

論文 電気炉酸化スラグを骨材として用いた融雪用発熱モルタルブロックの含水が電波吸収性能に及ぼす影響

伊藤 洋介*1・河辺 伸二*2・田口 陽貴*3

要旨：電波を吸収して熱に変換する電気炉酸化スラグを骨材とした融雪用発熱モルタルブロックの研究を行ってきた。発熱モルタルブロックは雨水などの含水により電波吸収性能が低下し、十分な発熱性能が得られなくなる懸念がある。本研究では、発熱モルタルブロックの電波吸収材層及び基材層の含水が電波吸収性能に及ぼす影響、発熱モルタルブロックの屋外暴露が含水率に及ぼす影響及び含水した発熱モルタルブロックへの電波の照射が含水率に及ぼす影響を明らかにした。これにより、含水の影響を受けても十分な発熱性能が得られる電波吸収性能を持つ発熱モルタルブロックの設計を行った。

キーワード：電気炉酸化スラグ, モルタル, 複素比誘電率, 含水率, 2層型電波吸収体, 反射減衰量

1. はじめに

降雪地域における除雪作業は多大な労力を要し、特に高齢者にとって重労働である。各住宅の玄関前や駐車場は住人が自ら除雪しなければならず、近年、急速に進む過疎・高齢化により、除雪が困難となっている。

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。電熱線は人や自動車などの荷重による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。散水は地下水の汲み上げによる地盤沈下や地下水に含まれる鉱物による路面の変色などの問題がある。

筆者らは、産業副産物である電気炉酸化スラグ(以下、スラグとする)が、電波を吸収して熱に変換する性質を利用し、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の研究を行ってきた^{1),2)}。発熱モルタルブロックは a)電波吸収性能を持たない基材層, b)電波吸収性能を持つ電波吸収材層, c)電波を反射する電波遮蔽材層からなる。基材層には山砂を骨材としたモルタル(以下、砂モルタルとする)が用いられる。電波吸収材層にはスラグを骨材としたモルタル(以下、スラグモルタルとする)が用いられる。電波遮蔽材層には内部に欠損金網³⁾を配置した砂モルタルが用いられる。融雪を行う際は、電波発振器から発振される電波を発熱モルタルブロックの下方から照射する。電波の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。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

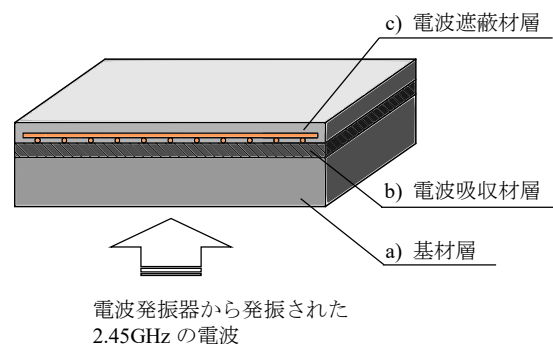


図-1 融雪用発熱モルタルブロック^{1),2)}

と複素比透磁率に影響を受ける⁴⁾。融雪や降雨などによる含水により発熱モルタルブロックの複素比誘電率と複素比透磁率が変化する場合、電波吸収・発熱性能が発熱モルタルブロックの設計時から変化する可能性がある。筆者らは、スラグモルタルが含水しても、シラン系吸水防止材をスラグモルタルの表面に塗布することにより、融雪に十分な電波吸収性能が確保できることを示した⁵⁾。しかし、発熱モルタルブロックの発熱量は、電波吸収材層に用いられるスラグモルタルの他、基材層である砂モルタルにも影響を受ける⁶⁾。そのため、基材層の含水が電波吸収材層の電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本研究は2層型電波吸収体の設計理論を用いて、1)発熱モルタルブロックの電波吸収材層及び基材層の含水が電波吸収性能に及ぼす影響、2)屋外暴露が発熱モルタルブロックの含水率に及ぼす影響、及び3)電波の照射が含水した発熱モルタルブロックの含水率に及ぼす影響を明らかにする。これにより、含水の影響を受けても十分な発熱性能が得られる電波吸収性能を持つ発熱モルタルブロックの設計を行う。

*1 名古屋工業大学大学院 助教 博(工)(正会員)
 *2 名古屋工業大学大学院 教授 工博(正会員)
 *3 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻(学生会員)

