

炭素粉末を添加したモルタルの電磁遮へい性に関する研究（第1報）

林 達郎^{*1)}, 高井伸一郎^{*2)}

A Study on Electromagnetic Wave Shielding of the Mortar Mixed with Carbon Powder (1st Report)

HAYASHI Tatsuro^{*1)}, TAKAI Shinichiro^{*2)}

モルタルあるいはコンクリートに任意に電磁遮へい性を付与することができれば、本来の耐荷力を担う能力に加えて不要な電波の透過や反射を抑制する材料として利用が可能である。本研究では電磁遮へい性をもつモルタルを構造体コンクリートあるいは埋設型枠用モルタル等に適用することを視野に、導電性の炭素粉末を添加した試験体を試作して実際の使用条件に近い寸法や各種含水状態における電波の透過率など各種測定を行い、基礎データを収集した。マイクロ波帯における透過率の測定結果から、炭素粉末を添加したモルタルでは周波数が高くなるほど透過が減少し、炭素粉末の添加率が高いほど効果が顕著に現れることが確認された。また、測定結果から推定した試験体の複素比誘電率を利用して、厚みが異なる試験体の透過率を計算により求めたところ、炭素粉末の添加率が少ない試験体において測定値との近似が確認できた。

1. 緒言

無線を利用した小電力データ通信や非接触 IC カードなどに加えて、屋外では高度道路交通システムをはじめとする新しい通信システムが次々と普及しつつあり電波の利用範囲や用途が拡大している。さらに今後はワイヤレス給電などエネルギー伝送の分野にも電波の利用が予想されることから、電波の過密利用状態が避けられない状況である。

一般に電波の過密は通信の不良や速度低下の一因となるが、その対策には空間の壁や天井などに電磁遮へい（透過や反射の抑制）材料を設けて、電波環境を調整する方法が効果的である。

モルタルやコンクリートに任意の電磁遮へい性を付与することができれば、本来の耐荷力を担う能力に加えて新たな付加価値が得られることから、筆者らは研究の第一段階として導電性の炭素粉末の添加がモルタルのフレッシュ性や強度、弾性係数に与える影響を明らかにするとともに、導電性の変化について予備的に実験的に検討してきた^{1),2)}。

また、既往の研究では炭素繊維などの導電性を有する炭素材料をセメントペーストやモルタルに混入し、電磁遮へい性の向上を検討している^{3),4)}。ただし、これらの研究に用いられている配合や試験体の含水状態に関する情報は少ない。さらに、従来の同軸管法⁵⁾等の測定方法で測定する場合、試験体の厚さも数ミリ程度であり、本来の構造部材としての仕様とは異なる。

そこで本研究では電磁遮へい性をもつモルタルを構造体コンクリートあるいは埋設型枠用モルタル等に適用するこ

とを視野に、導電性の高い炭素粉末を添加した試験体を試作して実際の使用条件に近い寸法や各種含水状態における電波の透過率など各種測定を行い、基礎データを収集した。

透過率の測定は、比較的大型の試験体においても測定可能な透過法⁶⁾を用いて行った。また、透過法で得られた透過係数から材料の電気定数である複素比誘電率を推定し、その値を用いて厚みが異なる試験体の透過率を計算により求めた結果と実際の測定で得られた値を比較検討したので（第1報）として以下に報告する。

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。

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材には湖底砂（琵琶湖産）を、炭素粉末は0.3mm以下に粉碎したものを使用した。また、モルタル中の空気量は、電磁遮へい性に影響を及ぼす可能性が考えられたため、空気量の影響を排除することを目的にすべての配合で消泡剤を使用し、空気量が1%以下となるように調整した。

2.2 モルタルの配合

表2にモルタルの示方配合を示す。モルタルの配合は、水セメント比（以下、W/C）を50%、細骨材とセメントの質量比 S/C=2 のモルタルをベースとして、W/C=50, 60, 70%の3水準、炭素粉末は細骨材の一部を置換する形で内割り混入とし、炭素粉末添加率（以下、CP）をモルタルの

