

# 論文 電気炉酸化スラグを骨材として用いたモルタルの含水及び材齢が電波吸収性能に及ぼす影響

田口 陽貴\*1・伊藤 洋介\*2・河辺 伸二\*3・安井 秀幸\*4

**要旨:** 電気炉酸化スラグ (以下, スラグという) は電波を吸収して熱に変換する特性を有する。融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収材層はスラグを骨材として用いたモルタル (以下, スラグモルタルという) である。本研究では, 融雪や降雨などによってスラグモルタルの複素比誘電率が変化し, 電波吸収性能が変化することを確認した。そこで, スラグモルタルの表面に吸水防止材を塗布したところ, 十分な防水効果が得られ, 十分な電波吸収性能を確保できることが分かった。また, スラグモルタルの材齢により複素比誘電率が変化すること, 水中養生期間が 28 日以降はその変化が小さくなることを明らかにした。

**キーワード:** 電気炉酸化スラグ, モルタル, 含水率, 複素比誘電率, 材齢, 水中養生, 電波吸収

## 1. はじめに

近年, 急速に進む過疎・高齢化により, 降雪地域において除雪が困難な高齢者の増加が問題となっている。特に各戸敷地内の玄関前から一般道路までは住人が自ら除雪しなければならず, 除雪作業は高齢者にとって重労働である。

除雪の労力を軽減するための融雪方法として, 電熱線や地下水の散水などが用いられる。電熱線は断線を防ぐため地中深くに埋め込まれる。そのため, 電源を入れてから地表面に熱が伝わるまでに時間がかかり, 立ち上がりが遅くなる。散水は地盤沈下や地下水に含まれる鉛物による路面の変色などの問題がある。

産業副産物である電気炉酸化スラグ(以下, スラグという)が, 電波を吸収して熱に変換する性質に着目し, これを骨材として活用した図-1 に示す融雪用発熱モルタルブロックが研究されている<sup>1),2)</sup>。発熱モルタルブロックは a)電波を反射する電波遮蔽材層, b)電波吸収性能を持つ電波吸収材層, c)電波吸収性能を持たない基材層の 3 層からなる。電波吸収材層にはスラグを骨材としたモルタル (以下, スラグモルタルという) が用いられる。周波数は電波発振器を安価に入手するため, 電子レンジ等で用いる周波数と同様の 2.45GHz とする。融雪を行う際は, 電波発振器から出力される 2.45GHz のマイクロ波を発熱モルタルブロックの下方から照射する。照射された電波は基材層を透過し, 表層付近に配置された電波吸収材層により吸収・熱に変換され, この熱を用いて融雪を行う。よって, 従来の融雪装置よりも立ち上がり早い。

スラグモルタルの電波吸収性能はその複素比誘電率と複素比透磁率に影響を受ける。既往の研究<sup>3),4)</sup>において, スラグの粒径や焼成が複素比誘電率と複素比透磁率

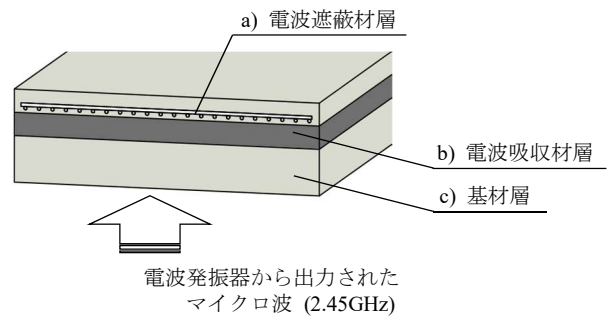


図-1 融雪用発熱モルタルブロック

に与える影響は明らかになっている。しかし, 融雪や降雨などによる含水がスラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率に及ぼす影響は明らかになっておらず, 発熱モルタルブロックは設計時の電波吸収・発熱性能を確保できない可能性がある。また, スラグモルタルの材齢によって複素比誘電率と複素比透磁率が変化する場合, スラグモルタルはこの変化を考慮して設計し, 作製する際の適切な養生期間を検討する必要がある。

本研究はスラグモルタルの含水率及び水中養生期間が複素比誘電率に及ぼす影響を調べる。これにより, スラグモルタルの融雪や降雨などによる含水及び材齢が電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにする。また, 含水の影響が無視できない場合には防水措置として1)スラグモルタルに混入する防水剤, 2)スラグモルタルの表面に塗布する吸水防止材を使用した検討を行う。

