

論文 金網のメッシュと線径が金網入りモルタルの電波遮蔽特性と界面剥離に及ぼす影響

寺西 洸人*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・井上 裕太*4

要旨：電波を熱エネルギーに変換して融雪を行う融雪用発熱モルタルブロックの研究が行われている。電気炉酸化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）で電波が吸収され、熱エネルギーに変換される。電波吸収性能の向上と外部への電波漏洩防止のため、スラグモルタルと砂モルタルの界面に電波を反射する金網を配置する。本研究では、金網のメッシュと線径が電波遮蔽特性と界面剥離に及ぼす影響を明らかにするため、電波遮蔽特性の測定及び曲げ試験を行った。測定した金網はそれぞれ基準以上の電波遮蔽量を有し、界面剥離も起こさないことが分かった。

キーワード：金網、メッシュ、線径、電磁波シールド効果、反射減衰量、界面剥離

1. はじめに

降雪地域では、高齢者の除雪作業は多大な労力を要し外出を妨げる要因となる。そこで人手によらない様々な融雪の方法がとられているが、いずれもランニングコストや環境負荷の面などで問題を抱えている。

これらの問題を解決すべく著者ら¹⁾は、電波を熱エネルギーに変換して融雪を行う融雪用発熱モルタルブロックシステムについて研究を行ってきた。融雪用発熱モルタルブロック²⁾を図-1に示す。このブロックは、基材層、電波吸収材層、電波遮蔽材層の3層構造であり、電波吸収材層には製鋼の産業副産物である電気炉酸化スラグ(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)が利用されている。

スラグには電波を吸収し熱エネルギーに変換する性質がある。融雪用発熱モルタルブロックは安価に発振器を入手できる周波数2.45GHzの電波を下方から照射してブロックを暖める。ここで、電波吸収材層を透過しようとする電波を反射して電波吸収材層の電波吸収性能を高め、融雪用発熱モルタルブロックの外部への電波漏洩を防ぐため、電波を垂直に反射する電波遮蔽材層が必要となる。

電波遮蔽材層では山砂を骨材としたモルタル(以下、砂モルタルという)とスラグモルタルの境界に電波を反射する金網を配置する。金網の開口を小さくすると、砂モルタルとスラグモルタルの付着が弱まり、ブロックに曲げ荷重がかかった場合に界面で剥離する恐れがある。また、金網の開口を大きくすると電波が透過しやすくなる。既往の研究³⁾では、金網を加工した欠損金網によりこれを解決しているが、欠損金網の生産には加工設備を導入

する必要があり、少量の生産には不向きである。

本研究では、金網のメッシュと線径の変化が融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽特性に及ぼす影響と、金網のメッシュと線径が融雪用発熱モルタルブロックに曲げ荷重をかけた際の破壊の状態、特に砂モルタルとスラグモルタルの界面剥離に及ぼす影響を明らかにする。

本研究の成果より、十分な電波遮蔽性能を持ち、界面剥離を生じにくく、少量生産に対応できる電波遮蔽材層が設計できる。

2. 供試体

2.1 電波遮蔽特性測定用供試体

1) 金網

金網の種類を表-1に示す。金網は平織のステンレス金網とする。線径とメッシュは一般的に流通しており比較的安価に入手できるものから選定した。

2) モルタル重ね金網

金網は、融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層を構成する場合、スラグモルタルと砂モルタルの間に設けられる。本供試体はこれと同じ状態にするため、融雪用発熱モルタルブロックシステムが使用している準マイ

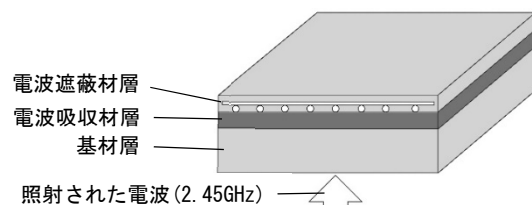


図-1 融雪用発熱モルタルブロック

*1 名古屋工業大学 工学部社会工学科 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 准教授 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 (学生会員)