*1) リビングサイエンス先導的研究開発グループ *2) 村本建設株式会社

体積比で 0~20%の範囲で変化させた。

表 1 使用材料と物理的性質

Cement (C)	Portland cement density : 3.15g/cm ³ specific surface area : 3380cm ² /g
Sand (S)	Sand surface dry density:2.62g/cm ³ , dry density:2.60g/cm ³ F.M. : 2.43, water absorption : 0.67%
Carbon powder	density : 2.12g/cm ³ specific surface area : 1314cm ² /g
Admixture	Deforming agent (Polyalkylene glycol derivative)

表 2 モルタルの示方配合

Blended name*	(kg/m ³)				Water content(%)	
	W	C	S	CP	Wet	Air dry
50-0	316	632	1266	0	9.9	6.3
50-5			1135	106	9.2	6.4
50-10			1004	212	10.3	6.4
50-15			873	318	11.5	6.3
50-20		742	424	11.8	6.4	
60-0		527	1354	0	9.7	5.7
60-5			1222	106	10.4	5.9
60-10			1092	212	10.6	5.7
60-15			960	318	11.0	5.5
60-20		830	424	11.2	5.6	
70-0		451	1417	0	9.9	6.3
70-5			1285	106	9.1	6.4
70-10			1155	212	10.3	6.4
70-15			1023	318	11.5	6.3
70-20			893	424	11.8	6.4

*W/C-CP

2.3 測定項目

透過率の測定は自由空間における遠方界の透過法を用いた。透過法の場合、日本建築学会電磁環境小委員会「電磁シールド材料性能測定法」⁷⁾によると、試験体取付け用開口部の周長は測定周波数の波長と同等以上と規定している。本研究では、開口部の1辺を250mmとし、300×300mmの平板試験体を用いた。したがって、開口部周長は1000mmとなり、1GHz以上の波長(λ=300mm)を用いる場合であればこの規定を満足する。

図1に実際の測定システムの構成を示す。装置は送信アンテナ、受信アンテナ、シールドボックス、ベクトルネットワークアナライザで構成される。ベクトルネットワークアナライザからの信号は送信アンテナから送信し、試験体を透過した透過波を受信アンテナで受信する。送信アンテナから試験体表面までの距離は1040mm(電波が2GHzの場合約7波長)、試験体裏面から受信アンテナまでの距離は180mm(電波が2GHzの場合、約1波長)とした。これは、測定システムの全体寸法上の制約によるものであるが、アンテナ間の距離の短縮によって測定ダイナミックレンジの確保も兼ねている。

