

FRPブッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの応力評価

浮上式鉄道技術研究部 電磁路技術
主任研究員 松江 仁

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用の地上コイルは全線にわたって敷設され、その数は莫大なものとなるだけでなく、長期間にわたり屋外で使用される。そのため、地上コイルには高い信頼性や耐久性が求められる¹⁾²⁾。

地上コイルをガイドウェイへ取り付けるための締結部の信頼性を向上させることを目的として開発を進めているFRP製の締結部(以下、積層型FRPブッシュ)を紹介するとともに、積層型FRPブッシュを適用した推進浮上案内兼用コイル(combined Propulsion, Levitation and Guidance coil、以下PLGコイル)³⁾を試作し、実使用を想定した定置試験で応力測定した結果を報告する。

2. 地上コイル締結部の信頼性改善⁴⁾

2.1 地上コイルの締結方法

地上コイルをガイドウェイに取り付ける方法としては、コイルに締結穴を設け直接ボルトで締結する方法やFRPなどの締結部材を介してコイルを間接的に取り付ける方法などが検討されてきた。これらの開発経緯から、コイルの着脱が容易であり構成が簡単なボルト締結方式を前提としてPLGコイルの開発を進めている。

2.2 ボルト締結方式の課題

PLGコイルは導体巻線を樹脂で注型することにより製作される。地上コイルの樹脂部に締結ボルトによる圧縮力を与えると、樹脂の圧縮クリープにより締結ボルトの軸力が変化する。また、樹脂と締結ボルトの線膨張係数の違いによっても締結ボルトの軸力が変化する。軸力抜けによる締結ボルトの緩みは、日常の保守点検のコストを増加させるだけでなく、締結構成そのものの信頼性も損ねることになりかねない。そこで、当初の試作PLGコイルでは、圧縮クリープを事実上無視できる金属ブッシュをボルト締結部に埋め込む構成としていた。金属ブッシュとモールド樹脂との界面に発生する応力を緩和するために、金属ブッシュとモールド樹脂との界面を意図的に接着しないようにしていたが、これが原因で繰り返しの電磁力によりその界面が摩耗することがわかった。

2.3 積層型FRPブッシュの概要

上記のような背景から、金属ブッシュの代わりとなる積層型FRPブッシュの適用を検討している。これは、あらかじめ樹脂が含浸され半硬化状態になったプリプレグシートを金型心



図1 積層型FRPブッシュ

棒に巻きつけた後に加熱成形することにより製作した厚肉FRPパイプである。締結部に適用するために、締結部の寸法にあわせて適当な長さに裁断し、外周を機械加工している。図1に積層型FRPブッシュの外観を示す。FRPはガラス繊維の配向や含有率により強度や弾性率を調整できるので、図2のように内周側のガラス繊維を軸方向に配置して圧縮クリープを金属と同程度に低減するとともに、外周側を低弾性率化して締結部との界面近傍の応力を緩和していることを特徴としている。さらに、①車上の超電導磁石の移動磁場による渦電流損失が積層型FRPブッシュで発生しない、②機械加工が容易である、③モールド樹脂との接着性がよい、④軽量である、⑤コスト低減が可能である、などの付加的な長所もある。

