

論文 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モルタルのフロー値と粘度が骨材分布と電波吸収性能に及ぼす影響

矢部 啓悟*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・池田 悠人*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。本研究ではビーズスラグモルタルに増粘剤を添加し、ビーズスラグモルタルの水セメント比、フロー値そして粘度のそれぞれが加振後の骨材の分布状況と電波吸収性能に及ぼす影響を検討した。結果、本測定範囲内ではビーズスラグモルタルの加振後の骨材の分布状況と電波吸収性能に水セメント比とフロー値が与える影響は小さく、粘度が直接的な影響を与えていると考える。

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, フロー値, 粘度, 加振, 広帯域

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。

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⁾。

著者らはビーズスラグモルタルの水セメント比と加振時間が、骨材の分布状況および電波吸収性能に及ぼす影響を検討し²⁾、モルタル内に均一に分散したスラグとビーズが二層に分離するまでは、水セメント比と加振時間の増加に伴い、電波吸収性能が上昇することを示した。つまり、ビーズスラグモルタルの電波吸収性能は加振後の骨材の分布状況に依存し、骨材の分布状況を制御することで、電波吸収性能を制御することができる。そして、骨材の分布状況にはビーズスラグモルタルの流動性が影響していると考えられ、既往の研究^{3),4)}では、流動性をフロー値で評価し、骨材の分布状況との関係を確認した。また、著者らはビーズスラグモルタルの流動性をフロー値と粘度の二つの指標で評価した⁵⁾。しかし、フロー値と粘度が互いに関係する値であったため、フロー値のみまたは粘度のみがビーズスラグモルタルの流動性に及ぼす影響は明らかに

されていない。

本研究では、ビーズスラグモルタルに増粘剤を添加し、水セメント比と増粘剤の添加量がビーズスラグモルタルのフロー値と粘度に及ぼす影響を確認する。また、水セメント比、フロー値、粘度が異なる供試体を作製し、加振時間ごとの骨材の分布状況と電波吸収性能を比較することで、水セメント比、フロー値、粘度が加振後の骨材の分布状況と電波吸収性能に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 にスラグとビーズの物性を、表-2 にスラグの組成概算値を示す。スラグは粒径が0.3~0.6mmである。ビーズの粒径は約3.0mm、発泡倍率は60倍とする。なお、ビーズは静電気の影響でふるいをういて粒径を測定することが不可能であったため、粒径は発泡倍率から算出した概算値である。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。増粘剤はセルロース系の増粘剤を使用する。

2.2 供試体

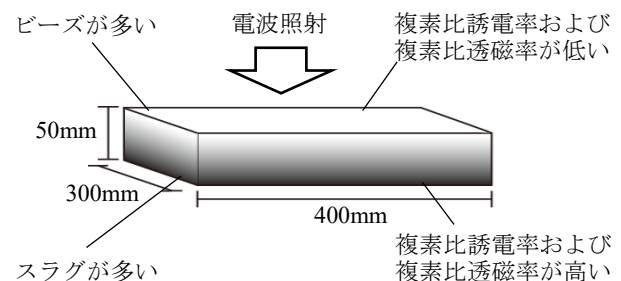


図-1 ビーズスラグモルタル

*1 名古屋工業大学 社会工学科 (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 (フェロー会員)

*4 名古屋工業大学大学院 工学専攻 (学生会員)

(1) フロー値と粘度の評価

供試体には練り混ぜ直後の未硬化のビーズスラグモルタルを用いる。表-3 にビーズスラグモルタルの調合を示す。水セメント比は 45, 50, 55, 60%の 4 条件とする。増粘剤の添加量(以下、増粘剤添加量とする)は水に対する質量比で、0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00w%の 5 条件とする。スラグとビーズは容積比で 1:1 とする。