クロ波帯に電波吸収のピークを持つよう設計³⁾した厚さ10mmのスラグモルタルと、既往の研究²⁾で用いられた電波遮蔽材層の砂モルタルと同じ厚さ8mmの砂モルタルを各々作製し、表-1に示す金網又は厚さ2mmのアルミ製の金属板を挟んだ状態(以下、モルタル重ね金網という)で測定を行う。

スラグモルタル及び砂モルタルは気中養生1日、水中養生7日の後105℃の定風量乾燥機で絶乾状態とする。使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、スラグは粒度0.3~0.6mm、絶乾密度3.49g/cm³である。スラグの成分を表-2⁴⁾に示す。またスラグモルタルの調合及び比誘電率は表-3、砂モルタルの調合は表-4に示す。

電波は融雪用発熱モルタルブロックと同様、スラグモルタル側から照射する。

2.2 界面剥離確認用供試体

図-2に示す界面剥離確認用供試体は40mm×40mm×160mmの型枠を用いてn=5で作製する。供試体は表-3の調合のスラグモルタルを充填後、硬化前に表-1に示す金網をそれぞれ配置し、その上に表-4の調合の砂モルタルを充填する。スラグモルタルの厚さは32mm、砂モルタルの厚さは8mmとする。なお、金網を配置しないブランク供試体も併せて作製する。養生は気中養生1日、水中養生28日とする。

3. 測定方法

3.1 シールドボックス測定装置による電磁波シールド効果SEと反射減衰量RLの測定

メッシュサイズ及び線径の異なる金網につき電磁波シールド効果SE(以下、SEという)を測定し、メッシュサイズ及び線径の変化が金網の電波遮蔽特性に及ぼす影響を測定する。また、融雪用発熱モルタルブロックのように金網にスラグモルタルや砂モルタルが密着している場合、スラグモルタルや砂モルタルの誘電率が金網のSEに影響を及ぼす可能性⁵⁾がある。そこで、モルタル重ね金網もSEを測定する。

表-1 金網の種類

メッシュ	線径 (mm)	材質	開き目 (mm)	開孔率 (%)
40	0.14	SUS304	0.50	61.0
	0.18		0.46	51.7
60	0.14		0.28	44.4
	0.18		0.24	32.7
80	0.10		0.22	47.3
	0.14		0.18	31.6

表-2 スラグ成分 (質量比)

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
22.93	18.09	9.84	5.20	29.20	6.24	15.57	3.53	1.71	0.17	99.23

メッシュサイズや線径の違いによって金網表面の凹凸が変化すると、金網に入射した電波が垂直に反射されず、散乱してしまう恐れがある。散乱した電波はスラグモルタルに対して斜入射となるため、融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収性能を低下させる原因となる。そこで、メッシュサイズの異なる金網につき反射減衰量RL(以下、RLという)を測定し、メッシュサイズ及び線径の変化が電波の散乱量に及ぼす影響を測定する。

電波遮蔽材層に金網を用いた場合、金網による電波の散乱や透過の影響及びスラグモルタルや砂モルタルの誘電率の影響で電波吸収性能が変化し、金網を用いた融雪用発熱モルタルブロックの発熱性能が変化する恐れがある。既往の研究³⁾より、スラグモルタルと砂モルタルを重ね合わせた発熱性能はRLによって評価できる。そこで、モルタル重ね金網もRLを測定する。

シールドボックス測定装置を図-3に示す。同軸ケーブルを用いてアンテナ1、アンテナ2をネットワークアナライザ(KEYSIGHT製N9951A)に接続したシールド

表-3 スラグモルタルの調合 (質量比) 及び比誘電率(ε_r)

調合(質量比)			比誘電率(ε _r)
セメント	スラグ	水	
2	6	1	9.65

表-4 砂モルタルの調合 (質量比)