2. 電波吸収の理論

スラグモルタルの電波吸収性能を示す反射減衰量は15dB以上であれば、十分な発熱性能を確保できる⁶⁾。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、その複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_r$ 、複素比透磁率 $\dot{\mu}_r$ はそれぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

$$\dot{\mu}_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (2)$$

ここで、 ϵ_r' と ϵ_r'' は複素比誘電率実部と虚部、 μ_r' と μ_r'' は複素比透磁率実部と虚部を表し、 j は虚数単位である。

発熱モルタルブロックを、図-2に示すように電波吸収材層と基材層及び電波遮蔽材層により構成される2層型電波吸収体とみなす。1層目の複素比誘電率と複素比透磁率をそれぞれ $\dot{\epsilon}_{r1}$ と $\dot{\mu}_{r1}$ 、厚さを d_1 とすると、1層目の規格化入力インピーダンス \dot{Z}_1 は式(3)⁷⁾で表される。

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r1}}{\dot{\epsilon}_{r1}}} \tanh\left(j\frac{2\pi d_1}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r1}\dot{\mu}_{r1}}\right) \quad (3)$$

ここで、 λ は電波吸収体に照射された電波の波長である。

同様に、2層目の複素比誘電率と複素比透磁率をそれぞれ $\dot{\epsilon}_{r2}$ と $\dot{\mu}_{r2}$ 、厚さを d_2 とすると、2層目の規格化入力インピーダンス \dot{Z}_2 は式(4)⁷⁾で表される。また、 \dot{Z}_1 は式(5)⁷⁾で表される。

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r2}}{\dot{\epsilon}_{r2}}} \tanh\left(j\frac{2\pi d_2}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2}\dot{\mu}_{r2}} + \theta\right) \quad (4)$$

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r2}}{\dot{\epsilon}_{r2}}} \tanh\theta \quad (5)$$

式(4)を式(3)と式(5)で整理すると、 \dot{Z}_2 は式(6)のように表される。

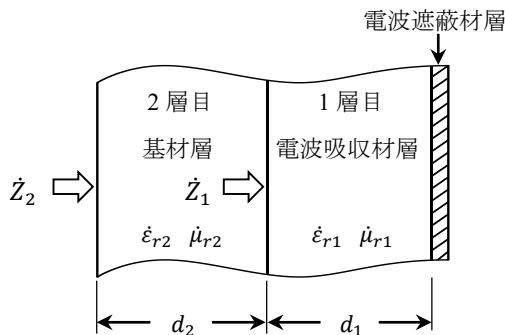


図-2 2層型電波吸収体

$$\dot{Z}_2 = \frac{A_1 \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r1}}{\dot{\epsilon}_{r1}}} + A_2 \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r2}}{\dot{\epsilon}_{r2}}}}{A_1 A_2 \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r1}}{\dot{\epsilon}_{r1}}} \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{r2}}{\dot{\mu}_{r2}}} + 1} \quad (6)$$

ここで、

$$A_1 = \tanh\left(j\frac{2\pi d_1}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r1}\dot{\mu}_{r1}}\right) \quad (7)$$

$$A_2 = \tanh\left(j\frac{2\pi d_2}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2}\dot{\mu}_{r2}}\right) \quad (8)$$

導出した式(6)~(8)を用いて、式(9)⁷⁾により反射係数 S が、式(10)⁷⁾により反射減衰量 RL が導出される。

$$S = \frac{\dot{Z}_2 - 1}{\dot{Z}_2 + 1} \quad (9)$$

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

以上より、発熱モルタルブロックのスラグモルタルと砂モルタルの複素比誘電率及び複素比透磁率から、反射減衰量を算定する。

3. 使用材料と供試体

3.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³）を、細骨材には愛知県豊田市産の山砂（表乾密度2.55g/cm³、粗粒率2.80、吸水率1.58）を、電気炉酸化スラグ（絶乾密度3.52g/cm³、吸水率1.30）⁸⁾には粒径4号（1.2~2.5mm）と6号（0.3~0.6mm）を使用する。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-1⁸⁾に示す。

3.2 供試体

(1) 導波管供試体

図-3に示すスラグモルタル及び砂モルタルの導波管供試体を用いて、各含水率における複素比誘電率及び複素比透磁率を測定する。導波管供試体は、金属製の導波管内にモルタルを打設し、硬化後、モルタルを導波管の厚さに研磨して作製する。スラグモルタルは厚さ8mm、砂モルタルは厚さ10mmの導波管を用い、打設時は導波管の背面に金属板をネジ留めしてモルタルを受ける。調合を表-2と表-3に示す。