練り混ぜは、まずミキサにセメント、スラグ、増粘剤を投入し、30 秒間空練りする。次にビーズを投入し、30 秒間空練りする。最後に水を投入し、3 分間練り混ぜる。

(2) 骨材の分布状況と電波吸収性能の評価

供試体は表-3 で示す調合表のうち、4.1 節で得られた結果をもとに、以下の 1)~3)に示す調合について、それぞれ確認事項について比較検討できるよう作製する。

1)水セメント比が供試体断面における骨材の分布状況に及ぼす影響を確認するための、水セメント比のみを変化させてフロー値および粘度を固定した 2 種類の調合。

2)粘度が供試体断面における骨材の分布状況に及ぼす影響を確認するための、フロー値を固定して粘度のみを変化させる 2 種類の調合。

3)フロー値が供試体断面における骨材の分布状況に及ぼす影響を確認するための、フロー値のみを変化させて粘度は固定する 2 種類の調合。

図-1 に供試体の形状を示す。供試体は底面 400×300mm、厚さ 50mm とし、硬化前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出力は 400W、振動数は 3000~3600VPM とする。加振時間は 5, 10, 15, 20, 25 秒の 5 条件とする。練り混ぜは前項と同様の手順で行う。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。なお、反射減衰量の測定を行う際は、テーブルバイブレータと接する面を下面として電波は上面側から照射する。

表-1 スラグとビーズの物性

	粒径(mm)	絶乾密度(g/cm ³)
スラグ	0.3~0.6	3.64
ビーズ	約 3.0	0.017

表-2 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-3 ビーズスラグモルタルの調合(質量比)

水セメント比(%)	水	セメント	スラグ	ビーズ	増粘剤添加量(×w%)
45	0.90	2.00	5.97	0.03	0.00
50	1.00				0.25
55	1.10				0.50
60	1.20				0.75
					1.00

3. 測定方法

3.1 フロー値および粘度の測定

水セメント比および増粘剤添加量がビーズスラグモルタルの流動性に及ぼす影響を明らかにするために行う。本研究では、流動性はフロー値および粘度で評価する。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。粘度測定は JIS Z 8803:2011(液体の粘度測定方法)の単一円筒形回転粘度計による粘度測定方法に基づいて行う。

3.2 スラグ分布の測定

ビーズスラグモルタルのフロー値および粘度が、供試体断面における骨材の分布状況に及ぼす影響を加振時間ごとに明らかにするために、スラグ分布の測定を行う。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。図-2 にスラグ面積率の測定方法の概要を示す。底面を 400×300mm として作製した供試体を、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の供試体と、300×300mm の反射減衰量測定用の供試体に分割する。スラグ面積率測定用の供試体の切断面を撮影し、厚さ方向に 20 層に等しく区切る。上面側を 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⁶⁾。 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(1)で表される。

$$SAR = \frac{t}{s} \times 100 \quad (1)$$

なお、供試体の上面はビーズにより凹凸が生じており、スラグ面積率の精度が低いため、1 層目の値は参考値とする。

ここで、写真-1 に骨材分布の状況の例を示す。骨材の分布状況は(a)分散、(b)やや分離、(c)二層に分離の 3 つに分類できる。(a)分散の場合、いずれの層でもスラグ面積率はほとんど変化せず、単層型電波吸収体として顕著