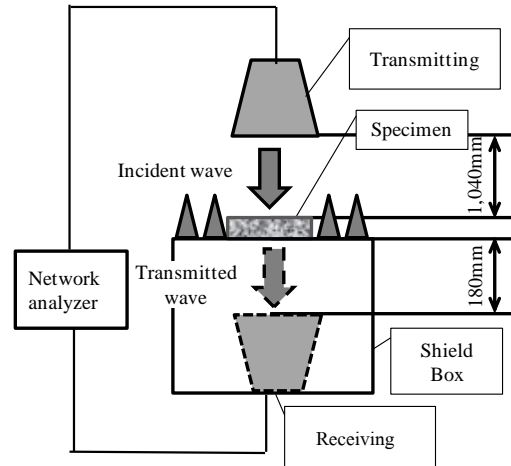


図 1 透過法の測定システム構成

電磁遮へい性を示す透過率 Ts (dB) は、試験体設置前における透過波と、試験体設置後の透過波を測定し、次式を用いて算出した。

$$T_s = 20 \log_{10} \left| \frac{V_t}{V} \right|$$

ここに、

V : 試験体の設置前、透過波を受信アンテナで受信した際の受信電圧

Vt : 試験体の設置後、透過波を受信アンテナで受信した際の受信電圧

なお試験体の厚さは、電磁遮へい性に影響を及ぼすことが予想されるが、既往の研究においては試験体厚さ 10mm 以下のものが多く、その厚さを超える報告例は少ない。そこで、本研究では埋設型枠の開発を進める基礎的研究と位置づけ厚さ 10、25mm の 2 水準で試験を行った。また試験体の含水状態が測定結果に及ぼす影響を検討するために、図2に示す条件下で養生を行い、湿潤、気乾、絶乾の状態とした。

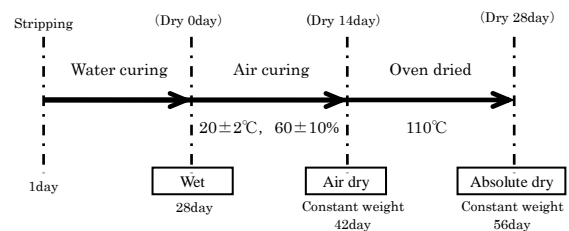


図 2 試験体の含水状態

なお、それぞれの状態における含水率は次式を用いて算出した。表2に測定時(湿潤、気乾状態)の含水率を示す。

$$W = \frac{(m - m_s)}{m_s}$$

ここに, W: 含水率 (%)

m: 試験時の試験体質量

ms: 絶乾状態の試験体質量

3. 実験結果および考察

3.1 透過率

図3に W/C=60%, 測定時の含水状態を気乾状態とした条件下で, CP をパラメータとした場合の周波数と透過率との関係を示す. 測定した周波数帯は1~8GHzとした. この図では縦軸の透過率が小さいほど, 試験体を透過する際の減衰効果が大きくなることを示している.

図より, CP が10%以下のモルタルでは, 周波数による透過率の変化は小さいが, 15%以上では, 周波数が高くなると透過率が減少傾向にある. また, 同一周波数で CP の影響を比較すると, 3GHz以上の周波数帯では, CP の増加とともに透過率が減少する傾向にある. 周波数が高くなるとともに, また CP の増加とともに透過率が小さくなり減衰効果が大きくなる傾向は, 試験体の含水状態の違いに影響されることなく同様の結果となった.

なお, 図中において透過率が急変する周波数が見られるが, これは, シールドボックスやケーブル内において発生した共振や反射による誤差と考えられる.

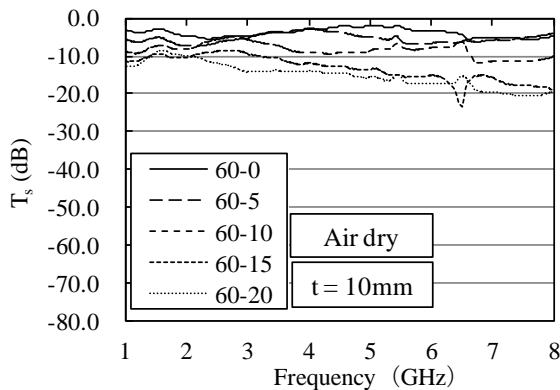


図3 CP をパラメータにしたときの透過率

図4に CP=10%, 含水状態を気乾状態の条件下で, W/C をパラメータとした場合の周波数と透過率との関係を示す. 図より, モルタルの W/C が変化しても各周波数における透過率に変化はなく, W/C が透過率に及ぼす影響は小さい. この傾向は含水状態や CP の違いに関わらず同様の結果となった.

図5に W/C=60%, CP=0,10,20%の配合において, 含水状態をパラメータとした場合の周波数と透過率の関係を示す. 図より, いずれの CP においても, 絶乾状態に比べて湿潤状態の試験体の透過率が小さくなった. これは, モルタル

内部の空隙が水分で満たされたことで透過率が小さくなった結果と考えられる. 試験体中の水分が透過減衰効果に与える影響は, CPが増加するほど顕著になることがわかる.

