

論文 発熱モルタルブロックの基材層の厚さがスロットアンテナの電波漏洩特性に及ぼす影響

安井 秀幸*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・大羽 慧*4

要旨：電波を熱に変換して融雪する発熱モルタルブロックは、川砂を骨材としたモルタル（以下、砂モルタルとする）により構成される基材層の部分で、電波を供給する漏洩導波管のスロットと接している。スロットは発熱モルタルブロックの有無で電波漏洩特性が変化する。スロット長さとスロットに密着する砂モルタル厚さを変化させ、スロットからの電波漏洩量の変化を測定した。本測定により、発熱モルタルブロックの砂モルタル厚さが、発熱モルタルブロックに密着するスロットの電波漏洩量に及ぼす影響を明らかにした。これにより、電波が均一に漏洩する漏洩導波管のスロット設計のための基礎データを得た。

キーワード：モルタル、漏洩導波管、比誘電率、実効誘電率、スロットアンテナ、電波、漏洩

1. はじめに

降雪地域において、除雪作業は多大な労力と時間を要する。特に、高齢者には酷な作業であり、外出行動を妨げる要因の一つである。融雪システムや融雪剤を用いれば除雪作業の労力を軽減できる。しかし、従来用いられる電熱線による融雪システムは立ち上がりの遅さなどに問題があり、散水による融雪システムは地盤沈下、融雪剤の使用は塩害を招くなどの問題がある。

著者ら¹⁾⁵⁾は、従来の融雪装置の問題を解決するため、**図-1**に示す準マイクロ波を用いた融雪用発熱モルタルブロックシステムについて研究してきた。発振器から発振された周波数2.45GHzの電波は、漏洩導波管の上部に設けられたスロットから漏洩し、発熱モルタルブロックに照射され、電波が熱に変換されることで表層を加熱して融雪する。これにより迅速に融雪が可能となる。

融雪用発熱モルタルブロックシステムの断面を**図-2**に示す。発熱モルタルブロックはa)電波遮蔽材層、b)電波吸収材層、c)基材層の三層で構成する。下方から照射された電波は、電波吸収性能をもたない基材層を透過し、電波吸収材層に吸収され、熱に変換される。電波遮蔽材層は外部への電波漏洩を防ぐ。基材層には川砂を骨材としたモルタル（以下、砂モルタルとする）を、電波吸収材層には電波吸収性能を有する産業副産物の電気炉酸化スラグ（以下、スラグとする）を骨材としたモルタル（以下、スラグモルタルとする）を、電波遮蔽材層には電波遮蔽性能を持つ鋼繊維²⁾入りのモルタルを用いる。

漏洩導波管はスロットアンテナの技術を利用³⁾している。最も電波漏洩量が多くなるスロット長さを基準とし、要求される電波漏洩性能になるスロット長さを設計する。本測定範囲内において、最も電波漏洩量が多くなる

スロット長さをマッチングスロット長さとする。既往の研究³⁾では、発熱モルタルブロックを設置しない状態で均一に電波を漏洩できる漏洩導波管が設計された。しかし、密着して発熱モルタルブロックを設置すると、発振器付近のスロットから多くの電波を漏洩し、発熱モルタルブロックを均一に温められない問題³⁾がある。

本研究では、スロットに砂モルタル、又は砂モルタルとスラグモルタル及び電波を遮蔽する金属の反射板を設置して、スロットからの電波漏洩量をそれぞれ比較する。これにより、発熱モルタルブロックの基材層の厚さ変化と電波吸収材層の存在有無がスロットからの電波漏洩量に及ぼす影響を明らかにし、電波漏洩量の変化の最小化を検討する。本研究のデータは発熱モルタルブロックを設置した状態で電波を均一に漏洩する漏洩導波管のスロット長さを設計するための基礎データとなる。