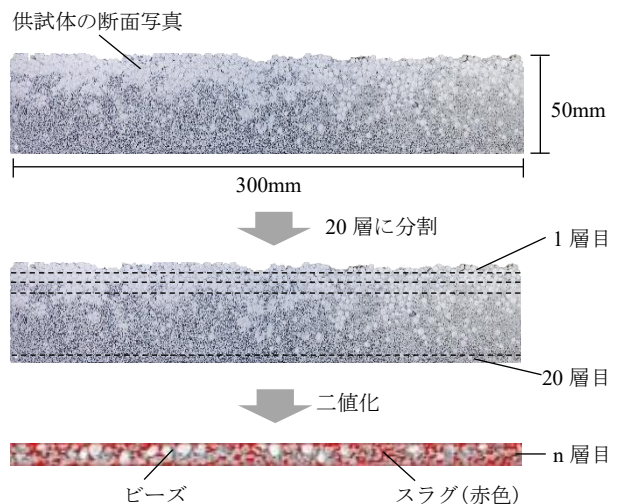


図-2 スラグ面積率の測定方法

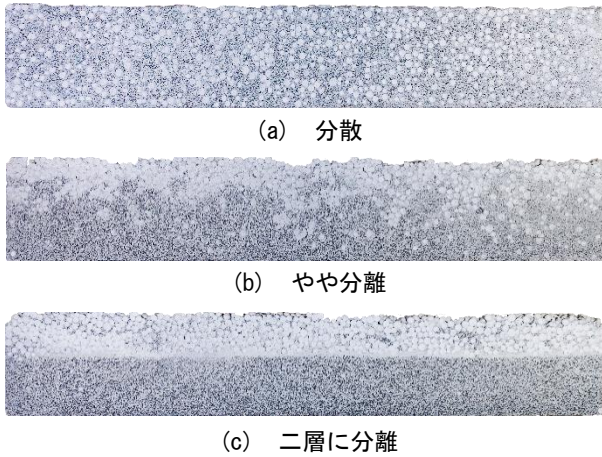


写真-1 骨材の分布状況の例

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。(b)やや分離の場合、下面に向かうほど徐々に層のスラグ面積率は上昇して、広帯域電波吸収体の特性を示す。(c)二層に分離の場合、スラグ面積率が急上昇する層が確認できる。電波吸収性能は二層型電波吸収体の特性を示し、ピークのある狭帯域電波吸収体となる。本研究では骨材の分布状況は広帯域電波吸収体となる(b)の状態が望ましい⁴⁾。

ここで(a)分散・(b)やや分離・(c)二層に分離の間でスラグ面積率が大きく変化する6~11層目の範囲において、連続する3層(6~8層目、7~9層目、8~10層目、9~11層目)の上面側の層と下面側の層のスラグ面積率の差の中で最大の値をスラグ面積率変化量とする。本研究では、スラグ面積率変化量で4%未満を(a)分散、4%以上15%未満を(b)やや分離、15%以上を(c)二層に分離と判断する。

3.3 反射減衰量の測定

ビーズスラグモルタルのフロー値および粘度が、電波吸収性能に及ぼす影響を加振時間ごとに明らかにするために、反射減衰量の測定⁷⁾を行う。反射減衰量を用いて電波吸収性能を評価する。図-3に反射減衰量の測定装置を示す。供試体は反射減衰量測定用の供試体を用いる。電波の測定周波数帯域は2~10GHzとする。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の上面に照射される。照射された電波は供試体で反射、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で反射され、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、供試体上面に金属板を設置したときのネットワークアナライザで受信した電圧を α_1 、供試体上面に何も設置しないときのネットワークアナライザで受信した電圧を β_1 とすると、反射係数 \hat{S}_{11} は式(2)で示される。

$$\hat{S}_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (2)$$

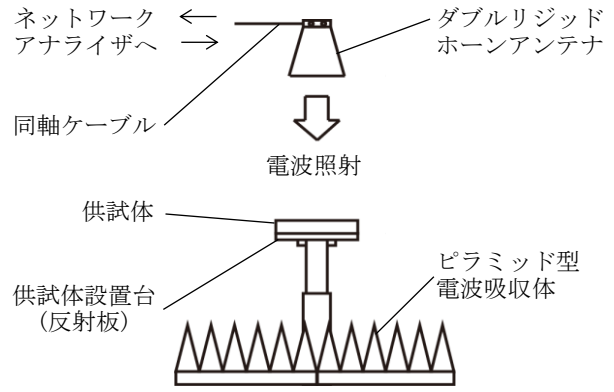


図-3 反射減衰量の測定装置

\hat{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(3)で表せる。これをスカラー量の反射係数 $|\hat{S}_{11}|$ に変換すると式(4)となる。この $|\hat{S}_{11}|$ を用いて式(5)から反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ を算出する。

$$\hat{S}_{11} = a + jb \quad (3)$$

$$|\hat{S}_{11}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4)$$

$$RL[\text{dB}] = -20 \log_{10} |\hat{S}_{11}| \quad (5)$$

なお、本研究では既往の研究⁷⁾およびISMバンドを考慮し、周波数2.4~10GHzの範囲の90%以上の周波数で反射減衰量が10dB以上あるものを広帯域電波吸収体とする。

4. 測定結果と考察

4.1 フロー値および粘度の測定

図-4に各増粘剤添加量におけるフロー値と水セメント比の関係を、図-5に各増粘剤添加量における粘度と水セメント比の関係を示す。

図-4より、いずれの増粘剤添加量においても、水セメント比が高くなるほど、フロー値は大きくなる。また、増粘剤を添加した調査では、増粘剤添加量が増加するほど、同じ水セメント比ではフロー値は小さくなる。

図-5より、いずれの増粘剤添加量においても、水セメント比が高くなるほど、粘度は小さくなる。また、増粘剤を添加した調査では、増粘剤添加量が増加するほど、同じ水セメント比では粘度は大きくなる。