## 2. 複素比誘電率と複素比透磁率

磁性損失材料であるスラグの比誘電率と比透磁率は複素数で表される。これらを複素比誘電率と複素比透磁率という。 $\epsilon'$ と $\epsilon''$ を複素比誘電率の実部と虚部,  $\mu'$ と $\mu''$

\*1 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 助教 博 (工) (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

\*4 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 (学生会員)

を複素比透磁率の実部と虚部,  $j$  を虚数単位とすると, 複素比誘電率  $\hat{\epsilon}$  と複素比透磁率  $\hat{\mu}$  はそれぞれ式(1)と式(2)で表される。

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\hat{\mu} = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

複素比誘電率実部は主に最も電波を吸収するスラグモルタルの厚さ (以下, マッチング厚さという) に, 複素比誘電率虚部は反射減衰量に与える影響が大きい。複素比透磁率虚部はマッチング厚さと反射減衰量ともに与える影響が大きい。なお, 複素比透磁率実部はスラグモルタルの場合, 骨材として用いるスラグの種類や割合, 粒径を変化させてもほとんど変化しない<sup>3),4)</sup>。また, 複素比誘電率虚部と複素比透磁率虚部は, 少なくとも一方が 0 でないことが電波を吸収するために必要である。

スラグモルタルの電波吸収性能を示す反射減衰量は複素比誘電率と複素比透磁率を用いて算出できる。スラグモルタルに入射する電波の自由空間における波長を  $\lambda_0$  [mm], スラグモルタルの厚さを  $d$  [mm], スラグモルタルに照射する電波の入射角度を  $\theta$  としたとき, 一方の端面を短絡したスラグモルタルの反射係数  $\hat{S}$  は式(3)<sup>5)</sup>により示される。なお, 導波管内のスラグモルタルの反射減衰量を算出する場合, 導波管の長辺の長さを  $a$  [mm] とすると,  $\theta$  は式(4)により求められる。 $\hat{S}=0$  のとき電波はスラグモルタルにより全吸収され,  $\hat{S}=1$  のとき電波は全反射される。 $\hat{S}$  を用いて, 式(5)より反射減衰量  $RL$  が求められる。

$$\hat{S} = \frac{\frac{\hat{\mu}}{\sqrt{\hat{\epsilon}\hat{\mu} - \sin^2\theta}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\hat{\epsilon}\hat{\mu} - \sin^2\theta}d\right) - 1/\cos\theta}{\frac{\hat{\mu}}{\sqrt{\hat{\epsilon}\hat{\mu} - \sin^2\theta}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\hat{\epsilon}\hat{\mu} - \sin^2\theta}d\right) + 1/\cos\theta} \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\lambda_0/2a) \quad (4)$$

$$RL = -20 \log_{10}|\hat{S}| \quad (5)$$

表-1 スラグの成分 (質量比)

組成式	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	合計
スラグ A	19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.4	1.97	0.42	0.33	97.77
スラグ B	22.93	18.09	9.84	5.20	29.20	6.24	15.57	3.53	1.71	0.17	99.23
スラグ C	20.69	13.63	7.97	3.34	30.79	5.67	10.32	3.55	0.47	0.43	96.86

表-2 スラグモルタルの割合 (質量比)

セメント	スラグ	水
100	150	45.0

表-3 防水剤の成分 (質量比)

高級脂肪酸塩等の混合物	ポリ(オキシレン)= ノニルフェニルエーテル	水
30~35	<2.0	64~69

表-4 吸水防止材の種類および分類

銘柄	分類	主成分	備考
A	シラン系	シランオリゴマー	3回塗布
B	シラン系	シランモノマー	2回塗布
C	水性エポキシ系 (コーティング材)	エポキシ樹脂	3種類を 配合
		エマルジョン	
		変性脂肪族ポリアミン 特殊セメント	

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

##### (1) スラグモルタル

セメントには普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm<sup>3</sup>) を, スラグには成分の異なるスラグ A, スラグ B 及びスラグ C (絶乾密度はそれぞれ 3.52g/cm<sup>3</sup>, 3.59g/cm<sup>3</sup>, 3.73g/cm<sup>3</sup>) を用いる。蛍光 X線による無機元素の定性分析により得られたスラグの成分を, 酸化物に換算した質量比で表-1<sup>6)</sup>に示す。スラグモルタルの割合を表-2に示す。

