AE 法による CFRP の破壊機構の解明に関する研究* (負荷角度と水環境の影響)

木田 外明^{*1}, 鈴木 恵^{*1}, 宮下 寿徳^{*2}
松本 克洋^{*2}, 水谷 文彦^{*2}, 宮野 靖^{*1}

Study on Fracture Mechanisms of CFRP by Acoustic Emission Technique (Effects of Loading Angle and Water Environment)

Sotoaki KIDA, Megumu SUZUKI, Hisanori MIYASHITA,
Katsuhiko MATSUMOTO, Fumihiko MIZUTANI and Yasushi MIYANO

AE monitoring tests are conducted on the specimens with different angles between the directions of applied load and the yarn of cross-ply CFRP or plain woven CFRP. Effects of water environment on the ratio of the loads P_b and P_c determined by the AE energy gradient method to the maximum load P_{max} are discussed. The crack initiation and propagation at notch tip are observed by a monitor microscope and the damage modes of constituents are investigated by AE frequency analysis at or near the points of P_b/P_{max} and P_c/P_{max} . The ratios of P_b/P_{max} and P_c/P_{max} are important points to clarify fracture mechanisms of CFRP.

Key Words: Acoustic Emission, Reinforced Plastic, Crack Propagation, CFRP, Fracture Mechanisms, Loading Angle, Water Environment

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は他の材料に比べて優れた比強度, 比弾性係数を有しているため, 船舶, 自動車, 航空機, 人工衛星などの構造材に広く使用され, その進出はめざましいものがある。そのため, 信頼性と安全性が要求され, その破壊に関する研究が重要になっている。

CFRP の炭素繊維の弾性係数と強度は母材樹脂のそれらと比較して著しく大きいので, 繊維配向により CFRP は著しい力学的異方性を示す。その結果, 樹脂割れや層間はく離といった異方性に強く支配される損傷が複合材料の構造部に発生しやすい⁽¹⁾。その損傷には繊維破断や繊維と樹脂のはく離などがあり, さらにその損傷は負荷方向と繊維方向との角度(負荷角度)や水環境の影響^{(2)~(5)}によっても異なるので, その機構は非常に複雑である。しかし, 上述の構造材には高い信頼性と安全性が必要とされるため CFRP の損傷機構を明らかにする必要がある。その方法として材料内

部の微小な変形や損傷の発生を高感度に検出できる AE 法が注目されている。

そこで本研究は積層 CFRP 試験片と平織 CFRP 試験片を大気中と水中に放置し, それらの試験片を取り出して大気中で負荷角度を変えて AE 試験を行い, 両者の破壊機構への負荷角度や水環境の影響を調べることを目的とする。

2. 実 験

2.1 実験試料 供試材は炭素繊維 UD プリプレグ(東レ, T 400)とエポキシ樹脂(東レ, #2500)で構成した厚さ 0.14 mm のプリプレグ(東レ, P 1053-15)を 7 ply 積層し, 1 mm の厚さに成形した積層 CFRP 板(300×300×1 mm)と炭素繊維織物(東レ, T 400 平織)とエポキシ樹脂(東レ, #2500)で構成した厚さ 0.19 mm のプリプレグ(東レ, FJ 6343 G)を 5 ply 積層し, 1 mm の厚さに成形した平織 CFRP 板(300×300×1 mm)である。これらの平板から負荷角度が 0° と 45° となるように, 短冊形試験片(170×20×1 mm)をダイヤモンドカッタで注意深く切り出した。なお, 繊維方向に対する負荷方向のなす角度, すなわち負荷角度 0°, 45° の試験片を 0° 材, 45° 材と称す。また, 大気中で試験する積層 CFRP の 0° 材を A 材, 45° 材を

* 原稿受付 平成 5 年 10 月 27 日。

^{*1} 正員, 金沢工業大学 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)。

^{*2} 学生員, 金沢工業大学大学院。

B材, 平織CFRPの0°材をC材, 45°材をD材と名付ける。これらの機械的性質を表1に示す。水に浸した試験片の水分の影響をみる実験では試験片の一部を切り出して水に浸し、膨潤度と日数の実験より飽和したと思われる日数を18日と決定し、試験片をその日数浸した後水中から取り出してAE試験を行った。ここで、A, B, C, D材の水中に浸した試験片をWA, WB, WC, WD材と名付ける。