導波管供試体は打設後、24時間気中養生し、水温20±3°Cの水中に浸せきして、28日間水中養生を行う。その

表-1 電気炉酸化スラグの成分（質量比）⁸⁾

組成式	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	合計
平均値	19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.40	1.97	0.42	0.33	97.77

後、絶乾となるまで 100°Cで乾燥し、表面のごみ、ほこりなどの付着物を除去して、吸水防止材を刷毛塗りで供試体の両面に塗布する。吸水防止材は使用実績⁹⁾のあるシラン系吸水防止材を使用する。主な成分を表-4に示す。なお、比較対象として吸水防止材を塗布しない砂モルタルも併せて作製する。

(2) 発熱モルタルブロック供試体

導波管供試体と同じ調合のスラグモルタルと砂モルタルを用いて、図-1に示す3層の発熱モルタルブロック(300mm×300mm)を作製する。発熱モルタルブロックを絶乾状態にした後、吸水防止材を電波遮蔽材層の上面を除く表面に塗布する。既往の研究⁹⁾より、電波吸収材層と電波遮蔽材層の厚さは8mmとする。式(6)~(10)より、基材層と電波吸収材層の厚さは発熱モルタルブロックの反射減衰量に影響を及ぼし、どちらかの厚さを変更することで反射減衰量は任意に調整できる。そこで、本研究では後述する「砂モルタルの厚さ実験」の測定結果から、基材層の厚さで発熱モルタルブロックの反射減衰量を調整し、測定に適した基材層の厚さを決定する。

4. 実験方法

4.1 砂モルタルの厚さの影響に関する実験

導波管供試体を用いて、基材層の砂モルタルの厚さが発熱モルタルブロックの反射減衰量に及ぼす影響を明らかにする。また、発熱モルタルブロック供試体における基材層の砂モルタルの厚さを決定する。

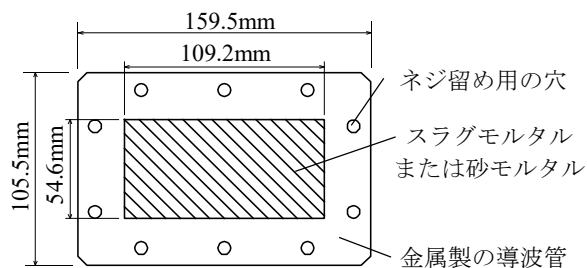


図-3 導波管供試体

表-2 スラグモルタルの調合 (質量比)

セメント	スラグ	水
100	150	45.0

表-3 砂モルタルの調合 (質量比)

セメント	山砂	水
100	300	45.0

表-4 吸水防止材の種類および分類

分類	主成分	備考
シラン系	シランオリゴマー	3回塗布

絶乾状態のスラグモルタルと砂モルタルの複素比誘電率及び複素比透磁率を、方形導波管によるモルタルのSパラメータ測定法¹⁾及びソフトウェア N1500A 材料測定スイート (KEYSIGHT 製) によって測定し、得られた値から式(6)~(10)を用いて発熱モルタルブロックの反射減衰量を算定する。発熱モルタルブロックの電波吸収材層であるスラグモルタルの厚さ d_1 は 8mm とし、基材層である砂モルタルの厚さ d_2 は 1~100mm まで 1mm ずつ変化させる。

4.2 砂モルタルの含水の影響に関する実験

導波管供試体を用いて、電波吸収材層であるスラグモルタルと基材層である砂モルタルの含水が電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにする。

供試体を水中に浸せし、24時間吸水させる。その後、絶乾状態になるまで乾燥する過程で質量を測定し、JIS A 1476: 2016 (建築材料の含水率測定方法) により 24時間吸水後の含水率を算出する。また、質量を測定すると同時に、供試体の複素比誘電率及び複素比透磁率を測定する。測定周波数帯は 2.00~2.50GHz とする。複素比誘電率及び複素比透磁率の測定値と式(6)~(10)より、スラグモルタルと砂モルタルを組み合わせた2層型電波吸収体について反射減衰量を算定して、電波吸収性能を評価する。算定に用いるスラグモルタルと砂モルタルの厚さは発熱モルタルブロック供試体に合わせる。