セメント	砂	水
2	6	1

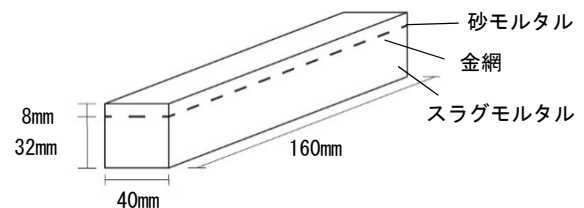


図-2 界面剥離確認用供試体

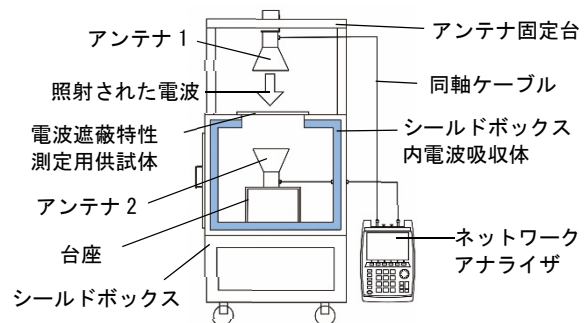


図-3 シールドボックス測定装置

ボックス測定装置を用いて S パラメータ測定法により伝送係数 S_{21} 及び反射係数 S_{11} を測定する。アンテナはダブルリジッドホーンアンテナを用いる。

ネットワークアナライザから電波を送信し、アンテナ 1 を介して供試体に照射する。照射された電波の一部は供試体に反射され、残りは供試体に吸収されるか供試体を透過する。透過した電波はアンテナ 2 を介して、反射した電波はアンテナ 1 を介して、ネットワークアナライザで受信される。ネットワークアナライザからの入射波を α 、反射波を β 、伝送波を γ とした時、伝送係数 S_{21} は式(1)で、反射係数 S_{11} は式(2)で示される。

$$S_{21} = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (1)$$

$$S_{11} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (2)$$

S_{21} は式(3)で、 S_{11} は式(4)で示すベクトル量である。なお、電波の成分については S_{21} の実部を a_1 、虚部を b_1 とし、 S_{11} の実部を a_2 、虚部を b_2 として、複素定数を j とする。

$$S_{21} = a_1 + jb_1 \quad (3)$$

$$S_{11} = a_2 + jb_2 \quad (4)$$

式(5)により S_{21} をスカラー量の伝送係数 τ へ変換する。ここで供試体を設置しない時の伝送係数を τ_0 とすると供試体の SE(dB)は式(6)より算出する。

$$\tau = |S_{21}| = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (5)$$

$$SE(\text{dB}) = -20 \log_{10} \frac{\tau_0}{\tau} \quad (6)$$

式(7)により S_{11} をスカラー量の反射係数 $|S_{11}|$ へ変換する。この $|S_{11}|$ から RL(dB)を式(8)より算出する。

$$|S_{11}| = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (7)$$

$$RL(\text{dB}) = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (8)$$

3.2 曲げ試験による界面剥離の測定

引張圧縮試験機を用いて JIS R 5201 に基づき曲げ試験を行う。載荷速度を毎秒 50±10N とし最大荷重 ω (N)を求める。求めた最大荷重から曲げ強度 c (N/mm²)を式(9)より算出する。

$$c(\text{N/mm}^2) = 0.00234 \times \omega \quad (9)$$

曲げ強度を算出し、曲げ強度と破断後の供試体の状態から金網と砂モルタル、又は金網とスラグモルタルの界面剥離の有無を評価する。

4. 測定結果

4.1 電波遮蔽特性測定用供試体の SE の測定結果

線径が 0.14mm の金網の SE と周波数の関係を図-4、線径 0.14mm の金網を用いたモルタル重ね金網の SE と周波数の関係を図-5 に示す。なお、測定機器の精度上、