AE試験には短冊形試験片の中央に片切欠きを入れた試験片を用いた。切欠長さや常用のAEパラメータの実験から切欠長さは8mm(切欠長さ a と板幅 W との比である相対切欠長さ a/W は0.4)とし、切欠きはダイヤモンドカッタで注意深く入れた。また、チャック部での破断を避けるため試験片のつかみ部の両側にFRPのタブ(45×20×1mm)を貼った。ここに、AE試験には3本以上の試験片を準備し、測定値の平均値および標準偏差を求めた。

2.2 実験方法 引張過程中のAE試験にはイン

表1 積層CFRP, 平織CFRPの機械的性質

Specimen	Elastic modulus E (GPa)	Tensile strength σ_b (MPa)	Apparent Poisson's ratio ν	Percentage elongation ψ (%)
A	86	1320	0.04	6.3
B	3	190	1.00	12.7
C	68	1000	0.04	4.8
D	15	240	0.82	13.0

ストロン形試験機を用いた。AEセンサは2chで試験片の中央からそれぞれ20mm離し、シリコングリースを介して試験片にテープで固定した。常用AEパラメータを求めるには共振形センサを用いて引張速度0.2mm/minで行い、またAE周波数解析には高帯域形センサを用いて引張速度0.1mm/minで行った。ただし、これらのAE計測装置、センサなどについては別報⁽⁶⁾を参照されたい。

次に、切欠先端の損傷域内で安定き裂が発生する荷重 P_b と安定き裂が見かけの不安定破壊になる荷重 P_c を求めるには、全AEエネルギーと応力拡大係数の関係を使用する応力拡大係数法⁽⁷⁾があるが、CFRPの予備実験では、荷重 P_b , P_c の決定に困難な場合があったのでエネルギーこう配法を使用した。このエネルギーこう配法の詳細については文献(8)を参照されたい。さらに、切欠先端の損傷の発生・進展状態を観察するためにモニタマイクロスコープ(Keyence VH-5900)を使用して引張試験中の切欠先端の損傷状態を連続的に撮影し、カラービデオプリンタ(SONY CVP-500)でプリントアウトして考察した。

3. 実験結果と考察

3.1 積層CFRPのエネルギーこう配法により求めた荷重 P_b , P_c の負荷角度および水環境の影響 負荷角度と水環境の影響をみるためにA, B材とWA, WB材の荷重-伸び曲線と累積AE事象数, 全AEエ

(a) A材

(c) WA材

(b) B材

(d) WB材

図1 積層CFRPの荷重-伸び曲線と累積AE事象数, 全AEエネルギーの関係への負荷角度と水環境の影響

エネルギーの関係を図1に示す。また、エネルギーこう配法を適用して求めたA, B材の荷重 P_b , P_c と最高荷重 P_{max} の値を表2に示す。最高荷重 P_{max} と同様に荷重 P_b , P_c の値はA材がB材より大きい。荷重 P_b , P_c と最高荷重 P_{max} との比、すなわち P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値を表3に示す。また、WA, WB材の荷重 P_b , P_c の値も表2に、 P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値も表3に示す。WA材の P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値はA材より少し低い、WB材とB材とはほとんど変わらない。また、A材とWA材の P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値はB材とWB材の値より低いことがわかる。ここに、 P_c/P_{max} の値が1に近いことは最高荷重付近で不安定破壊が始まることを意味し、 P_c/P_{max} の値が1よりかなり小さいことは最高荷重のかなり前で急速にき裂が進展するためと考えられ、この場合は見かけの不安定破壊と考えられる。図2に示すようにA材とWA材は荷重 P_c 点後に樹脂割れや繊維と樹脂がはく離して樹脂内をき裂は急速に進展するが、橋架け繊維を破断したり引抜くため荷重 P_c 点以後も荷重は増加するため荷重 P_c は

