温度環境下におけるガラスマット FRP の低サイクル 疲労挙動の AE によるモニタリング*

福田 武人^{*1}, 逢坂 勝彦^{*1}
藤井 太一^{*1}, 高田 政宏^{*2}

Acoustic Emission Monitoring of Low-Cycle Fatigue Behavior of Glass-Mat FRP in Various Temperature Environments

Takehito FUKUDA, Katsuhiko OSAKA,
Taichi FUJII, and Masahiro TAKADA

Acoustic emission (AE) monitoring of fatigue damage processes of glass-mat FRP was made in low-cycle fatigue tests at three environmental temperatures such as -20°C , 25°C , and 120°C . The AE signal was measured in the ring-down mode with an AE measuring system connected with a personal computer. It was found at all temperatures tested here that there are three regions where a certain feature can be recognized in the ring-down rate count with the development of fatigue damage. That is, in the first region, the AE rate count is the largest at the first cycle and then it will shake down. The second region is one in which the AE rate count at the shake-down state will be approximately stable during comparatively large cycles due to the testing conditions and finally in the third, it will increase abruptly just before fatigue failure of the specimen takes place. As a result of the measured data, it was shown that the AE counts in each region have a correlation not only with low-cycle fatigue life but also with fatigue failure mode under each temperature environment.

Key Words: Glass-Mat FRP, Acoustic Emission Monitoring, Ring-Down Rate Count, Low-Cycle Fatigue Behavior, Temperature Environments, Fatigue Failure Mode

1. 緒 言

AE 法は、非破壊検査法として最近注目を集めている。金属材料はもちろんのこと、セラミックス、コンクリート、木材など多くの材料を対象として AE 法を用いた研究が行われている^{(1)~(4)}。FRP についても同様に研究がなされているが⁽⁵⁾、複合材料である FRP は、破壊過程が複雑であるため、AE 法を非破壊検査法として確立するには、まだ解明されなければならない点が多く、より多くの研究が必要とされている。その一つの試みとして、著者らは、環境温度が、 -20°C 、 25°C および 120°C の場合の静的引張荷重を受けるガラスマット FRP 積層板について、AE リングダウンカウントを測定し、環境温度の相違による破壊過程の違いを AE 応答の特徴としてとらえることを明らかにした⁽⁶⁾。

さて、疲労負荷を受ける材料の疲労損傷を AE 法によってモニタリングすることは、金属材料などについては行われており、疲労寿命予測についての研究もな

されている⁽⁷⁾。しかし、FRP についてはあまり研究がなされておらず⁽⁸⁾、温度環境が変化した場合の疲労の研究については、ほとんど見当たらない。そこで、本研究では、前述の静的試験と同様の環境温度下で同じガラスマット FRP 試験片に対して、低サイクル疲労試験を行い、AE リングダウンカウントを測定した。その結果、環境温度によって疲労進行中に計測した AE カウントに特徴的な発生パターンが存在し、またそれが温度条件の違いによる FRP 積層板の破壊過程の違いを反映していることがわかった。

2. 試験方法

2.1 試験片 試験片の形状と寸法を図 1 に示す。試験片は強化材にチョップドストランドガラスマット〔日本硝子繊維(株), REM 450-G 5〕、マトリックスとして不飽和ポリエステル樹脂〔武田薬品工業(株), ポリマール 3272〕を使ってハンドレイアップ法により常温にて成形した。積層数は 6 層とし、ポストキュアは、 60°C 、24 時間とした。試験に際して、FRP 板を直接チャッキングすると、チャッキングによる AE が発生し試験片の正確な AE 測定ができない。ところで、この種の AE の発生は、樹脂板を介してチャッキングすることにより防止することができるが、単に接着剤によ

* 昭和 62 年 3 月 13 日 関西支部第 62 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 10 月 9 日。

^{*1} 正員、大阪市立大学工学部 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-138)。

^{*2} 学生員、大阪市立大学大学院。

り接着したのでは温度条件によって接着部にはく離を起こすので、高温から低温までの温度環境下での試験に対応することができない。このため、マトリックスと同じ不飽和ポリエステル樹脂で注型板を作り、積層板と注型板が完全に硬化していない、いわゆるゲル化の状態に接着することにより、試験片を製作する工夫を加えることによって、チャッキングなどによるAEの発生をほぼ防止できた。なお、表1に試験片の静的データを与えてある。

