論文　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

伊藤　洋介[*1]・河辺　伸二[*2]・吉田　成克[*3]

要旨：電気炉酸化スラグ(以下，スラグという)を骨材としたモルタル(以下，スラグモルタルという)は電波を吸収し，発熱する特性を持つ。粒径の異なるスラグの粉粒体とスラグモルタルについて電波の反射減衰量，スラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率を測定した。これにより，スラグの粒径が大きい程，電波を最も吸収する供試体の厚さは薄くなること，複素誘電率が大きくなることを明らかにした。また，スラグモルタルの骨材として粒径 4 号と 6 号のスラグを混合して用いることで，粒径 4 号又は粒径 6 号のスラグのみを用いたスラグモルタルより高い反射減衰量を持つスラグモルタルが設計できた。

キーワード：電気炉酸化スラグ，骨材粒径，モルタル，準マイクロ波，融雪，電波吸収，発熱

1. はじめに

除雪作業は多大な労力を要する。**図－1** に示すように，一般道路は除雪車により除雪できるが，各戸敷地内の除雪は手作業となり，高齢者には大変な労力負担となる。

労力軽減のための融雪方法として，電熱線方式，散水方式，融雪剤(塩化カルシウム等)の使用が挙げられる。しかし，電熱線方式は発熱する部分が細線状であり，断線を防ぐために発熱する部分を地中深くに埋設するので表面が暖まりにくい。散水方式は地下水の汲み上げによる地盤沈下や含有鉱物による汚染，融雪剤はコンクリートや植物，鉄への塩害などの問題がある。

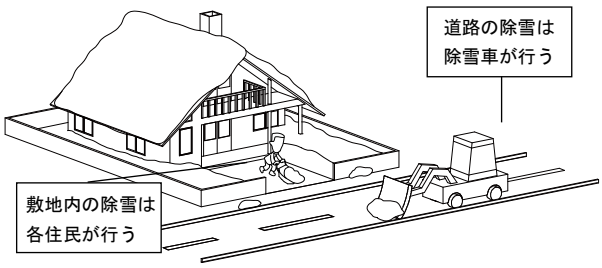
これを解決するため，産業廃棄物である電気炉酸化スラグ(以下，スラグという)を活用した準マイクロ波による融雪用発熱モルタルブロックシステム[1)-3)]が開発されている。スラグは電波を照射すると吸収し，熱に変換する特性を持つ。発熱モルタルブロックはスラグを骨材に用いることで電波を吸収して発熱する。発熱モルタルブロックの電波吸収性能を向上すると，発熱モルタルブロックの発熱効率が向上する[1)]。

既往の研究[1)-3)]では，スラグの粒径が電波吸収特性に及ぼす影響について検討していない。そこで本研究では，粒径の異なるスラグについて電波の反射減衰量および複素誘電率と複素透磁率を測定することで，スラグの粒径が電波吸収特性に及ぼす影響を検討し，得られたデータを活用して，電波吸収性能が高い，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)を設計することを目的とする。本研究の成果は，融雪用発熱モルタルブロックシステムの発熱効率の向上に寄与する。

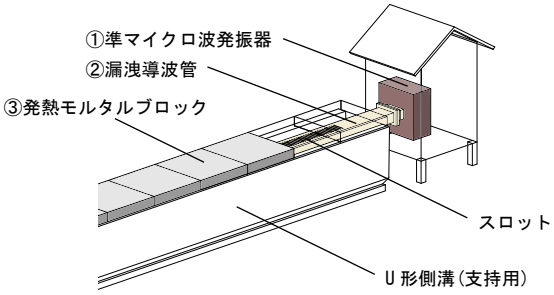
2. 融雪用発熱モルタルブロックシステム

融雪用発熱モルタルブロックシステムを**図－2** に示す。主に，①準マイクロ波発振器，②漏洩導波管，③発熱モルタルブロックの 3 つで構成される。準マイクロ波発振器から出力された準マイクロ波(2.45GHz の電波)は漏洩導波管に供給される。この電波は漏洩導波管の上面に設けたスロットを通して発熱モルタルブロックに供給される。U 形側溝は，漏洩導波管，発熱モルタルブロックを支持するために用いる。

