

論文 導電性材料を添加したモルタルの電磁波特性に関する研究

高井 伸一郎^{*1}・熊野 知司^{*2}・井上 正一^{*3}・林 達郎^{*4}

要旨: コンクリートに新しい機能や付加価値を与えるために導電性の高い材料である炭素粉末に着目し、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性をあらかず電磁波吸収性および電磁波反射性について検討を行った。その結果、電子レンジを用いた簡易法では、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波吸収性を確認できたが、電磁気学的試験である自由空間法では、炭素粉末を添加したモルタルは電磁波の反射量が大きくなった。そこで、透過法により電磁波反射性を評価した結果、炭素粉末を添加することで、反射による透過損失量が増加し、電磁波遮蔽性が向上することが明らかとなった。

キーワード: 炭素粉末, 電磁波吸収性, 電磁波反射性, 複素比誘電率

1. はじめに

近年は携帯電話や無線 LAN など、日常生活において様々な場面で電磁波が利用されており、電磁環境は悪化の一途をたどっている。このような電磁環境は環境問題としても取り上げられており、改善が求められている。そこで、モルタルやコンクリートに電磁波遮蔽性を付与できれば、コンクリート構造体のみで電磁波の制御も可能となる。

筆者らは既報において¹⁾、導電性材料である炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ特性、力学特性、電気的特性および電磁波特性に関する予備試験を行った。その結果、炭素粉末の添加は、モルタルのフレッシュ性状および硬化特性に若干の影響を与えるものの、混和材料として使用可能であることを確認した。また、炭素粉末の添加によりモルタルの導電性が改善でき、電磁波吸収の可能性があることを報告した。

ここで、炭素粉末の製造方法について記す。石油精製時に原油を蒸留分離した重質油を焼成、生コークスを析出し、この生コークスを 2000K 以上の高温で焼成すると炭素繊維、1500~1700K で焼成するとか焼コークスとなり、か焼コークスを粉砕したものが炭素粉末となる。したがって、炭素粉末は、炭素繊維に比べると低い温度で焼成するために結晶化が進行しておらず、非晶質で低強度といえる。また、炭素粉末を構成する成分は、炭素、水素、硫黄、窒素、灰分でそのうち炭素が 99% を占めており、他の成分はごく微量である。

本研究は、炭素粉末を混入したモルタルの電磁波特性である電磁波遮蔽性について、電磁波を吸収して遮蔽する電磁波吸収性と電磁波を反射して遮蔽する電磁波反射性として検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料および使用材料の物理的性質を示す。炭素粉末は 0.3mm 以下に粉砕したものを使用し、炭素粉末を添加したモルタルは空気量の影響をなくすために消泡剤を使用して、空気量を 0% となるように調整した。

2.2 モルタルの配合

表-2 にモルタルの配合を示す。モルタルの配合は W/C=50, 60, 70% の 3 水準とし、W/C=50% の 1:2 モルタルをベースの配合として炭素粉末をモルタルの体積比で 0~20% の範囲で変化させた。

2.3 実験項目および測定項目

表-3 に実験項目および測定項目を示す。電磁波吸収性は電子レンジによる簡易法²⁾ および電磁波吸収性を定量的に評価できる自由空間法を、電磁波反射性は透過法を用いた。供試体は簡易法には、40×40×160mm の角柱供試体を、自由空間法および透過法には、300×300×t mm (厚さ 10, 25, 50mm の 3 種類) の平板供試体を用いた。

表-1 使用材料

| 材料 | 種類・主成分 |
|--------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3380cm ² /g |
| 細骨材 | 湖底砂(S1) 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 粗粒率 2.43, 吸水率 0.67% |
| 炭素粉末 | 0.3mm 以下に粉砕 密度 2.12g/cm ² 比表面積 1314cm ² /g(ブレーン法) |
| AE 減水剤 | リグニンスルホン酸系 |
| 消泡剤 | シリコンエマルジョン系 |

*1 村本建設 技術グループ 工修 (正会員)

