

コアシェル粒子添加による 推進系地上コイル用モールド樹脂の特性改善

池田 遼平* 鈴木 正夫**

Property Improvement of the Mold Resin for Propulsion Coils of
Magnetically Levitated Transportation System by Adding Core-Shell Grain

Ryohei IKEDA Masao SUZUKI

For the magnetically levitated transportation system, a huge number of ground coils will be required for outdoor use over an extended period. Therefore, securing stable performance is an important issue in addition to cost reduction in development of ground coils. The durability verification of various properties including those of the materials and the finished products under actual service conditions is essential in securing the total reliability of the magnetically levitated transportation system. We therefore examined property improvement of the mold resin for propulsion coils by adding core-shell grain.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，モールド材料，コアシェル粒子，韌性向上

1. はじめに

地上コイルは、リニアモータを構成する要素の一つであり、超電導磁気浮上式鉄道（以下、超電導リニア）の固有の機器である。超電導リニアにおいて、軌道の全線にわたって敷設される地上コイルは、磁界を発生させる機能を持ち、車両の台車に搭載される超電導磁石の相互作用により、車両に浮上力・推進力・案内力を発生させる重要機器である。地上コイルは、長期間の屋外使用が前提となるばかりでなく、膨大な数が必要となる。営業線では、設置される数は100万個以上となる。従って地上コイルの開発においては、低コスト化に加え、高い信頼性と長期間の耐久性が要求されており、これらの命題を如何にして両立させるかが、超電導リニアシステムにとって重要なポイントとなっている。これまで鉄道総研では、材料レベルから実機に至るまで、将来の営業線運用を想定した種々の耐久性試験により、これらの信頼性の検証を行ってきた^{1) 2)}。

著者らは、推進系地上コイル用モールド樹脂を対象に、新たな機能付加や特性改善を狙いとしたモールドエポキシ樹脂の評価用供試体を製作し、各種評価を行った。本報告では、まず、地上コイルに要求される機能、モールド材料の特性改善について述べる。その後、各種試験結果について報告する。

2. 地上コイルに要求される機能³⁾

2.1 地上コイルの構造

地上コイルは、基本的に鉄心のない空芯コイルであるため、車上の超電導磁石との間に繰り返し働く電磁力を負担するために、アルミの巻線コイルを樹脂で一体成形し剛性を高めている。地上コイルの構造を図1に示す。地上コイルの一体成形には、コイルの機械的強化に加え、電気絶縁機能を付加する目的があり、地上コイルの製造において最も重要な工程となっている。従って、モールド材料やその製法の選択と管理が地上コイルの性能や信頼性を左右するだけでなく、本システムの建設コストにも多大な影響を与える。

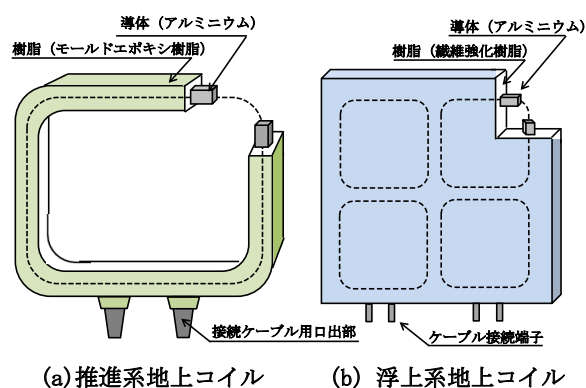


図1 地上コイルの構造⁴⁾

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部 山梨実験センター

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

地上コイルの種類は、外部からの電力供給が前提となる推進系地上コイル、電力供給のない浮上系地上コイル、1つの地上コイルで推進、浮上、案内の3機能を兼用する多機能兼用型地上コイル⁵⁾に分類できる。地上コイルは、それぞれの要求機能の違いによりモールド材料や製法を適切に選択している。例えば、推進系地上コイルは、高電圧環境で使用されるため絶縁強度に優れたモールドエポキシ樹脂が適用されている。浮上系地上コイルは、機械強度や耐久性が要求されるためガラス繊維強化樹脂等が適用されている。多機能型地上コイルは、絶縁強度と機械強度の両方が要求されるためモールドエポキシ樹脂に構造上の強化⁶⁾を盛り込んでいる。本報告では、推進系地上コイルに適用されているモールドエポキシ樹脂の特性改善について検討した。