##### (2) 防水剤

スラグモルタルに防水剤を混入することにより含水を抑え, 十分な電波吸収・発熱性能を確保することを目的とする。防水剤の主な成分を表-3に示す。防水剤はセメントに対し, 質量比で 3%または 6%混入する。

##### (3) 吸水防止材

コンクリートやモルタルに使用される表面含浸材は主にシラン系と珪酸塩系の材料に大別される。吸水防止効果を目的とするシラン系に対し, 珪酸塩系は表面改質によって微細ひび割れの充填効果を期待する材料である。本研究では, 表-4に示す 2種類のシラン系の表面含浸材に加えて, 防水コーティング材として水性エポキシ系の防水材の合わせて 3種類の吸水防止材を使用する。

#### 3.2 供試体

##### (1) 供試体の設計

既往の研究<sup>3),7)</sup>から, スラグモルタルの電波吸収性能を示す反射減衰量は複素比誘電率と複素比透磁率に影響を受けること, 反射減衰量は 15.0dB 以上であれば, 十分な発熱性能を期待できることが分かっている。

水の複素比誘電率実部がスラグモルタルに比べて著しく大きいこと, スラグモルタルが含水すると複素比誘電率実部の値は増加すると考えられる。式(3)と式(5)から複素比誘電率実部の値を増加させたとき, 図-2に示すように反射減衰量がピークとなる周波数は低周波に推

移する。よって、スラグモルタルが含水しても十分な電波吸収・発熱性能を確保するため、絶乾時において目的の周波数 2.45GHz よりも高周波にピークがあり、2.45GHz において反射減衰量が 15.0dB 以上となるスラグモルタルの調合を検討する。スラグモルタルの複素比誘電率はスラグの粒径により調整できる<sup>2)</sup>。スラグ A をスラグモルタルの骨材として用いる場合、粒径 4 号(1.2~2.5mm) : 6 号(0.3~0.6mm) = 9 : 1 の混合比において、反射減衰量のピークが 2.45GHz よりも高周波側に存在し、15.0dB 以上となることが分かった。この混合比のスラグ A を用いたスラグモルタルを基準供試体とする。基準供試体が最大限含水しても反射減衰量が 15.0dB 以上であれば、融雪や降雨によりスラグモルタルが含水した場合でも十分な電波吸収・発熱性能を確保できるといえる。

また、スラグの種類の違いがスラグモルタルの複素比誘電率又は複素比透磁率と含水率の関係、複素比誘電率又は複素比透磁率と水中養生期間の关系到及ぼす影響を調べるため、成分の異なるスラグ A, B, C の粒径 6 号をそれぞれ用いたスラグモルタルを作製し、比較供試体 A, B, C とする。

## (2) 供試体の作製

厚さ 8mm の金属製の導波管内(54.6mm×109.2mm)にスラグモルタルを充填し、硬化後に表面を研磨して厚さを一定にする。24 時間空中養生した後、水温 20±3°C の

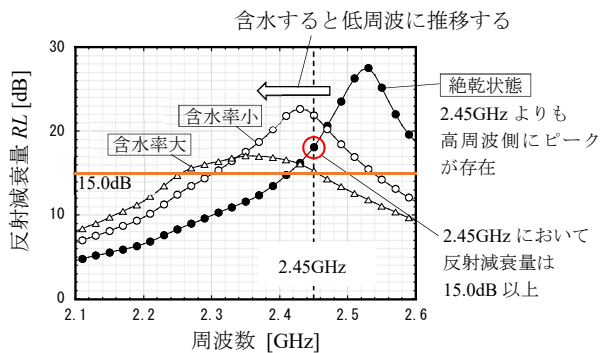


図-2 スラグモルタルが含水した時の反射減衰量 RL と周波数の関係 (概念図)

