

論文 電気炉酸化スラグと発泡スチロールビーズを用いたモルタルの電気炉酸化スラグの粒径が電波吸収性能に及ぼす影響

池田 悠人*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・福原 廉人*4

要旨： 建築内部空間における通信障害を解決するため、電気炉酸化スラグと発泡スチロールビーズを骨材としたビーズスラグモルタルによる安価で作製が容易な平板形状の広帯域電波吸収体が研究されている。本研究では電気炉酸化スラグの粒径の変化がビーズスラグモルタルの流動性と電波吸収性能に及ぼす影響を検討した。ビーズスラグモルタルの流動性は骨材分散距離に準じ、骨材に用いる電気炉酸化スラグの粒径が 1.2-2.5mm, 0.3-0.6mm, 0.6-1.2mm の順に高くなると分かった。ビーズスラグモルタルは骨材分散距離が大きくなるほど広帯域電波吸収体を設計する際の水セメント比を小さく、加振時間を短くすることができる。

キーワード： 電波吸収モルタル, 電気炉酸化スラグ, 発泡スチロールビーズ, 粒径, 広帯域, 加振

1. はじめに

建築内部空間において、無線 LAN, 携帯電話, 電子レンジなど電波を使用する機器同士の干渉による通信障害を防ぐために、広帯域電波吸収体が必要とされている。電波吸収体は電波照射方向から徐々に複素比誘電率と複素比透磁率を高くすることで広帯域電波吸収体となる。そこで、複素比誘電率と複素比透磁率の異なる材料を積層した多層型電波吸収体や、複素比誘電率と複素比透磁率の低い空気を活用したピラミッド型電波吸収体がある。しかし、これらは作製が困難であるため高価となり、一般建築物での大量使用が難しい。

密度と複素比誘電率および複素比透磁率が高い電波吸収材料の電気炉酸化スラグ(以下、スラグとする)と、スラグより密度と複素比誘電率および複素比透磁率が低い発泡スチロールビーズ(以下、ビーズとする)を骨材として用いたモルタル(以下、ビーズスラグモルタルとする)は未硬化時に加振することで、図-1 に示すように電波照射面から底面に向けて複素比誘電率および複素比透磁率が徐々に高くなる広帯域電波吸収体となる¹⁾。ビーズスラグモルタルは一般的なモルタルと同じ製造設備が使用でき、製造工程もほぼ変わらないため、多層型電波吸収体やピラミッド型電波吸収体よりも安価に製造できる。

骨材の粒径はモルタルの流動性に影響し、さらに、スラグの粒径はモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率に影響を及ぼす²⁾。しかし、既往の研究^{1),3),4)}では、スラグの粒径がビーズスラグモルタルの流動性と電波吸収性能に及ぼす影響は検討されていない。本研究では、骨材のスラグの粒径がビーズスラグモルタルの流動性と電波吸収性能に及ぼす影響を検討する。

2. 広帯域電波吸収体¹⁾

多層型電波吸収体は広帯域電波吸収体の 1 種である。単層型電波吸収体とは異なり、複数の異なる複素比誘電率および複素比透磁率を持つ層から構成される。

図-2 に示す N 層の多層型電波吸収体の反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ は、 N 層目の規格化入力ラインピーダンス $\hat{Z}_N$ から式(1)を用いて求めた反射係数 $\hat{S}$ を用いて式(2)から算出する。