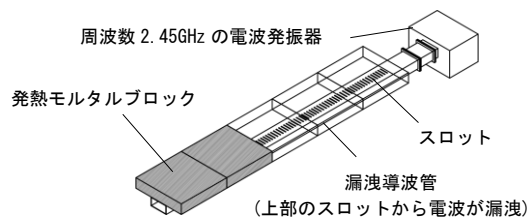


図-1 融雪用発熱モルタルブロックシステム

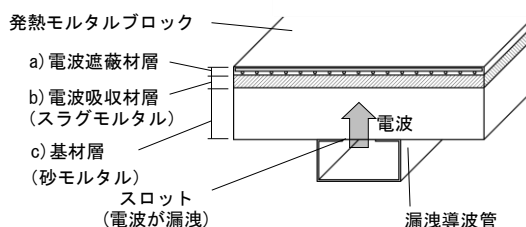


図-2 融雪用発熱モルタルブロックシステムの断面

*1 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 (学生会員)

*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 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻

2. 誘電体とスロットアンテナ

誘電体はアンテナの共振周波数に影響を及ぼす⁶⁾。発熱モルタルブロックは誘電体で、漏洩導波管のスロットはアンテナである。このため、既往の研究³⁾では発熱モルタルブロックがスロットの共振周波数に影響を及ぼして漏洩導波管の電波漏洩性能が変化したと考える。

誘電体中の電波の波長を λ_m とすると、誘電体中のマッチングスロット長さ L_m は式(1)で近似される³⁾。

$$L_m = \frac{\lambda_m}{2} \quad (1)$$

誘電体中の電波の速度は、空気中の電波の速度よりも遅くなる。誘電体の比誘電率を ϵ_r 、空気中の電波の速度(光速)を c とした時、誘電体中の電波の速度 v_m は式(2)⁷⁾によって示される。

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

これに伴って、誘電体中の電波の波長も短くなる。空気中の電波の波長を λ_0 とした時、誘電体中の電波の波長 λ_m は式(3)⁷⁾で示される。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

式(1)に式(3)を代入すると式(4)となり、 L_m はスロットが誘電体中に存在する場合、 ϵ_r の影響を受けると分かる。

$$L_m = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

しかし、漏洩導波管のスロットは発熱モルタルブロック中に存在せず、基材層の砂モルタルが片側に密着して存在する。よって、発熱モルタルブロックがスロットに及ぼす影響を検討する場合、式(4)の ϵ_r は砂モルタルの比誘電率ではなく、片側のみに砂モルタルが密着していることを考慮して算出した実効誘電率 ϵ_{eff} に置き換えて計算する。実効誘電率 ϵ_{eff} は、空気の比誘電率を ϵ_0 とすると、誘電体の厚さ t_n が無限に厚い場合、式(5)で近似できる⁶⁾。

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_r}{2} \quad (5)$$

3. 測定材料

3.1 スロット板

漏洩導波管のスロットに対応する図-3に示すスロット板は使用実績³⁾のある漏洩導波管と同様の厚さ1.6mmの鉄の金属板を用いる。漏洩導波管のスロットは、漏洩導波管の表面を流れる電流を妨げるように配置する必

要³⁾があるため、スロット板には同様に電流を妨げるよう、方形導波管の開口部の長手方向に平行なスロットを設ける。既往の研究³⁾より、スロットの幅は電波の漏洩にほとんど寄与しないと分かっている。そこで、既往の研究と同様、スロットの幅は最も安価に加工できる幅3mmとする。スロット長さ L は測定ごと設定する。

3.2 砂モルタル

本研究で用いる砂モルタルの調合⁴⁾を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントとする。吸水による砂モルタルの比誘電率の変化を防ぐため、防水剤をセメントに対して3%添加する。防水剤の主な成分⁴⁾を表-2に示す。次に、砂モルタル供試体の作製方法を図-4に示す。固定用の穴を介して導波管と金属板をねじで接続し、導波管内に砂モルタルを打設して砂モルタル供試体とする。砂モルタル供試体は砂モルタル硬化後に金属板を取り外し、表面を研磨して厚さを一定にする。気中養生1日、水中養生7日の後、含水が電波吸収特性に与える影響を等しくするため、100℃の恒温恒湿器で24時間乾燥する。周波数2.45GHzにおける砂モルタルの比誘電率は4.15である。