70dB を越える数値は参考値とする。

図-4 より、金網の線径が同じ場合は金網のメッシュが細くなるほど SE は高くなる。これは、カットオフ周波数⁶⁾の考え方より、メッシュが細くなることで、金網の網目の開口が小さくなり、電波が通りにくくなったためと考える。また、高周波になるにつれて SE は低下する。これは、高周波になるにつれて電波の波長が短くなり、電波が金網の網目の開口を通りやすくなった⁶⁾ためである。これらは線径が異なる金網についても同様の傾向がみられた。

図-5 より、モルタル重ね金網の場合も金網のみの場合と同様に、金網のメッシュが細くなるほど SE は高くなるが、照射される電波が高周波であっても SE は一定であった。また、モルタル重ね金網の場合、いずれの金網を用いた場合も金網のみの場合に比べて SE が低下している。これは、モルタル重ね金網では、スラグモルタル中を進む電波の波長がスラグモルタルの誘電率の影響を受け空気中と比較して短く⁶⁾なるためと考える。

物質中を伝搬する電波の波長を λ_m 、空気中を伝搬する電波の波長を λ_0 、物質の比誘電率を ϵ_r とすると、 λ_m は式(10)により算出できる。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

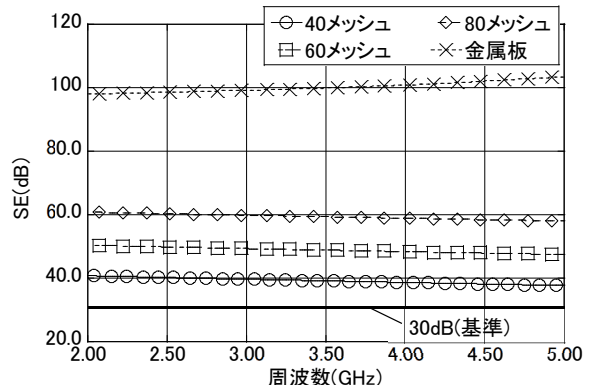


図-4 線径が 0.14mm の金網の SE と周波数の関係

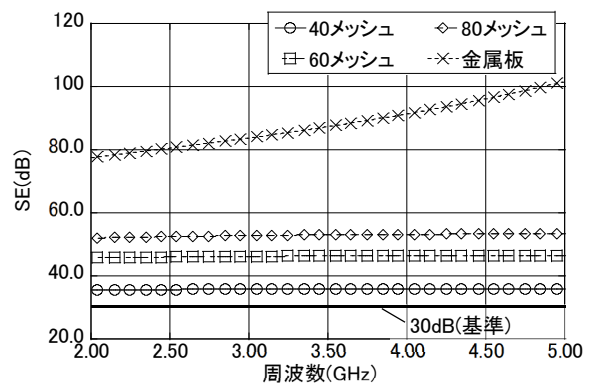


図-5 線径が 0.14mm のモルタル重ね金網の SE と周波数と関係

また、いずれの金網においても、SEは金属板に比べて劣るが、一般的な電磁波シールド性能の基準⁹⁾となる30dBを超えている。ただし、SEは誘電率の影響を受けるため、より誘電率の高いスラグモルタルを用いる場合を考慮する必要がある。そこで、融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層に線径0.14mmの金網を用いる場合、SEが十分に高い60メッシュ又は80メッシュの金網を採用すべきと考える。

なお、モルタル重ね金網はスラグモルタルと金網が一体化していないため、金網とスラグモルタルの隙間にある空気の影響により、スラグモルタルの金網に対する実効誘電率はスラグモルタルの誘電率よりも小さくなる⁵⁾。ただし、本研究では金網とスラグモルタルの隙間が小さいため実効誘電率と誘電率の差が小さく^{5), 7)}、図-5より、本研究で用いたモルタル重ね金網はSEの周波数依存も小さいため、考慮しない。