図3に締結部の全箇所積層型FRPブッシュを適用したPLGコイルを示す。

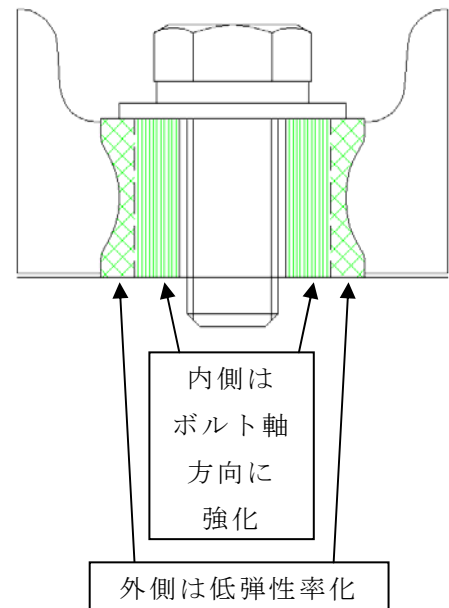


図2 積層型FRPブッシュの断面

3. PLGコイルの機械強度評価

3.1 PLGコイルの劣化要因

屋外使用が前提となる地上コイルは電気機器であり、構造部材を兼ねたモールド樹脂は電氣的機能に加え、機械的耐久性が要求される。また、高分子材料であるモールド樹脂は長期に亘る屋外環境で様々な材料劣化を生じる。注意すべき劣化要因としては、吸水、紫外線、熱などが挙げられる。従って、PLGコイルの強度評価には、これらの劣化因子による強度低下を十分に考慮しておく必要がある。

3.2 要因別応力測定

PLGコイルに働く応力のうち、電磁力により発生する応力(以下、電磁応力)、導体温度上昇により発生する応力(以下、熱応力)、締結ボルト軸力を受けて発生する応力(以下、締結応力)、PLGコイルの平面度やガイドウェイの取り付け面の面内段差(本評価では1.5mm)によりPLGコイルが変形することにより発生する応力(以下、段差応力)を、それぞれ、実使用時と等価な定置試験にて測定した。測定結果を図4に示す。各応力はそれぞれ同程度の値であり、いずれもPLGコイルの強度を評価するのに無視できない大きさとなっている。



