複合材料のヘルスマニタリング*

青山 博^{*1}, 渡邊 洋之^{*2}, 寺井 元昭^{*3}

Health Monitoring Technology for Alumina-Fiber-Reinforced Plastic

Hiroshi AOYAMA, Hiroyuki WATANABE and Motoaki TERAJI

Formally, we developed new load-support systems that consists of a biconical, alumina-fiber-reinforced plastic (FRP) structure for the superconducting magnet. Safe operation of the superconducting magnet will be jeopardized if the mechanical condition of the load-support system begins to degrade. One of the factors that evaluate the soundness of the superconducting magnet is the stiffness of the load-support system. Here, it is important to know the relation between the degradation of the stiffness and the growth of defects. For this purpose, firstly, a fatigue test of the load-support system was carried out, and the various defects (matrix cracking and delamination of FRP laminates) were observed during this fatigue testing. Finally, we proposed the application of two non-destructive-evaluation (NDE) methods for the health monitoring of alumina/epoxy load-support systems.

Key Words: Composite Material, Ultrasonic Inspection, Delamination, Alumina, Health Monitoring

1. 緒 言

近年, MRI (Magnetic Resonance Imaging, 核磁気共鳴) 装置, SOR (Synchrotron Orbital Radiation, 放射光) 装置, 大型加速器および磁気浮上列車など, 超電導磁石を利用した機器の開発が進められている。磁石の心臓部である超電導コイルは, 液体ヘリウムによって 4.2K に冷却されて使用される。このコイルを大気温度 (300K) の磁石外槽内に支持する荷重支持体は, 十分な剛性と強度の他に, 液体ヘリウムの消費量を抑えるために高い断熱特性が要求される。このため, 荷重支持体は FRP (繊維強化プラスチック) で, 製作されている。ここで, 超電導磁石は高真空容器内に納められており, 荷重支持体を容器内から取り外しての検査は困難となる。そのため, 磁石組立時の荷重支持体の欠陥, 損傷の検出, および磁石稼動中の荷重支

持体の劣化, 損傷をモニタリングする必要がある。本研究では, 超音波探傷法および FRP 透過光を利用した FRP 製荷重支持体の劣化・損傷モニタリング法を検討し, 両者の比較を行った。

2. 平板試験片による比較

2.1 試験片および試験方法 荷重支持体を用いた試験に先立ち, 図 1 に示すアルミナ繊維強化エポキシ樹脂製平板試験片を用いて 4 点曲げにて疲労試験を行った。試験は室温大気中で行い, 荷重制御で行った。そして, 試験片に負荷される荷重と試験治具の変位量を測定し, これらから試験片の剛性を算出した。繰返し数を破断までの繰返し数で除した値と試験中の剛性を試験開始時の剛性で除した値の関係を図 2 に示す。剛性が 33% 低下した後に再度荷重を負荷しようとしたが, 試験片の変形が大きくなりすぎたため試験を終了した。

FRP 内部の欠陥の成長と剛性低下の関係を調べるため, 試験片破断に到るまでの間に 7 回試験を中断し, 水浸法にて超音波探傷を行った。探傷子の周波数は

* 原稿受付 1998 年 4 月 16 日。

*¹ 正員, (株)日立製作所機械研究所(☎ 300-0013 土浦市神立町 502)。*² (株)日立製作所日立工場(☎ 317-0073 日立市幸町 3-1-1)。*³ 東海旅客鉄道(株)(☎ 103-0028 東京都中央区八重洲 1-6-6)。

15MHz, 焦点距離 50mm の日立建機社製を使用した。観察結果を図 3 に示す。試験片内部の変化をとらえやすくするため、スキャン画像は、試験開始時の画像との引き算処理で示した。図中(a)に示されるように、まだ試験片剛性の低下が認められる以前に、層間剥離と思われる像が観察された。

Fig. 1 Scheme of laminate under four-point bending

Fig. 2 Stiffness change of test piece

CCD image of transmitted light
loaded point ≈ 30

(a) Stiffness: - 0 %, Cycle ratio: 0.63

(b) Stiffness: - 12 %, Cycle ratio: 0.82

(c) Stiffness: - 33 %, Cycle ratio: 1.00

Fig. 3 CCD image of transmitted light through test piece and C-scan result

2.2 FRP透過光を利用した欠陥検出法 本試験で用いたFRPは板厚が2~3mmと薄く、アルミナ繊維とエポキシ樹脂の組み合わせからなるFRPであるため、可視光を通す。このため、もしFRP内部に層間剥離、樹脂割れ等の損傷が生じると、その部位で透過光の減衰が生じ、損傷を「影」の形として認識できる²⁾³⁾。そこで、超音波探傷時に図4に示す構成にて、FRP透過光を撮像し、試験開始時の像との引き算処理を行った。光源には MORITEX 社製面光源 MPP30 型、CCD カメラには SONY 社製 FDM77 型、内視鏡には OLYMPUS 社製 IF4D5 型を用い、画像処理には PHOTRON 社製イメージデジタイザ FRM512型を使用した。観察結果を図3に示す。先に示した超音波探傷結果と良く一致している。また、図3(a)のように試験片の剛性低下が顕著に現れる以前に層間剥離に起因すると思われる「影」が発生していることが分かる。