表2 積層CFRPの荷重 P_b , P_c , P_{max} 値への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_b (kN)		P_c (kN)		P_{max} (kN)
	Mean	SD	Mean	SD	
A	6.92	1.01	7.97	1.03	9.17
B	1.65	0.07	1.74	0.05	1.78
WA	6.27	0.71	7.76	0.06	9.01
WB	1.64	0.00	1.73	0.00	1.80

表3 積層CFRPの P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 値への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_b/P_{max}		P_c/P_{max}	
	Mean	SD	Mean	SD
A	0.75	0.07	0.87	0.03
B	0.93	0.02	0.98	0.01
WA	0.70	0.08	0.86	0.00
WB	0.93	0.00	0.98	0.00

図2 積層CFRPの荷重 P_c 点後のき裂進展への負荷角度と水環境の影響

最高荷重 P_{max} より小さい。B材とWB材は切欠先端で斜め繊維を破断し、その繊維に対し90°の斜め繊維に沿ってき裂は進展するため荷重 P_c は最高荷重 P_{max} に極めて近くなるものと考えられる。

3.2 積層CFRPのモニタマイクロ스코プによる切欠先端の巨視的損傷観察 図3はA, B材とWA, WB材の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点か、その近くでの切欠先端の損傷状態を示す。ここに、荷重 P_i はAEが出始めるときの荷重である。A材は P_b/P_{max} 点で切欠きは負荷方向に広がり、切欠先端に縦はく離が生ずる。 P_c/P_{max} 点ではさらに切欠きが広がり矢印で示すように P_b/P_{max} 点での損傷が進展して大きくなる。B材は P_b/P_{max} 点で切欠先端で斜め繊維に沿ったはく離による損傷が生ずる。さらに、 P_c/P_{max} 点ではA材と同様に P_b/P_{max} 点での損傷は繊維に沿って大きくなっている。これ以後、破壊は急速に進展するものと思われる。次に、水環境の影響をみるためにWA材とA材を比較すると、WA材の縦はく離はA材より顕著で水環境の影響により損傷が大きくなっていることがわかる。また、WB材とB材においても同様の影響が考えられる。

3.3 積層CFRPのAE周波数分布への負荷角度および水環境の影響 図4はA, B材とWA, WB材の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点か、その近くでのパワースペクトル密度-周波数-荷重の関係の三次元図である。この図のピーク周波数で最もAEの発生が大きい。すなわち、その周波数で損傷が大きいと考え、ピーク周波数に注目して順位①, ②, …, を付ける。これらのピーク周波数を表4に示す。炭素繊維とエポキシ樹脂

図3 積層CFRPの損傷進展への負荷角度と水環境の影響

の大気中と水環境でのモデル材の AE 試験によると、エポキシ樹脂の割れ、炭素繊維とエポキシ樹脂とのはく離、炭素繊維の破断に対応する周波数域は、それぞれ 100~200, 200~330, 340~440 kHz である。大気中と水環境では、それらの差はあまりなかった。それで、これらの周波数域を表 4 に対応させ、構成材の損傷因子に直して表 5 に示す。これより、A 材の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} 点では繊維と樹脂のはく離が多く、 P_c/P_{max} 点ではさらに多くなる。B 材の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} 点では繊維と樹脂のはく離が多く、 P_c/P_{max} 点では繊維破断が多くなる。WA 材の P_i/P_{max} 点で繊維破断、繊維はく離が極めて多く、 P_b/P_{max} 点では損傷は極めて少なくなり P_c/P_{max} 点ではまた繊維はく離が多くなる。WB 材の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} 点では繊維はく離、 P_c/P_{max} 点では繊維破断が多い。このように、A 材は B 材に比