ここで表-4に2.2節(2)で示した作製する供試体の条件に適合する調査を図-4、図-5から読み取り、まとめる。1)水セメント比55%・増粘剤添加量0.00w%、水セメント比60%・増粘剤添加量0.50w%、2)水セメント比50%・増粘剤添加量0.00w%、水セメント比55%・増粘剤添加量1.00w%、3)水セメント比50%・増粘剤添加量0.75w%、水セメント比55%・増粘剤添加量1.00w%の計5種類の調査を選定する。(以下、調査の説明において、水セメント比はW/C、増粘剤添加量はVと記載する。)

4.2 スラグ分布の測定結果と考察

(1) 水セメント比のみを変化させ、フロー値および粘度を固定した場合

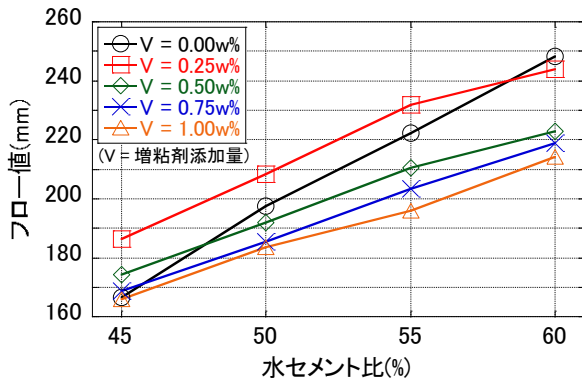


図-4 フロー値と水セメント比の関係

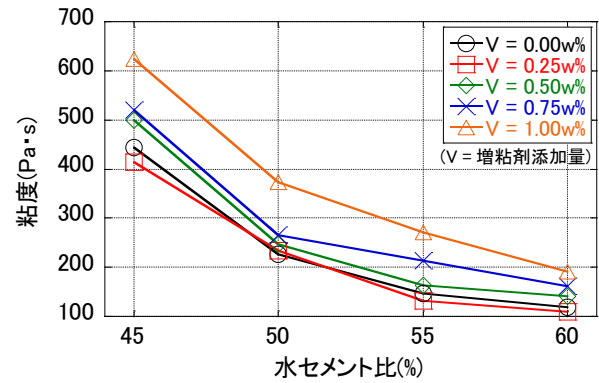


図-5 粘度と水セメント比の関係

表-4 供試体を作製する調査

		選定した調査 (V = 増粘剤添加量)	
1) W/C	一変化	W/C = 55%	W/C = 60%
フロー値	一固定	V = 0.00w%	V = 0.50w%
粘度	一固定		
2) フロー値	一固定	W/C = 50%	W/C = 55%
粘度	一変化	V = 0.00w%	V = 1.00w%
3) フロー値	一変化	W/C = 50%	W/C = 55%
粘度	一固定	V = 0.75w%	V = 1.00w%

図-6(a)に W/C=55%・V=0.00w%の調査において、図-6(b)に W/C=60%・V=0.50w%の調査において、加振時間5秒ごと 5~25秒で作製した供試体のスラグ面積率と層数の関係を示す。

図-6(a)より、W/C=55%・V=0.00w%の場合、加振時間5秒でスラグとビーズがやや分離する。加振時間10秒以上では8~10層目においてスラグ面積率が急上昇し、スラグとビーズが二層に分離する。

図-6(b)より、W/C=60%・V=0.50w%の場合、加振時間5秒でスラグとビーズがやや分離する。加振時間10秒以上では8~10層目においてスラグ面積率が急上昇し、スラグとビーズが二層に分離する。

以上より、水セメント比のみを変化させ、フロー値および粘度を固定した場合、加振時間ごとの骨材の分布状況にほとんど違いは見られない。よって、供試体断面における骨材の分布状況はフロー値または粘度の影響で変化し、水セメント比は直接的な影響を与えないと考える。そこで、以後の測定では水セメント比の影響を考慮せず、フロー値または粘度が骨材の分布状況に与える影響を確認する。

(2) フロー値を固定し、粘度のみを変化させた場合

図-6(c)に W/C=50%・V=0.00w%の調査において、図-6(d)に W/C=55%・V=1.00w%の調査において、加振時間5秒ごと 5~25秒で作製した供試体のスラグ面積率と層数の関係を示す。