Fig. 4 Setup for transmitted light technique

C-scan result

(immersion type 15 MHz, focal length 50 mm)

2・3 計算モデルによる検討 この透過光イメージに示される「影」の大きさと試験片の剛性の関係を調べるために、有限要素法にて層間剥離を模擬した計算モデルを作成し、検討した。

計算モデルを図5に示す。層間剥離を模擬するためにFRPの板厚中央部に弾性率の小さい要素を挿入した。板厚方向の弾性率は初期の剛性が実験結果にほぼ等しくなるように決めた。図6に層間剥離の大きさが試験片の荷重を負荷している領域に占める割合と、試験片の剛性変化率との関係を示す。図中には図3で示した「影」の大きさが試験片の面積に占める割合と、剛性の変化の関係も併記してある。両者はほぼ一致している。したがって、図4に示す構成で捉えられたFRP中の「影」は、層間剥離を主として捉えていると考えられる。層間剥離の大きさが、荷重を負荷している領域に占める割合の35%付近のデータを見ると、計算結果に対して、実験で得られた剛性値の方が低い。これは、層間剥離の他に繊維破断が発生したためと考えられる⁴⁾。

Fig. 5 Calculation model

Fig. 6 Relationship between ratio of delamination and normalized stiffness

3. 荷重支持体による試験結果

超電導磁気浮上列車に用いた磁石の構造を図7に示す。コーン型荷重支持体は、超電導コイルを納めたレーストラック状内槽の直線部中央に取り付けられ、コイルに働く浮上力、推進案内力を外槽を通して台車側に伝える。荷重支持体にとって、浮上力、推進案内力

は主にコーンの軸直角方向に作用することになる。この支持体の外観を図8に示す。また、内部構造を図9に示す。本荷重支持体は鼓状に成型されたアルミナ繊維強化FRPでできており、そのくびれ部内周側には熱遮蔽用円板が取り付けられる。そして、コーンの一端が内槽(低温側)へ、もう一端が外槽側(大気温度側)へ、それぞれ金属製の円板に締結される。本荷重支持体は、内槽側から外槽側までを一体成型されたFRPで製作してある。

Fig. 7 Structure of superconducting magnet

Fig. 8 Biconical load-support system

Fig. 9 Structure of biconical load-support system

3・1 超音波探傷方法 軸対称構造をした荷重支持体のFRP部を超音波探傷するために図10に示すような専用のスキャン装置を作製した。試験片は、水タンクの中に置かれたターンテーブル上に載せられる。

超音波プローブが取り付けられたロッドはステップモータで上下に往復運動を繰り返し、ターンテーブルはワイヤを介してステップモータで 1° ずつ回転される。得られた超音波探傷結果はソフトウェア上で鼓形状の展開図の形で出力される。本試験では超音波のFRPへの浸透性、得られる画像情報の細かさから周波数5MHz, 焦点距離37.5mmのトランスデューサを使用した。

Fig. 10 Setup for ultrasonic scanning

荷重支持体のコーン状FRPと金属製円板との締結部の構造を図11に示す。FRPコーンは、ステンレス製円板に埋め込まれている。また、エポキシ接着剤がFRPとステンレス製円板の間に封入されている。締結部に荷重や、温度変化が加わることで、界面での超音波の反射率が変化する。図11に示すような探傷方向にてFRPコーンとステンレス製円板との間の接着部の観察を行った。探傷子には周波数15MHzのトランスデューサを使用した。

Fig. 11 Scanning method for adhesive joint

3・2 透過光測定法 図12にFRP透過光を測定するための基本的な機器の構成を示す。荷重支持体はターンテーブル上に載せられ、光源となる蛍光灯あるいは白熱灯は試験片の外部からFRPを照らす。FRP透過光はCCDカメラでとらえられ画像処理ソフトを持つパーソナルコンピュータで、明度、損傷の形状を分析した。光源は20Wの蛍光管を使用し、鼓形状をしたFRP部の外側に置いた。