周波数2.45GHzにおける金網とモルタル重ね金網のSEと金網の開き目の関係を図-6に、周波数2.45GHzにおける金網のSEを図-7に、周波数2.45GHzにおけるモルタル重ね金網のSEを図-8に示す。

図-6より、金網、モルタル重ね金網共にSEと金網の開き目の関係は線径によらず強い負の相関がある。これは、金網の網目の開口が小さくなり、電波が通りにくくなったことを裏付けるものである。

ここで、図-7及び図-8より、金網のみであるか、モルタル重ね金網であるかに関わらず、メッシュが同じ場合は線径が太いほどSEは高くなる。これは、線径が大きくなるほど開口が小さくなる上、金網の開口の奥行きが大きくなることで、電波が金網を透過しにくくなるためである。図-7において、線径0.18mmの60メッシュの金網よりも線径0.10mmの80メッシュの金網の方が開き目は小さいにもかかわらず、SEは小さくなっている。また、図-8の線径0.18mmの60メッシュと線径0.10mmの80メッシュでも同様の状況が見受けられる。これは、金網の線径が細くなったことによって金網の開口の奥行きが小さくなり、電波が透過しやすくなったために生じたと考える。図-6、図-7、図-8より、図-6を用いて電波遮蔽材層の設計を行う場合、近似的には金網の開き目のみを考慮して設計できるが、厳密には線径も考慮して設計すべきである。

4.2 電波遮蔽特性測定用供試体のRLの測定結果

金網のRLと周波数の関係を図-9に示す。金網は電波吸収性能を持たず、金網を透過する電波も十分少ないため、RLは金網による散乱を示す。RLが高い場合、電波が垂直に反射する量は少ないと判断できる。