$$\hat{S} = \frac{\hat{Z}_N - 1}{\hat{Z}_N + 1} \quad (1)$$

$$RL = -20 \log_{10} |\hat{S}| \quad (2)$$

ここで、 $\hat{Z}_N$ は式(3), (4), (5)から求められる。

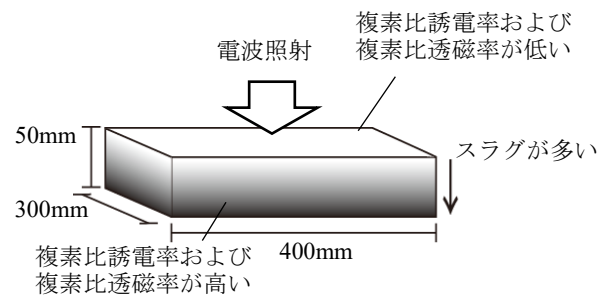


図-1 ビーズスラグモルタル

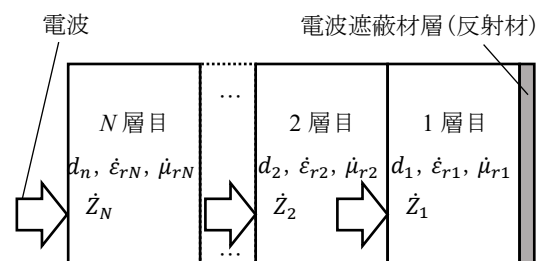


図-2 多層型電波吸収体の構成

*1 名古屋工業大学大学院 社会工学系プログラム (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 准教授 博士(工学) (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 社会工学科

$$\dot{Z}_N = \sqrt{\frac{\mu_{rN}}{\epsilon_{rN}}} \tan h \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{rN} \mu_{rN}} \cdot d_N + \theta_{N-1} \right) \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_{rN}}{\epsilon_{rN}}} \tan \theta_{N-1} = \dot{Z}_{N-1} \quad (4)$$

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}} \tan h \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}} \cdot d_1 \right) \quad (5)$$

ここで、 ϵ_{rN} は N 層目の複素比誘電率、 μ_{rN} は N 層目の複素比透磁率、 d_N は N 層目の厚さ、 λ は電波の波長、 j は虚数単位を示す。

単層型電波吸収体では、目的の周波数の電波以外に対しては電波吸収体の複素比誘電率および複素比透磁率が過大または過少となり、電波は電波吸収体表面で反射しやすくなる。そのため、特定の周波数の電波を目的とした狭帯域電波吸収体には向くが、幅広い周波数の電波を目的とする広帯域電波吸収体には向かない。

一方、多層型電波吸収体では、電波が照射される側は表面で電波を反射しないように複素比誘電率および複素比透磁率を小さくし、反射側は電波吸収性能が高くなるように複素比誘電率および複素比透磁率を大きくすることで、幅広い周波数の電波に対して高い電波吸収性能を得ることができる。

本研究で用いるビーズスラグモルタルは、加振することによって、スラグより密度と複素比誘電率および複素比透磁率が小さいビーズが電波照射側となる上面側に集まり、一方、ビーズより密度と複素比誘電率および複素比透磁率が大きいスラグは下面側に集まる。よって、適度に加振したビーズスラグモルタルは多層型電波吸収体を形成すると考える。

3. 供試体

表-1 にビーズスラグモルタルの調合を、表-2 にスラグとビーズの物性を、表-3 にスラグの組成概算値を、表-4 にスラグおよびスラグとビーズを混合した骨材（以下、混合骨材とする）の実積率と平均粒径を示す。水セメント比は5%ごと50, 55, 60%の3条件とし、スラグとビーズは容積比で1:1とする。スラグは粒径が0.3~0.6mm（以下、0.3-0.6とする）、0.6~1.2mm（以下、0.6-1.2とする）、1.2~2.5mm（以下、1.2-2.5とする）の3条件とする。ビーズの粒径は約2.0mmである。セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³）を使用する。

供試体を図-1に示す。供試体は底面400×300mm、厚さ50mmとし、練り混ぜ終了から20分後にテーブルバイブレータで加振する。使用するテーブルバイブレータの振動数は3000~3600VPMとする。加振時間は10秒ごと5, 15, 25秒の3条件とする。テーブルバイブレータと接する面を下面とし、上面側から電波を照射する。

作製した供試体は気中養生を1日間、水中養生を7日

間行い、水中養生後20±2℃の室内で質量の増減が48時間で0.1%以下になるまで静置する。

4. 測定方法

4.1 フロー値の測定

ビーズスラグモルタルの流動性はフロー値で評価する。フロー試験はJIS R 5201:2015（セメントの物理試験方法）に基づいて行う。試験は3種類の水セメント比と3種類のスラグの組み合わせによる、計9種類の条件で行う。