3.3 スラグモルタル

本研究で用いるスラグモルタルの調合⁵⁾を表-3に示す。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⁵⁾で表-4に

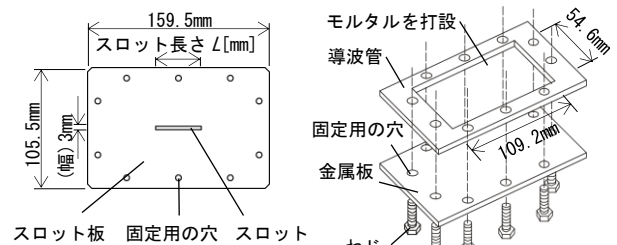


図-3 スロット板

図-4 供試体の作製方法

表-1 砂モルタルの調合(質量比)

セメント	川砂	水	防水剤
100	300	45.0	3.00

表-2 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-3 スラグモルタルの調合(質量比)

セメント	スラグ	水	防水剤
100	150	45.0	3.00

表-4 スラグの成分(質量比)

	化学組成(%)											
	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	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	0.030	97.77
標準偏差	3.38	2.99	0.72	1.44	4.91	8.50	3.08	0.37	0.12	0.065	0.020	0.59

示す。なお、スラグの粒径は 0.3mm 以下とする。吸水による電波吸収性能の変化を防ぐため、防水剤をセメントに対して 3%添加する。砂モルタル供試体と同様に導波管内にスラグモルタルを打設してスラグモルタル供試体とする。スラグモルタル供試体の厚さは、発熱モルタルブロックへの採用実績²⁾がある 8mm とする。スラグモルタル供試体はスラグモルタル硬化後に表面を研磨して厚さを一定にする。気中養生 1 日、水中養生 5 日の後、含水が電波吸収特性に与える影響を等しくするため、100℃の恒温恒湿器で 24 時間乾燥する。周波数 2.45GHz におけるスラグモルタルの比誘電率は 12.4 である。

4. S パラメータ測定法⁸⁾による電波漏洩量の測定方法

方形導波管によるスラグモルタルの S パラメータ測定法¹⁾⁵⁾によって測定した反射減衰量を用いて、スロットの電波漏洩特性を評価する。電波漏洩量の測定装置を図-5 に示す。本研究ではネットワークアナライザ (KEYSIGHT 製 E5063A) のポート 1 のみを使用する。ポート 1 から周波数 1.7~2.5GHz の電波を送信し、同軸ケーブル、同軸導波管変換器、方形導波管を介してスロット板に照射する。同軸導波管変換器と方形導波管は測定する周波数に対応した WRJ-2 規格(内寸が幅 109.22mm×高さ 54.61mm)に準ずる。方形導波管の開口部にそれぞれ同軸導波管変換器とスロット板を固定用の穴を介してねじで連結する。スロット板に照射された電波は反射、またはスロットから漏洩する。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} が算出される。電波の半波長より長い方形導波管を介することで、測定誤差の低減を図る。ネットワークアナライザのポート 1 における入射波電圧を α_1 、反射波電圧を β_1 とすると、反射係数 S_{11} は、式(6)で示される。

$$S_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (6)$$

ベクトル量である S_{11} をスカラー量の反射係数 $|S_{11}|$ に変換¹⁾⁵⁾し、式(7)から反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ (以下、電波漏洩量とする)を算出する。

$$RL = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (7)$$

5. 砂モルタルの有無が電波漏洩特性に及ぼす影響

5.1 測定条件

スロット板上面に砂モルタルを設置した時と、設置しない時のスロットからの電波漏洩量を比較する。図-5 のスロット板上面に砂モルタルを設置した時の電波漏洩量の測定装置の上部を図-6 に示す。スロット長さは 10mm ごと 10~90mm で変化させる。砂モルタル厚さは 30mm とする。スロット板と砂モルタル供試体は方形導