Fig. 12 Setup for transmitted light technique

3・3 試験方法 荷重支持体が繰り返し荷重を受けていく過程での、FRP中の損傷の発生、成長をとらえる目的で、図13に示すような負荷試験を行った。試験は室温大気中で行った。そして試験中、3回負荷を中断し、超音波探傷およびFRP透過光イメージを測定した。試験中の荷重支持体の剛性は荷重と試験治具の変位量から算出した。剛性変化と繰返し数の関係を図14に示す。剛性が6.8%低下した後、再度負荷を試みたが荷重レベルが上がらなかったため試験を終了した。

Fig. 13 Fatigue test of load-support system

Fig. 14 Stiffness change of load-support system

3・4 試験結果 図15(a)に試験開始前のFRPコーン締結部の超音波探傷結果を示す。色が濃くなるほど反射波の強度が大きいことを示している。全体的に反射波の強度に周方向のばらつきが無い。図15(b)には剛性が1.0%低下した時点での結果を示す。FRP

コーンが引張りを受けていた側の反射波強度が増している。これは、接着部の面圧が疲労試験中に、低下したためと考えられる。

Fig. 15 Adhesive area scan (ambient temp. side)

図 1 6 には F R P コーン部の超音波探傷結果を示す。超音波探傷は鼓状をした F R P 部のくびれ部を境にして内槽側、外槽側のコーンに分けて探傷した。

透過光は欠陥の位置が把握しやすいように、コーンを周方向に 4 分割して撮像した。4 分割した領域には便宜上時計の盤面に見立て、12 時、3 時、6 時、および 9 時方向とした。荷重方向と分割された領域の関係を図 1 7 に示す。また図 1 8 には主に変化の生じた 9 時方向の領域の F R P 透過光のイメージを示す。

図 1 6 の超音波探傷結果では剛性が 6.8%低下した時点で熱遮蔽用円板と F R P の境界部付近に層間剥離に起因するとみられる黒い部分が生じているが剛性が 3.6%低下した時点では変化が見られない。

図 1 8 の F R P 透過光イメージでは剛性低下が 3.6%のものでも、熱遮蔽用円板と F R P の境界部に変化が起こっているのが観察された。この理由として、超音波探傷法ではスキャン範囲が F R P コーンの平滑部に限られていたため、実際に損傷が発生した熱遮蔽用円板付近の F R P 湾曲部の情報をとらえることができなかったためと考えられる。

Fig. 17 Scanned area of the bicone

Fig. 16 C-scan result of alumina/epoxy bicone

Fig. 18 CCD images of transmitted light through alumina/epoxy bicone

4. 結 言

Fig. 19 Delamination between plies in alumina/epoxy

図18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。超音波探傷では5MHz程度の周波数ではこの微細な樹脂割れは捉えることができない。周波数を上げることでより微細な割れを観察することは可能であるが、超音波の板厚方向への浸透性の点で限界がある。

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。図19に結果を示す。繊維の配向が異なっている層間で50μm程度の割れが生じていることが分かった。

FRPコーン部の超音波探傷結果および透過光観察結果で、剛性が1.0%低下した時点では変化が無い。疲労試験初期の1.0%の剛性低下は図15に示されるFRPコーン部とステンレス製円板の締結部の損傷に起因すると考えられる。

磁気浮上列車用超電導磁石の荷重支持体のヘルスマニタリングを行うための非破壊検査技術の開発を行った。そして、以下の結論を得た。

- (1) アルミナFRPの透過光量変化を利用した新たな検査法を考案した。そして、室温大気中で平板試験片の疲労試験を行い、剛性の低下とともにFRP樹脂の微少な割れを起点に、繊維の層間剥離が発生することが分かった。これらの欠陥の成長により透過光量は敏感に変化し、影の形でとらえられることを確認した。
- (2) アルミナFRP製荷重支持体の疲労試験を大気中にて行い、剛性の低下と透過光イメージとして捉えたFRPの微少な樹脂割れ、層間剥離損傷との良い相関を得た。
- (3) 透過光を利用した探傷方法は湾曲部にも適用でき、また電磁ノイズの影響を受けにくいため、今後の荷重支持体のヘルスマニタリングに適用可能と考えられる。
- (4) 超音波探傷法を上記(1)から(3)の層間剥離損傷に適用し、透過光による評価と良く一致することを確認すると同時に、接着界面の剥離評価にも有効であることを確認した。

文 献

- 1) 青山・ほか9名, 機論, 62-598, (1997), 221-228.
- 2) 山本・ほか2名, 第25回FRPシンポジウム講演論文集, (1997), 225-226.
- 3) David A. Benaron, Laser Focus World, (1994), 79-.
- 4) Camponeschi, E. T. and Stinchcomb, W. W., ASTM STP 787, (1982), 225-246.