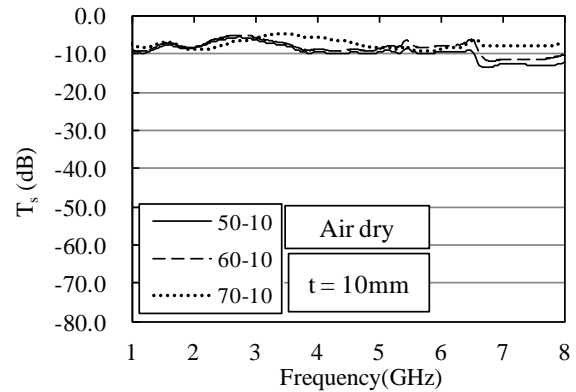


図4 W/C をパラメータにしたときの透過率

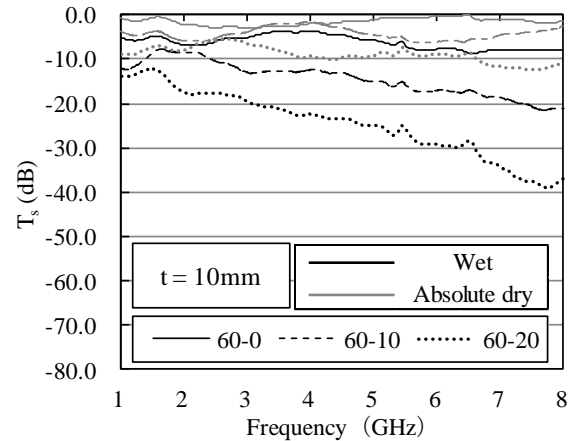


図5 含水状態をパラメータにしたときの透過率

図6に W/C=60%, CP=0~20%, 含水状態を気乾状態の条件下で, 試験体の厚さをパラメータとした場合の周波数と透過率の関係を示す. 図より, 厚さ10mmの試験体では前述のとおり CP=15%以上で, また厚さ25mmの試験体では CP=5%以上のとき, 周波数が高くなるとともに透過率が小さくなって減衰効果が大きくなる傾向がみられる. また, 炭素粉末無添加のモルタルでは厚さ25mmの試験体のほうが各周波数における透過率が若干小さいが, 炭素粉末を添加したモルタルでは, さらにその差が顕著となり試験体の厚さが透過率に与える影響が強くなった.

一般に平均的な電磁遮へい材に望まれる透過率は, -30~-60dB程度である. 本研究では, 気乾状態でその性能を満足する配合は, CP=15%以上, 厚さ25mmの試験体となり, 対象周波数は4GHz以上に限定される.

しかし, 炭素粉末を加えたモルタルでは, 無添加の場合と比較して含水状態や厚さの変化に伴う透過率の変化量が大きいことが確認できたため, さらに CP や厚さの調整を

行うことによって透過率の制御範囲が広がり、遮へい性能の向上が図れる可能性がある。

$$\dot{S}_{21} = \frac{\dot{T}_{12}\dot{T}_{23}e^{-j\dot{\gamma}_2 t}}{1 - \dot{R}_{21}\dot{R}_{23}e^{-2j\dot{\gamma}_2 t}}$$

ここに、 T_S : 透過率, θ : 位相差, \dot{S}_{21} : モルタルの透過係数, \dot{R}_{12} \dot{R}_{23} : 各境界面での反射係数, \dot{T}_{12} \dot{T}_{23} : 各境界面での透過係数, $\dot{\gamma}_2$: 試験体の伝搬定数, t : 試験体厚さ