波管の開口部に固定用の穴を介してねじで連結する。スロットから漏洩した電波は砂モルタル供試体を介して外部に放射される。

5.2 測定結果と考察

周波数 2.45GHz における電波漏洩量とスロット長さ L の関係を図-7 に示す。測定範囲内において砂モルタルを設置しない時、マッチングスロット長さは 60mm であった。式(4)より、周波数 2.45GHz における空気中のマッチングスロット長さの理論値は測定結果と同様に約 60mm である。

しかし、砂モルタルを設置した時、マッチングスロット長さは 40mm に短くなった。これは砂モルタルがスロットに密着したことにより、砂モルタルの比誘電率によってスロットに作用する実効誘電率が変化したためと考える。また、測定範囲内において砂モルタルを設置した時、マッチングスロット長さはスロット長さ 40mm 近

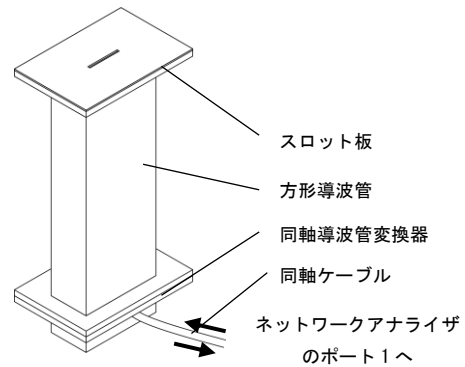


図-5 電波漏洩量の測定装置

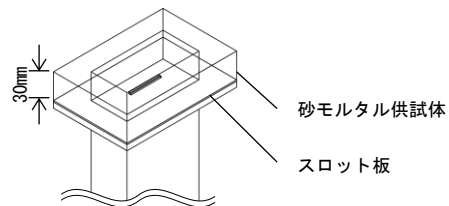


図-6 砂モルタルのみを設置の電波漏洩量の測定装置(上部)

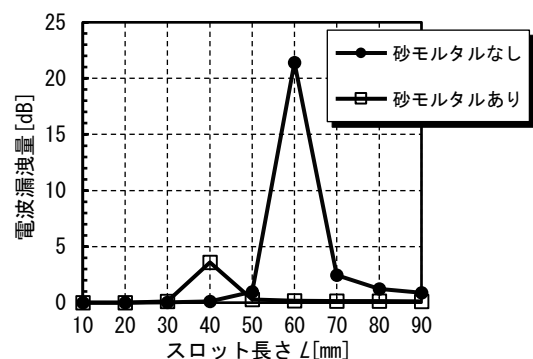


図-7 周波数 2.45GHz における電波漏洩量とスロット長さ L の関係

傍に一つのみ存在する。よって次章より、スロット長さ 40mm 近傍に注目して砂モルタル厚さがマッチングスロット長さに及ぼす影響を検討する。

6. 砂モルタルの厚さが電波漏洩特性に及ぼす影響

6.1 測定条件

方形導波管の開口部にスロット板、砂モルタル供試体の順で重ねて設置し、固定用の穴を介してねじで連結する。スロットから漏洩した電波は砂モルタル供試体を介して外部に放射される。スロット長さは 40mm を中心として、2mm ごと 30～50mm で変化させる。砂モルタル厚さは周波数 2.45GHz における砂モルタル中の電波の 1 波長を考慮して、1mm ごと 4mm～65mm で変化させる。それぞれのスロット長さ、砂モルタル厚さごとに電波漏洩量を測定する。

6.2 測定結果と考察

縦軸にスロット長さ L 、横軸に砂モルタル厚さ t をとり、それぞれの周波数 2.45GHz での電波漏洩量を大きき別に色分けし、図-8 に示す。図-8 より砂モルタル厚さ t ごとのマッチングスロット長さ L_m を抽出し、図-9 に示す。図-9 より、マッチングスロット長さは砂モルタル厚さ $t=4\sim5\text{mm}$, $13\sim14\text{mm}$, $36\sim37\text{mm}$ において長くなる。そこで、砂モルタル厚さ $t=5\text{mm}$, 14mm , 37mm を区切りとして、砂モルタル厚さ $t=5\sim14\text{mm}$, $14\sim37\text{mm}$, $37\sim65\text{mm}$ の 3 つの範囲に分ける。マッチングスロット長さは各範囲内で一定の値に向かって短くなる。その値