4.2 スラグ分布の測定

スラグの粒径の違いが、供試体断面におけるスラグ分布に及ぼす影響を確認するために行う。スラグ分布は、供試体の単位断面積当たりのスラグが占める面積（以下、スラグ面積率とする）によって評価する。底面を400×300mmとして作製した供試体は型枠の影響を排除して切断面を観察するため、コンクリートカッターで底面が100×300mmのスラグ面積率測定用供試体と、300×300mmの反射減衰量測定用供試体に分割する。図-3にスラグ面積率測定方法の概要を示す。スラグ面積率測定用供試体の切断面の写真を撮影し、厚さ方向に20層に等しく区切る。上面側1層目、下面側を20層目として、撮影した写真を画像解析ソフト（NIH製）で二値化し、各層のスラグが占める面積 $t[\text{mm}^2]$ を求める⁵⁾。 t および測定する各層の断面積 $s[\text{mm}^2]$ を用いて、スラグ面積率 $SAR[\%]$ は、式(6)で表される。

$$SAR = \frac{t}{s} \times 100 \quad (6)$$

表-1 ビーズスラグモルタルの調合（質量比）

水セメント比(%)	セメント	水	スラグ	ビーズ
50	2.00	1.00	5.96	0.04
55		1.10		
60		1.20		

表-2 スラグとビーズの物性

	粒径 (mm)	絶乾密度 (g/cm ³)
スラグ	1.2~2.5	3.57
	0.6~1.2	3.60
	0.3~0.6	3.59
ビーズ	約2.0	0.026

表-3 スラグの組成概算値（質量比）

MgAl ₂ O ₄	MgFeAlO ₄	FeO	Ca ₇ Mg(SiO ₄) ₄	Total
40	28	16	16	100

表-4 スラグおよび混合骨材の実積率と平均粒径

粒径(mm)	スラグの 実積率(%)	混合骨材の 実積率(%)	混合骨材の 平均粒径(mm)
1.2~2.5	61.5	67.2	1.5
0.6~1.2	62.7	70.5	0.9
0.3~0.6	63.3	72.4	0.6

ここで写真-1, 2, 3 に骨材分布の状況例を示す。骨材分布の状況は写真-1 に示す分散, 写真-2 に示すやや分離, 写真-3 に示す 2 層に分離の 3 種に分類できる。分散の場合, スラグ面積率は層数が増してもほとんど変化せず, 単層型電波吸収体として顕著に電波を吸収する周波数(以下, ピークとする)のある狭帯域電波吸収体となる。やや分離の場合, 層数の増加と共に徐々にスラグ面積率は上昇して, 広帯域電波吸収体となる。2 層に分離の場合, スラグ面積率が急上昇する層を確認できる。電波吸収性能は 2 層型電波吸収体としてピークのある狭帯域電波吸収体となる。本研究では骨材分布の状況として広帯域電波吸収体となるやや分離の状態が望ましい。

4.3 反射減衰量の測定

スラグの粒径の違いが, 水セメント比および加振時間による電波吸収性能の変化に及ぼす影響を確認するために反射減衰量の測定を行う。本研究では電波吸収性能を反射減衰量で評価する。図-4 に測定装置を示す。供試体は反射減衰量測定用供試体を用いる。測定は周波数 2 ～10GHz で行う。電波はネットワークアナライザ(K 社製)から送信され, 同軸ケーブルを介し, ダブルリジッドホーンアンテナから供試体に照射される。照射された電波は供試体に反射, 吸収されるか供試体を透過する。透過した電波は金属製の供試体設置台に反射され, 供試体で反射された電波と共にネットワークアナライザで受信される。

このとき, ネットワークアナライザにおける入射波を α_1 , 反射波を β_1 とすると反射係数 $\dot{S}_{11}$ は式(7)で示される。

$$\dot{S}_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (7)$$

$\dot{S}_{11}$ はベクトル量であるので, 実部を a , 虚部を b , 虚数単位を j とすると, 式(8)で表せる。これをスカラー量の反射係数 $|\dot{S}_{11}|$ に変換すると式(9)となる。この $|\dot{S}_{11}|$ を用いて式(10)から反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ を算出する。

$$\dot{S} = a + jb \quad (8)$$

$$|\dot{S}_{11}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (9)$$

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

本研究では建築空間内で用いられやすい 2.4～6.5GHz において 10dB 程度の反射減衰量をもつものを広帯域電波吸収体とする。

5. 測定結果と考察

5.1 フロー値の測定

図-5 に各スラグの粒径におけるフロー値と水セメント比の関係を示す。図-6 に各スラグの粒径における骨材分散距離と水セメント比の関係を示す。同じ水セメント比では 1.2-2.5, 0.3-0.6, 0.6-1.2 の順にフロー値が大きくなった。これは骨材分散距離が関係していると考えられる。

