解 説

超電導磁気浮上列車用 FRP 製荷重支持体の開発

青 山 博^{*1}, 渡邊 洋之^{*2}, 寺井 元昭^{*3}

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¹⁾。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 4.2 K に冷却されて使用される。このコイルを大気温度 (300 K) 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ほかに, 液体ヘリウムの消費量を抑えるために高い断熱特性 (高熱抵抗) が要求される²⁻⁸⁾。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⁹⁾。本研究は, 磁気浮上列車に搭載される超電導磁石内で使用される荷重支持体を主対象として行ったものである。そして, 従来の円筒型から, コーン形状を基本とした FRP 製荷重支持体数種を開発し, その剛性, 強度と熱侵入量の関係を考察した¹⁰⁾。

稼働中の超電導磁石内の荷重支持体のメンテナンスを考えた時, 超電導磁石は高真空容器内に納められているため, 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初期欠陥, 損傷検出のほか, 磁石稼働中の荷重支持体の劣化, 損傷をオンラインでモニタリングする必要がある。そこで, 超音波探傷法および FRP 透過光を利用した荷重支持体のヘルスマニタリング法についての検討も紹介する。

2. 各種荷重支持体の剛性, 熱抵抗の比較

超電導磁石の荷重支持体に要求される剛性と熱抵抗を, 種々の構造に対して定量的に比較する。これらの性

能は, 構造と構成材料の材料定数 (縦弾性率 E , 熱伝導率 λ) によって決まるが, ここでは, 構造の違いのみに注目した性能比較を行う。比較パラメータとしては, 剛性と熱抵抗とをかけた比剛性を用いる。

2.1 ロッド型

図 1 に示す諸元で剛性, 熱抵抗を計算する。以下, 構成材料の縦弾性率を E , 熱伝導率を λ で示す。剛性を K , 熱抵抗を R で表すと

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{AE}{L} \quad (1)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{A\lambda} \quad (2)$$

ただし, P : 軸力, δ : 変形量, A : 断面積, L : ロッド長, ΔT : 温度差, Q : 熱量, とする。

この両性能を次式で示す一つのパラメータ比剛性 $S \cdot S$ (Specific Stiffness) で表す。これは, 単位熱侵入量当たりの剛性を表し, これが大きいほど, 支持体に適切であることを示す。

$$S \cdot S = K \times R \quad (3)$$

ロッド型の場合, 軸方向剛性のみ考慮すると,

$$S \cdot S_{Ax} = \frac{E}{\lambda} \quad (4)$$

となる。実機では全方向にまんべんなく剛性が必要となり, 一般には X, Y, Z 方向に組み合わせた支持構造となり,

$$S \cdot S = 0.33 \cdot \frac{E}{\lambda} \quad (5)$$

となる。

2.2 多重円筒型

多重円筒型は従来より超電導磁石の断熱支持体として使われてきたもので, 図 2 に示すように, 円筒が 6 層に重ねられている。そして, その中心軸が大気温度の磁石外槽に, 最外周円筒部が液体ヘリウム温度のコイル内槽に固定される。

^{*1} Hiroshi AOYAMA: ㈱日立製作所機械研究所研究員 (300-0013 茨城県土浦市神立町 502 番地)

^{*2} Hiroyuki WATANABE: ㈱日立製作所原子力事業部技師 (317-0073 茨城県日立市幸町 3-1-1)

^{*3} Motoaki TERA: 東海旅客鉄道㈱主幹 (103-8288 東京都中央区八重洲 1-6-6)

図1 ロッド型

図2 多重円筒型

2.2.1 軸方向

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{8\pi t E}{L} \cdot \frac{1}{\sum \frac{1}{r_i}} \quad (6)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{8\pi t \lambda} \sum \frac{1}{r_i} \quad (7)$$

ただし, t : 一つの円筒の板厚. これらより

$$S \cdot S_{AX} = \frac{E}{\lambda} \quad (8)$$

となる. 当然ながら軸方向の比剛性は, ロッド型の軸方向の剛性に等しくなる.

2.2.2 軸直角方向

曲げによるたわみを δ_b , せん断によるものを δ_s とすると,

図3 コーン型

$$K = \frac{P}{\delta_b + \delta_s} = \frac{P}{\sum \frac{PL^3}{48EI_i} + \sum \frac{PL}{4A_iG}} \quad (9)$$

ただし, I_i : 各円筒の断面2次モーメント, A_i : 各円筒の断面積, G : 横弾性係数とする. 上式に, 実際に使用されている支持体の諸寸法を代入すると

$$S \cdot S = 0.277 \cdot \frac{E}{\lambda} \quad (10)$$

となり, 多重円筒型の場合, 軸直角方向の剛性が軸方向の剛性の約1/4になることが分かる. この軸方向と軸直角方向剛性のアンバランスが, しばしば超電導コイル制御上問題となる.