2.2 地上コイル用モールド樹脂

地上コイル用モールド樹脂は、用途に応じた絶縁機能、空芯コイルとしての機械強度、長期屋外使用に対する耐候性、巻線導体との相性、耐熱性、製造コスト等を総合的に検討した上で選択する必要がある。推進系地上コイルは、優れた電気絶縁特性、機械的特性、寸法安定性、ボイドレス成形等の理由から、モールドエポキシ樹脂が適用されている。モールドとは、鋳型または鋳造されたものを意味し、金型内に各種電気機器の導線や金具をセットして、その中に液状樹脂を注入し、そのままの状態硬化させて製品とする方法または製品を指す技術用語である。

モールドエポキシ樹脂の配合材料は、エポキシ樹脂のほか、硬化剤、充填材、着色剤、反応促進剤などにより構成される。主剤であるエポキシ樹脂は、分子内に2個以上のエポキシ基を持つ樹脂の総称である。エポキシ樹脂には、エピ・ビス系エポキシ等が使用されている。副主剤の硬化剤は、エポキシ基と反応して結合し、全体を固体の硬化物に変化させる。従って、エポキシ樹脂と硬化剤の組合せが地上コイルの基本的性格を決定する。充填材は、各種特性の向上や材料費の低減を目的として重量比で約6割以上の充填材が添加される。充填材には、無機フィラーのシリカ（石英）等が使用されている。

2.3 推進系地上コイルに要求される機能

推進系地上コイル用モールド樹脂の更なる信頼性の向上に要求される機能を以下に整理した。

(1) 耐熱性

地上コイルは、使用最高温度をガラス転移点より低く設定しているが、電磁力特性やコスト面から熱的な限界設計が求められる。地上コイルに熱応力を発生させる要因には、通電発熱による導体温度の上昇や、環境温度の変化などがある。充填材の添加により、埋込金具や内部

導体との線膨張係数の差を小さくすることで、温度変化に伴う熱応力の低減や、内部導体の温度上昇に伴う熱伝導性を向上させることが出来る。

(2) 靱性

充填材の添加は、モールドエポキシ樹脂に数々の改良をもたらす。しかしながら、充填材を大量に添加すると、モールド樹脂の靱性低下を考慮する必要がある。ガイドウェイへの敷設ではボルト締結が一般的であり、運用時の各種応力が地上コイルのボルト締結部位に集中し易い。また、地上コイルには、車両通過時の衝撃荷重や熱的衝撃への信頼性が求められる。

(3) 耐環境性

長期間の屋外使用が前提となる地上コイルでは、使用環境に応じた耐候性の確保が重要である。推進系地上コイルでは、コイルの表面に電界緩和を目的とした接地層とこれを保護するための耐候性塗装が設けられる。表面に耐候性塗装を施すことにより、紫外線による樹脂の強度低下は抑制⁷⁾できることを確認している。また過去に実施した地上コイル用モールド樹脂の環境劣化特性試験³⁾から、2000時間の吸水やアルカリ水劣化により最大約20%程度の強度低下が認められている。従って、推進系地上コイルでは、結露やコンクリート構造物のアルカリ水による影響を踏まえ、トンネル区間での劣化対策を考慮する必要がある。

(4) リサイクル性

地上コイルは、営業線を想定した場合、その数は膨大となる。保守における定期的な交換を想定した場合、ある程度まとまった数量の廃棄地上コイルが定期的に発生することが想定される。昨今、生活環境の保全及び資源の有効利用の観点から、廃棄物等の発生抑制、循環資源のリユース・リサイクル及び適正処分の推進に社会全体で取り組むことが求められている。地上コイルについてもリサイクルを前提とした最適構成が求められている。鉄道総研では、リサイクルに適した地上コイル用モールド樹脂の検討^{8) 9)}等を行っている。