2・2 試験方法 図2に試験装置ならびに計測システムの概略を示す。試験は、インストロン形引張試験機を用い、応力速度 10 MPa/s で定荷重片振り引張モードで行った。各環境温度は、恒温槽を用いることによって実現した。低サイクル疲労試験においては、負荷荷重レベルを、静的強度の約 75 % から 90 % とした。次に、AE センサを図1に示す位置に、シリコングリスをセンサと試験片の接触面に塗布し、布テープにより取付けた。図に示すように、センサで受けた AE 信号をプリアンプ、メインアンプで増幅し、100 kHz のハイパスフィルタ、300 kHz のローパスフィルタを通し、一定のしきい値以上の信号をカウンタによってカウントした。カウンタからのアナログ信号を A/D 変換器を用いてパーソナルコンピュータに取り込んだ。なお、AE センサは共振形のものをを用い、共振周波数は 140 kHz である。

3. 結果と考察

3・1 疲労進行に伴う AE カウントの変化

表 1 試験片の静的特性

Temperature (°C)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Fiber Volume Fraction(%)
-20	252	19.8	34.5
25	224	16.5	
120	142	10.9

図 1 試験片の形状と寸法

3・1・1 発生パターン 環境温度が -20°C 、 25°C および 120°C の場合の繰返し数に対する典型的な AE カウントの変化を図3から図5にそれぞれ示す。図に示しているように、各温度に共通して AE カウントを次の I, II, III の 3 種類の特徴的な発生パターンの領域に分けることができる。

領域 I 1 回めの負荷荷重によって大きな AE カウントが発生し、カイザ効果によって急激にカウント数が減少していき、一定の値に落ち着く（シェイクダウンの現象）。

領域 II 領域 I でシェイクダウンした AE カウントは、多少の変動はあるものの、ほぼ一定の値をかなり長い間保ち続ける。

領域 III 破壊直前になり、AE カウントが急激に増加する。

3・1・2 AE カウントと破壊繰返し数の関係 さて、1 回めの負荷時に発生する AE カウントは、試験片が損傷を受けていない状態から低サイクル疲労負荷荷重まで負荷を受けることによって、試験片内部に起こった損傷の結果であると考えられる。したがって、繰返し数 1 回めの AE カウントは、領域 I における

図 2 疲労試験装置と AE 測定システムの概要

図 3 疲労負荷に伴う AE カウントの変化 (-20°C)

AE カウント中, 大きな割合を占めるため, それを, 領域 I の AE カウントの代表値 (A' と記す) と考えることができる。次に領域 II においては, もっとも AE の発生が安定している初期の平均値を取り, この領域の代表値とする (A'')。具体的には, 例えば 25°C の場合, 試験片の疲労寿命にもよるが, 繰返し数が 6 から 16 の間の平均値を採用した。これらの結果, 1 回めの負荷時に発生する AE カウント A' と破壊繰返し数の関係は, 図 6 のように, 領域 II の初期の平均値と破壊繰返し数の関係は図 7 のようにそれぞれなった。また, 図 8 には, 破壊までの全 AE カウント (A_t) と破壊繰返し数の関係を示した。各図からわかるように, 実測値は両対数グラフ上で, 各環境温度下でほぼ 1 本の直線上にあると考えられる。すなわち, 各 AE カウントと破壊繰返し数の間には, 次の関係式が近似的に成立すると考えてよい。

$$A \times N_f^\alpha = C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, A は各 AE カウント, N_f は破壊繰返し数を表し, また, C と α は定数である。最小二乗法により算出した各グラフの α と C の値を表 2 に示す。

3.1.3 領域 I における AE の特徴

ここで 1 回

図 4 疲労負荷に伴う AE カウントの変化 (25°C)

図 5 疲労負荷に伴う AE カウントの変化 (120°C)