2.3 コーン型

コーン形状を図3に示すものの軸方向につき計算する.

軸方向の剛性については, 皿バネの式を参考にし,

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{E}{(1-\nu^2)Ma^2} \left\{ (h-\delta) \left(h - \frac{\delta}{2} \right) t + t^3 \right\} \\ = \frac{Et}{(1-\nu^2)M} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \quad (11)$$

と考える. ただし, a : 外半径, b : 内半径, h : コーン高さ, t : コーン板厚, ν : ポアソン比, M は, a と b より決まる係数であり, $\theta = 45^\circ$ の時 $M = 0.79$ である¹¹⁾.

熱抵抗は円板の熱伝導の計算式をもとに, 熱伝導経路が $1/\cos \theta$ 長くなるものと近似して計算した.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\log\left(\frac{a}{b}\right)}{2\pi t \lambda} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \quad (12)$$

これらの式に, 図3の諸寸法を代入すると

$$S \cdot S = 0.45 \cdot \frac{E}{\lambda} \quad (13)$$

となり, 多重円筒型に比べ小型のものでも, 剛性を向上できることが分かった.

3. コーン角度の検討

前節でコーン型の有効性が予測されたため, FEM 解析によってコーン角度の最適化の検討を行った. 図4

図 4 計算モデル

図 5 コーン角度と比剛性の関係

表 1 FRP の剛性および強度の実測結果

FRP 種類	GFRP	CFRP	アルミナ FRP
ヤング率 E (GPa)	15	40	34
圧縮強度 σ_c (MPa)	180	350	400

に、計算モデルを示す。解析条件は $E = 40$ GPa, $\nu = 0.3$, $\lambda = 3.25$ W/mK で行った。図 5 に前節で定義した比剛性 $S \cdot S$ とコーン角度の関係を示す。荷重支持体としては、あらゆる方向に剛性のバランスがとれていることが望ましいため、コーン角度 45° 程度が最適形状とみなせる。

4. 荷重支持体の試作と強度、熱侵入測定

4.1 各種 FRP の機械的および熱的特性

材質の選定に当たっては、CFRP, GFRP およびアルミナ FRP (Al_2O_3 FRP)¹²⁾ を候補とした。表 1 に各 FRP の剛性および強度の実測結果を示す。各 FRP は繊維の

図 6 FRP 材の熱伝導率

図 7 コーン型荷重支持体の内部構造

配向が $(0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ)$ の擬似等方材を用い、試験は室温大気中で行った。

図 6 に同じく、各 FRP 材の熱伝導率を試験温度との関係で示す。室温付近 (300 K) では、GFRP が最も低い熱伝導率を示す。また、液体ヘリウム温度付近 (4 K) では、CFRP が低い値を持つ。アルミナ FRP は全温度域で比較的低い熱伝導率を有している¹³⁾。

これらの結果より荷重支持体として高い断熱特性を持ち、あらゆる方向に等価な剛性、強度を持たせるためには擬似等方性アルミナ FRP が有利であることが分かる。

図 8 コーン型荷重支持体の外観

図 10 荷重支持体に加わる車体重量負荷

図 9 超電導磁石の構造模式図

4.2 コーン型荷重支持体

以上の予備検討をふまえて、支持体の試作を行った。荷重支持体は限られた搭載スペースで最大の熱抵抗を確保するために、2つのコーンを対向させる形をとった。この支持体の内部構造を図7に示す。また、その外観を図8に示す。図9にコーン型支持体を搭載した超電導磁石の構造模式図を示す。浮上力、推進案内力、コイルの自己電磁力、熱収縮力などの主荷重を2個のコーン型荷重支持体で受け持つ。そして、レーストラック状をしたコイルの面内上下方向、また面外方向の振動をロッド型支持体で抑制する方式を採用している。コーン型荷重支持体は鼓状に成型されたFRPでできており、そのくびれ部に熱シールド板が取り付けられる。そして、コーンの一端が内槽へ、もう一端が外槽側へ、それぞれ締結される。内槽側から外槽側までを一体成型のFRPで製作してあ