3. モールド材料の特性改善

3.1 特性改善の検討

モールド材料の特性改善に際しては、対象となる地上コイルの種類や使用環境に応じた選択が重要である。地上コイル用モールド樹脂に対し、一度に多くの機能を持たせることは技術的に困難である。仮に達成できたとしてもコスト的に問題となる可能性が高い。そのため、筆者らは、推進系地上コイルの基本性能に関わる靱性改善に主眼を置き、モールド材料の新たな機能付加方法に関する論文や開発事例等を調査して、地上コイル用途としての適用性を検討した。

モールド機器の靱性を改善する手段として、低弾性粒子を添加する方法がある。エポキシ樹脂にコアシェル構造の低弾性粒子（以下、コアシェル粒子）を添加し、樹脂内に分散させることで耐熱衝撃性が大幅に向上するという報告^{10) 11)}があり、上記の課題解決に期待される材料である。

そこで、本報告では、靱性の向上を狙いとしたモールド用エポキシ樹脂の評価用供試体を製作し、各種観点から推進系地上コイル用モールド樹脂として適用可能であるかを検討した。

3.2 コアシェル粒子

コアシェル粒子とは、中心にコア相があり、その周りをシェル相が取り囲んでいる多層構造の微粒子である。各相に用いられている材料は様々あり、数多くの種類のコアシェル粒子がある。コア相は、ゴム状ポリマーより形成され、緩衝要素として作用することで、衝撃的な応力を緩和する。シェル相は、樹脂と密着性の良いポリマーから成り、分散性を向上させている。試験に用いたコアシェル粒子は、低弾性粒子のアクリルゴムをコア相とし、エポキシ樹脂と密着性の良い材料をシェル相としている（図2参照）。

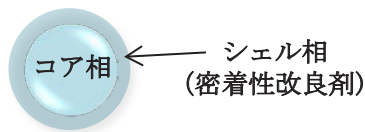


図2 コアシェル粒子の模型図

3.3 供試体の材質

試験に用いた材料は、コアシェル粒子を添加したエポキシ樹脂（以下、コアシェル添加樹脂）と、モールド機器等に使用されている汎用モールドエポキシ樹脂（以下、汎用モールド樹脂）の2種類である。表1に材料の種類を示す。コアシェル添加樹脂の充填材は、球状熔融シリカを使用している。汎用モールド樹脂の充填材は、熔融シリカを使用している。

表1 材料の種類

種類	コアシェル添加樹脂	汎用モールド樹脂
分類	エピ・ビス系	エピ・ビス系
充填材	球状熔融シリカ	熔融シリカ
添加剤	コアシェル粒子	—

4. 試験方法

靱性の改善を狙いとしたモールド用エポキシ樹脂の評価用供試体を製作し、推進系地上コイル用モールド樹脂としての適用可能性を各種観点から評価した。機械的

性の評価では、3点曲げ試験、耐衝撃強さ試験、疲労強度試験を行った。熱特性の評価では、耐熱衝撃試験を行った。絶縁特性の評価では、部分放電試験、tanδ特性試験、絶縁破壊試験を行った。リサイクル性の評価では、常圧溶解特性試験を行った。

4.1 機械的特性

4.1.1 3点曲げ試験

島津製作所製 AG-Xplus 型材料試験機を用いて、3点曲げ試験を行った。支点間距離 80mm、圧子および支点の半径 5mm、試験速度 2mm/min とした。試験環境温度は 23℃とした。試験片の形状は、JIS K 6911 に準拠した t5mm × w10mm × L100mm の短冊型とした。

4.1.2 耐衝撃強さ試験

東洋精機製作所製 DG-UB 型衝撃試験機を用いて耐衝撃強さ試験（シャルピー衝撃試験）を行った。打撃方向はエッジワイズ、試験環境温度は 23℃とした。試験片の形状は、JIS K 7111-1 に準拠した t5mm × w10mm × L80mm のエッジワイズ衝撃試験片（ノッチなし）とした。