融雪用発熱モルタルブロックで用いる周波数2.45GHzにおいてRLは、いずれの金網も0.50~1.00dBの範囲内

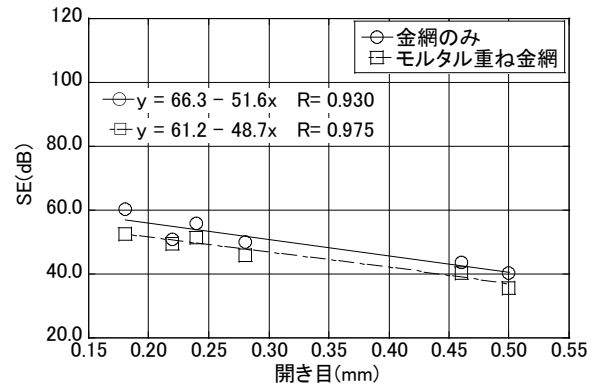


図-6 周波数2.45GHzにおける金網とモルタル重ね金網のSEと金網の開き目の関係

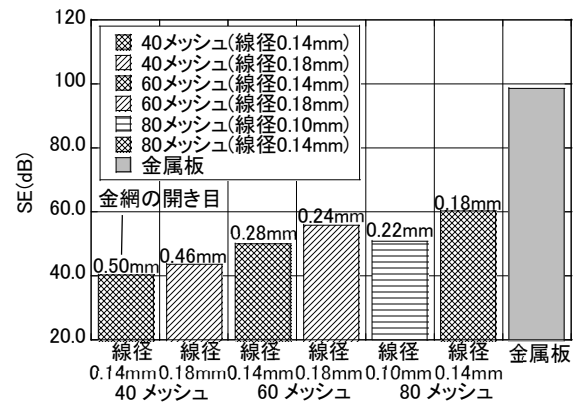


図-7 周波数2.45GHzにおける金網のSE

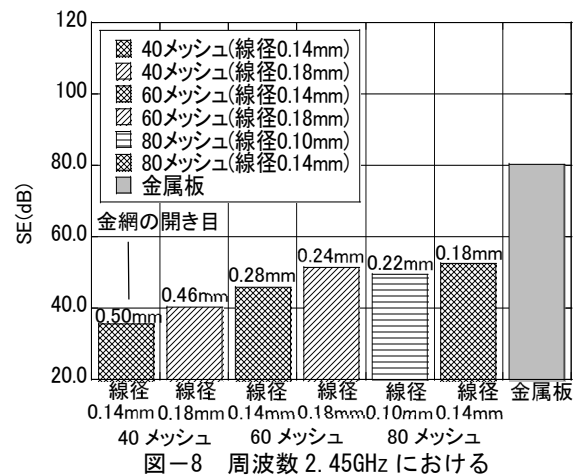


図-8 周波数2.45GHzにおけるモルタル重ね金網のSE

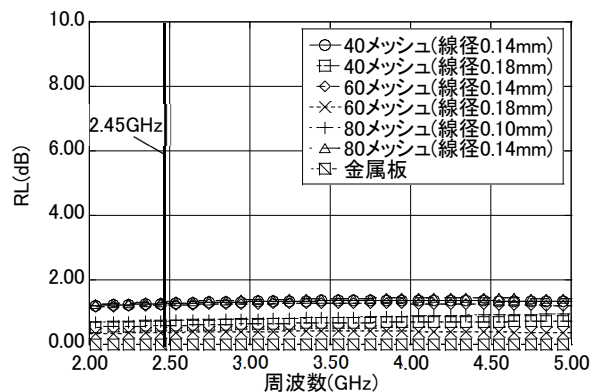


図-9 金網のRLと周波数の関係

であった。これはいずれの金網も照射した電波のほとんどが垂直に反射していることを表しているため、融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収性能に与える影響は軽微であると推定する。

モルタル重ね金網の RL と周波数の関係を図-10 に示す。RL のピーク及び値について、モルタル重ね金網同士ではほとんど差が無いが、金属板とはわずかに差がある。このため、融雪用発熱モルタルブロックの設計は電波遮蔽材層に金網を用いる場合、厳密には金網を用いることを前提として設計を行う必要があり、金属板を用いることを前提として行った設計はそのまま流用できず、補正する必要がある。具体的には、電波吸収材層の厚さを厚くする、調合を変更する等の補正が必要となる。

以上より、金網を融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層に用いる場合、電波の散乱の点では問題無いが、設計は金属板と金網の違いを考慮して行う必要がある。

4.3 曲げ試験の結果

各金網及びブランクの供試体の曲げ強度を図-11、80 メッシュで線径が 0.14mm の供試体の破断後の断面を写真-1 に示す。破断後いずれの供試体においても曲げ強度はブランクとほぼ差はなく、また破断後のいずれの供試体も写真-1 のような断面であり、界面剥離は生じていなかった。

測定範囲内においては、SE が十分大きい金網をモルタル内に配置しても、曲げ強度に及ぼす影響はなく、界面剥離も生じないことが分かった。

40 メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係を図-12、60 メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係を図-13、80 メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係を図-14 に示す。いずれの金網を用いた供試体も砂モルタルとスラグモルタルが一体となって曲げ破壊し、最大曲げ応力に達した後も残った金網が曲げ応力を負担していた。これは、曲げ破壊後も金網の電波遮蔽が期待できることを表す。ただし、40 メッシュで線径が 0.18mm の金網、60 メッシュで線径が 0.14mm と 0.18mm の金網及び 80 メッシュで線径が 0.14mm の金網を用いた供試体に比べ、40 メッシュで線径が 0.14mm の金網及び 80 メッシュで線径が 0.10mm の金網を用いた供試体は曲げ応力と金網による曲げ応力が残っていた変位が小さい。

ここで、金網は縦方向と横方向の鋼線が一体となっており、曲げ断面と平行な鋼線は金網とモルタルの付着に影響するため、曲げ応力との関係には単位体積当たりの金網の体積が影響すると考える。最大曲げ応力に達した後金網による曲げ応力が残っていた変位(図-12 に示す範囲)と単位体積当たりの金網の体積の関係を図-15 に示す。金網が負担した変位と単位体積当たりの金網の体