発熱モルタルブロックは，**図－3** に示すように，①電波遮蔽材層，②電波吸収材層，③基材層の複層構造となっている。電波吸収材層はスラグモルタルを用いる。スラグの電波エネルギーを吸収し，熱エネルギーに変換す



図－1 降雪地域の除雪の状況



図－2 融雪用発熱モルタルブロックシステム

*1 名古屋工業大学大学院　助教　（正会員）
*2 名古屋工業大学大学院　教授　工博　（正会員）
*3 名古屋工業大学　建築・デザイン工学科

る特性により発熱して，発熱モルタル上の雪を融かす。表層付近に発熱する部分があるため，効率的にブロックの表層を加熱できる。電波遮蔽材層は加工した欠損金網[3]を挿入したモルタルを用いる。電波遮蔽材層は外部への電波漏洩を防止[3]する。融雪用発熱モルタルブロックシステムは，発熱モルタルブロックが独立した構造のため，破損した場合，発熱モルタルブロックの交換が容易でメンテナンス性が高い。発熱モルタルブロック自体が発熱するため，発熱する部分が断線する心配も無い。

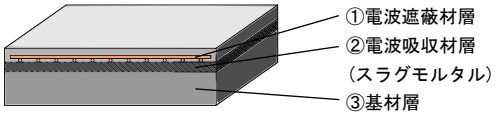
3. 電気炉酸化スラグ

スラグは製鋼所で再生鉄を生産する際に生じる産業廃棄物である。スラグの蛍光 X 線による無機元素の定性分析で得られた成分を，酸化物に換算した質量比で**表－1**[4]に示す。絶乾密度は3.52g/cm^{3}である。また，使用するスラグの粒径[4]と JIS A 1104:2006（骨材の単位容積質量及び実積率試験方法）により求めた実積率を**表－2** に示す。

スラグは酸化金属，特に鉄の酸化物を多く含む。主に，ウスタイト（FeO），マグネタイト（Fe_3O_4），アイアンクロマイト（FeO・Cr_2O_3），マグネシオフェライト（MgO・Fe_2O_3）を多く含む[4]。マグネタイト，マグネシオフェライトはフェリ磁性[5]であり，電波吸収に関係している。

4. スラグモルタル

スラグモルタルの調合を**表－3** に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い，含水による電波吸収特性の変化を防止するため，防水剤を用いる。防水剤の調合を**表－4** に示す。モルタルミキサー（千代田技研工業製 OM-5）で混練後，**図－4** のように導波管にスラグモルタルを充填し，気中養生 1 日，水中養生 5 日する。硬化後に表面を研磨して厚さを一定にする。研磨後の厚さを 0.1mm の精度で測定し，供試体の厚さとする。その後，含水が電波吸収性能に与える影響を等しくするため，100℃の恒温恒湿器で 24 時間乾燥させる。



図－3 発熱モルタルブロック

5. 測定方法

5.1 反射減衰量の測定方法

供試体の電波吸収性能を，S パラメータ測定法[1]で求めた反射減衰量により評価する。S パラメータは，高周波の 4 端子回路網の特性定数のことであり，入力端子の入射波，反射波と透過波の関係を表す。

測定は 1 ポート測定とする。1 ポート測定時の S パラメータ測定装置を**図－5** の a に示す。供試体の端面を金属製の反射板によって短絡する。ネットワークアナライザ（KEYSIGHT 製 E5063A）のポート 1 から 1.5～2.7GHz の電波を送信し，同軸ケーブルと同軸導波管変換器を介して，供試体に照射する。供試体を透過した電波は反射板によって反射され，同軸導波管変換器と同軸ケーブルを介してポート 1 に戻って受信されて，反射係数 S_{11} が計算される。ネットワークアナライザのポート 1 における入射波を$\alpha 1$，反射波を $\beta 1$ としたとき，供試体に照射する電波のうち，ポート 1 に戻ってきた電波の割合を表す S_{11} は式(1)で示される。準マイクロ波帯の周波数を考慮し，供試体を充填した導波管と同軸導波管変換器は金属製の WRJ-2（内寸 109.2×54.6mm）の規格品を使用する。