4.1.3 疲労強度試験

東洋精機製作所製ボールドウィンタイプ曲げ疲労試験機を用いて、疲労強度試験を行った。試験条件は、加振周波数 30Hz、試験環境温度 23℃、試験打ち切り回数は、 1.0×10^7 回とした。試験片の形状は、JIS K 7119 に準拠した t4mm × w36mm (R40) × L100mm の I-20 号形とした。応力比は、R = -1（両振り）で実施した。

4.2 熱特性

4.2.1 耐熱衝撃試験

耐熱衝撃試験（液相冷熱試験法）により耐熱性を評価した。液相冷熱試験法は、鉄製のスプリングワッシャを内蔵する供試体（図3参照）に熱衝撃を与え、クラックの有無により耐熱衝撃性を評価する試験法である。

温度条件に従い、供試体を入れたかごを高温槽と低温槽に交互に 10 分間浸漬した。高温槽は 100℃とし、低温槽は -10℃単位で低温側に -75℃までとした。浸漬中の溶媒温度は、±3℃以内に保持することとした。高温槽と低温槽の移動時間は 1 分間とし、その間にクラッ

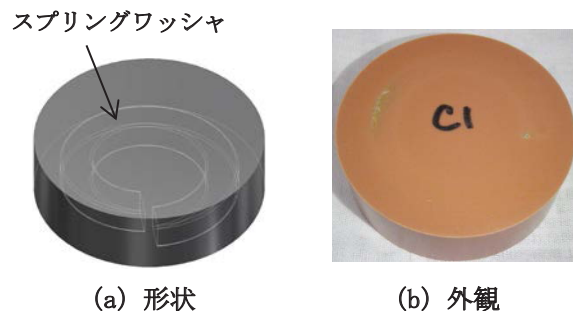


図3 耐熱衝撃試験用供試体

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

クの有無を確認した。クラックが発生した供試体については、試験を中止することとした。高温槽溶媒は水、低温槽溶媒は、エタノールとした。供試体の形状は、外径φ50mm、高さ15mm、中心にM24スプリングワッシャを埋め込んで成形した円筒状とした。試験状況を図4に示す。

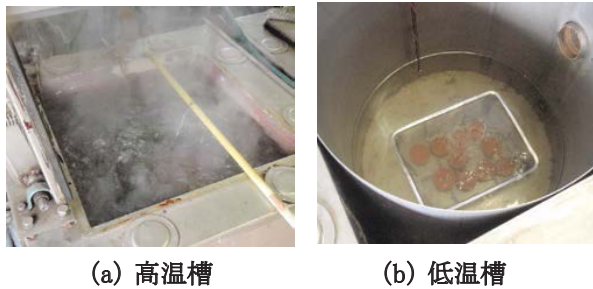


図4 耐熱衝撃試験状況

4.3 絶縁特性

絶縁特性評価用供試体を製作し、部分放電試験、tanδ特性試験、絶縁破壊試験を行った。絶縁特性評価用供試体の形状は、外径φ50mm、高さ70mmの円筒状(図5参照)とした。電極はM8のタップ(材質:A5052)とし、電極間距離(D)は、1mm、3mm、5mmとした。

4.3.1 部分放電試験

絶縁特性評価用供試体に商用周波数交流電圧を印加し、部分放電を測定した。試験環境は絶縁油中、基準放電電荷量を5pC、試験上限電圧は50kV(1分間保持)とした。

4.3.2 tanδ特性試験

部分放電測定後、絶縁特性評価用供試体に商用周波数交流電圧を印加し、tanδを測定した。試験環境は空中、試験電圧は10kVとした。

4.3.3 絶縁破壊試験

tanδ特性試験後、絶縁特性評価用供試体に雷インパルス電圧を印加し、破壊値を測定した。試験環境は絶縁油中、試験電圧は5kVステップで昇圧し、最高電圧を200kVまでとした。200kVを5回印加しても絶縁破壊しない場合は、「絶縁破壊なし」と判定した。