は砂モルタル厚さ $t=5\sim14\text{mm}$, $14\sim37\text{mm}$, $37\sim65\text{mm}$ の範囲でそれぞれ 40mm, 38mm, 38mm となる。ここで、各範囲の終端付近で砂モルタル厚さによらず、一定のマッチングスロット長さになる状態を収束と定義する。

ここで、空気と砂モルタルの比誘電率はそれぞれ約 1.00 と 4.15 であるので、式(5)より実効誘電率 ϵ_{eff} は約 2.58 となる。実効誘電率 ϵ_{eff} を式(4)の比誘電率 ϵ_r に代入すると、周波数 2.45GHz におけるマッチングスロット長さの理論値は約 38.1mm となる。これは砂モルタル厚さ $t=14\sim37\text{mm}$, $37\sim65\text{mm}$ の範囲でマッチングスロット長さが収束する値とほぼ等しい。

マッチングスロット長さの収束する砂モルタル厚さ t の範囲は、図-9 より砂モルタル厚さ $t=9\sim13\text{mm}$, $31\sim36\text{mm}$, $58\sim65\text{mm}$ であり、順に広くなる。砂モルタル厚さが本測定範囲の上限値 65mm よりも厚くなる場合、式(4)より、ある砂モルタル厚さを境に、マッチングスロット長さは砂モルタル厚さが変化してもほぼ 38mm の値を取り続けると考える。

図-10 にマッチングスロット長さの収束前の砂モルタル厚さ $t=21\text{mm}$, 23mm , 収束後の砂モルタル厚さ $t=32\text{mm}$, 34mm における電波漏洩量とスロット長さ L の関係を示す。図-11 にマッチングスロット長さの収束前の砂モルタル厚さ $t=40\text{mm}$, 42mm , 収束後の砂モルタル厚さ $t=61\text{mm}$, 63mm における電波漏洩量とスロット長さ L の関係を示す。図-10 と図-11 より、マッチングスロット長さの収束前においては、砂モルタル厚さの変

