。一方、擬似等方性積層材では、自由端面ではく離、90°層と45°層の樹脂割れ、そして局所はく離などがある。そこで直交積層材および擬似等方性積層材に対して引張り破損時の損傷進展過程とAE挙動について検討を行った。

直交積層片の引張の場合、90°層が厚い(0/906)s材では、振幅値80dB以上のAEグループと振幅値が80dB以下のAEグループとに明瞭に分離し、また80dB以上の発生数は90°層内のクラック数と一致することを確認した。80dB以下のAEヒットは90°層のクラック発生に付随した準微視的破壊挙動に起因する小振幅AEと見られる。対象となった3種類の直交積

層試験片は90°層内のクラック数の増加と累積AEヒットの増加の傾向は各々に良く対応することを確認した。また、フェリシティ比はほぼ0.9~1.0のレベルを維持することを確認した。

一方、擬似等方積層片の場合においても、90°層の厚い場合には90°層のクラックが主体となる破損モードである事を示した。また(45/0/-45/90)s材では、引張歪み0.9%以降に発生する-45°と90°の層間はく離現象と対応するのが低振幅値のAEであることを示した。また、(45/0/-45/90)s材の繰り返し引張試験中に計測される累積AEヒットの増加は、端面からの層間はく離面積の増加と同様の傾向を示し、積層板理論から求めた剛性低下と、実測による剛性低下はおおむね同様の傾向となることを確認した。

#### 4. 擬似等方積層材の引張り疲労損傷

疲労強度を論ずる場合、複合材料積層板として広く用いられる擬似等方積層材(45/0/-45/90)sの層間はく離挙動の及ぼす影響が大きく、疲労強度を向上させるためには層間はく離を生じにくくすることが必要である。そこで汎用の中弾性炭素繊維「T300」および研究事例の比較的少ないピッチ系高弾性繊維「XN40」を用いて、まず2種類のCFRP擬似等方積層板の引張特性とその微視的破壊過程を明らかにした。更に引張疲労特性の検証とはく離挙動について明らかにした。

その結果、静的破壊過程においては、2種類「T300/25CL」「XN40/25CL」の積層板の強度がほぼ同様であるにもかかわらず、90°層割れやはく離等の初期破損の生じる応力では、むしろ高弾性繊維「XN40」を用いたものが低い応力から破損が始まり、同時にAEも検出した。一方、疲労破損過程においては静的の場合とは異なり、高弾性繊維「XN40」を用いることにより初期破損の発生は遅れ、また最終破壊に至る疲労寿命も延びることを明らかにした。また、はく離面積の増加と剛性低下の関係を、実験値と計算値とで比較し、超音波C-スキャン法による実測はくり面積が計算値を若干下回ったが、傾向的には良い相関を示した。他方、T300/25CLとXN40/25CLでは積層材としての弾性計数は大きく異なるが、積層板のはく離発生時の疲労繰り返し数を、エネルギー解放率Gを用いて整理すると、両積層材がほぼ同等のレベルの値となることを明らかにした。

#### 5. 擬似等方性板の衝撃後圧縮損傷特性

CFRP積層板では層間の靱性が著しく低く、そのため、CFRP構造体へ飛翔物が衝突すると、それが低エネルギーの衝突荷重であっても内部に特徴的な破損を生じやすく、その後の残留圧縮強度が大幅に低下することが知られている。そこで、既往の提案されている試験法では厚物で高価な試験板となり、且つ試験装置も大容量のものが必要となる欠点を含んでいることから、小型短冊型試験片と専用治具の設計を行い、その有効性を実験的に求めた。次に、衝

撃損傷を与えたCFRP擬似等方性積層板 (+45/0/-45/90)<sub>2S</sub>の圧縮強度特性と破損進展中のAE挙動との相関について考察を行った。

衝撃後の圧縮強度は衝撃エネルギーの増加に伴って衝撃破損面積あるいは衝撃子による凹み量が増えると共に、圧縮強度は低下することを確認した。更に、衝撃による層間剥離損傷材において、AEヒットが連続的に発生し始める圧縮応力と残留強度との関係、あるいは損傷面積と真の累積総AEイベント数との関係、そして真の累積総AEイベント数と衝撃後の圧縮強度とが極めて密接な相関を有していることを明らかにした。

## 6. モルタルおよびコンクリート梁へのFRP補強とその損傷

近年、コンクリート材の補修・補強に複合材料を用いた適応事例が報告されるようになってきた。そこでコンクリート材およびモルタル材の補強、補修の観点から、3点曲げ試験片の底部・引張り部へFRPシートを貼付し、破損過程に及ぼすFRP補強材の影響あるいは補強効果等についてAE法を用い検討を行った。

中央切欠き付コンクリートの補強試験体では、AE法により発生限界荷重を安定的に見出すことが出来た。この荷重は補強FRPの剛性の増加に伴って上昇する値となったが、FEMで求めた $K_{IC}$ 値はコンクリート単体を含め全て同レベルとなり、コンクリート自身の破壊靱性値に帰結することを確認した。またFRP補強の最大破壊荷重値は、切欠きの有無に関わらず補強材剛性の大小と良い相関を示した。一方、コンクリート自身の破壊靱性値を $K_{IC}$ とし、FRP補強によって誘起された破壊靱性値の見かけの増加量を $K_{IP}$ として補強効率を“ $K_{IP}/K_{IC}$ ”として求めると、補強FRPの剛性増加に伴って補強効率も増加することを確認した。また、補強コンクリートへ初めてAEモーメント・テンソル法の適用を試みたが、き裂の発生、き裂発生位置の特定、或いはき裂の方向とき裂の生成形態が明らかになると共に、その有効性についても実証できた。

以上のように、本研究ではAEによる損傷評価という観点で、損傷の対象を可能な限り広範に捉え検討を行った。その結果、AE技法を効果的に適用することで、損傷進展過程とAE挙動との関係を明らかにすることが出来た。また、著者の主張を組み入れたAE試験法の提言を行った。これらの結果は複合材料の損傷進展および複合材料設計に対する新たな評価指針を与えるものと考えられる。