積には、正の相関がみられた。つまり、融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層に金網を用いる場合、内部に配置する金網の体積を大きくするほど、融雪用発熱モルタルブロックに曲げ荷重がかかって割れが生じた際にも、内部の金網が破断せずに残って電波を遮蔽するので外部への電波の漏洩を防ぐことができる。

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) 融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層に線径 0.14mm の金網を用いる場合、SE が十分に高い 60 メッシュ又は 80 メッシュの金網を採用すべき。
- 2) 電波遮蔽材層の設計を行う場合、近似的には金網の

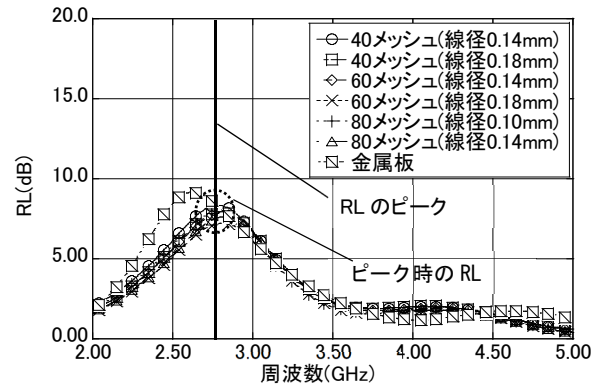


図-10 モルタル重ね金網の RL と周波数の関係

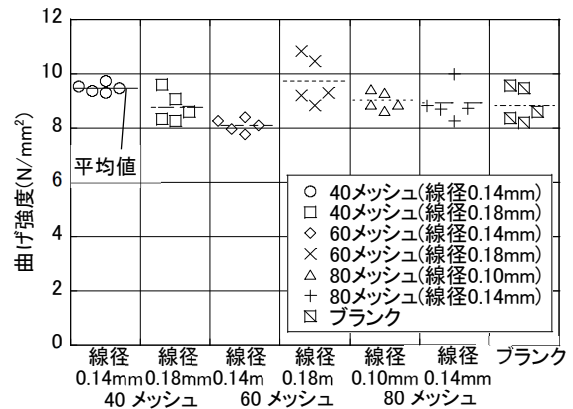


図-11 各金網及びブランクの供試体の曲げ強度

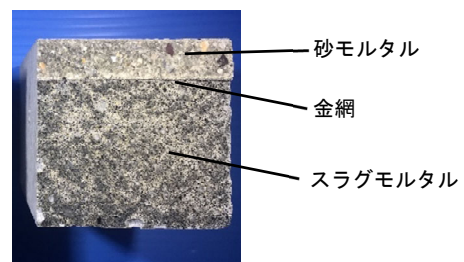


写真-1 80 メッシュで線径 0.14mm の供試体の破断後の断面

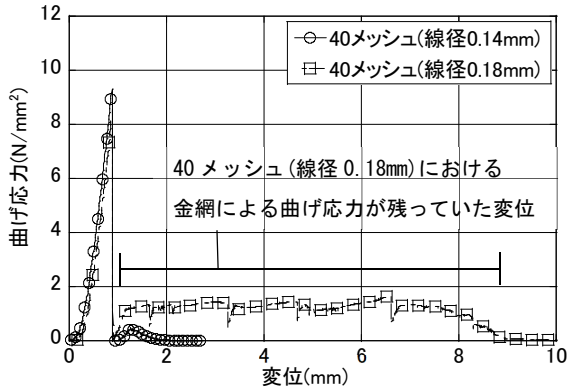


図-12 40メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係

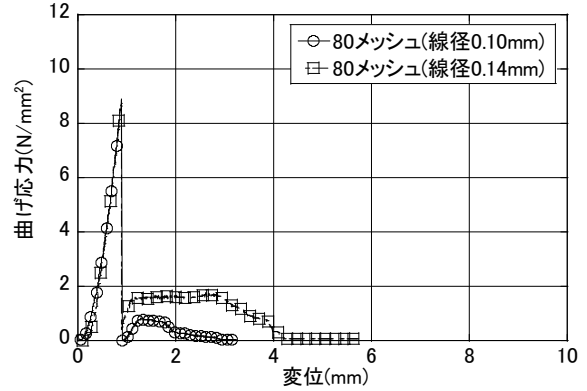


図-14 80メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係

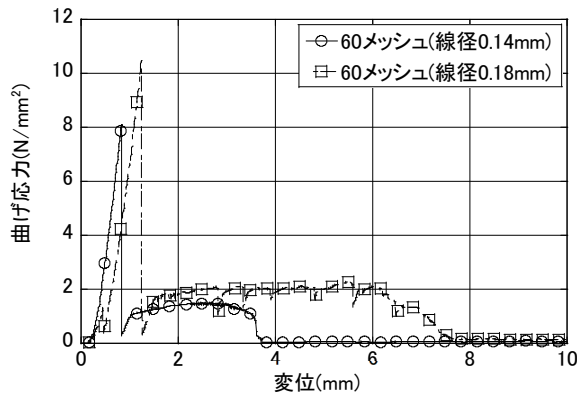


図-13 60メッシュの金網を用いた供試体の曲げ応力と変位の関係

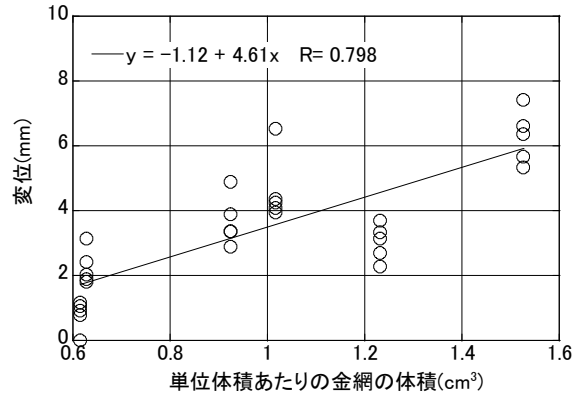


図-15 金網による曲げ応力が残っていた変位と単位体積あたりの金網の体積の関係

開き目のみを考慮して設計できるが、厳密には線径も考慮して設計すべき。