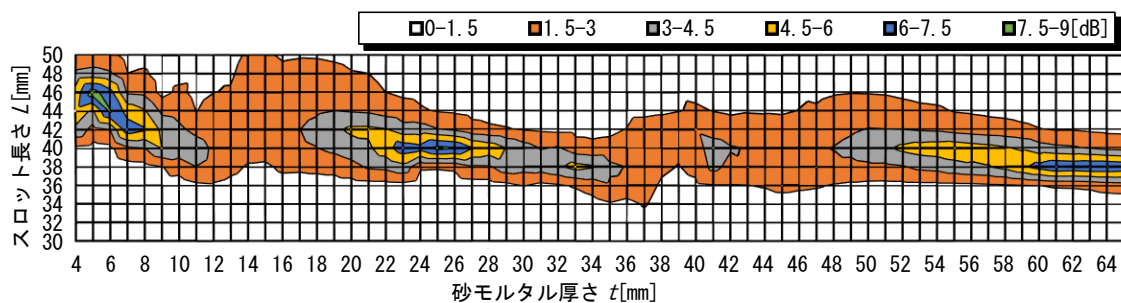


図-8 スロット長さ L と砂モルタル厚さ t における周波数 2.45GHz での電波漏洩量

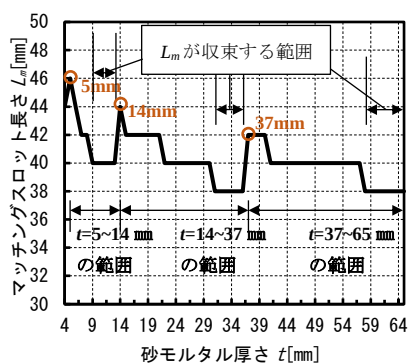


図-9 マッチングスロット長さ L_m と砂モルタル厚さ t の関係

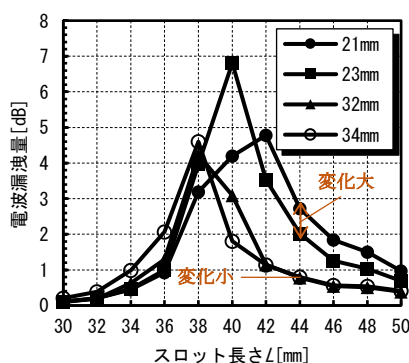


図-10 $t=14\sim37\text{mm}$ 内の電波漏洩量とスロット長さ L の関係

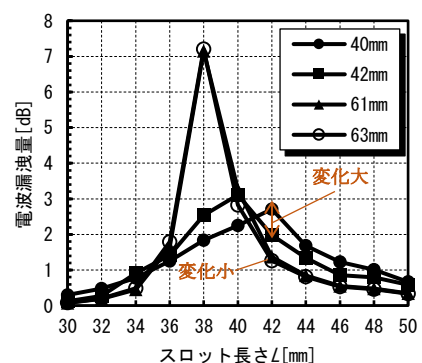


図-11 $t=37\sim65\text{mm}$ 内の電波漏洩量とスロット長さ L の関係

化によって、各スロット長さの電波漏洩量が大きく変化している。一方、収束後は砂モルタル厚さが変化しても、マッチングスロット長さが変化しないので、各スロット長さの電波漏洩量はほとんど変化しない。例えば、図-10 よりスロット長さ 44mm において、砂モルタル厚さ 2mm の変化で、収束前の砂モルタル厚さ $t=21\text{mm}$, 23mm では電波漏洩量は 0.70dB の差があるが、収束後の砂モルタル厚さ $t=32\text{mm}$, 34mm では 0.014dB の差となる。

以上より、スロット板上面に設置された砂モルタル厚さの変化でスロットからの電波漏洩量は変化する。マッチングスロット長さは砂モルタル厚さに対応して収束を繰り返し、収束する範囲は砂モルタル厚さが増加するにつれて広がると分かった。また、マッチングスロット長さの収束前は砂モルタル厚さの変化で電波漏洩量が著しく変化するが、収束後はほとんど変化しない。

次章では、砂モルタルである基材層に加えてスラグモルタルである電波吸収材層と反射板による電波遮蔽材層が、マッチングスロット長さが収束する範囲や収束するマッチングスロット長ささに及ぼす影響を検討する。

7. 砂モルタルとスラグモルタル、反射板がスロットの電波漏洩特性に及ぼす影響

7.1 測定条件

図-5 のスロット板上面に砂モルタルとスラグモルタル、反射板を設置した時の電波漏洩量の測定装置の上部を図-12 に示す。方形導波管の開口部にスロット板と砂モルタル供試体、スラグモルタル供試体、反射板の順で重ねて設置し、固定用の穴を介してねじで連結する。前章と同様に、それぞれのスロット長さ、砂モルタル厚さごとに電波漏洩量を測定する。

7.2 測定結果と考察

縦軸にスロット長さ L 、横軸に砂モルタル厚さ t をとり、それぞれの周波数 2.45GHz での電波漏洩量を大きさに別に分けし、図-13 に示す。図-13 より砂モルタル厚さ t ごとのマッチングスロット長さ L_m を抽出し、図-14 に示す。図-14 より、マッチングスロット長さは砂モルタル厚さ $t=17\sim 18\text{mm}$, $47\sim 48\text{mm}$ において長くなる。砂モルタル厚さ $t=18\text{mm}$, 48mm を区切りとして、砂