基材層への吸水防止材の塗布が発熱モルタルブロックの電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにするため、1) 絶乾状態のスラグモルタルと吸水防止材を塗布しない含水状態の砂モルタルの2層型電波吸収体、2) 絶乾状態のスラグモルタルと吸水防止材を塗布した含水状態の砂モルタルの2層型電波吸収体について算定する。また、発熱モルタルブロック供試体の構成と同様の3) 吸水防止材を塗布した含水状態のスラグモルタルと砂モルタルの2層型電波吸収体について算定する。

4.3 発熱モルタルブロックの屋外暴露実験

発熱モルタルブロック供試体を用いて、屋外暴露状態における発熱モルタルブロックの含水率の変化を明らかにする。供試体は名古屋工業大学構内 (愛知県名古屋市) に暴露する。暴露状況を写真-1に示す。設置台は



写真-1 発熱モルタルブロックの暴露状況

木製で、発熱モルタルブロックの設置環境²⁾を想定し、地面から縁を切るため、発熱モルタルブロックをコンクリート舗装の地面から約40mmの高さに設置する。

屋外暴露は2018年10月18日から開始し、約1週間に1回の頻度で含水率の測定を行う。暴露期間の一部では、1日1回の測定を行い、含水率の短期的な変化を把握する。暴露箇所に最も近いアメダス観測所で測定された、暴露期間中の日平均気温・降水量¹⁰⁾を図-4に示す。

4.4 発熱モルタルブロックの発熱実験

発熱モルタルブロックの含水率は降雨や降雪によって上昇する。一方、発熱モルタルブロックに電波を照射した場合、照射された電波や発生した熱の影響によって含水率が低下する可能性もある。そこで、発熱モルタルブロック供試体に電波を照射することで、含水した発熱モルタルブロックへの電波の照射が含水率に及ぼす影響を明らかにする。

既往の研究⁹⁾で用いられた図-5に示す長さ2400mm、内寸46.8×96.8mm、上面に長さ30mm、幅3mmのスロットを10mm間隔で設けた漏洩導波管を用いて、図-6に示す発熱測定装置を構築する。最大限吸水した発熱モルタルブロックに漏洩導波管のスロットを介して、電波発振器から発振された出力1kW、周波数2.45GHzの電波を照射する。照射されず漏洩導波管に残った電波は、末端部のダミーロード（導波管形無反射終端器）で吸収し、反射による定在波の発生を防ぐ⁹⁾。漏洩導波管の上には8体の発熱モルタルブロックを並べて設置する。ただし、発熱モルタルブロックの基材層が漏洩導波管のスロットの電波漏洩量に与える影響⁹⁾を考慮し、電波に対して影響が小さい木材で、漏洩導波管と発熱モルタルブ

ックとの間に60mmの間隔を設ける。電波照射時間は30時間とし、適宜発熱モルタルブロックの質量を測定する。この際、比較供試体として気中に静置した発熱モルタルブロック供試体の質量変化を併せて計測する。また、赤外線サーモグラフィカメラ（日本アビオニクス製R500EX）を用いて、発熱モルタルブロック上面の中心点の上昇温度を計測し、発熱の参考データを得る。

5. 測定結果と考察

5.1 砂モルタルの厚さの影響に関する実験

周波数2.45GHzにおける、発熱モルタルブロックの反射減衰量 RL と基材層である砂モルタルの厚さの関係を図-7(1)に示す。砂モルタルの厚さが27mm、56mm、86mmのときに顕著に電波を吸収する周波数帯（以下、ピークとする）が存在する。電波吸収材層であるスラグモルタルは含水すると、反射減衰量のピークが低周波側に推移する⁵⁾。よって、基材層の厚さは発熱モルタルブロックの含水によるピークの低周波への推移やインターロッキングブロックの一般的な厚さを考慮し、絶乾状態においてピークより高周波側で反射減衰量が15dBを少し上回る54mmとする。

5.2 砂モルタルの含水の影響に関する実験

(1) 吸水防止材を塗布しない砂モルタル

各含水率における2層型電波吸収体の反射減衰量の算定値と周波数の関係を図-7(2)に示す。測定範囲内において、吸水防止材を塗布しない砂モルタルは最大9.05%まで含水する。砂モルタルの含水率が2.74%以上になると、周波数2.45GHzにおいて、反射減衰量が15dBを下回る。