*2 摂南大学 工学部都市環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 鳥取大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*4 奈良県工業技術センター 機械・電子・情報技術チーム (非会員)

表-2 モルタルの配合

| 配合名※ | 単位量(kg/m ³) | | | |
|----------|-------------------------|-----|------|--------------|
| | W | C | S | CP (炭素粉末) |
| CP-0-50 | 316 | 632 | 1264 | 0 |
| CP-5-50 | | | 1135 | 106 |
| CP-10-50 | | | 1004 | 212 |
| CP-15-50 | | | 873 | 318 |
| CP-20-50 | | | 742 | 424 |
| CP-0-60 | | 527 | 1354 | 0 |
| CP-5-60 | | | 1223 | 106 |
| CP-10-60 | | | 1092 | 212 |
| CP-15-60 | | | 961 | 318 |
| CP-20-60 | | | 830 | 424 |
| CP-0-70 | | 451 | 1417 | 0 |
| CP-5-70 | | | 1286 | 106 |
| CP-10-70 | | | 1155 | 212 |
| CP-15-70 | | | 1024 | 318 |
| CP-20-70 | | | 893 | 424 |

※炭素粉末(CP)-炭素粉末添加率-水セメント比

表-3 実験項目および測定項目

| 実験項目 | 測定項目 |
|-------------------|---|
| 電磁波吸収性 (簡易法) | 家庭用電子レンジ(700W)を用いて、供試体に電磁波を60秒間照射し、表面温度を測定する。 |
| 電磁波吸収性 (自由空間法) | 自由空間に測定する平板供試体を配置し、その平板供試体に電磁波を照射したときの反射・透過波や偏波特性を測定し、電磁波吸収性を評価する。 |
| 電磁波反射性 (透過法) | 電磁波を送信アンテナから送信し、平板供試体を透過させて受信アンテナで受信する。その時の透過量を測定することで、電磁波反射性を評価する。 |

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの電磁波吸収性

(1) 簡易法

電磁波吸収性を評価するための第一段階として、簡易法を行った。簡易法は家庭用電子レンジ(700W, 2.45GHz)を用いて、供試体に電磁波を60秒間照射した後、放射温度計で供試体の表面温度を測定した。予備試験の結果、照射後の温度分布は、電子レンジの電磁波照射特性に影響を受けることが判明した。そこで、本研究では電磁波の吸収による温度上昇を評価する測定点を供試体の両端から20mmの位置とし、2点の平均値を測定値とした。

図-1に実験のフローを示す。供試体中の水分が簡易法の試験結果に影響を及ぼすことが予想されたため、28日間炉乾燥し、ほぼ絶乾状態となった供試体を用いて1

回目の測定を行った。その後、温度20±2℃、湿度60±10%の恒温恒湿室にて保存し、含水率と表面温度を測定した。モルタルの含水率は式(1)を用いて算出した。

$$\text{含水率}(\%) = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100 \quad (1)$$

ここに、W1：簡易法測定時のモルタル質量

W2：乾燥開始から28日後のモルタル質量

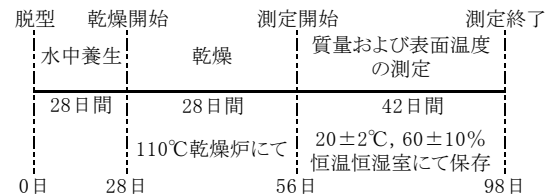


図-1 簡易法の実験フロー

図-2に炉乾燥終了から24時間後(含水率0.2~0.3%)に測定した温度上昇量と炭素粉末添加率の関係を示す。ここに、温度上昇量とは電磁波照射前後の表面温度測定値の差である。図より、W/C=50%、炭素粉末添加率10%を除くと、温度上昇量は炭素粉末添加率の増加にともなって温度上昇量が増加する傾向にある。なお、炭素粉末添加率15%では0%と比べて30~40℃温度上昇量が増加した。図-3に各水セメント比における温度上昇量を示す。図より、炭素粉末添加率10%を除くと水セメント比が変化しても温度上昇量は大差がない。すなわち、温度上昇量は、水セメント比ではなく、炭素粉末の添加率に依存している。これらのことより、供試体の表面温度上昇は電磁波が熱エネルギーに変換された結果もたらされたと考え、温度上昇量が大きい方が電磁波のエネルギーをより多く熱に変換した結果であり、電磁波を多く吸収したといえる。