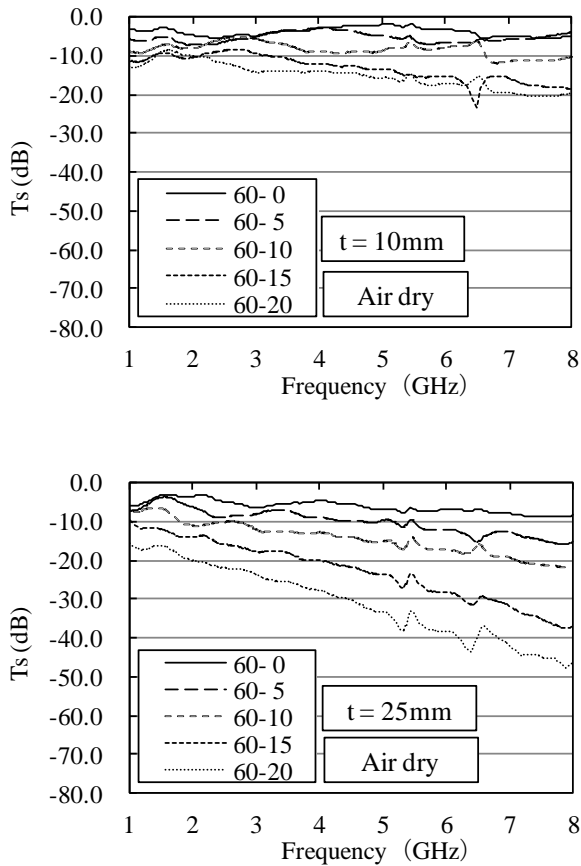


図6 試験体の厚みをパラメータにしたときの透過率

3.2 複素比誘電率の推定

試験体の複素比誘電率を知ることができれば、任意の厚みに調製した試験体が示すおおよその透過率を理論的に求めることができるため、その試みとして透過法により得られた透過率と、試験体設置前後の位相差を含む透過係数 \dot{S}_{21} を用いて試験体の複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_\gamma = \epsilon'_\gamma - j\epsilon''_\gamma$ の推定を行った⁵⁾。

$$\dot{\epsilon}_\gamma = \epsilon'_\gamma - j\epsilon''_\gamma$$

ここに、 ϵ_γ : 複素比誘電率, ϵ'_γ : 実数部, j : 虚数単位, ϵ''_γ : 虚数部

図7に示すような試験体に、上部から入射波があったとき透過率 T_S および透過係数 \dot{S}_{21} は次のように表される。

$$T_S = 20 \log_{10} |\dot{S}_{21}|$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(\dot{S}_{21})}{\text{Re}(\dot{S}_{21})} \times \frac{180}{\pi}$$

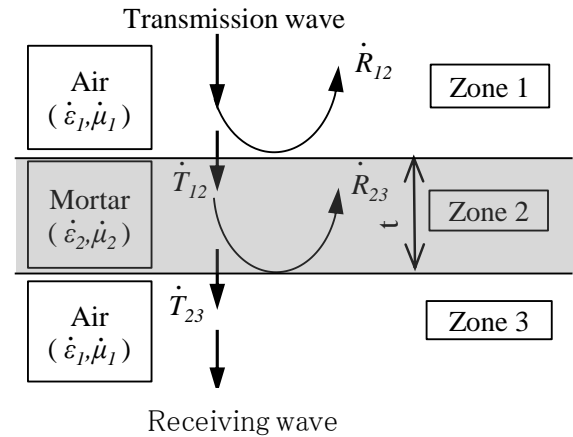


図7 試験体周辺における透過波, 反射波

空気の複素比誘電率を $\epsilon_1 = 1$, 空気とモルタルの複素比透磁率を $\mu_1 = \mu_2 = 1$ としたうえで、試験体の複素比誘電率 ϵ_2 の初期推定値を上式の各境界面における透過係数, 反射係数に代入し \dot{S}_{21} を求める。そこで得た \dot{S}_{21} の計算値と測定値を比較し、残差が設定した値以下になるように ϵ_2 を繰り返し修正する近似計算を2次元のニュートン法により実施し、試験体の複素比誘電率を推定した。