入力電力を 1，吸収電力係数を S_0 とすると，S_0 と S_{11} の関係は式(2)で示される。また，位相と振幅の特性を持つベクトル量である S_{11} は実部を a，虚部を b，複素定数を j とすると，式(3)で示される。これを式(4)に示す反射の大きさを示すスカラー量の反射係数$|S_{11}|$に変換して，式(5)から反射減衰量 RL[dB]を算出する[1]。

$$S_{11} = \beta 1/\alpha 1 \tag{1}$$

$$|S_0|^2 = 1 - |S_{11}|^2 \tag{2}$$

$$S_{11} = a + \mathrm{j}b \tag{3}$$

$$|S_{11}| = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{4}$$

$$RL = -20\log_{10}|S_{11}|[\mathrm{dB}] \tag{5}$$

5.2 複素誘電率と複素透磁率の測定方法

供試体の電波吸収特性を，S パラメータ測定およびニコルソン・ロス法で求めた複素誘電率と複素透磁率で評価する。ここで，ε’と ε’’を複素誘電率の実部と虚部，μ’と μ’’を複素透磁率の実部と虚部とすると，複素誘電率$\dot{\varepsilon}$と複素透磁率$\dot{\mu}$は，それぞれ式(6)と式(7)で表される[6]。

表－1 スラグの成分（質量比）

組成式	CaO	SiO_2	MnO	MgO	FeO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Cr_2O_3	TiO_2	P_2O_5	合計
質量比(%)	19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.40	1.97	0.42	0.332	97.60

表－2 スラグの粒径と実績率

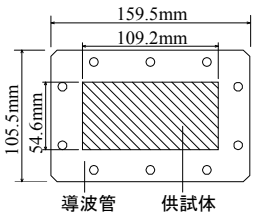
号数	粒径（mm）	実績率(%)
4 号	1.2～2.5	58.9
5 号	0.6～1.2	61.5
6 号	0.3～0.6	64.0

表－3 スラグモルタルの調合表（質量比）

セメント	スラグ	水	防水剤
100	150	45	0.3

表－4 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



図－4 導波管の形状

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (6)$$

$$\dot{\mu} = \mu' - j\mu'' \quad (7)$$

電波吸収は電波が媒質内部で減衰することにより起こる。ε''と μ''は電波損失項を表し，少なくとも一方が 0 ではないことが電波を吸収するために必要である。

まず，供試体の S_{11} と伝送係数 S_{21} を S パラメータ測定法で求める。測定は 2 ポート測定とする。2 ポート測定時の S パラメータ測定装置を**図－5** の b に示す。ネットワークアナライザのポート 1 から 1.7～2.6GHz の電波を送信し，同軸ケーブルと同軸導波管変換器を介して供試体に照射する。供試体に反射された電波は同軸導波管変換器と同軸ケーブルを介してポート 1 で受信され，S_{11} が計算される。供試体を透過した電波は同軸導波管変換器と同軸ケーブルを介してポート 2 で受信され，S_{21} が計算される。ネットワークアナライザのポート 1 における入射波を $\alpha 1$，ポート 2 における伝送波を $\beta 2$ とすると，供試体に照射する電波のうち，供試体を透過してポート 2 に伝送された電波の割合を表す S_{21} は式(8)により示される。

$$S_{21} = \beta 2 / \alpha 1 \quad (8)$$

S パラメータ測定で求めた反射係数 S_{11} と伝送係数 S_{21} を用いて，ニコルソン･ロス法により，複素誘電率と複素透磁率を算出する。なお，ニコルソン･ロス法による計算には, KEYSIGHT 製 N1500A 材料測定スイートを用いる。

6. スラグの粉粒体の反射減衰量の測定

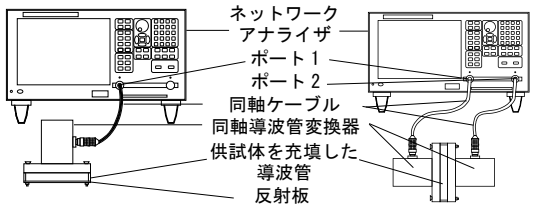
6.1 測定概要

スラグの粉粒体について粒径が電波吸収特性に及ぼす影響を検討する。スラグの粉粒体のみを導波管に充填して測定すると，**表－2** より粒径によって実績率が異なるため，単位容積あたりのスラグの質量が変化する。この影響で反射減衰量が変化するため，スラグの粉粒体のみを導波管に充填しても粒径の変化が反射減衰量に及ぼす影響を確認できない。そこで，空気と同様に電波吸収性能を持たず，10μm 程度とスラグよりも粒径が十分小さいセメントを一定の割合でスラグと混合し，単位容積あたりのスラグの質量を変えずに測定する。これにより，スラグの粉粒体の粒径が反射減衰量に及ぼす影響を確認できると考える。