べ、水環境により負荷の初期段階で損傷が多く起きることがわかる。

3・4 平織 CFRP のエネルギーこう配法により求めた荷重 P_b , P_c の負荷角度および水環境の影響 C, D 材と WC, WD 材の荷重-伸び曲線と累積 AE 事象数、全 AE エネルギーの関係を図 5 に示す。エネルギーこう配法で求めた C, D 材の荷重 P_b , P_c と最高荷重 P_{max} との値を表 6 に示す。最高荷重 P_{max} と同様に C 材の荷重 P_b , P_c の値は D 材の値より大きい。荷重 P_b , P_c と最高荷重 P_{max} との比を表 7 に示す。また、WC, WD 材の荷重 P_b , P_c の値を表 6 に、 P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値を表 7 に示す。 P_b/P_{max} , P_c/P_{max} の値とも C 材は D 材より小さく負荷角度の影響を受ける。しかし、 P_b/P_{max} の値で C 材と WC 材, D 材と WD 材とを比較すると水環境により低下しているが、 P_c/P_{max} の値

表 4 積層 CFRP の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点でのピーク周波数への負荷角度と水環境の影響

Specimen	Peak frequency at P_i/P_{max}	Peak frequency at P_b/P_{max}	Peak frequency at P_c/P_{max}
A	(1) 290 (2) 100	(1) 300 (2) 380 (3) 140	(1) 300 (2) 150 (3) 350
B	(1) 270	(1) 280 (2) 370 (3) 110	(1) 370 (2) 250 (3) 100
WA	(1) 350 (2) 290 (3) 170	(1) 360 (2) 280	(1) 310 (2) 400 (3) 120
WB	(1) 270 (2) 350	(1) 290 (2) 400 (3) 100	(1) 400 (2) 280

Unit: kHz

表 5 積層 CFRP の P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点での損傷因子への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_i/P_{max}	P_b/P_{max}	P_c/P_{max}
A	①Fiber debonding ②Resin cracking	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking	①Fiber debonding ②Resin cracking ③Fiber breaking
B	①Fiber debonding	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking	①Fiber breaking ②Fiber debonding ③Resin cracking
WA	①Fiber breaking ②Fiber debonding ③Resin cracking	①Fiber breaking ②Fiber debonding	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking
WB	①Fiber debonding ②Fiber breaking	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking	①Fiber breaking ②Fiber debonding

(a) A 材

(c) WA 材

(b) B 材

(d) WB 材

図 4 積層 CFRP のパワースペクトル密度-周波数-荷重の関係への負荷角度と水環境の影響

は水環境により影響を受けないようである。

ここにC材とWC材の P_c/P_{max} の値がD材とWD材の値より低いのは、図6に示すように荷重 P_c 点後にC材とWC材は樹脂割れや繊維と樹脂がはく離して樹脂内を急速にき裂が進展するが、橋架け繊維を破断したり引抜くため荷重 P_c 点以後も荷重は増加する

(a) C材

(b) D材

(c) WC材

(d) WD材

図5 平織CFRPの荷重-伸び曲線と累積AE事象数、全AEエネルギーの関係への負荷角度と水環境の影響

ため荷重 P_c 点は最高荷重 P_{max} より小さい。しかし、D材は切欠先端で斜め繊維を破断し、その繊維に対し 90° の斜め繊維に沿ってき裂が進展するため荷重 P_c 点は最高荷重 P_{max} に極めて近くなるものと考えられる。

3.5 平織CFRPの切欠先端のモニタマイクロスコブによる巨視的損傷観察 図7はC、D材とWC、WD材の P_i/P_{max} 、 P_b/P_{max} 、 P_c/P_{max} 点か、その近くでの切欠先端の損傷状態を示している。C材では P_i/P_{max} 点で損傷は観察されないが、 P_b/P_{max} 点になると切欠きから矢印で示すように損傷が生じており、 P_c/P_{max} 点になるとその損傷は大きくなっている、また、D材でも P_i/P_{max} 点では損傷は観察されないが、 P_b/P_{max} 点になると切欠先端の損傷と切欠きから離れて斜め繊維に沿ったはく離による損傷が現れる⁽⁹⁾。 P_c/P_{max} 点では P_b/P_{max} 点で現れた損傷が大きく明らかになっている。WC材とWD材は、C材とD材と比較して水環境の影響により損傷が大きくなるようである。