図-4に含水率と温度上昇量の関係を示す。図より炭素粉末添加率0, 5%では含水率の増加にともなって温度が上昇する傾向を示すが、炭素粉末添加率10%以上では逆に減少する傾向を示した。一般的に、電子レンジによる加熱の原理は、物体に含まれる水分子が電磁波による影響で振動し、熱エネルギーに変換されることによる。そのため、炭素粉末添加率が小さい供試体においては、水分子が増加することにより、温度が上昇したと考えられる。しかし、炭素粉末添加率が大きい供試体では水分子の挙動だけではなく、炭素の存在が電磁波吸収に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。炭素粉末を添加した供試体の発熱原理は、供試体中に炭素粉末が分散している場合を考えると、供試体中には炭素粉末の抵抗と炭素粉末間の静電容量が複雑に結合した回路が形成されている。そこに、高い周波数の電界が作用した場合には抵抗にも電流が流れ、抵抗体に熱が発生する誘電加熱の

現象が生じ、発熱が生じたと考えられる。

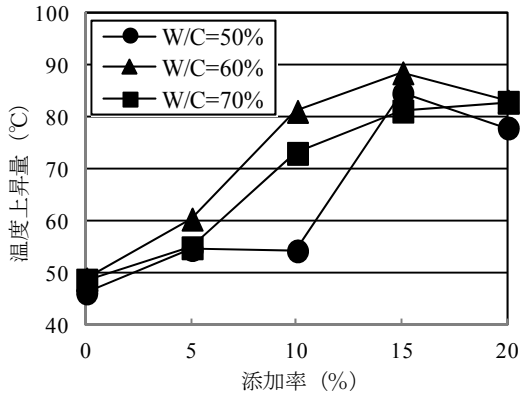


図-2 炭素粉末添加率と温度上昇量の関係

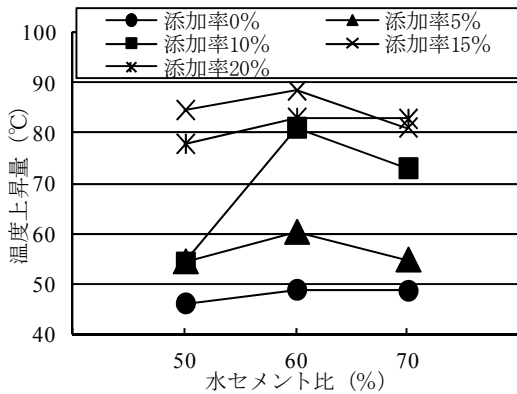


図-3 水セメント比と温度上昇量の関係

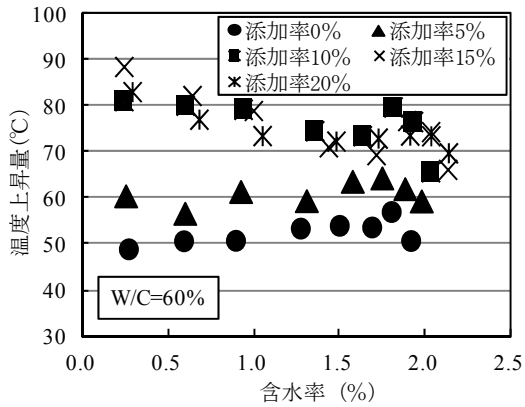


図-4 含水率と温度上昇量の関係

(2) 自由空間法

簡易法の結果、モルタルの電磁波吸収性を確認した。しかし、携帯電話や無線 LAN 等の電子機器に比べて、電子レンジのピーク電力は 700W と携帯電話の 0.6W に比べてかなり大きく、一般的に使用される電子機器での電磁波吸収性を評価するためには不十分である。そこで、電磁気学的試験法である自由空間法を用いて、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波吸収性を定量的に評価した。