調合は，スラグの粉粒体の影響を高めるため，実積率を考慮してスラグの割合が質量比で最大となる整数比を採用する。よって，スラグとセメントの調合は質量比 6:4(容積に占めるスラグの割合は57.3%)とする。1mm ごと 8～20mm の導波管に調合した粉粒体を充填し，表面を擦り切る。スラグの粒径は 4～6 号を用いる。供試体の反射減衰量を S パラメータ測定法により求める。

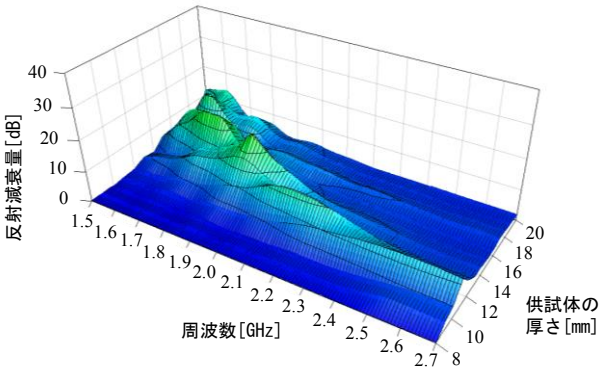
6.2 測定結果と考察

スラグの粒径 4～6 号におけるスラグの粉粒体の供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係を**図－6**，**図－7** および**図－8** に示す。測定範囲内において，それぞれの粒径で周波数ごとに電波を最も吸収する供試体の厚さ(以下, マッチング厚さという)が存在し, 低周波側になる程, マッチング厚さは厚くなる。また，粒径が大きい程，スラグの粉粒体のマッチング厚さは薄くなる。1.5～2.7GHz

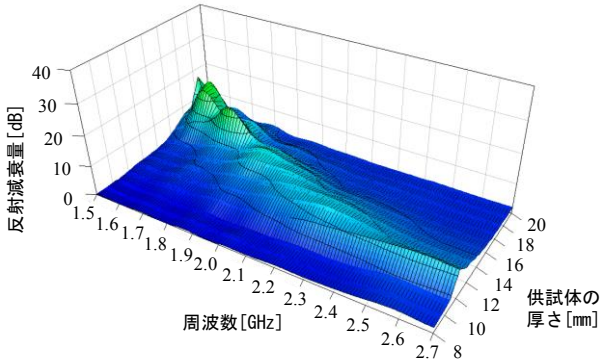


a.　1 ポート測定　　b.　2 ポート測定

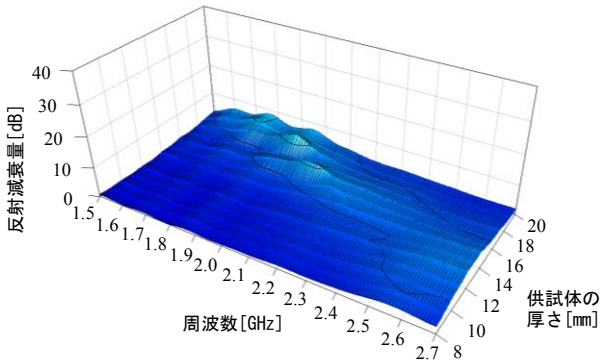
図－5　S パラメータ測定装置



図－6 粒径 4 号のスラグの粉粒体における
供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係



図－7 粒径 5 号のスラグの粉粒体における
供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係



図－8 粒径 6 号のスラグの粉粒体における
供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係

の周波数における 4 号と 5 号のマッチング厚さは，4 号の方が平均で 0.51mm，5 号と 6 号のマッチング厚さは，5 号の方が平均で 2.64mm 薄くなる。スラグの粒径が変化するとマッチング厚さが変化するのは，スラグの粒径が変化することで，スラグの粉粒体の複素誘電率か複素透磁率が変化するためと考える。