表6 平織CFRPの荷重 P_b 、 P_c 、 P_{max} 値への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_b (kN)		P_c (kN)		P_{max} (kN)
	Mean	SD	Mean	SD	
C	4.45	0.36	4.95	0.61	5.61
D	2.16	0.07	2.36	0.10	2.41
WC	3.09	0.46	4.15	0.22	5.10
WD	1.84	0.02	2.17	0.03	2.22

表7 平織CFRPの P_b/P_{max} 、 P_c/P_{max} 値への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_b/P_{max}		P_c/P_{max}	
	Mean	SD	Mean	SD
C	0.79	0.06	0.81	0.11
D	0.90	0.03	0.98	0.05
WC	0.60	0.08	0.81	0.04
WD	0.83	0.01	0.98	0.01

図6 平織CFRPの荷重 P_c 点後のき裂進展への負荷角度と水環境の影響

3・6 平織CFRPのAE周波数分布への負荷方向および水環境の影響 図8はC, D材とWC, WD材の荷重 P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点か、その近くでのパワースペクトル密度-周波数-荷重の関係の三次元図である。前述3・3節と同様にC材とD材の損傷を示すピーク周波数を表8に、これらの周波数を構成材の損傷因子に直して表9に示す。C材の P_i/P_{max} 点では繊維はく離、 P_b/P_{max} 点では繊維破断、 P_c/P_{max} 点では繊維はく離が多い。D材の P_i/P_{max} 点では繊維はく離、 P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点では繊維破断がやや多いことがわかる。WC材とWD材のピーク周波数を表8に示し、構成材の損傷因子の順位を表9に示す。WC, WD材のパワースペクトル密度はC, D材より極めて小さく、水環境により損傷が既に起きたことを示し水環境の影響

表8 平織CFRPの P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点でのピーク周波数への負荷角度と水環境の影響

Specimen	Peak frequency at P_i/P_{max}	Peak frequency at P_b/P_{max}	Peak frequency at P_c/P_{max}
C	① 290 ② 170	① 350 ② 120	① 310 ② 370 ③ 150
D	① 230 ② 410 ③ 100	① 360 ② 280 ③ 170	① 340 ② 250
WC	① 370 ② 280	① 370 ② 280	① 300 ② 360
WD	① 270	① 290 ② 150	① 310

Unit: kHz

表9 平織CFRPの P_i/P_{max} , P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点での損傷因子への負荷角度と水環境の影響

Specimen	P_i/P_{max}	P_b/P_{max}	P_c/P_{max}
C	①Fiber debonding ②Resin cracking	①Fiber breaking ②Resin cracking	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking
D	①Fiber debonding ②Fiber breaking ③Resin cracking	①Fiber breaking ②Fiber debonding ③Resin cracking	①Fiber breaking ②Fiber debonding
WC	①Fiber breaking ②Fiber debonding	①Fiber breaking ②Fiber debonding	①Fiber debonding ②Fiber breaking
WD	①Fiber debonding	①Fiber debonding ②Resin cracking	①Fiber debonding

図7 平織CFRPの損傷進展への負荷角度と水環境の影響

維はく離、 P_b/P_{max} 点では繊維破断、 P_c/P_{max} 点では繊維はく離が多い。D材の P_i/P_{max} 点では繊維はく離、 P_b/P_{max} , P_c/P_{max} 点では繊維破断がやや多いことがわかる。WC材とWD材のピーク周波数を表8に示し、構成材の損傷因子の順位を表9に示す。WC, WD材のパワースペクトル密度はC, D材より極めて小さく、水環境により損傷が既に起きたことを示し水環境の影響