表 2 コーン型荷重支持体の剛性、強度および熱侵入量の測定結果

剛性 K (kN/mm)	軸方向	235
	軸直角方向	67
強度 S (kN)	軸方向	100 以上
	軸直角方向	116
熱侵入量 H (W)		0.28

るため、FRPと金属の締結部が2箇所となり、しかも、締結部の径が大きいため接着面積が大きくとれることになり接着強度上の信頼性も上がる。さらに、図10に示すように鼓形状は、支持体に加わる車体重量負荷に対して、応力分布が一樣になる形状を有しており、強度的にも有利である。

本荷重支持体は、擬似等方性アルミナFRPで製作した。成型は鼓形状の内金型に一方アルミナ繊維を含むプリプレグシートを、その繊維配向を変えながら重ね、外金型で加圧することで行った。軸直角方向の荷重に対し、FRP内部の応力が均一になるように板厚が場所によって変えてある。この板厚はFEM計算によってFRPの応力分布を変化させながら決めた。

表2に本支持体の剛性、強度および熱侵入量の測定結果を示す。

5. 荷重支持体の疲労試験

5.1 実環境槽の製作

荷重支持体はFRPと金属の締結部を有しており、極

図 11 環境槽内部の構造

低温環境下での締結部の強度も荷重支持体の信頼性を左右する重要なデータである。従って、荷重支持体の信頼性を定量的に把握するためには、疲労試験を実際の環境を模擬した状態で行う必要がある。このため、冷凍機を用いた環境槽を設計、製作した。環境槽外槽内部の構造を図 11 に示す。外観はステンレス製の箱型溶接構造をしており、内部は真空中に保たれる。内部には FRP 製コーン型支持体 4 つによって支えられた低温側治具が中央に位置している。低温側治具はステンレス (SUS304) の箱型溶接構造をしている。この箱型の低温側治具が実際の超電導磁石のコイル内槽 (液体ヘリウム温度) を模擬している。この低温側治具はヘリウム冷凍機 3 台によって 10 K 程度にまで冷却される。試験片は低温側治具の端部にボルトによって固定される。この試験片に荷重を負荷するために常温側治具を取り付ける。常温側治具上部を油圧アクチュエータにつながった負荷ロッドによって上下に引圧負荷する。これによって、試験片には軸直角方向の荷重が負荷される。試験中、試験片の剛性は負荷荷重を、負荷ロッドの変位と低温側治具の変位の差で除した値から求めている。FRP 各部のひずみ、荷重振幅、負

図 12 荷重種類

図 13 荷重負荷イメージ

荷ロッド変位、および低温側治具変位信号は A/D 変換機を通して、パソコンに取り込んでいる。

5.2 荷重条件

荷重支持体に作用する荷重を冷却時、励磁時、走行時に分けて整理する。

5.2.1 冷却時

内槽冷却時にコーン型荷重支持体取付部は内槽支持ビームの熱収縮によってコイルの中心に向かって強制変形する (図 12 (a))。

5.2.2 励磁時

励磁されると、自己電磁力によってコイルの上下方向および、隣接コイルよりコーン型支持体は負荷を受ける (図 12 (b))。

5.2.3 走行時 (浮上力、推進案内力)

通常走行時、コーン型支持体には、列車の進行方向に推進案内力を、上下方向に車体重量が働く (図 12 (c))。

5.2.4 荷重の負荷回数

実機における、コーン型荷重支持体の荷重負荷イメージを図 13 に示す。本図より、繰り返し荷重パターンとしては、

- (1) 製作時 ↔ 冷却後
- (2) 冷却後 ↔ 励磁後
- (3) 励磁後 ↔ 浮上
- (4) 浮上走行中の振動

の 4 種類に分類される。(1) から (4) の荷重方向の違いを考慮し、試験は各荷重条件のもとで試験片の向きを変

表 3 荷重条件

試験項目	荷重方向	荷重 P (kN)	繰返し数 N (回)
1 冷却時	$Z(0^\circ)$	0 $\sim$ -19	120
2 励磁時	$Z(0^\circ)$	4 $\sim$ 14	1.7×10^5
3 浮上時	$X(90^\circ)$	0 $\sim$ 21	3,650
4 走行時	$X(90^\circ)$	29 $\sim$ 37	1.2×10^7

えて行った。表 3 に荷重条件をまとめて示す。各荷重条件での荷重振幅および繰返し数には安全率が見込んである。

5.3 試験結果

試験はコーン型支持体を環境槽内に取り付け、5.2 節に述べた荷重条件で行った。図 14 に表 3 の各条件で試験中の支持体の剛性と繰返し数の関係を示す。各荷重条件で、剛性の低下は見られなかった。