7. スラグモルタルの反射減衰量の測定

7.1 測定概要

6 章より，スラグの粉粒体は粒径の影響を受けて電波吸収特性が変化すると分かった。スラグを保持する物質が変化しても粒径の影響が同様になるかを確認するため，スラグモルタルのスラグの粒径が電波吸収特性に及ぼす影響を検討する。供試体はスラグモルタルとし，粒径は 4～6 号を用いる。1mm ごと厚さの異なる 4～12mm までの導波管を用いて供試体を作製し，これらの反射減衰量を S パラメータ測定法により求める。

7.2 測定結果と考察

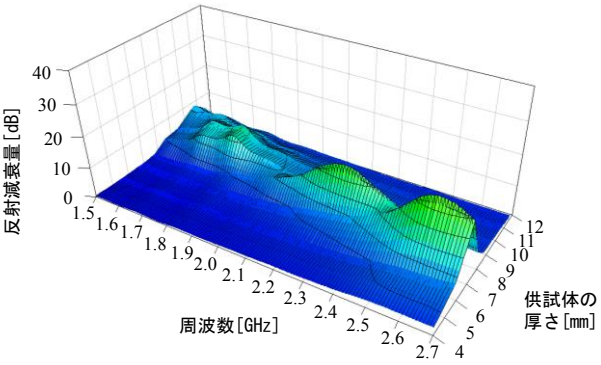
スラグの粒径 4～6 号におけるスラグモルタルの供試体の厚さと周波数, 反射減衰量の関係を**図－9**, **図－10** および**図－11** に示す。測定範囲内において，スラグの粉粒体と同様に，それぞれの粒径で，周波数ごとにマッチング厚さが存在し，低周波側になる程，マッチング厚さは厚くなる。ただし，スラグの粉粒体と比べて，スラグモルタルのマッチング厚さは全体的に薄くなる。

また，スラグの粉粒体と同様に，粒径が大きい程，スラグモルタルのマッチング厚さは薄くなる。1.5～2.7GHz の周波数における 4 号と 5 号のマッチング厚さは，4 号の方が平均で 0.56mm，5 号と 6 号のマッチング厚さは，5 号の方が平均で 0.34mm 薄くなる。これらマッチング厚さの粒径による変化量はスラグの粉粒体と異なる。

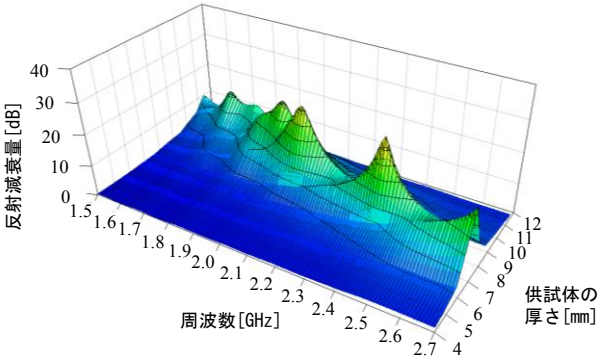
スラグの粉粒体とスラグモルタルで違いが生じるのは，スラグを保持する物質であるセメントとセメントペーストの複素誘電率が異なるためと考える。よって，スラグを保持する物質を変更したり，スラグモルタルの調合を変更したりする場合は，粒径の影響によるマッチング厚さの変化量が異なることに留意する必要がある。

スラグの粒径が 4～6 号のスラグモルタルの 2.45GHz における反射減衰量と供試体の厚さの関係を**図－12** に示す。2.45GHz では，反射減衰量の最大値は，粒径 4 号において 7.0mm 厚のとき 13.9dB，粒径 5 号において 7.6 mm 厚のとき 21.2dB，粒径 6 号において 7.7mm 厚のとき 15.8dB であり，粒径 5 号のスラグモルタルの反射減衰量が最も大きい。よって，スラグモルタルの厚さと粒径を変化させることで，反射減衰量を高めることができる。