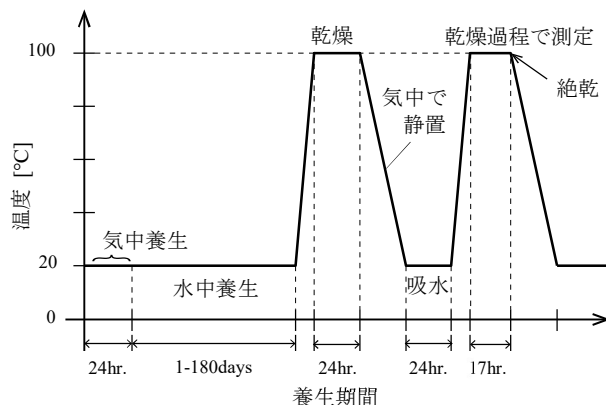


図-3 スラグモルタル打設後の養生過程

水中に浸漬させ、水中養生を行う。養生期間は 1, 3, 5, 7, 14, 28, 56, 91 及び 180 日とし、水中養生期間で材齢による影響を評価する。

## (3) 吸水防止材の塗布方法

スラグモルタルを一度絶乾状態にした後、表面のごみ、ほこりなどの付着物を除去し、刷毛塗りで吸水防止材を供試体の両面に塗布する。

## 3.3 測定方法

### (1) 含水率の測定

スラグモルタルの含水率と複素比誘電率及び複素比透磁率の関係を調べる。図-3 に示すように水中養生終了後、吸水防止材の塗布を考慮してスラグモルタルを 100°C 設定の恒温恒湿器により一度絶乾状態にする。その後スラグモルタルを 24 時間吸水させ、表乾状態から絶乾状態までの乾燥過程で質量を測定し、JISA 1476 (建築材料の含水率測定方法) により含水率を算出する。

### (2) 複素比誘電率と複素比透磁率の測定方法

スラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率は、S パラメータ測定法<sup>2)</sup>及びニコルソン・ロス法<sup>4)</sup>によって測定する。測定装置を図-4 に示す。ネットワークアナライザ (KEYSIGHT 製 E5063A) のポート 1 から電波を送信し、同軸ケーブルと同軸導波管変換器を介してスラグモルタルの供試体に照射する。照射された電波は供試体に対し反射、透過または吸収される。反射された電波は再びポート 1 で受信され反射係数( $S_{11}$ )が、透過した電波はポート 2 で受信され伝送係数( $S_{21}$ )が算出される。

得られた反射係数と伝送係数からニコルソン・ロス法によりスラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率を算出する。ニコルソン・ロス法の計算は KEYSIGHT 製のソフトウェア N1500A 材料測定スイートを用いて行う。

## 4. 測定結果と考察

### 4.1 スラグモルタルの含水率変化が複素比誘電率と複素比透磁率に及ぼす影響

#### (1) 基準供試体

水中養生 7 日における基準供試体の複素比誘電率及び

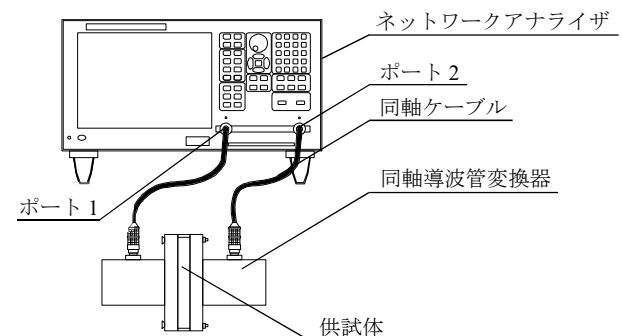


図-4 Sパラメータ測定装置

複素比透磁率と含水率の関係を図-5 と図-6 に示す。24時間吸水後の含水率は7.65%である。スラグモルタルは含水すると、複素比誘電率が変化することが確認できる。複素比誘電率は含水率の増加に対応して増加する。これは水の複素比誘電率実部が影響しているためと考える。複素比透磁率は実部と虚部ともにほぼ一定である。以降、複素比透磁率は変化が小さいので省略する。

式(3)から式(5)より算出した、各含水率における反射減衰量と周波数の関係を図-7 に示す。スラグモルタルの含水率が增加するにつれて、反射減衰量のピークは低周波に推移する。周波数2.45GHz のとき含水率が1.38%で反射減衰量が17.2dBとなる。含水率が2.11%になると反射減衰量は15.0dBを下回り、11.3dBまで低下する。

以上から、スラグモルタルの含水により複素比誘電率が変化することが分かった。また、これにより反射減衰量は15.0dBを下回り、十分な電波吸収・発熱性能を確保できなくなることが分かった。