図8に厚さ 10mm の試験体を対象に W/C=60%, CP=0~20%, 含水状態が気乾状態の条件下における複素比誘電率推定値と周波数との関係を示す。図より、いずれの CP においても複素比誘電率の実数部, 虚数部が周波数に依存して緩やかに変化する様子がみられる。

また、CP が大きい試験体では周波数が高くなると複素比誘電率を求める際の解が収束せず、実数部, 虚数部の推定値が得られなかった。これは炭素粉末添加率の増加に伴ってモルタルの導電性が向上した結果、測定される透過波が微小となり、その微小量を用いた近似計算が誤差範囲に収束しなかったものと考えられる。

図9に W/C をパラメータに、CP と推定した複素比誘電率の実数部, 虚数部との関係を示す。実数部および虚数部の推定値は、解を求めることができた周波数の範囲において、各々の平均値を各配合の複素比誘電率の概数値として表示した。

図より、いずれの W/C による試験体においても CP の増加に伴って実数部, 虚数部が増加する傾向がみられ、また W/C の違いによる差異は認められない。CP によって実数

部および虚数部が増加する傾向は, いずれの含水条件における試験体でも同様であった。

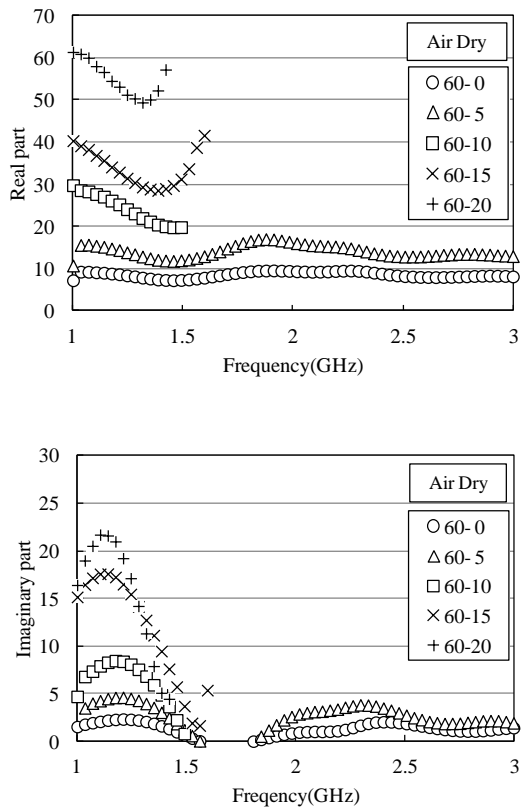


図8 複素比誘電率の推定値

図10に含水状態をパラメータに, CPと推定した複素比誘電率の実数部, 虚数部との関係を示す. 図より, 試験体の含水状態が絶乾状態, 気乾状態, 湿潤状態と変化し, 水分を多く含むほど, 複素比誘電率の実数部, 虚数部はともに増加する. 炭素粉末無添加のモルタルでは, 試験体の含水状態が変化しても複素比誘電率に及ぼす影響は小さいのに対し, 炭素粉末を添加したモルタルでは, 含水による複素比誘電率の増加割合はCPが大きくなるほど大きくなっている. この傾向はW/C=50, 70%の試験体でも同様であった.

試験体の含水状態によって複素比誘電率が変化するのは, 水の比誘電率が80とモルタルや空気比べて大きく, モルタル内の空隙部に水分を多く含むことで複素比誘電率の実数部, 虚数部がともに大きくなった結果と考えられる.

3.3 推定した複素比誘電率の評価

厚さ10mmの試験体を用いて推定した複素比誘電率の値を3.2に示した理論式に代入して厚さ25mmの試験体の透過率を求め, 実際の測定で得られた透過率と比較を行うことで推定した複素比誘電率の妥当性を検証した.

