

Health Monitoring Technologies for Fiber-reinforced-plastics

Hiroshi AOYAMA

1 緒 言

極低温溶液タンクを真空容器内で支持する構造体として、ステンレス鋼や繊維強化樹脂 (FRP) が使用される。特に FRP は、金属材料に比べて熱伝導率が小さく、比強度、比剛性に優れることから、液体ヘリウムなどの冷媒を入れたタンクを、大気温度の真空容器内に断熱支持するために使用されている。この構造体のヘルスマニタリングを考えた場合、FRP の損傷をリアルタイムで検出するために、ひずみセンサ、加速度センサ等の使用が考えられるが、センサ自身の極低温での長期信頼性の確保が困難である。また、層間剥離のような FRP 特有の損傷を検出するためにはひずみセンサを多数設置する必要がありセンサ用信号線による熱侵入も無視できなくなる。本研究では、FRP の損傷、剛性低下を監視できるヘルスマニタリング法の開発を目的として、FRP 透過光を利用した FRP の劣化・損傷モニタリング法を検討した。

2 透過光を利用したアルミナ FRP の損傷検出

2.1 試験片および試験方法 本研究ではアルミナ FRP 円錐型成形品を使用した。強化繊維は直径 $15\mu\text{m}$ の γ -アルミナ繊維 (85% : $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 15% : SiO_2)、マトリックスはビスフェノール F 型エポキシ樹脂である。板厚は 2mm である。成形方法は一方向プリプレグシートを配向角を変えながら金型表面に積層した擬似等方とし、プレス成形した。試験は室温大気中で行い、FRP 構造体が繰返し荷重を受けていく過程での劣化をとらえる目的で、試験中の荷重と試験治具の変位量から剛性を算出した。

2.2 透過光測定法 試験体のアルミナ FRP は板厚が薄いため光を良く通す。FRP 内部に樹脂割れ、層間剥離などの損傷が生じると、それは「影」の形で認識できる¹⁾。FRP の損傷を調べるために疲労試験中に試験を中断し、アルミナ FRP の透過光イメージを測定した。イメージの撮像には、20W の蛍光灯と CCD カメラを使用した。

2.3 試験結果 Fig.1 に、FRP 透過光のイメージを示す。図を見ると、剛性が 3.6% 低下した場合の観察結果において FRP 平滑部に細かいキズ状の「影」が生じている。これは、FRP を構成しているエポキシ樹脂の割れを捉えているものと考えられる。試験終了後、透過光観察結果にて大きな「影」を生じていた部分について試験片を切り出し、SEM 観察を行った。繊維の配向が異なっている層間で $50\mu\text{m}$ 程度の割れが生じていることが分かった。

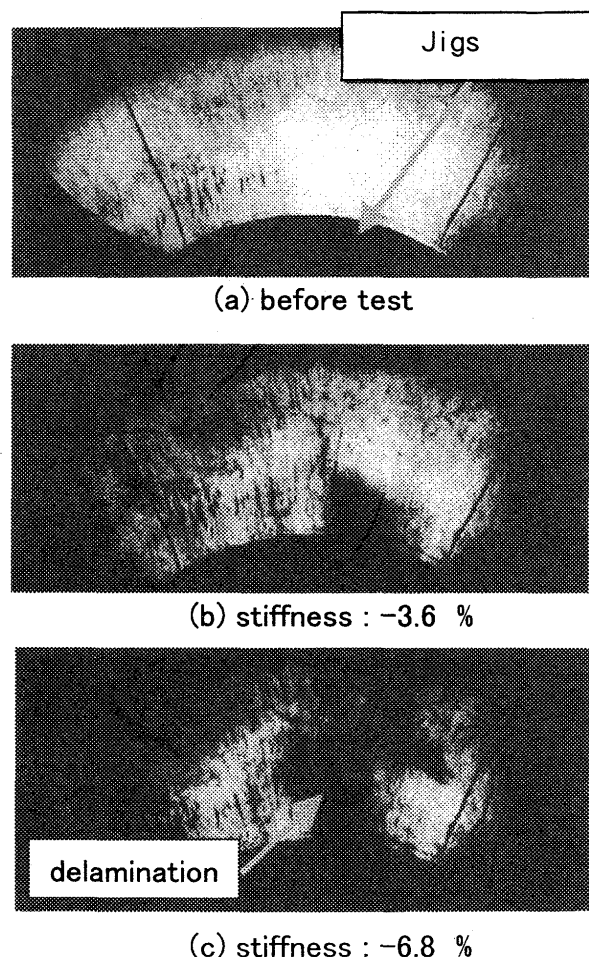


Fig.1 CCD images of transmitted light through alumina FRP

3 透過光測定ユニットによる剛性低下検出

3.1 透過光測定ユニット 第2章で述べたように、FRP 構造物の剛性低下を引き起こすアルミナ FRP の損傷の検出に、透過光が有効であることが分かった。しかし、本手法は光源として蛍光灯を、透過光イメージの撮像には CCD カメラを使用したために、超電導磁石のような極低温・真空環境での使用は不可能である。また、赤外光を含む蛍光灯の光を荷重支持体に照射することは、熱侵入の点で問題がある。

極低温・真空環境に置かれたアルミナ FRP 製荷重支持体の剛性低下量を検出する方法として、フォトリソスタと発光素子を用いた透過光測定ユニットを試作した。アルミナ FRP の損傷を敏感に捉える波長は