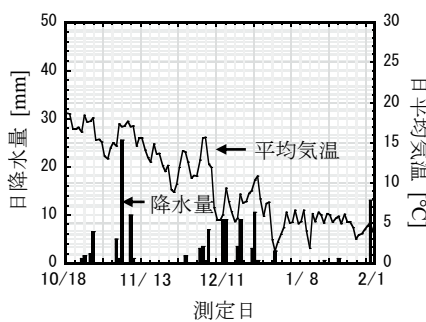


図-4 気象データ
(気象庁提供アメダス観測データ、名古屋)

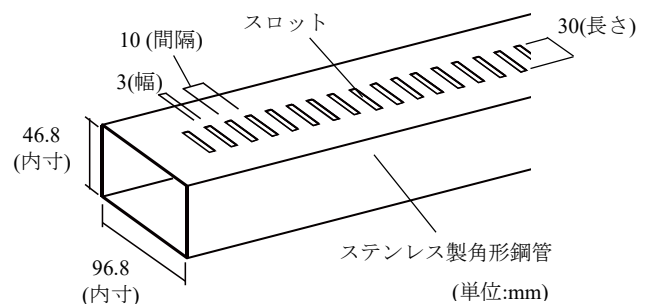


図-5 漏洩導波管の形状

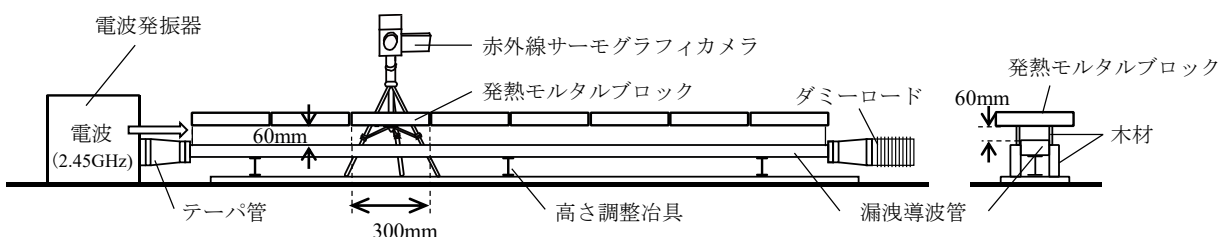


図-6 発熱測定装置の漏洩導波管軸方向断面（左）と直交軸方向断面（右）

(2) 吸水防止材塗布の砂モルタル

各含水率における2層型電波吸収体の反射減衰量の算定値と周波数の関係を図-7(3)に示す。測定範囲内において、吸水防止材を塗布した砂モルタルは最大2.69%まで含水する。最大の含水率の場合でも2.45GHzにおいて、反射減衰量は15dB以上であり、十分な電波吸収性能を確保できる。よって、前項及び本項より、基材層の砂モルタルに吸水防止材を塗布することで、基材層の含水による電波吸収性能の低下を抑制できる。

(3) 吸水防止材塗布のスラグモルタルと砂モルタル

砂モルタルの複素比誘電率と含水率の関係及び近似直線を図-7(4)に示す。近似直線から各含水率における複素比誘電率を推定し、推定した複素比誘電率から反射減衰量を算定する。スラグモルタルについても同様の推定・算定を行う。これら算定値を用いて、実際の発熱モルタルブロック供試体の含水率変化を想定したスラグモルタルと砂モルタルの含水率が同様に変化する場合の、各含水率における2層型電波吸収体の反射減衰量と周波数の関係を図-7(5)に示す。なお、複素比透磁率は実部、虚部ともにほぼ変化しないため一定とする。

図-7(5)より、2.45GHzにおいて、反射減衰量が15dB以上となる含水率の範囲は0.00~1.20%であり、1.60%になると15dBを下回る。よって、1.20%を超えて含水する