比較はW/C=60%, CP=0, 10, 20%の配合で行い, 含水条件が気乾状態の試験体を用いた.

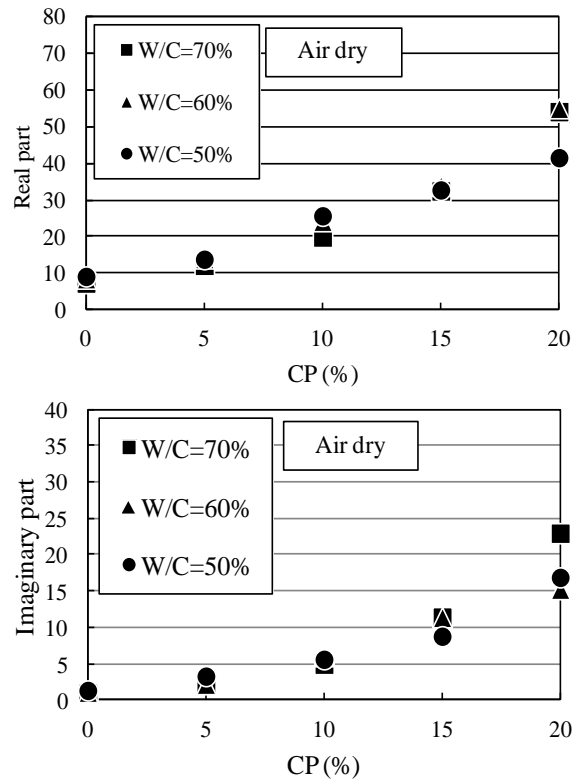


図9 W/Cをパラメータとした複素比誘電率

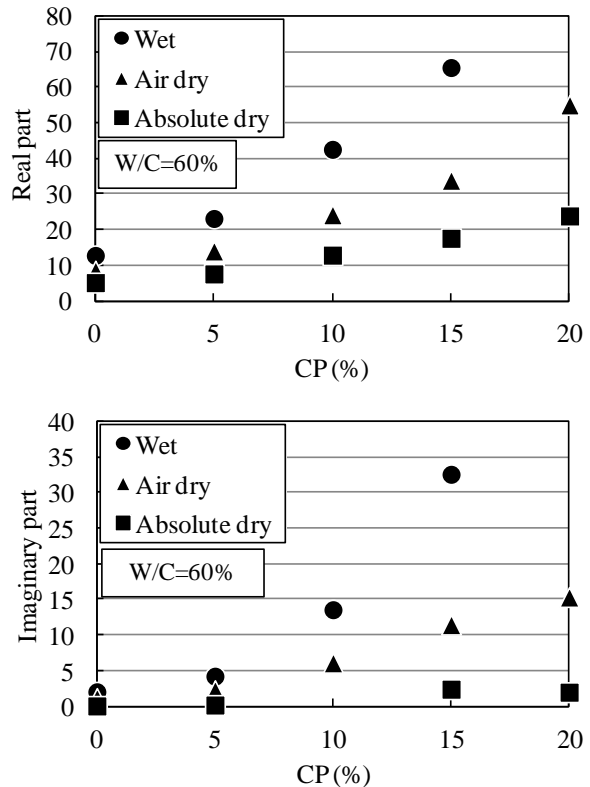


図10 含水条件をパラメータとした複素比誘電率

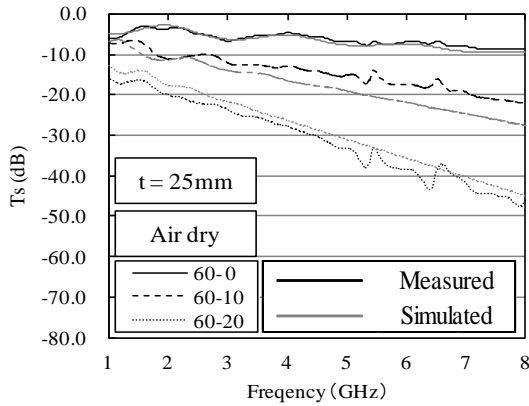


図 11 透過率計算値と測定値の比較

図 11 に計算値と測定値の比較を示す。CP=0%のモルタルでは計算値と測定値が概ね一致しているのに対して、CP=10,20%のモルタルでは計算値と測定値に差が生じている。これは、CP=10%以上のモルタルでは複素比誘電率の推定時に1~1.5GHzの狭い範囲の実数部および虚数部しか得られず、その値を他の周波数範囲に適用したことが原因であると考えられる。

さらに計算値と測定値の差を低減するためには、複素比誘電率の推定精度の向上が不可欠である。

4. 結言

本研究では、炭素粉末を添加したモルタルの電磁遮へい性（主に透過率）について検討した。

- (1) 試験体の厚さが 10mm のとき CP=15%以上で、厚さが 25mm のときは CP=5%以上の場合に周波数が高くなるにしたがって透過率が減少し、併せて CP が大きいほど減少することが確認できた。W/C が透過率に及ぼす影響は小さい。
- (2) 試験体中の水分が多いほど透過率は減少し、CP が大きいほど、水分の有無による透過率の差が大きく現れる。また、試験体が厚いほど透過率は減少し、CP が大きいほど、試験体厚さの違いによる透過率の差が大きく現れる。
- (3) 複素比誘電率の推定値を用いて厚さが異なる試験体の透過率を計算して測定値と比較した結果、炭素粉末の添加率が少ない試験体において、計算値と測定値に一定の近似が得られた。
- (4) 任意の厚さの試験体における透過率を予測するためには、さらに複素比誘電率の推定精度を向上する必要がある。

謝辞

本研究の実施に際しご指導、ご協力をいただいた摂南大学理工学部都市環境工学科の熊野教授をはじめ研究室の皆様感謝いたします。

なお、本研究は奈良県が実施する「Living Science 先導的研究開発事業」の一環として、村本建設株式会社との共同研究により実施したものである。

参考文献

- 1) S.Takai, T.Kumano, K.Kageyama and S.Inoue, “On the physical properties of mortar added the conductive carbon powder”, Japan Concrete Institute, Proceedings of Annual Conference Vol.34, No.1, pp1396-1401(2012)