- 3) 金網を融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材層に用いる場合、電波の散乱の点では問題無いが、設計は金属板と金網の違いを考慮して行う必要がある。
- 4) SE が十分大きい金網をモルタル内に配置しても、曲げ強度に及ぼす影響はなく、界面剥離も生じない。
- 5) 金網の体積を大きくするほど、融雪用発熱モルタルブロックに曲げ荷重がかかって割れが生じた際にも、内部の金網が破断せずに残って電波を遮蔽するので外部への電波の漏洩を防ぐことができる。

謝辞

名古屋工業大学池田哲夫名誉教授、テン株式会社、日本環境アメニティ株式会社、電磁環境研究室堀之内淳氏及び太陽金網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) Yosuke Ito, Shinji Kawabe : DEVELOPMENT OF A HEATING MORTAR BLOCK SYSTEM FOR SNOW MELTING THROUGH QUASIMICROWAVES, Proceeding of Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Vol.1, pp. 147-152, 2018.10
- 3) Yosuke Ito, Shinji Kawabe and Satoshi Ohba : Effect 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, 2018.4
- 4) 株式会社星野産商: ウィンドスターズ販促資料, 2015.6
- 5) 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, No.731, pp.1-10, 2017.1
- 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, 2014.5
- 7) BEN A. MUNK : FREQUENCY SELECTIVE SURFACES(Theory and Design), JOHN WILEY & SONS, INC., 2000