図-6(c)より、W/C=50%・V=0.00w% (粘度: 226.97Pa·s) の場合、加振時間5秒でスラグとビーズが分散し、15

秒以上でスラグとビーズが二層に分離する。

図-6(d)より、W/C=55%・V=1.00w% (粘度: 271.36Pa·s) の場合、加振時間15秒以下でスラグとビーズが分散し、加振時間20秒以上でスラグとビーズがやや分離する。

以上より、フロー値を固定し、粘度のみを変化させた場合、加振時間ごとの骨材の分布状況は異なる。

(3) フロー値のみを変化させ、粘度を固定した場合

図-6(e)に W/C=50%・V=0.75w%の調査において、加振時間5秒ごと 5~25秒で作製した供試体のスラグ面積率と層数の関係を示す。

図-6(e)より、W/C=50%・V=0.75w% (フロー値: 185.50mm) の場合、加振時間15秒以下でスラグとビーズが分散し、加振時間20秒以上でスラグとビーズがやや分離する。

図-6(d)より、W/C=55%・V=1.00w% (フロー値: 196.00mm) の場合、加振時間15秒以下でスラグとビーズが分散し、加振時間20秒以上でスラグとビーズがやや分離する。

以上より、フロー値のみを変化させ、粘度を固定した場合、加振時間ごとの骨材の分布状況にほとんど違いは見られない。

4.3 反射減衰量の測定結果と考察

(1) 水セメント比のみを変化させ、フロー値および粘度を固定した場合

図-7(a)に W/C=55%・V=0.00w%の調査において、図-7(b)に W/C=60%・V=0.50w%の調査において、加振時間5秒ごと 5~25秒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-6(a)と図-7(a)より、W/C=55%・V=0.00w%の場合、加振時間5秒ではスラグとビーズがやや分離しているが、反射減衰量は測定範囲内の周波数全域において約 9.7dB でわずかに広帯域電波吸収体に及ばない。加振時間10秒以上ではスラグとビーズが二層に分離しているため、電波を十分に吸収しない周波数およびピークが生じる。

図-6(b)と図-7(b)より、W/C=60%・V=0.50w%の場合、加振時間5秒ではスラグとビーズがやや分離しているため、広帯域に電波を吸収する。加振時間10秒以上ではス

ラグとピーズが二層に分離しているため、電波を十分に吸収しない周波数およびピークが生じる。

以上より、水セメント比のみを変化させ、フロー値および粘度を固定した場合、加振時間ごとの電波吸収性能にほとんど違いは見られない。

(2) フロー値を固定し、粘度のみを変化させた場合

図-7(c)に $W/C=50\% \cdot V=0.00w\%$ の調合において、図-7(d)に $W/C=55\% \cdot V=1.00w\%$ の調合において、加振時間 5 秒ごと 5~25 秒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-6(c)と図-7(c)より、 $W/C=50\% \cdot V=0.00w\%$ (粘度: $226.97Pa \cdot s$) の場合、加振時間 5 秒ではラグとピーズが分散しているため、測定範囲内で低い電波吸収性能を示す。加振時間 10 秒ではラグとピーズがやや分離しているため、広帯域に電波を吸収する。加振時間 15 秒以上ではラグとピーズが二層に分離しているため、電波を十分に吸収しない周波数およびピークが生じる。

図-6(d)と図-7(d)より、 $W/C=55\% \cdot V=1.00w\%$ (粘度: $271.36Pa \cdot s$) の場合、加振時間 10 秒以下ではラグとピーズが分散しているため、測定範囲内で低い電波吸収性能を示す。加振時間 15 秒でもラグとピーズは分散しているが、広帯域に電波を吸収する。加振時間 20 秒以上ではラグとピーズがやや分離しているため、広帯域に電波を吸収する。

以上より、フロー値を固定し、粘度のみを変化させた場合、加振時間ごとの電波吸収性能は異なる。

(3) フロー値のみを変化させ、粘度を固定した場合

図-7(e)に $W/C=50\% \cdot V=0.75w\%$ の調合において、加

振時間 5 秒ごと 5~25 秒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-6(e)と図-7(e)より、 $W/C=50\% \cdot V=0.75w\%$ (フロー値: $185.50mm$) の場合、加振時間 15 秒以下ではラグとピーズが分散しているため、測定範囲内で低い電波吸収性能を示す。加振時間 20 秒以上ではラグとピーズがやや分離しているため、広帯域に電波を吸収する。