図 6 1 回め負荷時の AE カウントと破壊繰返し数

図 7 領域 II の初期 AE カウントの平均値と破壊繰返し数

図 8 全 AE カウントと破壊繰返し数

め負荷時の AE カウント A' と破壊繰返し数の関係について考える。図 6 からわかるように、AE カウントの値は、破壊繰返し数が大きくなると次第に小さくなる傾向にある。また、それは、環境温度が、 -20°C 、 25°C 、 120°C と高くなるに従って小さくなり、 -20°C では 10^3 のオーダーであるのに対し、 120°C の場合は 10^2 のオーダーの値となっており、温度によって AE カウントに大きな差が現れる。また、直線の傾き α の値をみると、表 2 より -20°C では 0.266、 25°C で 0.376、 120°C で 0.415 となっており、温度が高くなると直線の傾きが大きくなっている。一般に、疲労負荷荷重レベルが低いほど、破壊繰返し数は大きくなるから、破壊繰返し数の増加は、負荷荷重レベルの減少を意味する。このことを、図 6 について言い換えると、例えば、図の横軸の破壊繰返し数の減少は、負荷荷重の増加を意味している。したがって、グラフ上での直線の傾きの割合は、そのまま負荷荷重レベルに対する AE カウントの増加の割合を表している。すなわち、低温域から高温域になるほど直線の傾きが次第に大きくなっているということは、負荷荷重レベルにおいて、環境温度が高くなるほど負荷荷重の増加に伴う AE カウントの増加の割合は大きくなっているということである。このことは、文献(6)で報告した環境温度を変えた場合の同じ材料に対する静的引張試験における AE カウント発生傾向と一致する。

3・1・4 領域 II における AE の特徴 次に領域 II の初期 AE カウント A'' と破壊繰返し数の関係について述べる。今回の試験において、実験者は測定中この A'' を知ることによってその試験片の破壊の時期をある程度予測するという経験を得たので、この観点からここでは、式(1)における A'' と C のもつ意味について検討を加えることにする。さて、図 7 に示す両対数グラフ上の直線の傾き α は、 -20°C で 0.798、 25°C で 0.775、 120°C で 0.980 となっている。例えば、 120°C では、傾き α がほぼ 1 に等しいので、AE カウント A'' の値を疲労負荷 1 回当たりの疲労損傷を表していると仮定すると、式(1)より破壊繰返し数までのその和が定数 C に達した時に破壊すると考えることができる。 -20°C と 25°C の場合にも 120°C と同様の考え方を適用すると、式(1)の左辺の量が C に達した時破壊すると考えれば、 C は疲労損傷を表すパラメータと考えることができる。したがって、今後図 7 のデータ数を増やすことにより、AE モニタリングに際してこの図を用いて、試験開始後かなり初期の段階で疲労破壊時期を予測しようと考えている。

3・1・5 破壊までの全 AE カウント 破壊までの

全 AE カウント A_t と破壊繰返し数の関係について述べる。図 8 に示すように、破壊繰返し数の増加とともに全 AE カウントも増加している。疲労負荷によって与えられたエネルギーの一部が AE として発散するため、繰返し数の増加とともに AE カウントも増加している結果に基づくと考えてよい。この場合 AE カウントの破壊繰返し数に対する増加の割合は、環境温度によって違っている。すなわち、このことは、マトリックスが温度依存性のある樹脂であることに起因していると考えられ、疲労負荷によって引き起こされたエネルギーの発散の結果としての AE カウントが、低温域では大きく、高温になるほど小さくなっていることがわかる。また破壊繰返し数の増加に対する AE カウントの増加の割合は、低温域ではゆるく、高温になるほど強くなる傾向がみられる。

3・2 環境温度の AE カウント発生パターンに対する影響 図 9 から図 11 は、 -20°C 、 25°C および 120°C に対する、1 回めの AE カウント A' と領域 II における C の値 (図中前者を○印、後者を●印で示す)、それに全 AE カウント A_t から上に述べた二つの値を引いた残りの AE カウント (●印) を、全 AE カウントに対する百分率でそれぞれ表したものである。横軸には破壊繰返し数を取っており、図中の曲線は、式(1)に表 2 の各パラメータを代入して計算し描いたものである。

先に述べたように、1 回めの負荷時の AE カウント A' は領域 I の特徴を示し、また、 C の値は、3・1・4 項で述べたように疲労損傷を表している。したがって、全 AE カウント A_t が繰返し数とともに増加するため、 A' はもちろんのこと、 C の値も全 AE カウントに対する割合としては低下していく。このことは、各図に示した結果と一致する。したがって、残りの AE カウントは、破壊繰返し数とともに増加していくことがわかる。

表 2 α と C の値

		Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
		-20	25	120
Fig. 6	α	0.266	0.376	0.415
	C	7.14×10^5	1.04×10^5	2.72×10^4
Fig. 7	α	0.798	0.775	0.980
	C	3.43×10^5	3.88×10^4	2.56×10^4
Fig. 8	α	-0.176	-0.306	-0.284
	C	7.19×10^5	1.46×10^5	4.02×10^4