Weymouth⁶⁾は, 骨材分散距離がコンクリートおよびモルタルの流動性に対して支配的な値であり, 骨材分散距離が大きいほどコンクリートおよびモルタルの流動性は高くなることを示した。骨材分散距離 $D_{ep}[\times 10^3 \mu\text{m}]$ は骨材の実積率 $C_a[\%]$, 骨材体積比 $V_a[\%]$, 骨材平均寸法

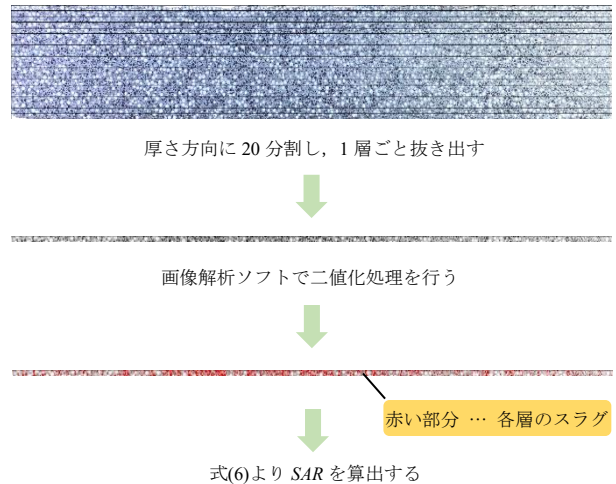


図-3 スラグ面積率測定方法の概要



写真-1 供試体断面(分散)

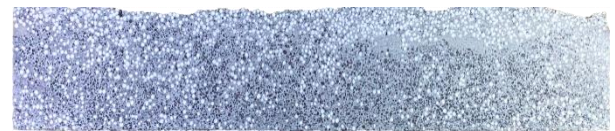


写真-2 供試体断面(やや分散)



写真-3 供試体断面(2層に分離)

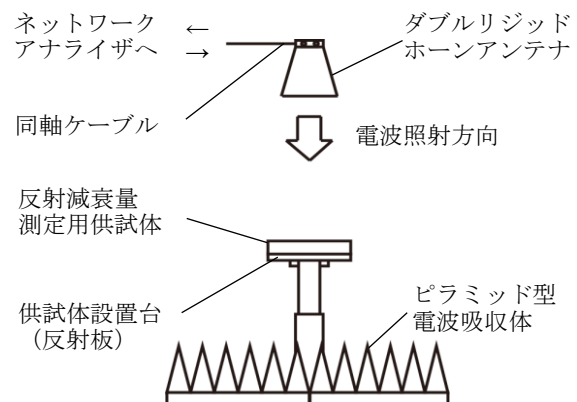


図-4 反射減衰量の測定装置

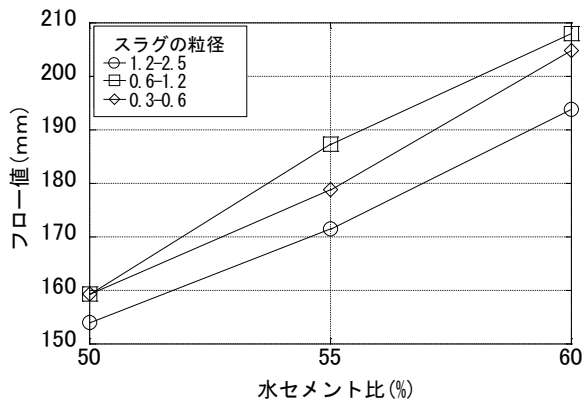


図-5 フロー値と水セメント比の関係

D_a [mm]を用いて式(11)から算出する。

$$D_{ep} = \left(\sqrt[3]{\frac{C_a}{V_a}} - 1 \right) D_a \quad (11)$$

ここで、表-4 の値を用いて、ビーズ・スラグ混合骨材の平均寸法 D_a [mm]は、呼び寸法が小さい方から数えたふるいの順番 n 、 n 番目のふるいの呼び寸法 D_n [mm]、 n 番目のふるいに留まる骨材の体積割合 V_n [%]を用いて式(12)^{7),8)}により算出する。

$$D_a = \frac{1}{\sum_{n=1} \frac{(\ln D_{n+1} - \ln D_n)}{D_{n+1} - D_n} V_n} \quad (12)$$