図-6(d)と図-7(d)より、 $W/C=55\% \cdot V=1.00w\%$ (フロー値: $196.00mm$) の場合、加振時間 10 秒以下ではラグとピーズが分散しているため、測定範囲内で低い電波吸収性能を示す。加振時間 15 秒でもラグとピーズは分散しているが、広帯域に電波を吸収する。加振時間 20 秒以上ではラグとピーズがやや分離しているため、広帯域に電波を吸収する。

以上より、フロー値のみを変化させ、粘度を固定した場合、加振時間ごとの電波吸収性能にほとんど違いは見られない。

4.4 小結

本測定範囲内では、加振後の骨材の分布状況にはピーズラグモルタルの粘度が直接的な影響を与えていると考える。ただし図-4と図-5より、水セメント比の増加に対してフロー値は直線的な変化であり、粘度は曲線的な変化であることから、フロー値の変化量に対して、粘度の変化量が大きくなる範囲が存在する。本測定ではその範囲に属する調合を選定した可能性があるが、本測定範囲よりもフロー値を大きくし、粘度を小さくすると、二層に分離しやすくなり、ピーズラグモルタルの調合にあまり適さない。

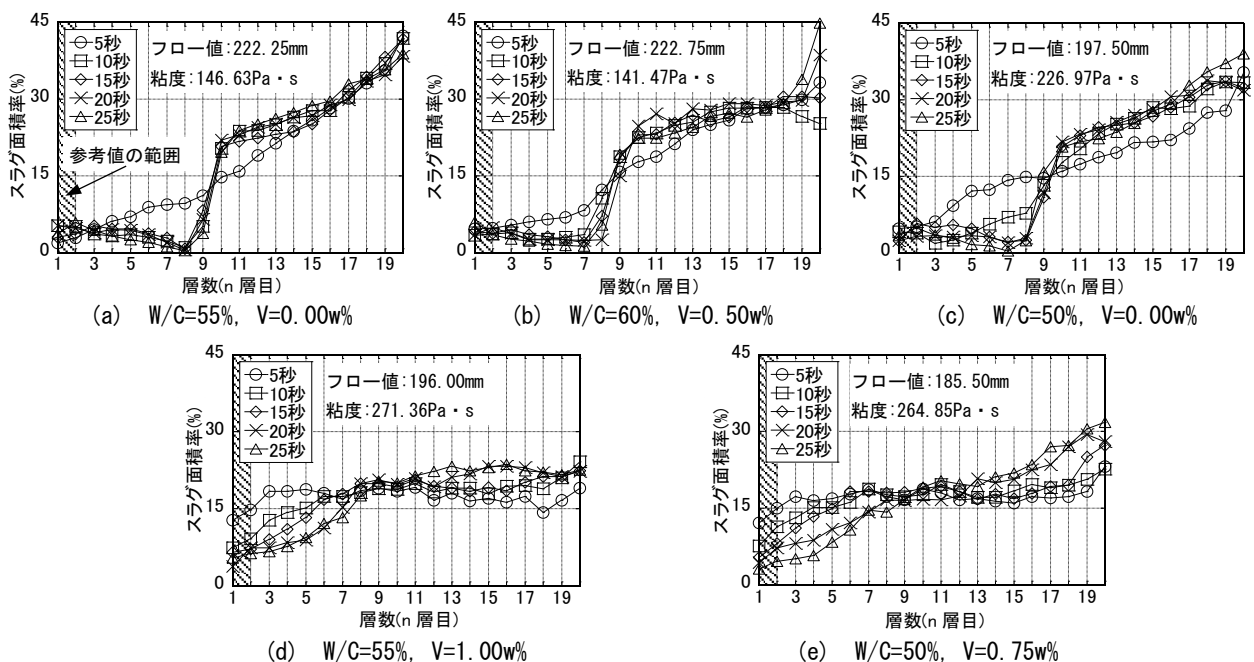


図-6 スラグ面積率と層数の関係 (V=増粘剤添加量)