## (2) 比較供試体

水中養生7日における比較供試体の複素比誘電率の実部及び虚部と含水率の関係を図-8 と図-9 に示す。24時間吸水後の含水率はいずれのスラグを用いたスラグモルタルもおおよそ8.00%である。スラグA とスラグB、スラグA とスラグC の間で含水率あたりの複素比誘電率の増加量に差異がみられる。これは複素比誘電率に影響を及ぼす結晶構造をもつ酸化鉄の成分量が異なるた

めと考える。

以上から、スラグモルタルは成分の異なるスラグを用いると、含水率あたりの複素比誘電率の増加量が変化することが分かった。

## 4.2 防水剤を混入したスラグモルタルの含水率変化が複素比誘電率に及ぼす影響

防水剤を混入した水中養生7日の基準供試体の含水率の乾燥過程における経時変化を図-10 に、複素比誘電率と含水率の関係を図-11 に示す。前節において防水措置を行わない基準供試体（以下、ブランクという）の24時間吸水後の含水率は7.60%であるが、防水剤の混入量を多くするほど含水率は低下する。防水剤を6%混入すると含水率は4.50%まで抑えられる。また、防水剤を混入することでスラグモルタルの複素比誘電率が変化する。

防水剤を3%または6%混入したスラグモルタルの、各含水率における反射減衰量と周波数の関係を図-12 と図-13 に示す。周波数2.45GHz のとき、防水剤3%または6%ともに含水率がおおよそ2.00%になると、反射減衰量が15.0dBを下回る。

以上から、スラグモルタルに防水剤を混入することにより含水を抑えられるが、24時間吸水後の含水率において反射減衰量は15.0dBを下回ることが分かった。また、防水剤の影響で複素比誘電率が変化するため、ブランクを基準として設計したときの電波吸収・発熱性能を確保できなくなることが分かった。