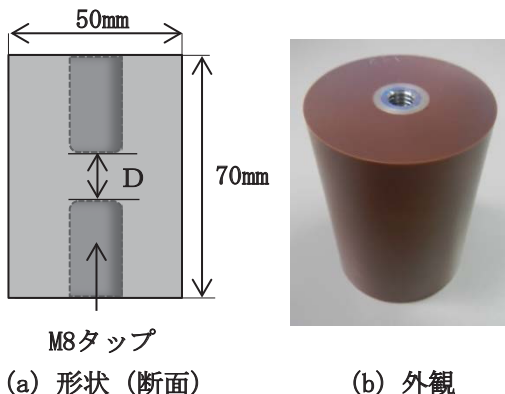


図5 絶縁特性評価用供試体

4.4 リサイクル性

4.4.1 常圧溶解試験

リサイクル性は、常圧溶解法¹²⁾により評価した。常圧溶解法は、触媒であるアルカリ金属塩をアルコール触媒に配合した処理液を用いて、樹脂硬化物を解重合して可溶化する技術である¹³⁾。なお、常圧溶解法は、明電ケミカル株式会社の実験プラントにて、各試料の溶解性を評価した。溶解には、溶媒にベンジルアルコール、触媒にリン酸三カリウムを用いた。溶解条件は、常圧、190℃とした。溶解時間は、1時間、3時間とした。試験片は、t5mm×w10mm×L50mmの短冊型とした。所定の時間溶解後、冷却し試験片を取り出した。試験片の厚みを測定し、溶解性を評価した。試験状況を図6に示す。

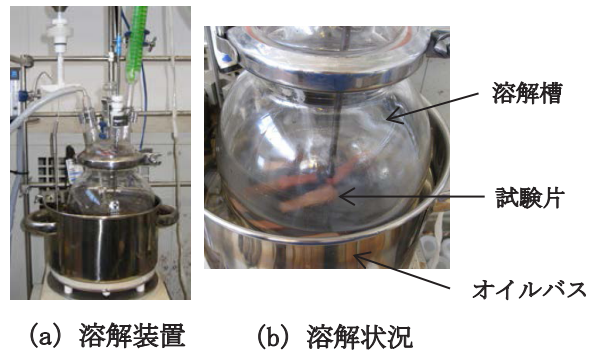


図6 常圧溶解特性試験状況

5. 試験結果

5.1 機械的特性

3点曲げ試験から曲げ特性、耐衝撃強さ試験からシャルピー衝撃値が得られた。各試料の機械的特性を表2に示す。コアシェル添加樹脂の機械的特性は、汎用モールド樹脂と比較して、静的曲げ特性に関しては、ほぼ同程度の値であった。これに対し、シャルピー衝撃値は、大幅に向上していることがわかった。疲労強度試験より得られたS-N線図より、本材料の23℃環境における10⁷レベルの疲労強度は、30MPa前後であることがわかった。

従って、コアシェル添加樹脂は、推進系地上コイル用モールド樹脂として適用した場合、従来の地上コイル用モールド樹脂と同程度の曲げ特性を有しながら耐衝撃性を向上させることが出来ると考えられる。

表2 機械的特性

試験項目	コアシェル添加樹脂	汎用モールド樹脂
曲げ強度 [MPa]	137	129
曲げ弾性率 [GPa]	10.4	10.9
シャルピー衝撃値 [kJ/m ²]	14.9	6.8

5.2 熱特性

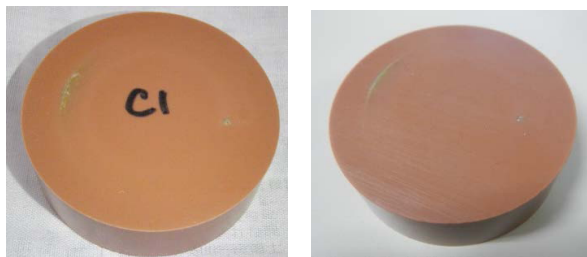
耐熱衝撃試験用供試体を各5個ずつ製作し、各試料の熱特性を評価した。液相冷熱試験法により得られた各試料の耐熱衝撃試験結果を表3に示す。染色浸透探傷法により熱負荷試験後の供試体の表面を観察した。耐熱衝撃試験前後での各試料の供試体の外観を図7に示す。

汎用モールド樹脂の供試体では、条件10までの急冷の熱負荷により全ての供試体にクラックが発生した。これらのクラックは、内蔵したスプリングワッシャに沿って生じていた。一方、コアシェル添加樹脂の供試体では、