図-5、写真-1 に自由空間法による電磁波吸収性試験の概要を示す。試験装置は送信アンテナ、受信アンテナ、ベクトルネットワークアナライザから構成されており、

供試体から約 1.4m 離れた円周上の一点に設置されている送信アンテナから送信された電磁波が同じ寸法の金属板で裏打ちされた試料に入射後、裏打ち面から反射されて帰ってくる強さを測定し、電磁波吸収性を算出するものである。

自由空間法は水セメント比および炭素粉末添加率を変化させた配合 (15 配合) において縦 300×横 300mm×厚さ 50mm の薄型ブロック形状の供試体を用いて行った。なお、供試体は打設後、28 日間の水中養生を行った後、温度 20℃、湿度 60±10% の恒温恒湿室で保存した。試験は水中養生後の湿潤状態および恒温恒湿室で供試体質量が平衡状態になった乾燥状態(気乾状態)で試験を行った。

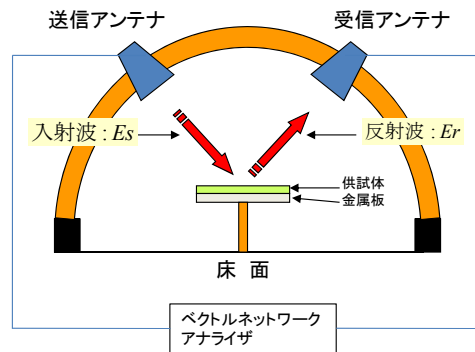


図-5 自由空間法の概要

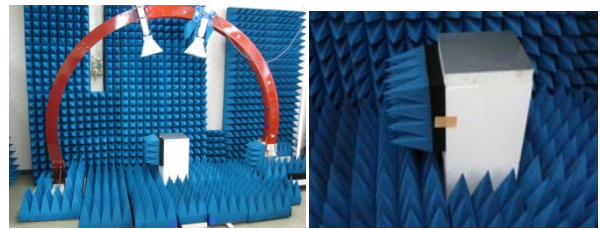


写真-1 自由空間法の測定環境(左:全景, 右:架台)

図-6 に W/C=60% 供試体の垂直入射による自由空間法の測定結果(湿潤および乾燥状態)を示す。図は各周波数帯における反射損失量を示している。図より電磁波吸収性の周波数特性は炭素粉末の添加率に関わらず類似しており、5.2GHz と 6.7GHz 付近に吸収のピークが見られる。また、炭素粉末の添加率で比較すると、添加率 0% の反射損失量の絶対値が大きく、添加率が増加するほど小さくなっている。すなわち、炭素粉末の添加率が多いほど吸収量が小さくなっている。換言すると、添加率が増加するほど吸収量でなく、反射量が増加していることになる。簡易法では添加率の増加により表面温度上昇量も増加し、炭素粉末の添加による電磁波吸収性の可能性が見られたが、自由空間法ではそのような傾向が現れなかった。これは、各試験で用いた電力量の違いと、炭素粉末添加率の増加によって導電率が高くなり、入射した電波がモルタル表面に局所的に集中して反射し、内部まで取り込まれず、材料全体の電磁波吸収性が低下した結

果と考えられる。また、今回の対象となる周波数帯においては、添加率 20% で -5 ~ -10 dB 程度の吸収効果であり、一般的に電磁波の吸収材料として望まれる電磁波吸収性は、-15 ~ -20 dB 程度を要求される。したがって、電磁波吸収体として満足するには、今後、炭素粉末の添加率の調整だけでなく他の導電材料の混合、配合の変更等の改良が必要となる。