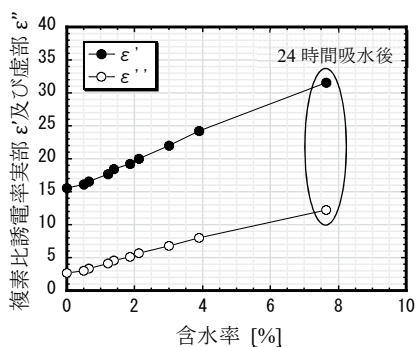


図-5 複素比誘電率と含水率の関係

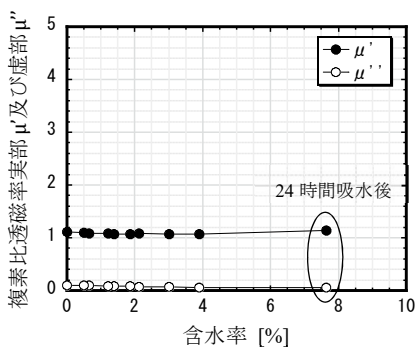


図-6 複素比透磁率と含水率の関係

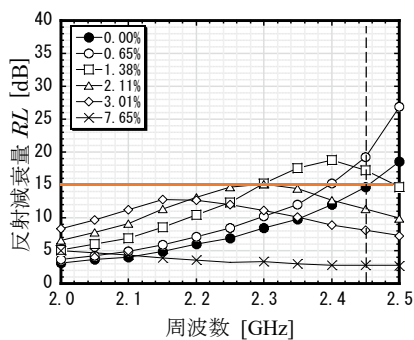


図-7 各含水率における反射減衰量  $RL$  と周波数の関係

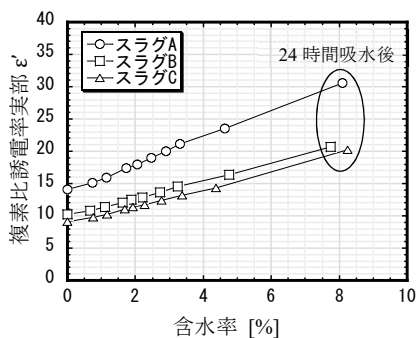


図-8 成分の異なるスラグを用いたスラグモルタルの複素比誘電率実部  $\epsilon'$  と含水率の関係

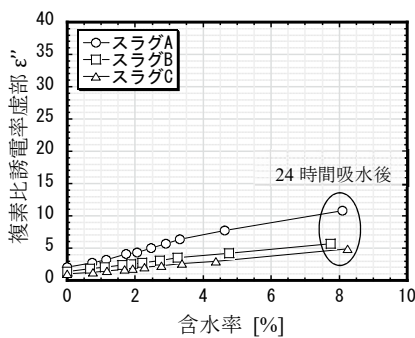


図-9 成分の異なるスラグを用いたスラグモルタルの複素比誘電率虚部  $\epsilon''$  と含水率の関係

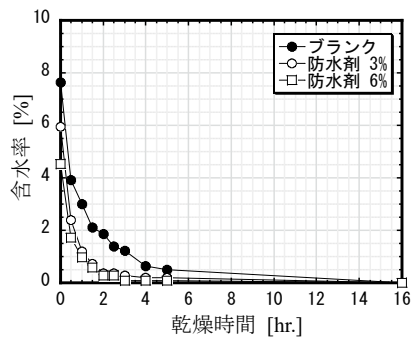


図-10 防水剤を混入したスラグモルタルの含水率の乾燥過程における経時変化



### 4.3 吸水防止材を塗布したスラグモルタルの含水率変化が複素比誘電率に及ぼす影響

各吸水防止材を塗布した水中養生7日の基準供試体の含水率の乾燥過程における経時変化を図-14に示す。主成分がシランモノマーである吸水防止材Bを塗布したスラグモルタルの含水率は、ブランクの含水率のおよそ1/4にあたる2.00%以下となる。同じシラン系でも主成分がシランオリゴマーである吸水防止材Aはあまり効果がみられない。これは、主成分が分子構造の大きいオリゴマー系の含浸材よりも、小さい分子構造を持つモノマー系の方が、より奥深く浸透したためと考えられる。

吸水防止材Bを塗布したスラグモルタルの複素比誘電率実部と含水率の関係を図-15に示す。吸水防止材Bを塗布したスラグモルタルの複素比誘電率実部は同じ含水率のときブランクとほぼ同じ値をとることが分かる。

ここで、吸水防止材Bを塗布したスラグモルタルの各含水率において算出した反射減衰量と周波数の関係を図-16に示す。いずれの含水率においても、周波数2.45GHzで15.0dB程度の反射減衰量が確保できることが分かる。なお、絶乾時の反射減衰量は14.4dBであるが、発熱モルタルブロックの屋外での設置環境を考慮すると、絶乾状態にはなり得ない。

以上から、主成分がシランモノマーであるシラン系吸水防止材をスラグモルタルに塗布することで、吸水防止

効果が得られ、十分な電波吸収・発熱性能を確保できることが分かった。

### 4.4 水中養生期間がスラグモルタルの含水率及び複素比誘電率に及ぼす影響

材齢がスラグモルタルの含水率と複素比誘電率に及ぼす影響を、水中養生期間を変化させることによって調べる。含水率0~6%のときの基準供試体の複素比誘電率実部と水中養生期間の関係を図-17に示す。また、成分の異なるスラグの違いを調べるため、図-18から図-20にそれぞれ比較供試体A, B, Cの複素比誘電率実部と水中養生期間の関係を示す。なお、図に示す含水率は、複素比誘電率実部が含水率の増加に対応して増加することから、その近似直線をもとにプロットした。

複素比誘電率実部は、各供試体において水中養生28日まで増加する傾向が確認できる。基準供試体においては水中養生3日で増加し5日で減少、以降28日まで増加する。28日以降は180日まで変化が小さい。これはセメントの水和反応が28日までにほとんど進行するためと考える。ここで、水中養生1日から180日までの間で、複素比誘電率実部が最大となる28日と最小となる5日について、式(3)から式(5)により反射減衰量を算出するとそれぞれ19.5dB, 16.7dBとなる。複素比誘電率実部の変化により反射減衰量が変化するため、厳密に設計を行う場合は水中養生28日以降のデータを基準とすべきであ