さて、低温と高温の温度条件の違いによる今述べた諸量の変化の様子について検討してみる。すなわち、図9に示すように、環境温度が -20°C の場合は、 120°C (図11)に比べ、1回目負荷時のAEカウントの全体に占める割合がかなり大きいことがわかる。また、図3に示すように、低温における1回目負荷時の値が極めて大きく、場合によっては破壊直前のAEカウントよりも大きくなることも特徴的である。これは、 -20°C では樹脂が脆性化しており、マイクロクラックが発生しやすい状態になっているため、クラッキングによる

図9 各領域を代表するAEカウントの全AEカウントに占める割合 (-20°C)

図10 各領域を代表するAEカウントの全AEカウントに占める割合 (25°C)

図11 各領域を代表するAEカウントの全AEカウントに占める割合 (120°C)

AEがカウントされているためと思われる〔文献(6)参照〕。このことは、 -20°C における試験片の破壊状況を示した図12の写真に多くのクラックが見られることからわかる。

次に、 120°C の高温環境下では、ここで用いた樹脂の熱変形温度が、約 69°C であるので、樹脂がいわゆるゴム状になっており、その結果、試験片は、図13に示すように、繊維の引抜けにより破壊している。この状態では、クラックの発生によるAEは極めて少なく、1回目負荷時のAEカウントの割合は小さくなる。以上の事実から、AE発生については、環境温度による樹脂の性質の変化が、1回目の負荷時に大きな違いとなって現れているといえる。

さて、 25°C の場合について特徴的なことは、1回目負荷時のAEカウントA'とCが近い値を示していることであり、この傾向は -20°C と似ている。しかし、それらの割合は小さい。この原因は、破壊試験片の様子を観察することから次のように説明できる。すなわち、図14に示すとおり、破壊は繊維破断を示しており、この点は、 -20°C の場合と似ているが、クラック数は極めて少ない。したがって、 25°C の場合は、クラック発生によるAEカウントが起こりにくい。ところが、

図12 試験片の破壊状況 (-20°C)

図13 試験片の破壊状況 (120°C)

図 14 試験片の破壊状況 (25°C)

破壊前になると、 -20°C に比して樹脂が脆性的でないため、多量のAEカウントを発生するものと思われる。

以上、各環境温度によって樹脂の性質などが変化し、それがAEカウント発生のパターンに影響を及ぼしていることがわかった。

4. 結 言

-20°C 、 25°C 、 120°C の温度環境下において、ガラスマットFRP積層板の低サイクル疲労試験を行い、試験中のAEリングダウンカウントを測定した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 3レベルの温度環境下に共通して、低サイクル疲労試験中に発生するAEカウントが、繰返し数の増加とともに三つの特徴的な発生パターンの領域に分

かれることがわかった。

(2) 各領域におけるAEカウント発生パターンの特徴を表すAEカウント量と、破壊繰返し数の間に一定の関係があることがわかった。

(3) 各温度環境下で、三つのAEカウント発生パターンにおいてAEカウント量に差異が見られた。このことについては、環境温度の違いによるマトリックスの性質の変化および静的試験結果を参照することによって説明できた。

最後に、本研究を行うにあたり、実験に際して、適切な助言と協力をいただいたセイコー化工機(株)の藤井善通、下浜博美の両氏に感謝申し上げる。そして、ガラス繊維と樹脂をそれぞれ提供して下さった日本硝子繊維(株)と武田薬品工業(株)に厚くお礼申し上げます次第である。

文 献

- (1) 山岡・ほか2名, 非破壊検査, 34 (昭60), 441.
- (2) Sadowskaboczar, E., ほか3名, 12 (1984), 639.
- (3) 丹羽・ほか2名, アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集, 3rd (昭56), 29.
- (4) 佐藤・ほか2名, アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集, 4th (昭58), 138.
- (5) Awerbuch, J., ほか2名, Mater. Eval., (1985), 754.
- (6) Fujii, T., ほか5名, Proc. Int. Sympo. Compos. Mater. Struct., (1986), 919.
- (7) Baram, J., Eng. Fract. Mech., 19 (1984), 181.
- (8) Awerbuch, J., ほか2名, J. Reinf. Plast. Compos., 3 (1984), 2.