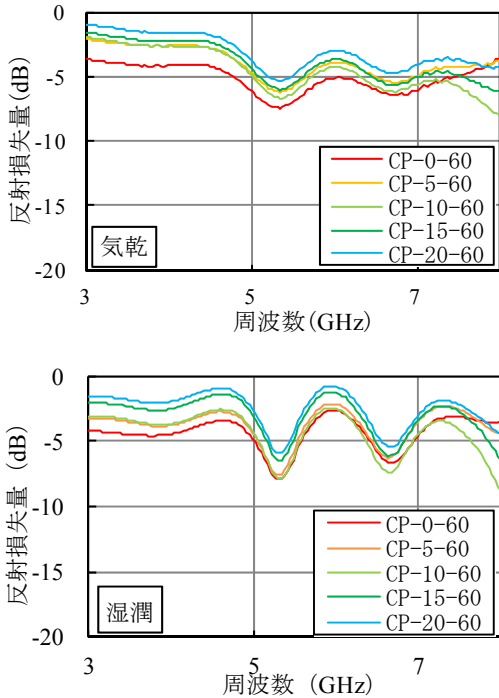


図-6 自由空間法による周波数と反射損失量の関係

(3) 自由空間法による複素比誘電率の推定

自由空間法の測定結果より、材料の電気的特性を示す複素比誘電率 ϵ_r ($\epsilon_r = \epsilon' / \epsilon_0 = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$, j : 虚数単位) を推定した。複素比誘電率の推定には、モルタルの比誘電率および誘電損失を変化させて反射損失量の理論値を式(2)より算出し、測定値との差を最小にする複素比誘電率を決定した。また、式中の小文字の反射係数の量は実数で、各層の厚さや波長には依存しない。一方、大文字の量は複素数で層の厚さや波長に依存する。図-7 に自由空間法による反射概念図を示す。

$$R_s = 20 \log_{10} R_t = 20 \log_{10} \left| \frac{r_{12} \times R_{23}}{1 + r_{12} \times R_{23}} \right| \quad (2)$$

R_s : 反射損失量 (dB) R_t : 反射係数

R_{23} : モルタルと鉄板の反射係数

$$R_{23} = r_{23} e^{-j2k_2 h} = -e^{-j2k_2 h}$$

r_{23} : モルタルと鉄板が共に半無限媒質である場合の反射係数 $r_{23} = -1$

h : モルタルの厚さ $h = 50 \text{ mm}$

r_{12} : 空気とモルタルが共に半無限体媒質である場合の反射係数

$$r_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$$

k_1, k_2 : 伝搬定数 (k_1 : 空気, k_2 : モルタル)

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = 2.094 f \times 10^{-8}$$

λ : 波長 (m) c : 光速度 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

f : 周波数 (Hz)

$$k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_s \mu_2} = \omega \sqrt{\epsilon_s} = k_{re} - jk_{im}$$

$$= k_1 \sqrt{\epsilon_s (1 - j \tan \delta)}$$

μ_2 : モルタルの透磁率 $\mu_2 = 1$

ϵ_s : 複素誘電率, $\tan \delta$: 誘電損失

$$\epsilon_{sc} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon_{sre} - j\epsilon_{sim} = \epsilon_s (1 - j \tan \delta)$$

ϵ_{sc} : モルタルの複素比誘電率

ϵ_0 : 真空中の誘電率, ϵ_c : モルタルの誘電率

$\epsilon_{sre}, \epsilon_{sim}$: 複素比誘電率の実数部と虚数部

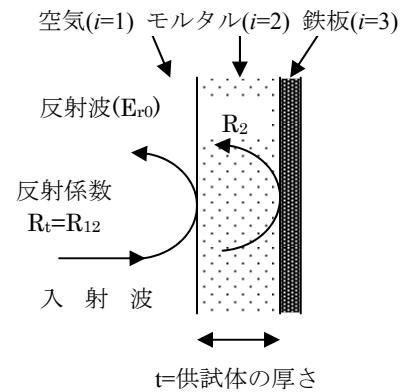


図-7 自由空間法による反射概念図

図-8 に CP-15-70 の配合において、モルタルの比誘電率および誘電損失を仮定し、式(1)より求めた各周波数帯の反射損失量の理論値と測定値の比較結果を示す。