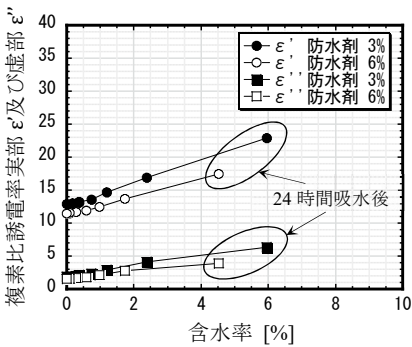


図-11 防水剤を混入したスラグモルタルの複素比誘電率と含水率の関係

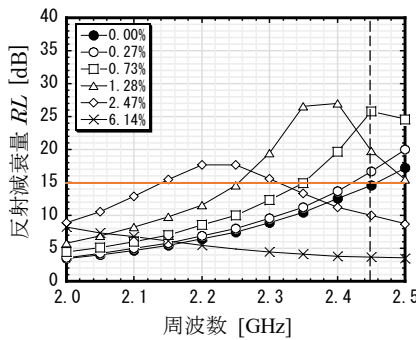


図-12 各含水率における反射減衰量 RL と周波数の関係 (防水剤 3%混入)

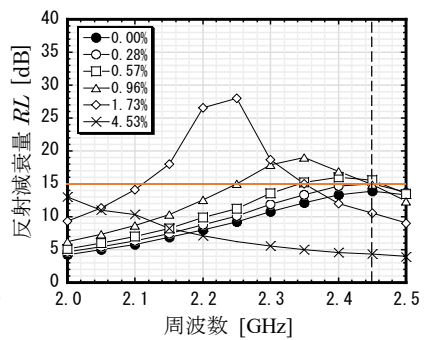


図-13 各含水率における反射減衰量 RL と周波数の関係 (防水剤 6%混入)

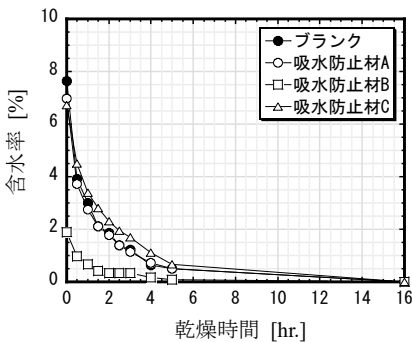


図-14 各吸水防止材を塗布したスラグモルタルの含水率の乾燥過程における経時変化

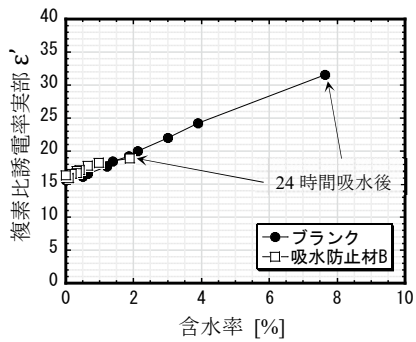


図-15 吸水防止材Bを塗布したスラグモルタルの複素比誘電率実部 ε' と含水率の関係

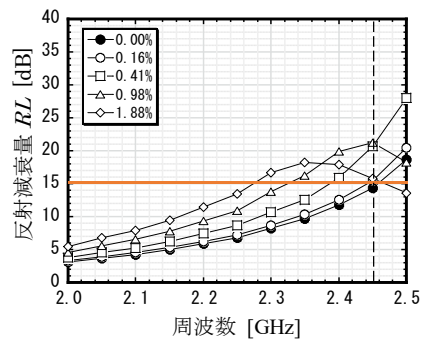


図-16 各含水率における反射減衰量 RL と周波数の関係 (吸水防止材 B)

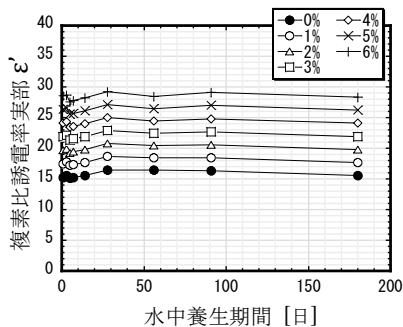


図-17 各含水率における  
複素比誘電率実部  $\epsilon''$  と  
水中養生期間の関係  
(基準供試体)

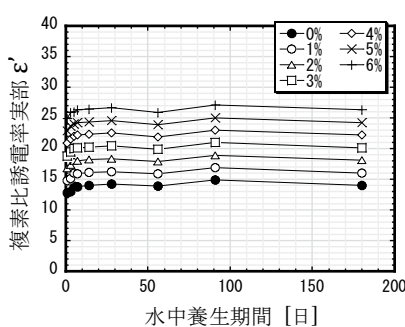


図-18 各含水率における  
複素比誘電率実部  $\epsilon''$  と  
水中養生期間の関係  
(比較供試体 A)