図3 積層型FRPブッシュを適用したPLGコイル

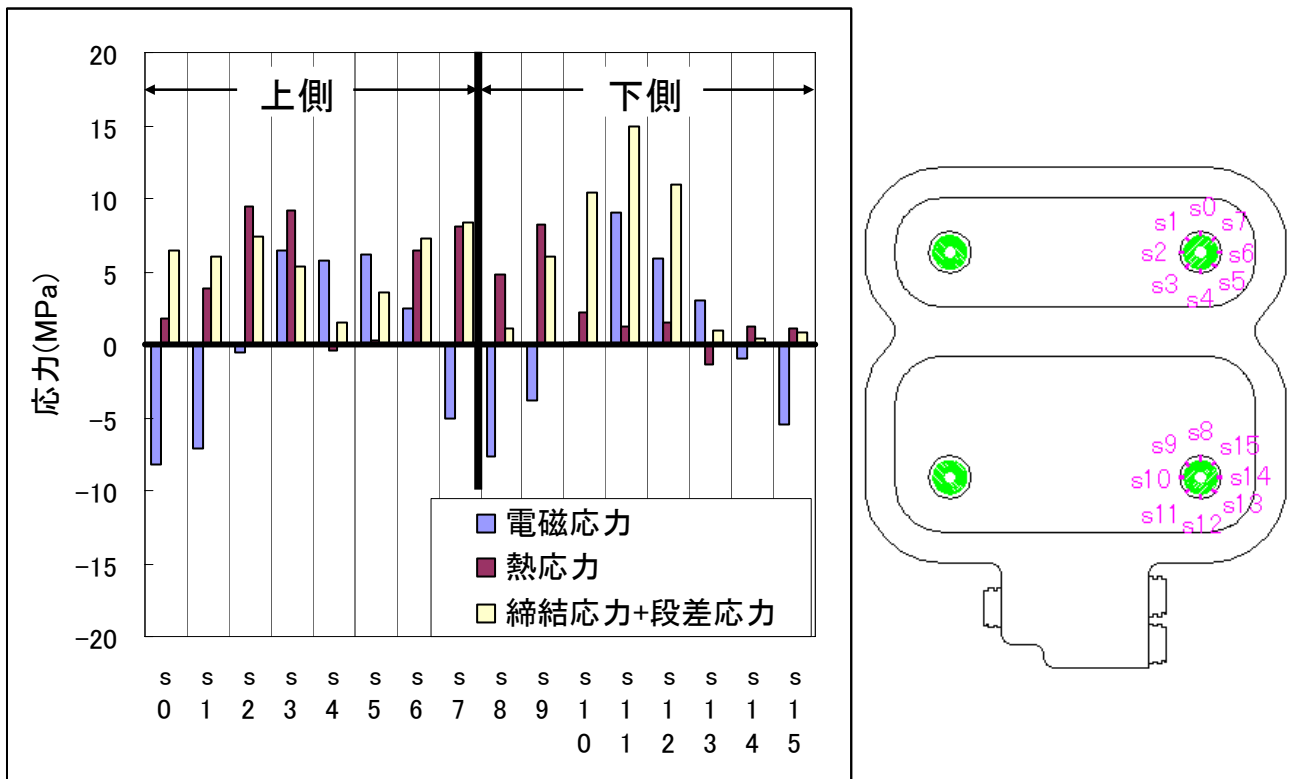


図4 応力測定結果

3.3 疲労限度線図による強度評価

PLGコイルに働く応力は、電磁応力のような周波数の高い変動応力と締結応力などのような長時間にわたり一定な応力との複合応力である。疲労限度線図によりモールド樹脂の強度を評価するためには、PLGコイルに発生する応力を平均応力と応力振幅に分ける必要がある。電磁応力は片振りの変動応力であり、電磁応力の半分の値が応力振幅となり、残りの半分が平均応力となると考えた。熱応力は繰り返し数が電磁応力より充分少ないため、静的な応力とみなした。残留応力はすべての測定箇所ですべての静的な応力であるとした。以上の考え方に基づいて、平均応力と応力振幅をそれぞれ(1)式及び(2)式により計算した。

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{2}\sigma_e + \sigma_t + \sigma_f + \sigma_r \quad (1)$$

$$\sigma_{amp} = \frac{1}{2}|\sigma_e| \quad (2)$$

σ_{ave} : 平均応力、 σ_{amp} : 応力振幅、 σ_e : 電磁応力、 σ_t : 熱応力

σ_f : 締結応力+段差応力、 σ_r : 残留応力

10⁷回までの疲労試験結果から外挿した繰り返し回数10⁸回におけるPLGコイル用モールド樹脂の疲労限度線図を図5に示す。なお、図5の疲労限度線は環境劣化による強度低下も考慮している。

PLGコイルの代表点に発生する応力は、モールド樹脂の疲労限度線を下回る結果となった。

4. まとめ

ボルト締結部の信頼性向上策として開発を進めている積層型FRPブッシュをPLGコイルに適用し、締結応力、段差応力、電磁応力、熱応力を定置試験で測定した。

各種応力を足し合わせた結果はモールド樹脂の疲労限度線を下回る結果となった。本試験は国庫補助金を受けて実施した。

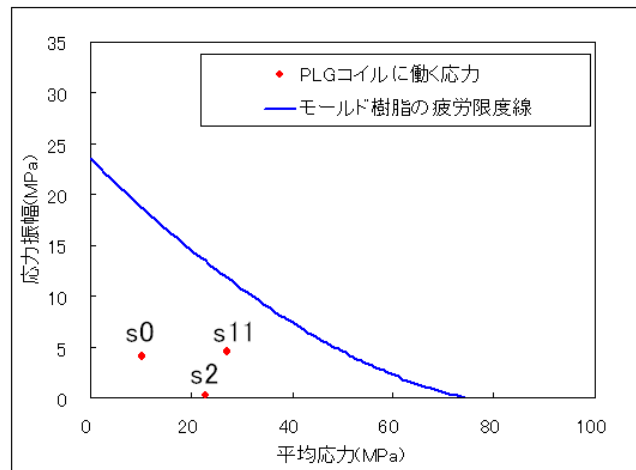


図5 モールド樹脂の推定疲労限度線図

参考文献

- 1) 饗庭雅之, 鈴木正夫: 推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 6, pp. 19-24, 2005
- 2) 鈴木裕之, 鈴木正夫, 相原直樹: 地上コイル用モールド樹脂の耐久性評価試験, 鉄道総研報告, Vol. 21, No. 9, pp. 17-22, 2007
- 3) 村井敏昭他: 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電気学会論文誌, Vol. 114-D, No. 7/8, pp. 746~747, 1994. 7/8
- 4) 鈴木正夫他: 地上コイル耐振性締結部の開発, 第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp. 265-266, 2006
- 5) 田中実他: 地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 8, pp. 17-22, 2006