論文 漏洩導波管を用いた均一に発熱する融雪用発熱モルタルブロックシ ステムの設計

伊藤 洋介*1·河辺 伸二*2·安井 秀幸*3

要旨:融雪用発熱モルタルブロックシステムは発振器,漏洩導波管,発熱モルタルブロックで構成される。効率的な融雪のため,漏洩導波管には長さ方向にわたって均一に電波を漏洩し,末端までに全ての電波を使い切る性能が求められる。有限要素法解析により,漏洩導波管のスロットの長辺と短辺の長さ,スロットを連設する間隔が漏洩導波管の電波漏洩性能に及ぼす影響を明らかにした。本研究の方程式を用いることで,長さ方向にわたって均一に電波を漏洩し,末端までに全ての電波を使い切る漏洩導波管が設計できる。また,漏洩導波管の長さ方向にわたって均一に発熱する融雪用発熱モルタルブロックシステムを設計した。 キーワード:発熱,電波,スロット,方形導波管,漏洩導波管,有限要素法解析

1. はじめに

降雪地域では除雪作業に費やす労力を低減するため, 電熱線,地下水の散水,融雪剤などで融雪が行われてい る。しかし,これらの融雪方法はメンテナンス性,環境 負荷,鉄への塩害などの問題がある。

著者らりは新たな融雪方法として、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。融雪用発熱 モルタルブロックシステムを図-1 に示す。発振器から 発振された 2.45GHz の電波は、漏洩導波管の上面に設け られたスロットから漏洩し、発熱モルタルブロックに照 射される。発熱モルタルブロックは電波を吸収し、熱に 変換して雪を融かす。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下 から基材層,電波吸収材層,電波遮蔽材層の3層により 構成される。漏洩導波管から漏洩した電波は、電波吸収 性能を持たない基材層を透過し、電波吸収材層に吸収さ れて熱に変換される。電波遮蔽材層は外部への電波漏洩 を防ぐ。漏洩導波管はスロットアレーアンテナの技術2) を利用する。漏洩導波管の中央には管軸に対してスロッ トの長辺が垂直となるようにスロットを連設する。スロ ットから漏洩しなかった電波は、末端に連結されたダミ ーロードによって吸収される。これより、末端からの電 波の反射によって起こる定在波の影響を無くす。

電波は,発熱モルタルブロックを連続的に等しく温め るため,漏洩導波管の各スロットから均一に漏洩させる 必要がある。スロットは,漏洩導波管内の電波の量に伴 って漏洩する電波の量(以下,電波漏洩量とする)が変 化する。既往の研究³⁾の漏洩導波管は,長距離にわたる 漏洩導波管の中間部のみを想定し,スロットの長辺の長 さを一定にして,測定区間内の電波漏洩量をほぼ一定に

*1 名古屋工業大学大学院 准教授 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

している。ただし、この漏洩導波管では、末端近傍で電 波漏洩量が低下し、漏洩導波管の始端から末端まで均一 に電波を漏洩できない。また、末端に至るまでに電波を 漏洩し切らず、残った電波が無駄になる問題がある。

そこで,測定区間内で電波を均一に漏洩し,末端まで に電波を全て使い切る漏洩導波管(以下,均一に電波を 全て使い切る漏洩導波管とする)のスロットの設計が必 要である。本研究では有限要素法解析を用いてスロット の短辺と長辺の長さ,スロットの間隔が電波漏洩性能に 及ぼす影響を明らかにし,均一に電波を全て使い切る漏 洩導波管のスロットを設計する。



図-1 融雪用発熱モルタルブロックシステム



2. 測定材料

2.1 漏洩導波管とスロット

漏洩導波管とスロットを図-3に示す。漏洩導波管は、 市場流通が多く、入手が容易な長辺外寸100mm×短辺外 寸 50.0mm,長辺内寸96.8mm×短辺内寸46.8mm,厚さ 1.6mmの方形導波管にスロットを連設したものとする。