と、発熱モルタルブロック供試体は十分な電波吸収性能を確保できない。

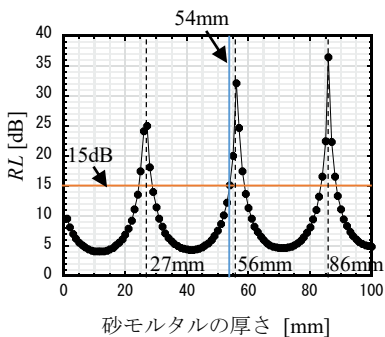
5.3 発熱モルタルブロックの暴露実験

発熱モルタルブロック供試体の含水率と暴露日数の関係を図-7(6)に示す。供試体はN=3で測定し、それぞれa), b), c)とする。測定期間内において、含水率は常に1.02%を下回っている。また、最初の含水率のピーク後における含水率の最大値と最小値の差は0.77%である。前節より1.20%を超えて含水すると、発熱モルタルブロックは十分な電波吸収性能を確保できないが、暴露実験における最大の含水率が1.20%以下であるため、本研究で設計した発熱モルタルブロック供試体は含水の影響を受けても十分な発熱性能が得られる電波吸収性能を持つ。

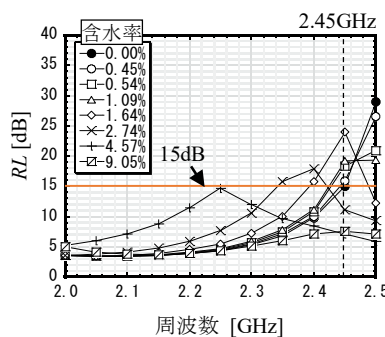
5.4 発熱モルタルブロックの発熱実験

発熱モルタルブロック上面の中心の上昇温度と電波照射時間の関係を図-8(1)に、電波照射30時間後の熱画像を図-8(2)に示す。なお、発熱モルタルブロックの初期温度は13.2°Cである。電波照射8~30時間に渡って発熱モルタルブロックの表面における上昇温度は20°C程度となった。

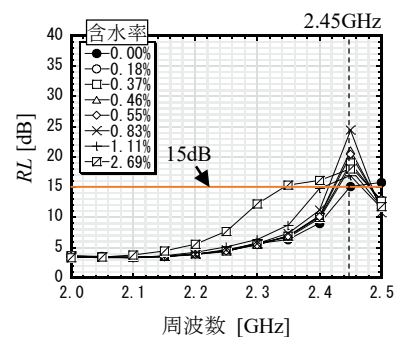
発熱モルタルブロックの含水率及び電波による含水率の減少量と電波照射時間の関係を図-8(3)に示す。なお、電波による含水率の減少量は、自然乾燥による含水率変化の



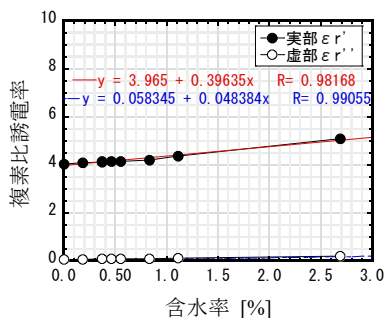
(1) 2.45GHzにおけるRLと砂モルタルの厚さの関係



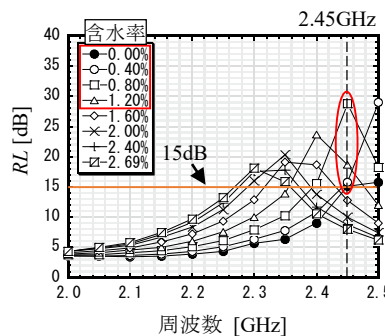
(2) 各含水率におけるRLと周波数の関係(吸水防止材を塗布しない砂モルタル, 厚さ54mm)



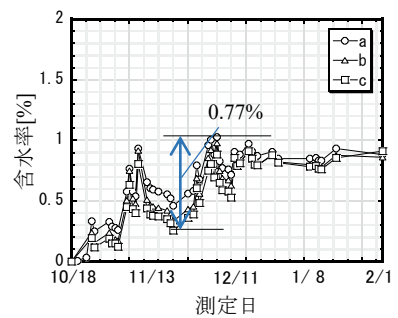
(3) 各含水率におけるRLと周波数の関係(吸水防止材塗布の砂モルタル, 厚さ54mm)



(4) 砂モルタルの複素比誘電率実部及び虚部と周波数の関係



(5) 各含水率におけるRLと周波数の関係(スラグモルタル及び砂モルタルが含水, 砂モルタルの厚さ54mm)