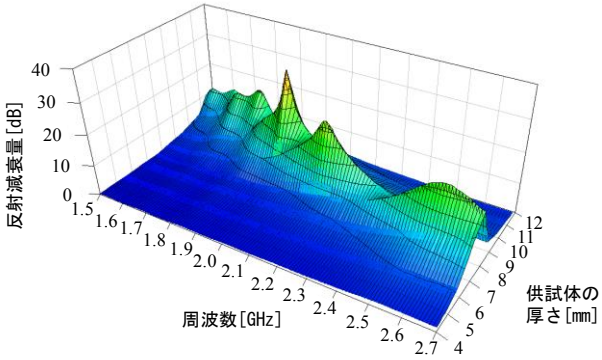
スラグの粒径が変化すると反射減衰量が変化するのは，スラグの粒径が変化することで，スラグモルタルの複素



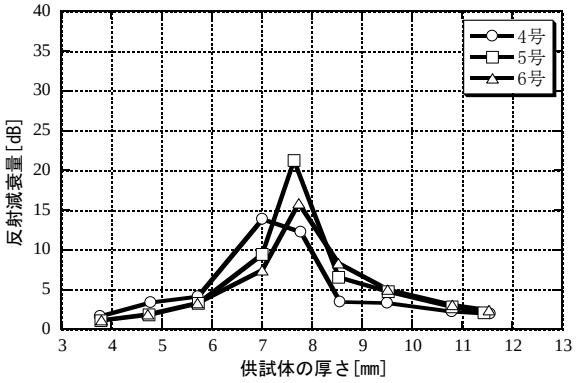
図－9 粒径 4 号のスラグモルタルにおける供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係



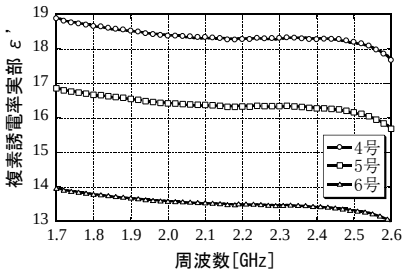
図－10 粒径 5 号のスラグモルタルにおける供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係



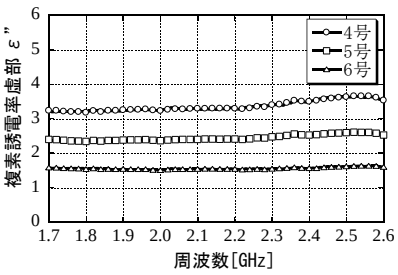
図－11 粒径 6 号のスラグモルタルにおける供試体の厚さと周波数，反射減衰量の関係



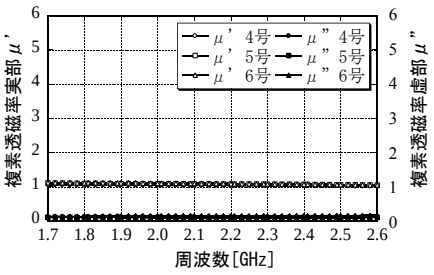
図－12 2.45GHz におけるスラグモルタルの反射減衰量と供試体の厚さの関係



図－13 4～6 号のスラグモルタルにおける ε'と周波数の関係



図－14 4～6 号のスラグモルタルにおける ε"と周波数の関係



図－15 4～6 号のスラグモルタルにおける μ', μ"と周波数の関係

誘電率か複素透磁率が変化するためと考える。供試体に入射する電波の自由空間における波長を λ_0[mm], 供試体の厚さを d[mm], 供試体に照射する電波の入射角度を θ としたとき，端面を反射板で短絡した 1 ポート測定における導波管内の供試体の反射係数 $\dot{S}$ は式(9)[6]により示される。なお，導波管の開口の長辺の長さを a[mm]とすると，θ は式(10)[7]により求められる。$\dot{S}$=0 のとき電波は供試体内で全吸収され，$\dot{S}$=1 のとき電波は供試体表面で全反射する。$\dot{S}$ を用いて，式(11)より反射減衰量 RL[dB]が求められる。よって，粒径による $\dot{\varepsilon}$ と $\dot{\mu}$ の変化を確認することで，スラグモルタルの電波吸収特性が評価できる。

$$\dot{S} = \frac{\dfrac{\dot{\mu}}{\sqrt{\dot{\varepsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}}\tanh\left(j\dfrac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\dot{\varepsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}\, d\right) - 1/\cos\theta}{\dfrac{\dot{\mu}}{\sqrt{\dot{\varepsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}}\tanh\left(j\dfrac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\dot{\varepsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}\, d\right) + 1/\cos\theta} \quad (9)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\lambda_0/2a) \quad (10)$$