三宅ら⁹⁾は細骨材と粗骨材を混合した骨材の実積率を算出する式を求めた。その式を参考に、混合骨材の実積率 C_a [%]は、試験容器内の試料の質量 W_j [g]、試験容器内のスラグの質量 W_s [g]、試験容器内のビーズの質量 W_b [g]、試験容器内の体積 V_j [cm³]、スラグの絶対乾密度 ρ_s [g/cm³]、ビーズの絶対乾密度 ρ_b [g/cm³]を用いて式(13)より算出する。

$$C_a = \frac{100 \cdot W_j \cdot (\rho_s W_b + \rho_b W_s)}{V_j \cdot \rho_s \rho_b (W_s + W_b)} \quad (13)$$

図-5, 6 より、同じ水セメント比において骨材分散距離は1.2-2.5, 0.3-0.6, 0.6-1.2の順に大きくなり、フロー値の大小関係と骨材分散距離の大小関係が一致した。これより、ビーズスラグモルタルの流動性は骨材分散距離に準ずる。また、ビーズスラグモルタルの流動性は普通モルタルの流動性と同等に骨材分散距離で評価出来る。

5.2 スラグ分布の測定結果と考察

(1) スラグの粒径と水セメント比の影響

図-7 に各粒径のスラグを用いて、水セメント比5%ごと50~60%で、25秒加振した供試体のスラグ面積率と層数の関係を示す。なお、供試体上面側の表面はビーズにより凹凸が生じているため、1層目の値は参考値とする。

図-7(a)より、スラグの粒径が1.2-2.5の場合、分散となる。ここで写真-4に粒径1.2-2.5, 水セメント比60%, 加振時間25秒, 写真-5に粒径0.6-1.2, 水セメント比60%, 加振時間25秒で作製した供試体の断面写真を示す。写真-4より、ビーズが多い層、セメントペーストの層、

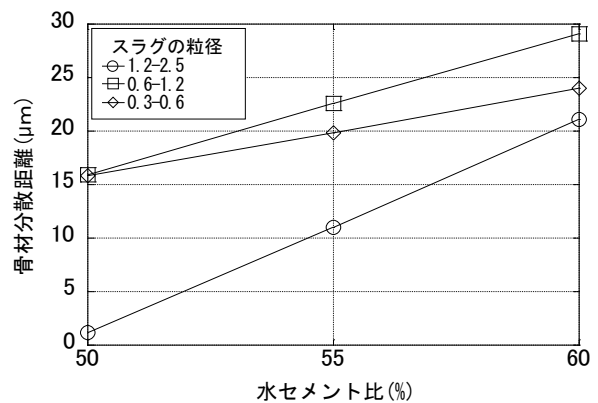


図-6 骨材分散距離と水セメント比の関係

ビーズとスラグが分散している層の3層に分かれていることが確認できる。一方、写真-5ではビーズが多い層とスラグが多い層の2層に分離している。よって、図-7(a)より、1.2-2.5は2層に分離しているようにも見えるが、分散と判断している。図-7(b)より、スラグの粒径が0.6-1.2の場合、水セメント比50%で分散し、水セメント比55%以上で2層に分離する。骨材分散距離が大きいため、小さな水セメント比でも流動性が高くなり、2層に分離したと考える。図-7(c)より、スラグの粒径が0.3-0.6の場合、水セメント比50%は分散し、水セメント比55%以上でやや分離となる。

以上より、加振時間25秒ではスラグ粒径は1.2-2.5, 0.3-0.6, 0.6-1.2の順に分離が生じる水セメント比は小さくなる。また、図を省略したが、加振時間5秒, 15秒でも同様の傾向が見られる。これは5.1より、骨材分散距離が大きい順にビーズスラグモルタルの流動性が高くなり、同じ加振時間でもスラグが流動しやすくなったためと考える。