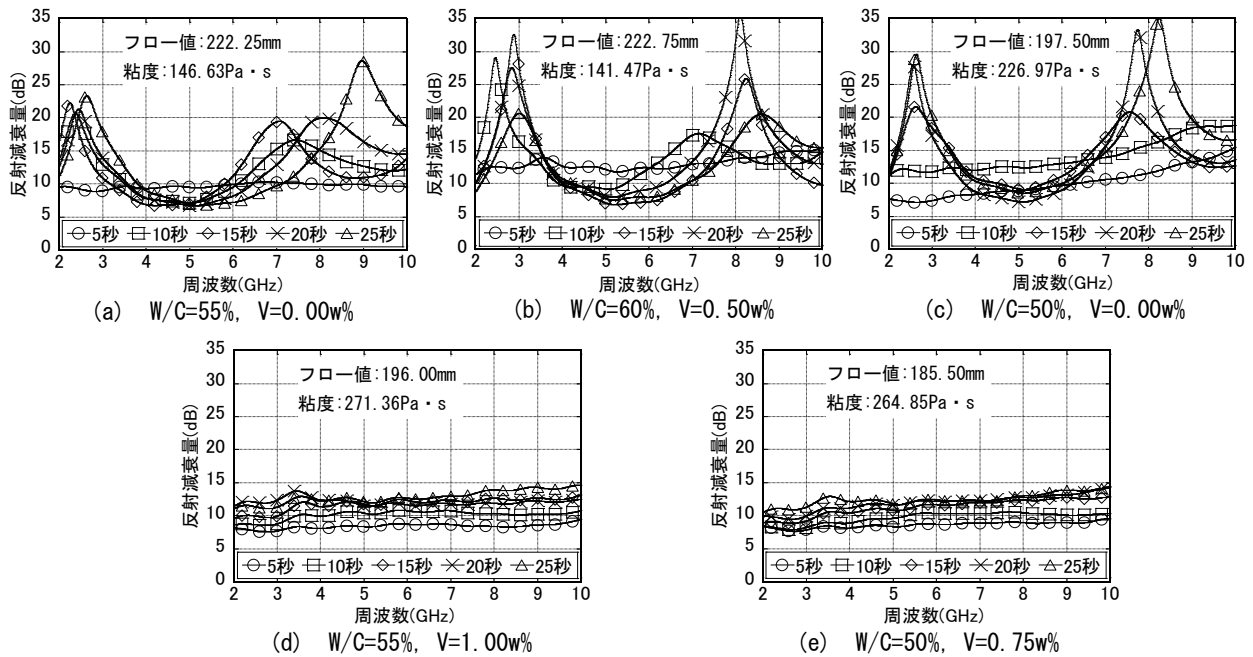


図-7 反射減衰量と周波数の関係 (V=増粘剤添加量)

5. まとめ

本研究の測定範囲内で以下のことが分かった。

- 1) 水セメント比のみを変化させ、フロー値および粘度を固定した場合、加振時間ごとの骨材の分布状況および電波吸収性能にほとんど違いは見られない。
- 2) フロー値を固定し、粘度のみを変化させた場合、加振時間ごとの骨材の分布状況および電波吸収性能は異なる。
- 3) フロー値のみを変化させ、粘度を固定した場合、加振時間ごとの骨材の分布状況および電波吸収性能にほとんど違いは見られない。
- 4) 加振後の骨材の分布状況および電波吸収性能にはビーズスラグモルタルの粘度が直接的な影響を与えている。

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。また実験の実施にあたり、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、名古屋工業大学 竹嶋航生氏の協力を得ました。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, 2021.3
- 2) 伊藤洋介, 河辺伸二, 寺西洗人, 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, 2022.3
- 3) 池田悠人, 伊藤洋介, 河辺伸二, 寺西洗人, 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
- 4) 池田悠人, 伊藤洋介, 河辺伸二, 福原廉人: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.304-309, 2023.6
- 5) 伊藤洋介, 河辺伸二, 池田悠人, 西島正貴: 電気炉酸化スラグ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, 高性能 AE 減水剤添加量が電波吸収性能と曲げ強度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.76, pp.324-332, 2023.3
- 6) 山柿健人, 中田喜久, 唐沢智之, 大塚秀三, 宮田敦典, 黒川海人: テーブルバイブレータ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
- 7) 祥雲勇一, 大塚健二郎, 鈴木宏和, 橋本修: 石膏ボードと導電紙を用いた無線 LAN 用電波吸収体の吸収特性, 電気学会研究会資料. IM 計測研究会, pp.29-33, 2008.12