モルタル厚さ $t=4\sim 18\text{mm}$, $18\sim 48\text{mm}$, $48\sim 65\text{mm}$ の 3 つの範囲に分ける。マッチングスロット長さは各範囲内で一定の値に向かって短くなる。その値は砂モルタル厚さ $t=4\sim 18\text{mm}$, $18\sim 48\text{mm}$, $48\sim 65\text{mm}$ の範囲でそれぞれ 40mm, 38mm, 38mm となる。マッチングスロット長さは砂モルタル厚さ $t=18\sim 48\text{mm}$, $48\sim 65\text{mm}$ の範囲内で 38mm に収束する。また、本測定範囲内では、マッチングスロット長さが収束する範囲は図-9 に比べ広くなる。

誘電体の比誘電率は誘電体から離れたスロットのマッチングスロット長さにも影響を及ぼす場合³⁾がある。ここで、スラグモルタルの比誘電率は 12.4 であり、砂モルタルの比誘電率 4.15 に対し大きい。収束するマッチングスロット長さは 38mm で変化しない。

以上より、測定範囲内において、マッチングスロット長さが収束する範囲は、砂モルタルだけでなく、スラグモルタルと反射板にも影響を受ける。一方、収束するマッチングスロット長さはスロットに密着する砂モルタルの影響のみを受ける。

図-15 にマッチングスロット長さの収束前の砂モルタル厚さ $t=18\text{mm}$, 20mm 、収束後の砂モルタルの厚さ $t=35\text{mm}$, 37mm における電波漏洩量とスロット長さ L の関係を示す。図-16 にマッチングスロット長さの収束前の砂モルタル厚さ $t=48\text{mm}$, 50mm 、収束後の砂モルタル厚さ $t=61\text{mm}$, 63mm における電波漏洩量とスロット長さ L の関係を示す。図-15 と図-16 より、マッチングスロット長さの収束前においては、砂モルタル厚さの変化によって、各スロット長さの電波漏洩量が大きく変化している。一方、収束後は砂モルタル厚さが変化しても、マッチングスロット長さが変化しないので、各スロット長さの電波漏洩量はほとんど変化しない。