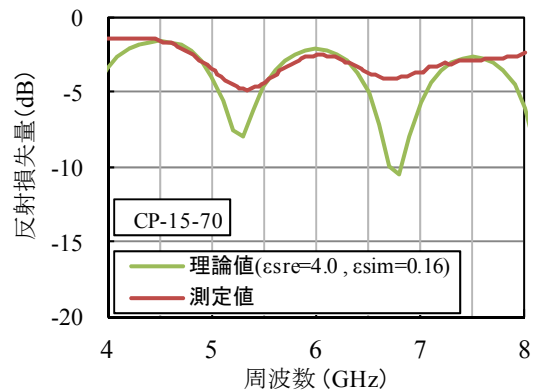


図-8 理論値と測定値の比較

図-9, 10 に湿潤および気乾状態の炭素粉末添加率と理論値より求めた複素比誘電率の実数部 (ϵ_{sre}), 虚数部 (ϵ_{sim}) との関係を示す。複素比誘電率の実数部は電磁波の

位相変化に関係し、虚数部は電磁波の減衰に対応している。図より実数部は水分を含んだ状態ほど大きくなるが、水セメント比および添加率の影響は小さい。一方、虚数部は含水状態の違いによる影響は小さいが、添加率および水セメント比によってばらつきが生じている。

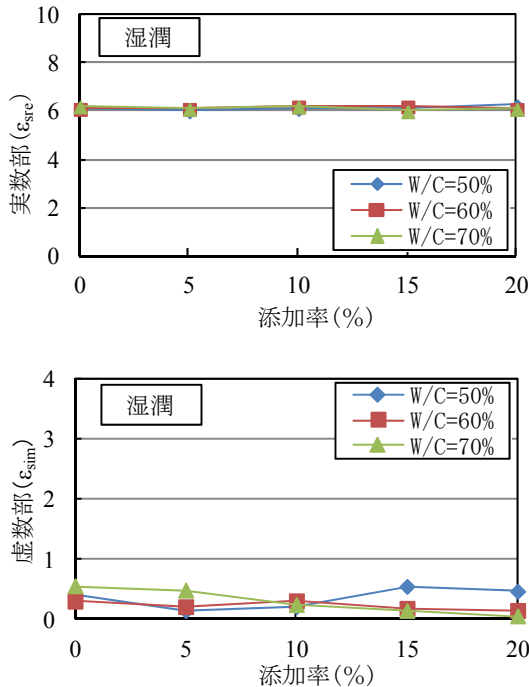


図-9 炭素粉末添加率と複素比誘電率(湿潤状態)

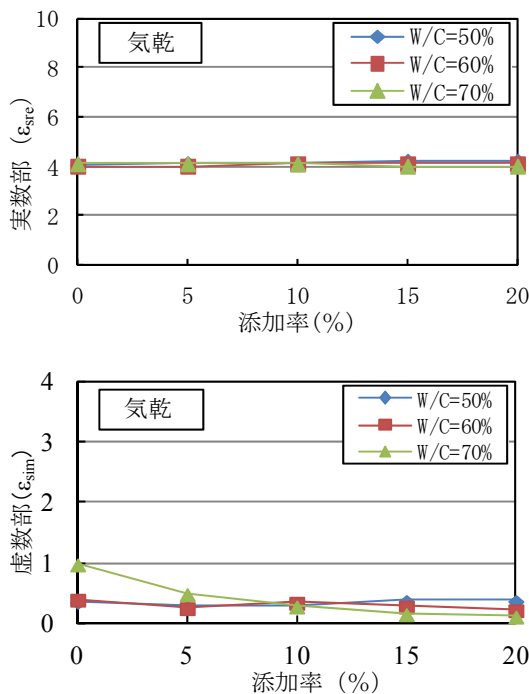


図-10 炭素粉末添加率と複素比誘電率(気乾状態)

図-11に $W/C=60\%$ における実数部と虚数部の関係を示す。図中の曲線は各周波数帯において、電波の吸収が最大となる実数部 (ϵ_{sr}) と虚数部 (ϵ_{sim}) の関係を示す無反