(2) スラグの粒径と加振時間の影響

図-8 に各粒径のスラグを用いて、加振時間5秒ごと5~25秒、水セメント比55%で作製した供試体のスラグ面積率と層数の関係を代表として示す。なお、図-7と同様に1層目の値は参考値とする。

図-8(a)より、スラグの粒径が1.2-2.5の場合、加振時間に関わらず、上層部分を除いてスラグとビーズが分散している。図-8(b)より、スラグの粒径が0.6-1.2の場合、加振時間5秒以下では分散、加振時間15秒ではやや分離、加振時間25秒以上で2層に分離する。図-8(c)より、スラグの粒径が0.3-0.6の場合、加振時間15秒までは分散し、加振時間25秒でやや分離する。

以上より、水セメント比55%では粒径が1.2-2.5, 0.3-0.6, 0.6-1.2の順に分離が生じ始める加振時間は短くなる。また、図を省略したが、水セメント比50%, 60%でも同様の傾向が見られる。これは5.1より、骨材分散距離が大きい順にビーズスラグモルタルの流動性が高くなり、同じ水セメント比でもスラグが流動しやすくなったため

と考える。

5.3 反射減衰量の測定結果と考察

(1) スラグの粒径と水セメント比の影響

図-9 に各粒径のスラグを用いて、水セメント比 5% ごと 50~60% で、25 秒加振した供試体の反射減衰量と周波数の関係を示す。

図-9(a) より、スラグの粒径が 1.2-2.5 の場合、いずれの水セメント比でもピークが生じる。なお、水セメント比 50% では測定範囲外の周波数でピークが生じると考える。図-9(b) より、スラグの粒径が 0.6-1.2 の場合、水セメント比 50% 以下では測定範囲外の周波数でピークが生じると考える。水セメント比 55% 以上ではピークが生じるため、水セメント比 50%~55% の間に広帯域電波吸収体となる水セメント比があると考ええる。図-9(c) より、スラグの粒径が 0.3-0.6 の場合、水セメント比 50% では測定範囲外の周波数でピークが生じると考える。水セメント比 55% ではなだらかなピークを生じるが、周波数 2GHz でも反射減衰量が 10dB 以上となり広帯域電波吸収体の特性を示す。水セメント比 60% ではピークが生じた。以上より、骨材分散距離が大きくなるほど広帯域電波吸収体を設計する際の水セメント比を小さくできると考える。

(2) スラグの粒径と加振時間の影響

図-10 に各粒径のスラグ、を用いて、加振時間 10 秒ごと 5~25 秒、水セメント比 55% で作製した供試体の反射減衰量と周波数の関係を示す。

図-10(a) より、スラグの粒径が 1.2-2.5 の場合、いずれの加振時間でもピークが生じる。なお、加振時間 5 秒

では測定範囲外の周波数でピークが生じると考える。図-10(b) より、スラグの粒径が 0.6-1.2 の場合、加振時間 5 秒では周波数 10GHz より高い周波数帯でピークが生じると考える。加振時間 15 秒では 4~10GHz でピークを持たず、広帯域電波吸収体の特性を示す。加振時間 25 秒ではピークが生じる。図-10(c) より、スラグの粒径が 0.3-0.6 の場合、加振時間 15 秒までは測定範囲外の周波数でピークが生じると考える。加振時間 25 秒ではなだらかなピークを生じるが、周波数 2GHz でも反射減衰量が 10dB 以上となり広帯域電波吸収体の特性を示す。以上より、骨材分散距離が大きくなるほど広帯域電波吸収体を設計する際の加振時間を短くできると考える。