漏洩導波管のスロットは、電波を漏洩させるために、 漏洩導波管の表面を流れる電流を妨げるように配置³す る必要がある。図-3 に示すように、漏洩導波管の中央 には管軸に対してスロットの長辺(以下,スロット長さ とする)が垂直となり、短辺(以下,スロット幅とする) が平行となるようにスロットを連設する。

スロット長さは,電波漏洩量に大きく影響³⁾を及ぼす。 本研究では,スロット幅やスロットの間隔が電波漏洩量 に及ぼす影響についても検討を行う。

2.2 発熱モルタルブロック

発熱モルタルブロックは、既往の研究⁴⁾より縦 300mm ×横 300mm,厚さが基材層 29mm,電波吸収材層 8mm, 電波遮蔽材層 8mm のものとする。基材層は普通ポルト ランドセメントを用いたモルタル(以下,砂モルタルと する)とする。含水による電波吸収性能の変化を最小限 に抑えるため⁵⁾,砂モルタルに防水剤を添加する。**表-1** に砂モルタルの調合,**表-2**に防水剤の成分を示す。

電波吸収材層は電波吸収性能を有する電気炉酸化ス



| 耒 | -1 | 砂干 | ルタ | ルの | 調合 | (督帯比) |
|---|----|------|------|--------|----|-------|
| x | | P2 - | 10 5 | ////// | | 、見まれ |

| セメント | 川砂 | 水 | 防水剤 |
|------|-----|----|------|
| 100 | 300 | 45 | 3.00 |

| - | ^ | | 1. 4 .1 4 | · + / · | / 所行 日 11.) | |
|---|----------|------|----------------------|----------|-------------|--|
| ᆽ | -2 | 867 | K AII() |) ሐሶ 'ምት | (省亩FF) | |
| ĸ | ~ | 11/1 | NЛ:1V. | | 、見まれ) | |

| 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 | 3.00 | | | |

ラグを骨材として用いたスラグモルタルとする。質量比 でスラグモルタルの調合を表-3,電気炉酸化スラグの 成分を表-4⁶に示す。電波遮蔽材層は電波反射性能を有 する欠損金網⁴を電波吸収材層の上に設置し,砂モルタ ルを被せる。

3. 解析方法及び測定方法

3.1 有限要素法解析による電波漏洩性能の解析方法

有限要素法解析を用いてスロットの電波漏洩性能を 確認し,スロットの形状が電波漏洩量に及ぼす影響を把 握する。またスロットの連設方法について検討を行う。

有限要素法解析には COMSOL Multiphysics(version5.4) を使用する。有限要素法解析モデルの環境設定を図-4 に示す。有限要素法解析における材料定数の設定を表-5 に示す。漏洩導波管の全長,スロットの数,スロット の間隔及びスロットの寸法は,解析条件に応じて変更す る。漏洩導波管を空気の直方体内に配置し,空気の直方 体と外部との境界は,垂直に入射した電波を吸収する設 定である散乱境界条件とする。

周波数2.45GHzの電波を漏洩導波管始端の電波の供給 面(以下,ポートとする)から漏洩導波管内に供給する。 電波の出力は300Wとする。スロットは電波の伝送モー ドを安定させるため,ポートから300mm離して設ける。 漏洩導波管末端部の管内電界強度の測定面を図-5に



図-4 有限要素法解析モデルの環境設定

| 表 一 5 | 有限要素法解析にお | ける材料定数の設定 |
|-------|-----------|-----------|
| | | |

| | 温冲演讲新中部 | 比誘電率 | 1 |
|------------|--------------------|-------|----------------------|
| 材料 - 定数 | 漏洩导波官内部 及び周囲の空気 | 比透磁率 | 1 |
| | | 電気伝導率 | 0[S/mm] |
| | | 比誘電率 | 1 |
| | 漏洩導波管(鉄) | 比透磁率 | 4000 |
| | | 帚车仁道家 | 1.12×10 ⁴ |
| | | 电刘広导华 | [S/mm] |