射曲線³⁾と呼ばれている。各周波数帯に対応した電波吸収体を実現するためには、この無反射曲線に近い複素比誘電率を有することが必要条件である。しかし、炭素粉末を添加した、いずれの配合においてはいずれも虚数部が小さくなった。このことから炭素粉末を添加したモルタルに電磁波を与えた場合、減衰が少なく、反射が大きくなるのがわかる。したがって、モルタルに炭素粉末のみを混合して電磁波吸収材料とすることは困難であるが、電磁波の反射特性を生かせば、電磁波遮蔽材として利用の可能性がある。

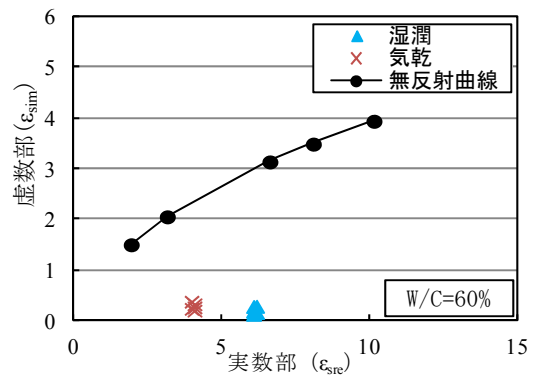


図-11 複素比誘電率と無反射曲線

3.2 モルタルの電磁波反射性

自由空間法の結果、炭素粉末の添加により電磁波に対する反射が大きくなることが明らかとなった。そこで、電磁波反射性の評価として透過法を用いた。図-12、写真-2に透過法の測定環境を示す。透過法はベクトルネットワークアナライザで発信した電磁波を送信アンテナから送信し、測定する供試体を透過させ、その透過波を受信アンテナで受信し、透過波の透過量を測定する。この測定系を用いて供試体挿入前における透過量を測定し、その後、供試体を挿入して透過波の透過量差を透過損失量として算出した。透過法測定時の供試体は湿潤状態とした。

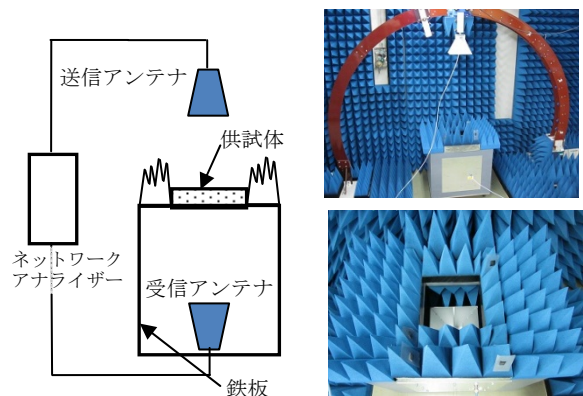


図-12 透過法の概要 写真-2 透過法の測定環境

図-13, 14 に湿潤状態における厚さ ($t=10, 25\text{mm}$) の異なる供試体の周波数と透過損失量の関係を示す。図より各厚さの供試体において、炭素粉末添加率の増加に伴って透過損失量の絶対値は増加している。すなわち、炭素粉末の添加により、電磁波反射性は向上している。また、供試体の厚さで比較した場合、25mm の供試体は 10mm に比べて各周波数帯で 2 倍程度の透過損失量となっている。一般的に電磁波シールド効果の目安は、透過損失量の絶対値で 30dB 以上とされている⁴⁾。厚さ 25mm の場合、炭素粉末添加率が 15% 以上で、各周波数帯の透過損失量が 30dB を越えており、電磁波遮蔽材として利用できる可能性がある。