$$RL = -20\log_{10}|\dot{S}|[\mathrm{dB}] \quad (11)$$

8. スラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率の測定

8.1 測定概要

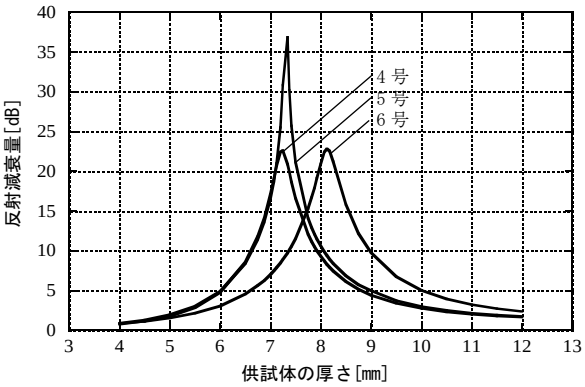
スラグの粒径がスラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率に及ぼす影響を検討する。供試体はスラグモルタルとする。骨材のスラグの粒径は 4 号～6 号をそれぞれ用い，供試体は 8mm の導波管に充填する。供試体の複素誘電率と複素透磁率を S パラメータ測定とニコルソン･ロス法により算出する。また，求めた複素誘電率と複素透磁率を用いてマッチング厚さとマッチング厚さのときの反射減衰量を算出し，7 章の結果と比較する。

8.2 測定結果と考察

スラグの粒径 4～6 号におけるスラグモルタルの複素誘電率又は複素透磁率と周波数の関係を図－13，図－14 および図－15 に示す。測定範囲内において，スラグの粒径が大きい程，スラグモルタルの ε' と ε''は大きくなり，μ' と μ''はほとんど変化がない。

7.3 複素誘電率と複素透磁率によるスラグモルタルの反射減衰量とマッチング厚さの計算

求めた複素誘電率と複素透磁率を用いて，式(9), 式(10), および式(11)により算出した 2.45GHz における導波管内のスラグモルタルの反射減衰量と供試体の厚さの関係を図－16 に示す。図－12 と図－16 は同様に，粒径が大きい程，マッチング厚さは薄くなり，最大の反射減衰量の大きさが 5 号，6 号，4 号の順になる。よって，複素誘電率と複素透磁率により反射減衰量を算出することで，スラグモルタルの電波吸収性能が推定でき，スラグモルタルの設計が容易になる。



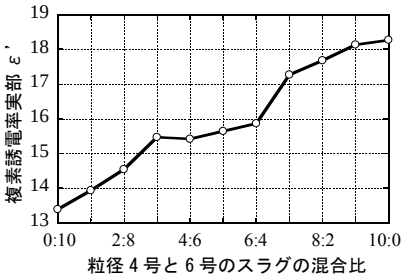
図－16 2.45GHz におけるスラグモルタルの反射減衰量と供試体の厚さの関係の計算値

9. 粒径 4 号と 6 号のスラグを混合したスラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率の測定

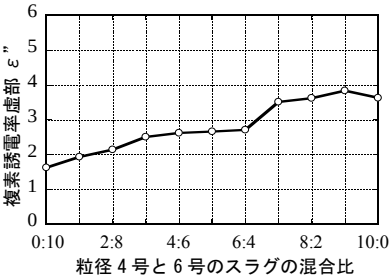
9.1 測定概要

粒径が変化すると，複素誘電率も変化する。複素誘電率を制御できれば，反射減衰量が向上できる。そこで，複素誘電率の異なる粒径 4 号と 6 号のスラグを混合し，混合比の変化がスラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率に及ぼす影響を確認する。求めた複素誘電率と複素透磁率を用いてマッチング厚さとマッチング厚さのときの反射減衰量を算出し，反射減衰量の向上を検討する。