6. まとめ

本研究の測定範囲内でビーズスラグモルタルについて以下のことが分かった。

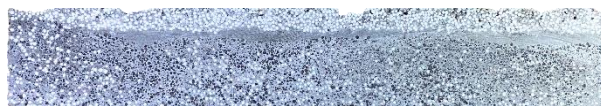
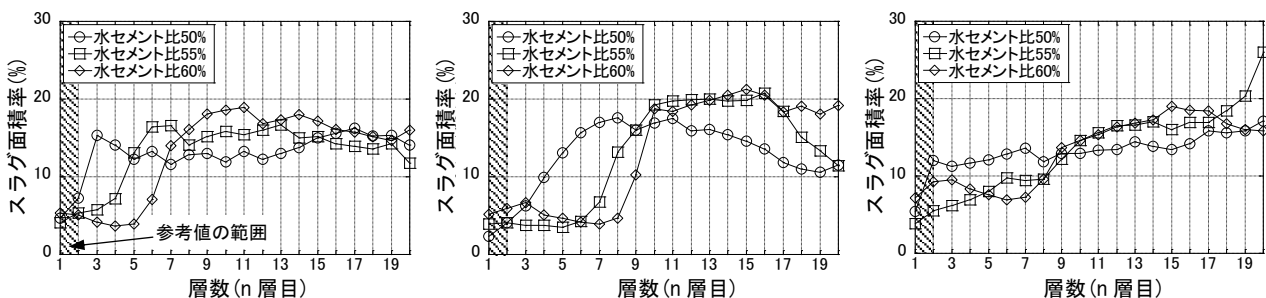