表-4 電気炉酸化スラグの成分(質量比)

| 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 |
|-----|-------|------------------|------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| 平均值 | 19.53 | 12.92 | 5.66 | 4.57 | 19.67 | 24.13 | 8.40 | 1.97 | 0.42 | 0.33 | 97.77 |

示す。測定面には漏洩導波管の断面方向に測定点を 2mm 間隔で配列する。測定点における電界強度[V/m]の合計を 末端部の管内電界強度とする。末端部の管内電界強度を 基に,漏洩導波管全体の電波漏洩量を評価する。測定面 は,電波の伝送モードを安定させるため,スロットから 300mm 離して設ける。

漏洩導波管内の断面方向中央には,漏洩導波管の全長 にわたって,1mm 間隔で測定点を配列する。これより, 管内中央の電界強度を測定する。管内中央の電界強度の 減衰量を基に,スロットからの電波漏洩量を評価する。

各スロット中央の直上にも測定点を配列する。測定点 は、漏洩導波管上面から発熱モルタルブロック下面まで の距離に合わせて漏洩導波管の上面に設けられたスロッ トから上方に 60mm 離す。スロット中央から 60mm 直上 の電界強度を基に、スロットから発熱モルタルブロック に照射される電波量を評価する。

漏洩導波管の末端部には、管内に厚さ 100mm の電波 吸収層である PML を設ける。これより、末端からの電波 の反射によって起こる定在波の影響を無くす。PML は測 定面から 200mm 離して設ける。

3.2 発熱モルタルブロックの上昇温度の測定方法

有限要素法解析による解析結果を基に設計した漏洩導 波管を用いて, 融雪用発熱モルタルブロックシステムを 構築し,発熱モルタルブロックの上昇温度の測定を行う。 発熱モルタルブロックの上昇温度の測定装置を図-6に 示す。発振器に対してパワーメータ,漏洩導波管,パワ ーメータ、ダミーロードの順に接続する。パワーメータ と漏洩導波管は管の大きさが異なるため、接続部で電波 の反射が生じないよう、テーパー管を用いて連結する。 管内の電波の量は、パワーメータによって電力値として 測定する。テーパー管からスロットまでの距離は、電波 の伝送モードを安定させるため 300mm 離す。漏洩せず 管内に残った電波は、末端のダミーロードによって吸収 される。これより、末端からの電波の反射を防ぎ、管内 の定在波の影響を無くす。発熱モルタルブロックは、漏 洩導波管のスロットが設けられた区間の上方に連続して 8 枚設置する。発熱モルタルブロックと漏洩導波管上面 を 60mm 離し, 発熱モルタルブロックの誘電率が,漏洩 違波管のスロットの電波漏洩量に及ぼす影響²⁾を無くす。 発振器はマグネトロンで出力 300W, 周波数 2.45GHz



の電波を発振する。測定時間は 60 分とし、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を撮影する。これより,60 分後の発熱モルタルブロック上面の上昇温度を測定する。

4. スロット幅が電波漏洩量に及ぼす影響

4.1 解析条件

有限要素法解析による電波漏洩性能の解析方法でスロ ット幅の変化が電波漏洩量に及ぼす影響を検討する。漏 洩導波管の全長は 2600mm,スロットの数は 120 個とす る。スロット長さとスロットの間隔は,それぞれ既往の 漏洩導波管で実績²⁾のある 30mm と 10mm とする。スロ ット幅は,0.2mm ごと 1.0~4.0mm まで変化させる。末 端部の管内電界強度を基に,スロット幅の変化が漏洩導 波管の電波漏洩量に及ぼす影響を評価する。