400から800nmであるため、光源としては赤色のLED (Light emitted diode)素子を使用した。Fig.2に、本実験で用いたLEDの発光スペクトルを示す。640nmを中心とした波長を有する光を出力する。

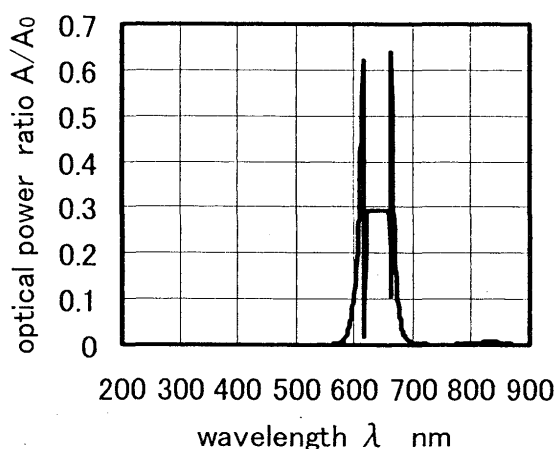


Fig.2 Spectrum of red-LED

このLEDとフォトランジスタとでFRPをはさむ形で対向させるようにFRPに非接触になる形で配置した。LED、フォトランジスタはいずれもFRP表面から約1mm離して固定した。

3.2 試験結果 透過光測定ユニットを取り付けたFRP構造物の疲労試験を行い、剛性低下を透過光量の変化で捉えられるか確認した。試験片の剛性 K を試験開始時の剛性 K_i で除した剛性比 K/K_i と、繰返し数 N を試験片の破壊までの回数 N_f で除した寿命比 N/N_f との関係をFig.3に示す。本FRP構造体においては $N/N_f=0.9$ を超えると、剛性の急激な低下が生じている。そして $K/K_i=0.6$ まで低下するとその後、損傷領域が急激に広がり、荷重を負荷できなくなった。

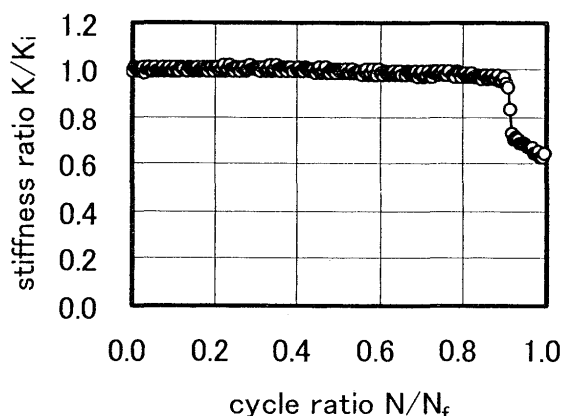


Fig.3 Relation between cycle ratio and stiffness ratio

疲労試験中の透過光の強度 A を、試験開始時のFRP透過光強度 A_i で除した透過光強度比 A/A_i の変化をFig.4に示す。試験終了後も損傷を生じなかった部位の透過光強度比は、試験を通してほぼ一定であった。試験終了後試験片を観察した結果、大きな層間剥離が生じていた部位の透過光強度比は、試験開始時から緩やかに減少し、 $N/N_f=0.7$ で急激に減少した。

本実験により、FRP構造物の剛性が低下する前の微細な樹脂割れなどの損傷を透過光強度より検出できることが分かった。本手法は、透過光強度の検出に光学素子を使用しているため、電磁ノイズの影響も受けにくい。また、供試体に直接センサを接触させないため、極低温環境においても熱侵入を引き起こさない検出が可能である。

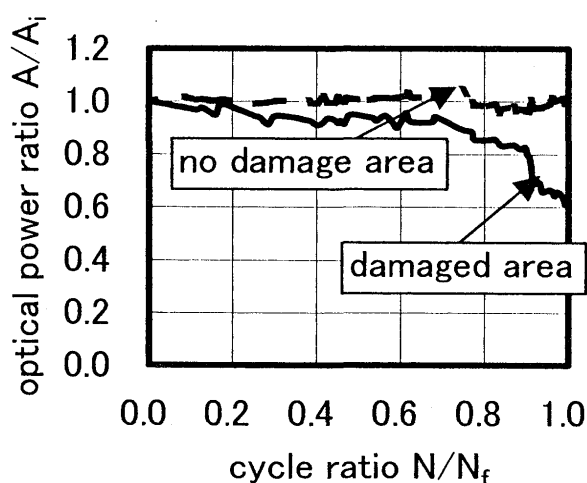


Fig.4 Relation between cycle ratio and optical power ratio

3 結 言

極低温・真空環境下におかれたアルミナFRP構造物の剛性低下につながる損傷を検出する方法として、FRP透過光を利用した新たな検査法を考案した。そして、LEDとフォトランジスタによる透過光測定ユニットを試作した。LEDの発光中心波長を640nmとすることで、FRPの発熱を引き起こさない透過光強度測定が可能となった。これをFRP構造体の疲労試験に適用し、透過光測定ユニットによるFRP透過光強度を実測した。その結果、剛性低下を大きく引き起こす前の初期のFRPの損傷発生を、透過光により検出でき、損傷の発生部位を透過光測定ユニットで検出可能なが分かった。

本研究は、工業技術院（現、経済産業省）、大学連携型産業科学技術研究開発制度による「知的材料・構造システムの研究開発」の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 1)山本俊浩, 百武秀, 日本機械学会論文集, A-63,124 (1997).