図-15 に炭素粉末添加率 0, 10, 20 % における、各水セメント比の透過損失量を示す。各水セメント比とも炭素粉末添加率が増加すると透過損失量の絶対値は増加している。また、同一添加率における水セメント比の影響は、添加率 0% ではほとんどないが、添加率が多くなると透過損失量のばらつきが大きくなる。炭素粉末を添加したモルタルで電磁波遮蔽を行う場合、炭素粉末添加率およびモルタル厚さをパラメーターにすることで、対象となる周波数帯の電磁波遮蔽設計が可能と考える。今後、さらに電磁波遮蔽性を高めるための導電材料の選定および配合について検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、導電性材料である炭素粉末をモルタルに添加し、電磁波遮蔽性について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 簡易法の結果、炭素粉末を添加したモルタルの表面温度上昇量は増加し、添加率 15% で電磁波吸収による誘電加熱が最も大きくなった。
- (2) 自由空間法の結果、炭素粉末添加率が増加すると、電磁波の反射が大きくなる。
- (3) 炭素粉末を添加したモルタルの複素比誘電率は、含水状態により実数部は変化するが、水セメント比および添加率の影響は小さい。一方、虚数部は含水状態の違いによる影響は小さいが、添加率および水セメント比によってばらつきが生じる。
- (4) 透過法の結果、炭素粉末添加率が増加すると透過損失量の絶対値も増加しており、電磁波の反射による電磁波遮蔽性は向上する。また、炭素粉末を添加したモルタルで電磁波遮蔽を行う場合、炭素粉末添加率およびモルタルの厚さを変化させることで、対象となる周波数帯の電磁波遮蔽設計が可能である。

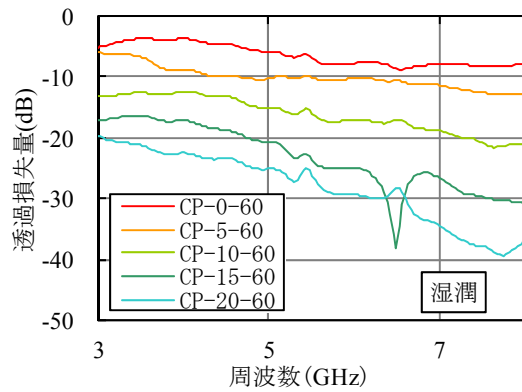


図-13 透過損失量 ($t=10\text{mm}$)

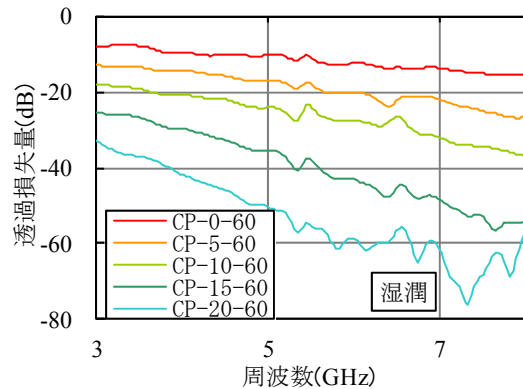


図-14 透過損失量 ($t=25\text{mm}$)

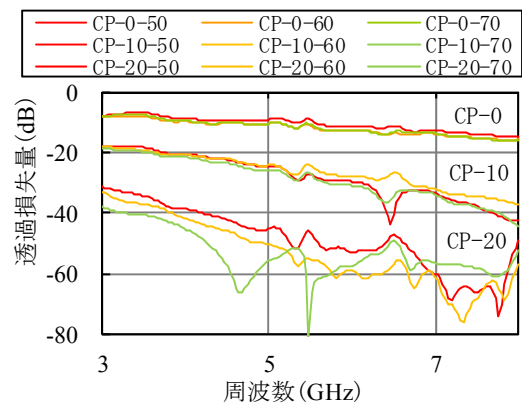


図-15 各水セメントにおける透過損失量 ($t=25\text{mm}$)

参考文献

- 1) 高井伸一郎, 熊野知司, 陰山恵子, 井上正一: 導電性の高い炭素粒子を添加したモルタルの各種物性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.35-40, 2012.7
- 2) 白川達也他: 副次産物として得られる高性能ナノカーボンを用いたモルタル供試体の開発, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.949-950, 2010.9
- 3) 橋本修: 電波吸収体のはなし, 日刊工業新聞社, 2001
- 4) 清水康敬他: 最新電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書株式会社, 1999