図8 平織CFRPのパワースペクトル密度-周波数-荷重の関係への負荷角度と水環境の影響

響が極めて大きいことがわかる。

3・7 積層CFRPと平織CFRPの破壊機構の相違点

上述のように、両CFRPへの負荷角度、水環境による破壊への影響を論じたが、構造の破壊機構への影響は述べてない。平織CFRPは積層CFRPと異なり織構造に基づくクリンプの影響が、荷重-伸び曲線の形状と、蛍光塗料法による微視的損傷の観察、損傷のエネルギーに基づくAE振幅の考察などの孫⁽¹⁰⁾の詳細の研究により、損傷機構にあると考えている。このように構造の異なるCFRPにおいて、

(1) 微小欠陥の生成から安定き裂に成長する荷重と最高荷重との比(P_b/P_{max})と安定き裂が不安定き裂または急速進展き裂になる荷重と最高荷重との比(P_c/P_{max})、(2) 切欠先端の損傷のモニタマイクロスコープによる観察、(3) 損傷因子の周波数解析などから考察すると、大気中では積層CFRPと平織CFRPの P_b/P_{max} と P_c/P_{max} の値は変わらないが、水環境下では積層CFRPの値は平織CFRPの値より大きい。この違いは構成材の損傷のモードにも現れ、負荷角度 0° 、 45° で大気中の P_b/P_{max} と P_c/P_{max} では積層CFRPは繊維はく離、平織CFRPは繊維破断が多く、水環境下では水の影響を強く受け損傷は大気中の傾向と異なることがある。ここに、積層CFRPの水環境の影響が平織CFRPより小さいのは、板厚は同じであるが積層数(糸密度)の違いによるものと思われる。このようにエネルギーこう配法により求めた P_b/P_{max} と P_c/P_{max} はCFRPの破壊機構の相違を解明するうえで重要な点と考えられる。

4. 結 論

積層CFRPと平織CFRPの破壊機構への負荷角度と水環境が及ぼす影響をAE法により調べた結果、次の結論を得た。

(1) エネルギーこう配法による切欠先端の損傷域

内で切欠きから安定き裂が発生する荷重 P_b 、安定き裂が見かけの不安定き裂となる荷重 P_c と最高荷重 P_{max} との比 P_b/P_{max} と P_c/P_{max} は、両材とも負荷角度を 0° から 45° にすると大気中と水環境下で大きくなり、その理由を明らかにした。

(2) モニタマイクロスコープによる P_b/P_{max} と P_c/P_{max} 点か、その近くでの切欠先端の損傷の観察によると、両材とも大気中と水環境下で負荷角度が 0° のときは縦はく離、 45° のときは斜めはく離を生じ、水環境下ではそれらのはく離は顕著である。

(3) P_b/P_{max} 点か、その近くでの周波数解析によると、負荷角度 0° 、 45° の大気中のA材の損傷は繊維はく離、C材は繊維破断が主であるが、 P_c/P_{max} 点か、その近くでは負荷角度により損傷モードが変わる場合がある。水環境による損傷はA材はC材に比べ小さい。

(4) エネルギーこう配法による P_b/P_{max} 、 P_c/P_{max} はCFRPの損傷を解明するうえで重要な点であることがわかった。

本研究に対する京都工芸繊維大学工芸学部・中西博教授のご配慮、関係会社および本学学生・徳田実、福島愛一郎両君の協力を感謝する。

文 献

- (1) 下村・ほか5名, 非破壊検査, 33(1984), 520.
- (2) 駒井・ほか3名, 機論, 54-505, A(1988), 1677.
- (3) 駒井・ほか2名, 機論, 56-525, A(1990), 1021.
- (4) 森井・ほか6名, 強化プラスチック, 37-5(1991), 163.
- (5) 駒井・ほか2名, 機論, 59-566, A(1993), 2278.
- (6) 鈴木・ほか6名, 機論, 53-492, A(1987), 1459.
- (7) 木田・ほか3名, 機論, 58-553, A(1992), 1537.
- (8) 鈴木・ほか3名, 機論, 59-566, A(1993), 2271.
- (9) 鈴木・ほか3名, 材料, 41-464(1992), 707.
- (10) 孫, 織布強化複合材料の損傷挙動および湾曲繊維を有する複合材料の力学特性に関する研究, 東京大学博士学位論文, (1991).