6. 荷重支持体のヘルスモニタリング

FRP 製荷重支持体の製作時または稼働中の性能低下

を監視する方法として、超音波探傷法および FRP 透過光を用いた新たな損傷モニタリング法について検討する¹⁴⁾。

6.1 超音波探傷法

コーン型荷重支持体の重要な性能の一つに剛性がある。剛性に影響を及ぼす損傷としては、支持体を構成する FRP 自身の損傷、FRP と固定金具との嵌合部の損傷が考えられる。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 15 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 5 MHz、焦点距離 37.5 mm のトランスデューサを使用した。

図 14 支持体の剛性と繰返し数の関係

図 15 超音波探傷スキャン装置

図 16 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

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 16 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により接着剤とステンレス製円板との間の面圧が変化すると、界面での超音波の反射率が変化する。図 16 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 15 MHz のトランスデューサーを使用した。

6.2 透過光測定法

支持体を構成している FRP は板厚が 2~3 mm 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 内部に層間剝離、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。図 17 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 カメラで捉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 20 W の蛍光管を使用し、鼓形状をした FRP 部の外側に置いた。

図 17 FRP 透過光を測定するための基本的な機器の構成

図 18 剛性変化と繰返し数の関係

6.3 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、成長を捉える目的で負荷試験を行った。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 18 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。

6.4 試験結果

図 19 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。色が濃い部分は、反射波の強度が大きいうことを示している。全体的に反射波の強度に周方向のばらつきが無い。図 19 (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。

図 20 には FRP コーン部の超音波探傷結果を示す。超音波探傷は鼓形状をした FRP 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。

(a) Before test

(b) Stiffness: -1.0%

図 19 FRP コーン締結部の超音波探傷結果

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。図21には主にせん断変形を主に受けたコーン側面のFRP透過光のイメージを示す。図20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FRP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20のFRP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FRP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FRP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FRP湾曲部の情報を捉えることができなかったためと考えられる。

図21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

図 20 FRP コーン部の超音波探傷結果

図 21 コーン側面FRP透過光のイメージ

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。繊維の配向が異なっている層間で50 μm 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。従って、疲労試験初期の1.0%の剛性低下は図19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。

7. 結 言

超電導磁気浮上列車用磁石を対象としたFRP製荷重支持体の開発を行い、以下の結論を得た。

(1) 2つのアルミナ繊維強化エポキシ製コーンを対向

させた支持体構造の採用により、低熱侵入、高剛性、高強度を達成した。

(2) 実環境下で長期にわたり疲労試験できる実環境槽を製作し、この試験槽を用いて実走行時の荷重条件に基づくコーン型荷重支持体の疲労試験を行った。その結果剛性等に異常の無いことを確認した。

(3) 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、アルミナ FRP 製荷重支持体の疲労試験を大気中に行い、剛性の低下と透過光イメージとして捉えた FRP の微小な樹脂割れ、層間剝離損傷との良い相関を得た。

(4) 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。

(5) 超音波探傷法を支持体の層間剝離損傷に適用し、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、接着界面の剝離評価にも有効であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 森田洋昭：溶接学会誌，**64**，3 (1995)，32-37.
- 2) 中島 洋，ほか6名：日本金属学会会報，**31**，3 (1992)，211-219.
- 3) 鈴木栄司，ほか8名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 67.
- 4) 山地陸彦，ほか7名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 68.
- 5) 寺井元昭，ほか5名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 69.
- 6) 寺井元昭，ほか5名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 70.
- 7) 寺井元昭，ほか6名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 71.
- 8) 鈴木栄司，ほか6名：第49回春期低温工学・超電導学会講演概要集 (1993)，p. 76.
- 9) 竹野正志，ほか4名：低温工学，**21**，3 (1986)，182-187.
- 10) 青山 博，ほか9名：機論，**62**，598 (1997)，221-228.
- 11) R.J. Roark & W.C. Young： *Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill, New York (1976)，p. 383.
- 12) 安部康明，ほか2名：複合材料学会誌，**6**，3 (1980)，89-97.
- 13) D.L. Rule & L.L. Sparks： NISTIR, 89-3914, Natl. Inst. of Stand. and Tech. (1989)
- 14) 青山 博，ほか2名：機論，**64**，628 (1998)，43-48.