(6) 屋外暴露した発熱モルタルブロックの含水率の変化

図-7 発熱モルタルブロックの含水による各物性の変化

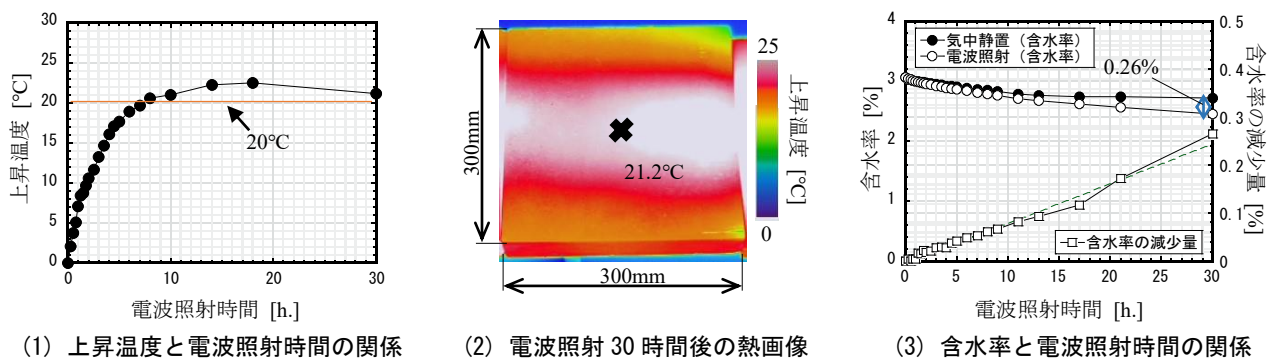


図-8 発熱モルタルブロックへの電波照射による各物性の変化

影響を取り除き、電波の照射による含水変化の影響のみを抽出するため、電波を照射した発熱モルタルブロックの含水率の変化分から、気中に静置した発熱モルタルブロックの含水率の変化分を差し引いた値である。最大限吸水した発熱モルタルブロック供試体は 30 時間の電波照射で、含水率の減少量は 0.26%となる。また、含水率の減少量と電波照射時間についての近似線は、ほぼ比例関係にあることが分かる。

以上より、電波の照射は発熱モルタルブロックの含水率を低下させる。よって、仮に本研究において設計した発熱モルタルブロック供試体の含水率が 1.20%を超えた場合でも、電波を照射することで含水率の減少を促進できる。

6. 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) 発熱モルタルブロック供試体として、電波遮蔽材層 8mm, 電波吸収材層 8mm, 基材層 54mm で吸水防止材を電波遮蔽材層の上面を除く表面に塗布した発熱モルタルブロック供試体を設計した。
- 2) 基材層の砂モルタルに吸水防止材を塗布することで、基材層の含水による電波吸収性能の低下を抑制できる。
- 3) 1.20%を超えて含水すると、発熱モルタルブロック供試体は十分な電波吸収性能を確保できない。
- 4) 暴露実験における最大の含水率が 1.20%以下であるため、本研究で設計した発熱モルタルブロック供試体は含水の影響を受けても十分な発熱性能が得られる電波吸収性能を持つ。
- 5) 仮に本研究において設計した発熱モルタルブロック供試体の含水率が 1.20%を超えた場合でも、電波を照射することで含水率の減少を促進できる。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金研究助成金、JSPS 科研費 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及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) Ito, Y. and Kawabe, S.: DEVELOPMENT OF A HEATING MORTAR BLOCK SYSTEM FOR SNOW MELTING THROUGH QUASI MICROWAVES, SynerCrete'18, Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Vol. 1, pp.147-152, Oct.2018
- 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) 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) 田口陽貴, 伊藤洋介, 河辺伸二, 安井秀幸: 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, コンクリート工学年次論文集, 第 40 巻, No.1, pp.537-542, 2018.7
- 6) Ito, Y., Kawabe, S. and Ohba, S.: Effects of Thickness of the Base Layer on the Electromagnetic Absorption in Heating Mortar Blocks for Snow Melting through Quasi Microwave, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.170-178, Apr.2018
- 7) 内藤喜之: 電波吸収体, オーム社, 1987.4
- 8) 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
- 9) 伊藤洋介, 河辺伸二, 大羽慧, 安齋弘樹: 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の漏洩導波管に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No. 737, pp.969-978, 2017.7
- 10) 気象庁ホームページ: https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_s1.php?prec_no=51&block_no=47636&year=2018&month=12&day=&view=p1