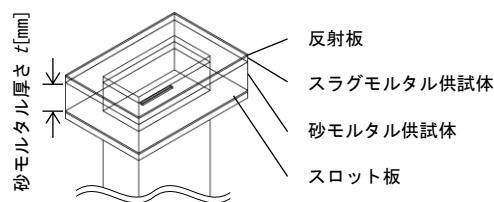


図-12 砂モルタルとスラグモルタル、反射板を設置の電波漏洩量の測定装置（上部）

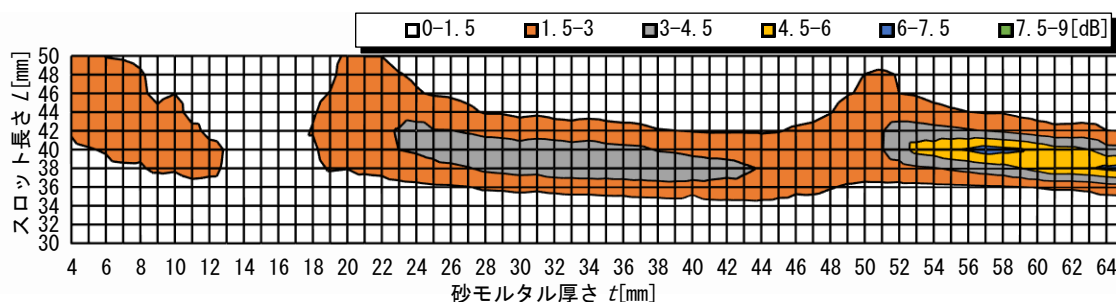


図-13 スロット長さ L と砂モルタル厚さ t における周波数 2.45GHz での電波漏洩量

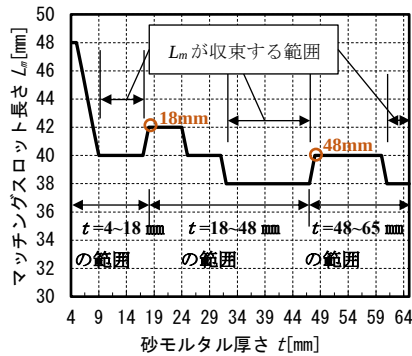


図-14 マッチングスロット長さ L_m と砂モルタル厚さ t の関係

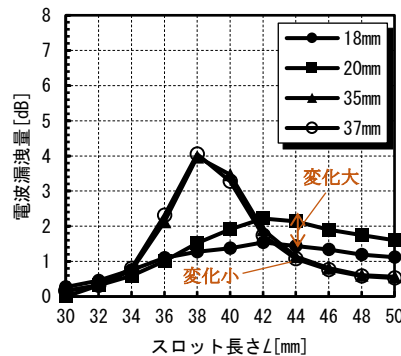


図-15 $t=18\sim46$ mm内の電波漏洩量とスロット長さ L の関係

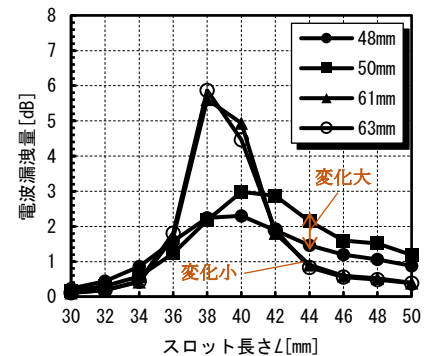


図-16 $t=48\sim64$ mm内の電波漏洩量とスロット長さ L の関係

以上より、発熱モルタルブロックの基材層の厚さをマッチングスロット長さが収束する範囲に設定すれば、基材層の厚さの製造誤差がスロットの電波漏洩量に及ぼす影響を抑えることができる。

例えば、図-16より電波漏洩量が約1.0dBのスロット長さを設計する。収束前の砂モルタル厚さ $t=48$ mmで設計する場合、スロット長さ48mmにおいて1.06dBとなる。ただし、砂モルタルが2mm厚くなると、1.51dBとなる。一方、収束後の砂モルタル厚さ $t=61$ mmで設計する場合、スロット長さ44mmにおいて0.90dBとなる。砂モルタルが2mm厚くなっても、0.84dBとなり、変化は小さい。スロット長さがマッチングスロット長さより長いと電波漏洩量の差は大きく、スロット長さがマッチングスロット長さより短い範囲でもその差はみられる。

8. 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) スロットに密着して設置された砂モルタルは、スロットのマッチングスロット長さを短くする。
- (2) スロット板上面に設置された砂モルタル厚さの変化でスロットからの電波漏洩量は変化する。
- (3) マッチングスロット長さは砂モルタル厚さに対応して収束を繰り返し、その範囲は砂モルタル厚さが増加するにつれて広がる。
- (4) マッチングスロット長さの収束前は砂モルタル厚さの変化によって電波漏洩量が著しく変化するが、収束後はほとんど変化しない。
- (5) マッチングスロット長さが収束する範囲は、砂モルタルだけでなく、スラグモルタルと反射板にも影響を受ける。一方、収束するマッチングスロット長さはスロットに密着する砂モルタルの影響のみを受ける。
- (6) 発熱モルタルブロックの基材層の厚さをマッチングスロット長さが収束する範囲に設定すれば、基材層の厚さの製造誤差がスロットの電波漏洩量に及

ぼす影響を抑えることができる。

謝辞

本研究の一部は、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, Vol.69, No.586, pp.1-5, 2004.12
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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, Vol.82, No.739, pp.1321-1327, 2017.9
- 5) 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, Vol.39, No.1, pp.523-528, 2017.7
- 6) MUNK, B.: FREQUENCY SELECTIVE SURFACES(Theory and Design), JOHN WILEY & SONS, INC., 2000
- 7) 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, 2014.5
- 8) Belevitch, V.: Transmission Losses in 2n-Terminal Networks, Journal of Applied Physics 19, 636, 1948