- 2) S.Takai, T.Kumano, S.Inoue and T.Hayashi, “ Study on Property of Electromagnetic Wave of Mortar Added Conductive Material” Japan Concrete Institute, Proceedings of Annual Conference Vol.35, No1, pp1369-1374 (2013)
- 3) M.Miki and T.Kikuchi, “Electromagnetic Wave Absorption Characteristics of Unsaturated Polyester Containing Bincho-Charcoal and Bamboo Charcoal Powders”, J.Jpn.Soc.Powder.Metallurgy Vol.52, No.8, pp630-634(2005)
- 4) S.Kawabe, T.Ikeda, M.Yasuda and K.Shimogama, “ The Electromagnetic Wave Absorption Characteristic of Quasi Microwave Band in Carbon Mixed Cement Mortar”, CAJ Proceeding of Cement & concrete vol.53, pp744-750(1999)
- 5) O.Hashimoto, “ Material constant measurement method in the high frequency region”, Morikita Publishing Co., Ltd.(2003.8)
- 6) T.Hayashi and S.Takai, “ Test Environment for the Measurement of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Large Size Material at GHz Wave Band and Characteristic of Mortar Added Conductive Carbon” Report of Nara Prefecture Institute of Industrial Development, No.39, pp1-5 (2013)
- 7) “Electromagnetic Shielding Material Performance Measurement Method”, Electromagnetic Environment Subcommittee, Architectural Institute of Japan(2000.3)