4.2 解析結果と考察

末端部の管内電界強度とスロット幅の関係を図-7 に 示す。スロット幅が大きくなるにつれ,末端部の管内電 界強度は小さくなった。これより,スロット幅が大きく なるにつれ,電波漏洩量は多くなることが分かった。ス ロット幅が大きくなることで,管表面を流れる電流を多 く妨げるようになるため,電波漏洩量が多くなったと考 える。本解析範囲において,末端部の管内電界強度とス ロット幅の関係は,一次関数の関係であった。

以上より、スロット幅によって電波漏洩量は変化する ため、採用するスロット幅ごとに漏洩導波管のスロット の設計を変更する必要がある。本研究においてスロット 幅は、加工が安価にでき、かつ最小の3mmを採用する。







5. スロットの間隔が電波漏洩量に及ぼす影響

5.1 解析条件

有限要素法解析による電波漏洩性能の解析方法でス ロットの間隔が電波漏洩量に及ぼす影響を検討する。漏 洩導波管の全長は3300mm,スロット幅は3mm,スロッ ト長さは30mmとする。スロットの数は10個ずつ10~ 30個とし,スロットの間隔は製造上の最小値である 10mmから70mmまで10mmごと変化させる。末端部の 管内電界強度を基に,スロットの間隔が漏洩導波管の電 波漏洩量に及ぼす影響を評価する。

5.2 解析結果と考察

各スロットの数における末端部の管内電界強度とス ロットの間隔の関係を図-8 に示す。スロットの間隔 10mm では、電波漏洩量をスロットの数によって変更で きる。スロットの間隔 30~70mm では、スロットの数に よらず、同程度の電波漏洩量となった。これは、スロッ トの間隔 30~70mm においてスロット同士の相互干渉に よる影響が大きくなったためと考える。

以上より,スロットの間隔はスロットの数によって電 波漏洩量を変更できる10mmが良い。

6. 各スロット長さにおける電波漏洩性能

6.1 解析条件

有限要素法解析による電波漏洩性能の解析方法で各 スロット長さにおける電波漏洩性能を把握する。漏洩導 波管の全長は3300mm,スロット幅は3mm,スロットの 間隔は10mm,スロットの数は240個とする。スロット 長さは2mmごと26~50mmまで変化させる。管内中央 の電界強度で各スロット長さの電波漏洩量を評価する。

6.2 解析結果と考察

各スロット長さにおける管内中央の電界強度とポートから距離の関係を図-9 に示す。スロットは、ポートからの距離 300~2700mm の区間に連設する。スロット 長さ 26~40mm において管内中央の電界強度は、徐々に 減衰した。スロット長さ 42~50mm において管内中央の 電界強度は、ポートからの距離 450mm 以降で大きく変 化した。これは、スロット長さが周波数 2.45GHz の半波 長である約 60mm に近い長さとなったためと考える。

ここで,各条件における管内中央の電界強度の概念を 図-10に示す。スロットは一定の割合で電波を漏洩する。 スロット長さが同じスロットを連設した漏洩導波管は, 管内の電波の量に伴って電波漏洩量が減っていくため, 管内中央の電界強度の減衰率が漏洩導波管のスロットが 連設した区間(以下,スロット連設区間とする)内の位 置によって変化する。これに対して,均一に電波を全て 使い切る漏洩導波管は管内の電波の量によらず,電波漏 洩量が一定であるため,管内中央の電界強度の減衰率が







スロット連設区間内の位置によらずに一定である。

図-9 に示すようにスロット連設区間において、管内 中央の電界強度の減衰率が一定,かつ末端で管内中央の 電界強度が 0V/m の直線を理想直線とする。

スロット長さをポートからの距離に伴って変化させ, 電波漏洩量を一定に調整することで,均一に電波を全て 使い切る漏洩導波管のスロットを設計することができる。

7. 均一に電波を全て使い切る漏洩導波管のスロットの 設計法

有限要素法解析により得られた電波漏洩性能の解析結 果に基づき、均一に電波を全て使い切る漏洩導波管のス ロットを設計するための方程式を導く。スロット連設区 間内で管内中央の電界強度の減衰率を一定とするため、 スロット長さをポートからの距離に伴って変化させる。