表3 耐熱衝撃試験結果

条件	温度 [°C]	コアシェル添加樹脂	汎用モールド樹脂
0	室温	-	-
1	100 ⇒ 0	-	-
2	100 ⇒ -10	-	-
3	100 ⇒ -20	-	-
4	100 ⇒ -30	-	-
5	100 ⇒ -40	-	-
6	100 ⇒ -50	-	-
7	100 ⇒ -60	-	2個で×
8	100 ⇒ -75	-	2個で×
9	100 ⇒ -75	-	-
10	100 ⇒ -75	-	1個で×
11	100 ⇒ -75	-	-
クラック発生 [個]		0	5

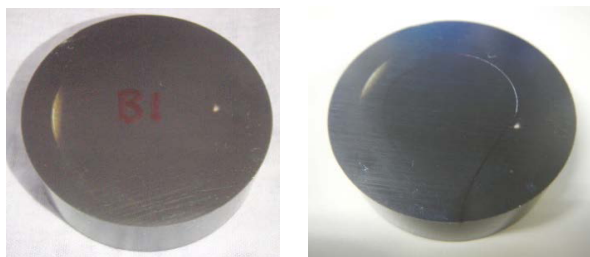
※ ×：クラック発生



試験前

試験後

(a) コアシェル添加樹脂



試験前

試験後

(b) 汎用モールド樹脂

図7 耐熱衝撃試験前後の供試体

条件11までの熱負荷を与えてもクラックが発生しなかった。コアシェル添加樹脂は、汎用モールド樹脂と比較して、耐熱衝撃性が大幅に優れていることを確認した。

液相ヒートショック試験は、クラックの有無により簡単に評価が可能であり、大型のモールド製品での耐熱衝撃試験結果と良好な相関関係を有している¹⁴⁾。従って、コアシェル添加樹脂は、推進系地上コイル用モールド樹脂として適用した場合、耐熱衝撃性を大幅に向上させることが出来ると考えられる。特に冬期の温度上昇を想定した場合に有効な手法であるといえる。

5.3 絶縁特性

絶縁特性評価用供試体を各5個ずつ製作し、商用周波数交流電圧を印加し、部分放電、tanδを測定した。また雷インパルス電圧を印加し、絶縁破壊強度を測定した。各試料の絶縁特性を表4に示す。電極間距離(D)が5mmの絶縁特性評価用供試体では、200kVを5回印加しても絶縁破壊(BD)しなかった。コアシェル添加樹脂の絶縁特性は、汎用モールド樹脂と比較して、tanδ値に増大傾向が見られるものの、部分放電、絶縁破壊強度については同等の値を有することがわかった。

表4 絶縁特性

D [mm]	試験項目	コアシェル添加樹脂	汎用モールド樹脂
1	部分放電	5pC以下 (放電なし)	5pC以下 (放電なし)
3			
5			
1	tan δ [%]	0.33	0.16
3		0.29	0.15
5		0.31	0.19
1	絶縁破壊強度 [kV]	110kVで3個がBD 120kVで2個がBD	110kVで3個がBD 120kVで2個がBD
3		195kVで1個がBD 4個BDなし	BDなし
5		BDなし	BDなし

5.4 リサイクル性

常圧溶解法により、各試料の溶解性を評価した。各試料の溶解率と溶解時間の関係を表5に示す。コアシェル添加樹脂は、常圧溶解法により溶解が可能であることが

表5 各試料の溶解率と溶解時間

溶解時間 [min]	測定項目	コアシェル添加樹脂	汎用モールド樹脂
溶解前	厚み [mm]	5.0	5.0
60	厚み [mm]	3.88	3.97
	溶解率 [%]	22.4	20.6
180	厚み [mm]	2.68	2.94
	溶解率 [%]	46.3	41.2

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

わかった。また、コアシェル添加樹脂は、汎用モールドエポキシ樹脂と比較して、材料レベルで溶解速度が速いことがわかった。どちらの試料においても、溶解時間を増やすことで、溶解率が増加することがわかった。