写真-4 スラグの粒径 1.2-2.5, 水セメント比 60%, 加振時間 25 秒の供試体断面

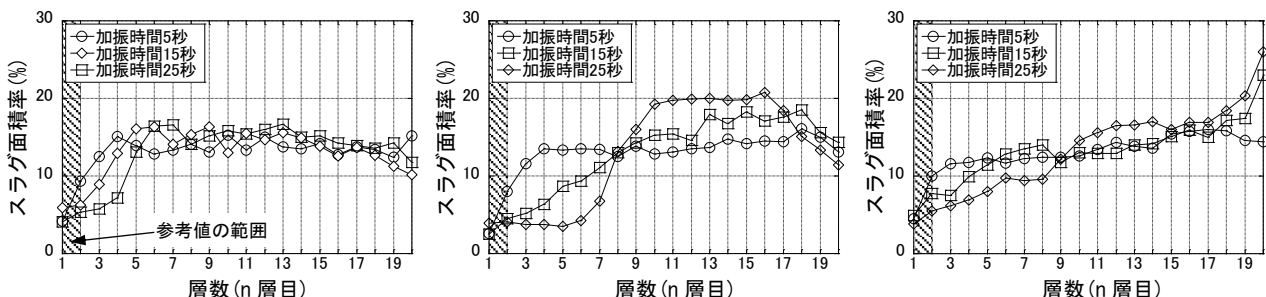


写真-5 スラグの粒径 0.6-1.2, 水セメント比 60%, 加振時間 25 秒の供試体断面



(a) 粒径 1.2-2.5, 加振時間 25 秒 (b) 粒径 0.6-1.2, 加振時間 25 秒 (c) 粒径 0.3-0.6, 加振時間 25 秒

図-7 水セメント比 50~60% の供試体のスラグ面積率と層数の関係



(a) 粒径 1.2-2.5, 水セメント比 55% (b) 粒径 0.6-1.2, 水セメント比 55% (c) 粒径 0.3-0.6, 水セメント比 55%

図-8 加振時間 5~25 秒の供試体のスラグ面積率と層数の関係

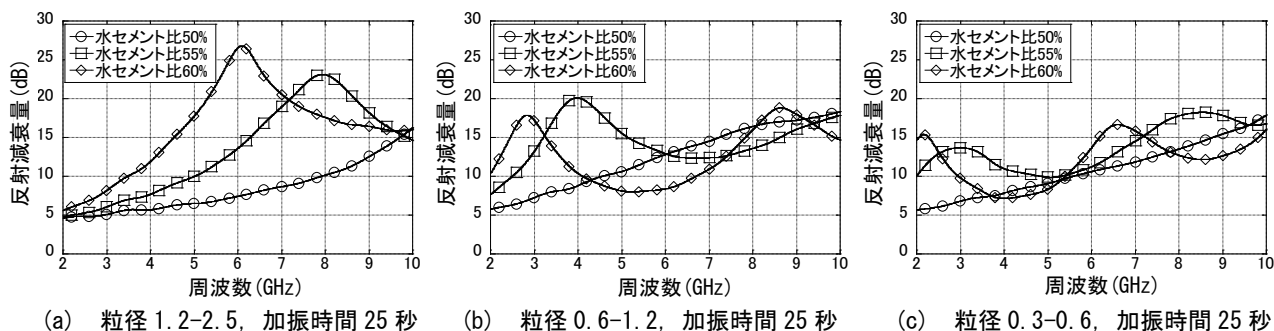


図-9 水セメント比 50～60%の供試体の反射減衰量と周波数の関係

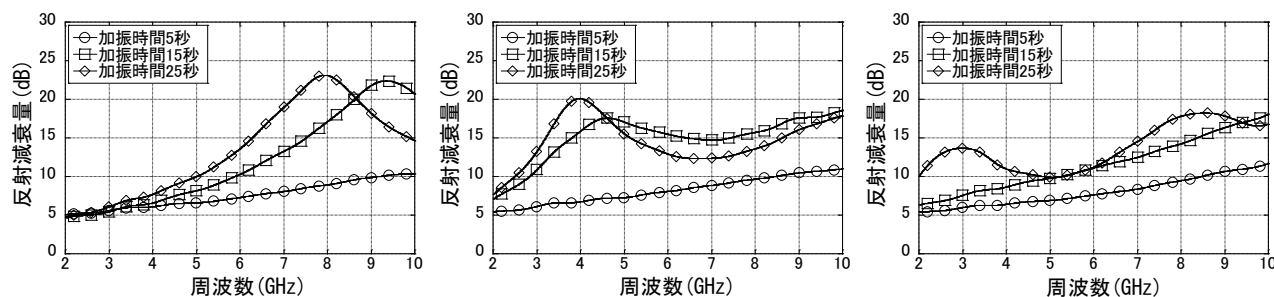


図-10 加振時間 5～25 秒の供試体の反射減衰量と周波数の関係

- 1) 流動性は骨材分散距離に準ずる。
- 2) スラッグの粒径は 1.2～2.5mm, 0.3～0.6mm, 0.6～1.2mm の順に分離が生じ始める水セメント比は小さくなり、加振時間は短くなる。
- 3) 骨材分散距離が大きくなるほど広帯域電波吸収体を設計する際の水セメント比を小さくできる。
- 4) 骨材分散距離が大きくなるほど広帯域電波吸収体を設計する際の加振時間を短くできる。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金 2022 年度研究助成金の助成・支援を受けたものです。日本環境アメニティ株式会社、電磁環境研究室の堀之内淳氏、株式会社星野産商、山口化成工業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) 伊藤洋介, 河辺伸二, 井上裕太, 中川奏人: 電気炉酸化スラグ、軽量細骨材及び発泡スチロールビーズを混入したモルタルの加振時間が電波吸収性能に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.74, No.1, pp.118-124, 2020.3
- 2) 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, 2017.6
- 3) 伊藤洋介, 河辺伸二, 寺西洸人, 井上裕太: 電気炉

酸化スラグ細骨材と発泡スチロールビーズを混入したモルタルの水セメント比と加振時間が電波吸収性能に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.188-194, 2021.3

- 4) 池田悠人, 伊藤洋介, 河辺伸二, 寺西洸人, 西島正貴, ウン・ソンミン: 電気炉酸化スラグと発泡スチロールビーズを用いたモルタルの発泡スチロールビーズの粒径が電波吸収性能に及ぼす影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.60, pp.1-4, 2022.2
- 5) 山柿健人, 中田喜久, 唐沢智之, 大塚秀三, 宮田敦典, 黒川海人: テーブルパイププレートを用いて締め固めたコンクリートの材料分離に関する実験的研究 その 1 実験概要および小型容器ブリーディング量, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.311-312, 2019.9
- 6) C.A.G.Weymouth: Effects of Particle Interference in Mortars and Concretes, Rock Products, Vol.36, No.2, pp.26-31, 1933.2
- 7) 近田孝夫: 余剰ペースト厚さによるコンクリートのコンシステンシーの評価に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 1997.3
- 8) 徳光善治: 粉体のつめこみについて, 粉体工学, 1965 年 9 月号, pp.29-34, 1965.9
- 9) 三宅淳一, 松下博通, 取違剛: 余剰水膜によるモルタルおよびコンクリートのコンシステンシーの評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.306-319, 2006.5