漏洩導波管の最初のスロット1個が漏洩する電波の電 界強度を Ro[V/m],スロット連設区間の始端の管内中央 の電界強度を E₀[V/m]とすると、最初のスロット1 個が 漏洩する電波の電界強度 R₀ とスロット連設区間の始端 における管内中央の電界強度 E₀の比 r₀(以下、単一スロ ットの電波量比とする)は、式(1)のように示される。

$$r_0 = \frac{R_0}{E_0} \tag{1}$$

スロット長さ L₀[mm]と単一スロットの電波量比 r₀の 関係を図-11の補正前に示す。なお、最初のスロット1 個が漏洩する電波の電界強度 R₀の算出には、図-9より、 管内中央の電界強度とポートからの距離の関係が一次関 数で近似できるポートからの距離 300~450mmの位置で の値を用いた。スロット長さ L₀と単一スロットの電波量 比 r₀の関係における近似曲線は、式(2)のように示される。

 $L_0 = 78.30r_0^{0.15}$ (2) 理想直線より,スロット連設区間の長さをD[mm],ス ロット連設区間の始端から任意のスロット中央までの距 離(以下,始端からのスロット距離とする)をx[mm]と すると,均一に電波を全て使い切る漏洩導波管の始端か らのスロット距離 x における管内中央の電界強度 E_x [V/m]は,式(3)のように示される。

$$E_x = -\frac{E_0}{D}x + E_0 \tag{3}$$

均一に電波を全て使い切る漏洩導波管のスロットは, 各スロットからの電波漏洩量が等しくなる。スロットの 間隔を *d*[mm]とすると,スロット連設区間内に設けられ るスロットの数は最大で D/d 個である。これより,始端 からのスロット距離 *x* の位置にあるスロット 1 個が漏洩 する電波の電界強度 *R_x*[V/m]は,式(4)のように示される。

$$R_x = \frac{d \times E_0}{D} \tag{4}$$

始端からのスロット距離 x における単一スロットの電 波量比 rxは,式(3),式(4)より,導出した式(5)によって算 出できる。

$$r_x = \frac{R_x}{E_x} = \frac{d}{D - x} \tag{5}$$

本研究の漏洩導波管において,始端からのスロット距離 x における均一に電波を全て使い切る漏洩導波管のスロットのスロット長さ *L*x[mm]は,式(2)の ro に式(5)の rx を代入した式(6)によって算出できると考える。

$$L_x = 78.30 \left(\frac{d}{D-x}\right)^{0.15} \tag{6}$$

漏洩導波管の全長を 3300mm, スロット幅を 3mm, ス ロットの間隔を 10mm, スロット連設区間の長さ 2400mm とした場合における漏洩導波管のスロットを設計する。 漏洩導波管のスロットの設計は,漏洩した電波の干渉も 含めた検討を行う必要があるため,発熱モルタルブロッ クが設置される位置における電界強度を測定する。式(1) ~(6)を用いて設計した漏洩導波管におけるスロットから 60mm 直上の電界強度と始端からのスロット距離の関係を図-12の補正前に示す。電波はスロット連設区間の始端近傍で大きく漏洩しており、均一にはならない。これは、最初のスロット1個が漏洩する電波の電界強度 R_0 を算出する際、漏洩導波管外の電波の干渉を考慮していなかったためと考える。ここで、漏洩した電波が均一になるように任意の補正係数 k で漏洩した電波の干渉による電波漏洩量の変化を補正する。