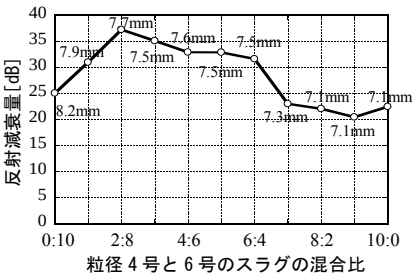
供試体はスラグモルタルとする。骨材のスラグは粒径 4 号のスラグを 1/10 ずつ粒径 6 号のスラグに置換して，粒径 4 号と 6 号のスラグがそれぞれ質量比 0:10～10:0 になるようにし，11 種類の供試体を作製する。供試体は 8mm の導波管に充填する。供試体の複素誘電率と複素透磁率を S パラメータ測定とニコルソン・ロス法により算出する。



図－17 スラグモルタルの
ε'とスラグの混合比の関係



図－18 スラグモルタルの
ε"とスラグの混合比の関係



図－19 2.45GHz のスラグモルタルの
反射減衰量と混合比の関係の計算値

9.2 測定結果と考察

2.45GHz における粒径 4 号と 6 号のスラグを混合したスラグモルタルの複素誘電率と混合比の関係を**図－17**, **図－18** に示す。なお，複素透磁率はほとんど変化が見られないため，図は省略する。

測定範囲内において，4 号の割合が大きい程，ε'と ε"は大きくなる。混合比を変えることで ε'と ε"が変化するため，混合比を変えることでマッチング厚さを調整し，反射減衰量を高めることができる。

9.3 複素誘電率と複素透磁率によるスラグモルタルの反射減衰量とマッチング厚さの計算

求めた複素誘電率と複素透磁率を用いて，式(9), 式(10)および式(11)により算出した 2.45GHz における導波管内のスラグモルタルがマッチング厚さのときの反射減衰量と混合比の関係を**図－19** に示す。なお，各点に示した数値は各混合比におけるマッチング厚さである。粒径 4 号の割合が大きい程，マッチング厚さは薄くなる。また，マッチング厚さのときの反射減衰量は粒径 4 号と 6 号の混合比が 2:8 のときが最も大きく，37.2dB である。

測定範囲内において，粒径 4 号と 6 号のスラグを混合することにより，粒径 4 号又は粒径 6 号のスラグのみを用いたスラグモルタルより高い反射減衰量を持つスラグモルタルが設計できた。反射減衰量を高めるために，粒径の異なるスラグを混合することは有効といえる。

10. まとめ

測定範囲内において，以下のことが分かった。

(1) スラグの粒径が大きい程，スラグモルタルのマッチング厚さは薄くなる。

(2) スラグモルタルの厚さと粒径を変化させることで，反射減衰量を高めることができる。

(3) スラグの粒径の変化によりスラグモルタルの反射減衰量は変化し，周波数 2.45GHz で，粒径 5 号の反射減衰量が最も高く，スラグモルタルの厚さが 7.6mm のとき 21.2dB である。

(4) スラグの粒径が大きくなる程，スラグモルタルの複素誘電率実部 ε'と虚部 ε''は大きい。複素透磁率実部 μ'と虚部 μ''はほとんど変化がない。

(5) 複素誘電率と複素透磁率により反射減衰量を算出することで，スラグモルタルの電波吸収性能が推定でき，スラグモルタルの設計が容易になる。

(6) 粒径 4 号と 6 号のスラグを混合したスラグモルタルは混合比が 2:8 のとき，マッチング厚さのときの反射減衰量が最も大きく，37.2dB である。反射減衰量を高めるために，粒径の異なるスラグを混合することは有効といえる。

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 JP16K18183, JP16K06569 の助成・支援を受けました。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, Vol.38, No.1, pp.657-662, 2016.6

3) 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電波遮蔽材に関する研究,日本建築学会構造系論文集，Vol.82，No.731，pp.1-10，2017.1

4) 株式会社星野産商:電気炉酸化スラグ骨材 CK ハイパー，（http://www.hoshino-i.com/recycle/CKHG.pdf）

5) 平賀貞太郎，奥谷克伸，尾島輝彦：フェライト，丸善株式会社，p.13，1986.11

6) 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会:電磁波の吸収と遮蔽,オーム社，p.49，2014.5

7) 安斎弘樹，内藤喜之，水本哲弥：ピラミッド型電波吸収体の斜入射特性の検討，電子情報通信学会技術研究報告書，Vol.94，No.229，pp.9-16，1994.9