6. 結論

靱性の向上を狙いとしたモールド用エポキシ樹脂の評価用供試体を製作し、機械的特性、熱特性、絶縁特性、リサイクル性を評価した。試験結果から、コアシェル添加樹脂の推進系地上コイル用モールド樹脂としての適用可能性を評価した。

次に、本研究の結果をまとめる。

- (1) 機械的特性は、汎用モールド樹脂と比較して、静的曲げ特性に関しては、ほぼ同程度の値であった。これに対し、シャルピー衝撃値は、汎用モールド樹脂と比較して、大幅に向上していることがわかった。
- (2) 熱的特性は、汎用モールド樹脂と比較して、耐熱衝撃性が大幅に優れていることを確認した。
- (3) 絶縁特性は、汎用モールド樹脂と比較して、部分放電、絶縁破壊強度については同等の値を有することがわかった。
- (4) コアシェル添加樹脂は、常圧溶解法により溶解が可能であることがわかった。

7. おわりに

推進系地上コイル用モールド樹脂を対象に、靱性の向上を狙いとしたモールド用エポキシ樹脂の各種特性について述べた。各種試験の結果、コアシェル添加樹脂を使用することで、推進系地上コイル用モールド樹脂の靱性の向上が図れることを確認した。

しかしながら、推進系地上コイル用モールド樹脂として適用するには、トンネル区間での劣化を考慮した耐環境性の評価等が必要である。今後は、これらの検討をもとにコアシェル添加樹脂の更なる高機能化を目指した開発を実施していく予定である。

なお、本研究の一部は、国土交通省からの国庫補助を受けて実施した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御協力いただいた株式会社東光高岳、明電ケミカル株式会社の関係者の皆様に謝意を表します。

文献

- 1) 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
- 2) 田中実, 饗庭雅之, 鈴木正夫: 地上コイル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
- 3) 鈴木正夫: 地上コイルモールド用樹脂の環境劣化特性, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.23-28, 2006
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所編: ここまで来た! 超電導リニアモーターカー, 交通新聞社, pp.85-88, 2006
- 5) 村井敏昭: 推進・浮上・案内を兼用するリニアモーター同期モーターの特性, 電気学会論文誌, Vol.1.114-D, No.7/8, pp.746-747, 1994.7/8
- 6) 高橋紀之, 鈴木正夫, 饗庭雅之: 推進浮上案内兼用コイル保護層の耐衝撃強度評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.11-16, 2010
- 7) 池田遼平, 鈴木正夫, 太田聡: 地上コイルモールド用樹脂の劣化特性, 第19回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) / 日本機械学会, pp.213-214, 2012
- 8) 高橋紀之, 鈴木正夫: コンクリート添加剤としての地上コイルモールド樹脂リサイクル利用, 土木学会 第67回年次学術講演会概要集, pp.213-214, 2012
- 9) 高橋紀之, 鈴木正夫: 地上コイルのリサイクルに関する検討, 第19回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) / 日本機械学会, pp.315-316, 2012
- 10) 山下太郎, 熊谷美佳, 渡邊滋, 渋谷達雄, 北川清, 寺田修, 中野博史, 平野一美: エポキシ樹脂の高性能化による特別高圧モールド機器のAPG化の実現, 東光電気技報, No.14, 2009
- 11) 渡邊滋, 山下太郎, 熊谷美佳, 平野一美: 電気絶縁用エポキシ樹脂の耐サーマルショック性向上, 東光電気技報, No.13, 2008
- 12) 前川一誠, 柴田勝司, 岩井満, 遠藤顕: 常圧溶解によるFRPリサイクル技術, 日立化成テクニカルレポート No.42 (2004・1月), pp.21-24, 2004
- 13) 柴田勝司, 中川光俊: 常圧溶解によるCFRPリサイクル技術, 日立化成テクニカルレポート No.56 (2013・12月), pp.6-11, 2013
- 14) 山下太郎, 熊谷美佳, 渡邊滋, 大塚尊裕: 熱応力低減に着目したエポキシ樹脂の耐サーマルショック性向上, 平成22年電気学会全国大会, No2-015, 2010