スロット連設区間の始端近傍で大きく漏洩している ことから、図-9より算出した最初のスロット1個が漏 洩する電波の電界強度 R_0 が実際はより大きいと考えら れる。そこで、均一に電波を全て使い切る漏洩導波管と なるように、式(1)の R_0 に補正係数 k をかけて式(7)のよ うに単一スロットの電波量比を r_0 とする。

$$r_0' = \frac{R_0 \times \mathbf{k}}{E_0} \tag{7}$$

今回対象とした仕様において, k を任意に変化させて スロットから 60mm 直上の電界強度を均一とする。k が 1.71 の場合のスロット長さ *L*₀'と単一スロットの電波量 比 *r*₀'を図-11 の補正後に示す。始端からのスロット距 離 *x* におけるスロットのスロット長さ *L*_x'[mm]は,式(7) により式(6)を補正した式(8)によって算出できる。

$$L_{x}' = 72.35 \left(\frac{d}{D-x}\right)^{0.15}$$
(8)

kが1.71より設計した時のスロット中央から60mm 直 上の電界強度と始端からのスロット距離の関係を図-12 の補正後に示す。補正係数kより設計した時のスロット



長さと始端からのスロット距離の関係を図-13 に示す。 スロット長さは周波数 2.45GHz の電波の半波長である 60mm を上限とする。スロットから漏洩した電波は,発 熱モルタルブロックが設置される位置において,ほぼ均 ーになった。また,末端部の管内電界強度の割合は7.78% となり,ほとんどの電波を漏洩した。以上より,提案す る方程式を用いて,今回対象とした仕様で均一に電波を 全て使い切る漏洩導波管のスロットを設計できた。

8. 発熱モルタルブロックの上昇温度の測定 8.1 測定条件

式(8)より設計したスロットが連設する漏洩導波管を用いて,発熱モルタルブロック上面の上昇温度を測定する。 均一に発熱モルタルブロックが温まるか確認する。

漏洩導波管には漏洩導波管の製造コストを低減するため、スロット連設区間の長さ 300mm ごとに式(8)から算出した値の平均値より 3mm 程度大きいスロット長さの スロットを連設した。これに対し、算出したスロット長さになるように金属テープでスロットの長さを調節した。 8.2 測定結果と考察

発熱モルタルブロック上面の漏洩導波管の管軸直上の 60 分後の上昇温度と始端からのスロット距離の関係を 図-14 に示す。発熱モルタルブロック上面の漏洩導波管 の管軸直上の 60 分後の上昇温度は、ほぼ均一となった。 パワーメータによる電力値は、漏洩導波管の末端におい て 0.00W であり、検出できなかった。以上より、本研究 において提案する方程式を用いて、漏洩導波管のスロッ トの設計をすれば、発振した電波を全て使い切り、発熱 モルタルブロックを均一に温めることが可能である。

9. まとめ

本研究の範囲内において、以下が明らかになった。

- (1) スロット幅によって電波漏洩量は変化するため,採 用するスロット幅ごとに漏洩導波管のスロットの 設計を変更する必要がある。
- (2) スロットの間隔はスロットの数によって電波漏洩 量を変更できる 10mm が良い。
- (3) 提案する方程式を用いて、今回対象とした仕様で均 ーに電波を全て使い切る漏洩導波管のスロットを 設計できた。
- (4) 本研究において提案する方程式を用いて、漏洩導波 管のスロットの設計をすれば、発振した電波を全て 使い切り、発熱モルタルブロックを均一に温めるこ とが可能である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19K04708 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, テン株式会社の協力を得ました。漏洩導波管は有限会社 プライムエンジニアリングの高橋孝直氏,発熱の測定は 株式会社ジーエネックスの野田了誠氏の協力を得ました。 ここに謝意を表します。

参考文献

- 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) 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, No.82(737), pp.969-978, 2017.7
- 社団法人電子情報通信学会:アンテナ工学ハンドブ ック第2版,オーム社,2008.7
- 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システムの電波遮蔽 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
- 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) 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.30, 2012