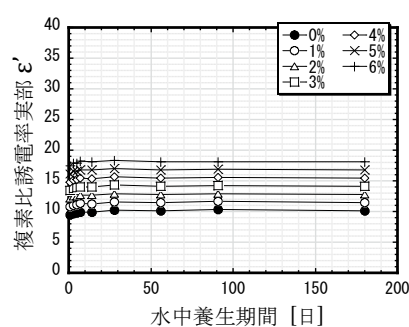


図-19 各含水率における  
複素比誘電率実部  $\epsilon''$  と  
水中養生期間の関係  
(比較供試体 B)

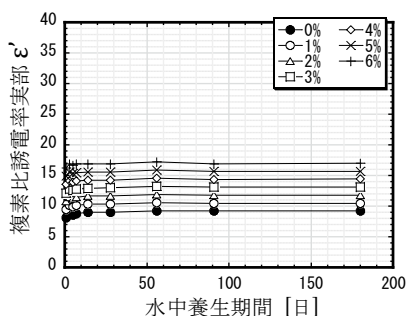


図-20 各含水率における  
複素比誘電率実部  $\epsilon''$  と水中養生期間の関係  
(比較供試体 C)

る。また、含水率が変化しても複素比誘電率実部は各水中養生期間にわたり同様に増減するのみであり、含水率が水中養生期間による反射減衰量の変化に与える影響はみられない。

以上から、スラグモルタルの複素比誘電率は水中養生期間により変化するが、28日以降は変化が小さくなること、含水率変化と水中養生期間の相互作用はみられないことが分かった。

## 5. まとめ

本研究の測定範囲内において、以下のことが分かった。

- 1) スラグモルタルの含水により複素比誘電率が変化する。これにより反射減衰量は 15.0dB を下回り、十分な電波吸収・発熱性能を確保できなくなる。
- 2) スラグモルタルは成分の異なるスラグを用いると、含水率あたりの複素比誘電率の増加量が変化する。
- 3) スラグモルタルに防水剤を混入することにより含水を抑えられるが、24 時間吸水後の含水率において反射減衰量は 15.0dB を下回る。また、防水剤の影響で複素比誘電率が変化するため、ブランクを基準として設計したときの電波吸収・発熱性能を確保できなくなる。
- 4) 主成分がシランモノマーであるシラン系吸水防止材をスラグモルタルに塗布することで、吸水防止効果

が得られ、十分な電波吸収・発熱性能を確保できる。

- 5) スラグモルタルの複素比誘電率は水中養生期間により変化するが、28 日以降は変化が小さくなる。また、含水率変化と水中養生期間の相互作用はみられない。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金 2017 年度研究助成金、JSPS 科研費 JP16K18183, JP16K06569 の助成・支援を受けたものです。名古屋工業大学池田哲夫名誉教授およびテン株式会社の協力を得ました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 河辺伸二, 池田哲夫, 伊藤洋介: 準マイクロ波による融雪用発熱モルタルブロックの研究, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.1-5, 2004.12
- 2) 大羽慧, 伊藤洋介, 河辺伸二: 電気炉酸化スラグモルタルの準マイクロ波帯における電波吸収特性, コンクリート工学年次論文集, 第 38 巻, pp.657-662, 2016.7
- 3) 伊藤洋介, 河辺伸二, 吉田成克: 電気炉酸化スラグ骨材の粒径による準マイクロ波帯における電波吸収性能の改善, コンクリート工学年次論文集, 第 39 巻, No.1, pp.523-528, 2017.7
- 4) 田口陽貴, 伊藤洋介, 河辺伸二: 電気炉酸化スラグ骨材の焼成による準マイクロ波帯における電波吸収性能の改善, コンクリート工学年次論文集, 第 39 巻, No.1, pp.517-522, 2017.7
- 5) 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会:【新版】電磁波の吸収と遮蔽, オーム社, p.119, 2014.5
- 6) 電気炉酸化スラグ骨材の特殊機能材としての利用技術, 株式会社星野産商, pp.76-77, 2012.10
- 7) 伊藤洋介, 河辺伸二, 大羽慧: 準マイクロ波による融雪用発熱モルタルブロックの基材層の厚さが電波吸収性能に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.739, pp.1321-1327, 2017.9