論文　モルタルの電気的特性に及ぼす炭素繊維混入率の影響

福上　大貴[*1]・水越　睦視[*2]・太良尾　浩生[*3]・上松　航星[*4]

要旨：モルタルの導電性を向上させる材料として炭素繊維に着目し，炭素繊維を混入したモルタルのフレッシュ性状，力学的特性，電気的特性について検討した。その結果，炭素繊維混入率が高くなると，フロー，圧縮強度は低下する傾向にあることがわかった。また，電気抵抗は低周波数領域では高くなるが，高周波数領域では低くなる傾向にあり，高周波数領域の方が供試体間の電気抵抗のばらつきは小さくなった。さらに，炭素繊維混入率が高いほど電気抵抗は小さくなり，含水率の低下に伴う電気抵抗の変化量が小さくなることがわかった。

キーワード：炭素繊維，インピーダンス，抵抗成分，周波数，含水率

1. はじめに

これまで，コンクリートに要求される性能として力学的特性，耐久性，使用性などが主なものであり，これらの性能を向上させるために多くの検討が行われてきた。しかし昨今では，炭素系材料の電気伝導性を利用して材料の損傷を検知する技術，あるいは炭素繊維を混入したコンクリートの通電により，発熱機能を付加するなど，従来の性能に新しい性能を加えたコンクリートの研究・開発がなされている[1),2)]。

また近年，オール電化住宅の推進に伴い，漏電および感電防止のための複数の接地が必要となっている。これらの住宅の接地極として，鉄筋コンクリート基礎を利用するため，コンクリートに導電性物質を混入した場合の電気的特性についても検討が行われている[3),4)]。筆者らも先行研究により，セメント系材料の電気抵抗には，周波数，水セメント比および骨材量などの諸条件が影響を及ぼすことを確認した[5)]。このように，従来の方法とは異なるコンクリートの新たな活用方法も検討されている。

しかしながら，導電性の高い材料をセメント系材料に混入した場合の電気的特性について検討はされているものの，直流電流による検討であり，交流電流についての研究成果は少ない。さらに，交流電流による研究成果のうち，比較的周波数が低い領域についてのみ報告されている場合が多い。また，接地極として鉄筋コンクリートを用いる場合，あるいは接地極の保護材料としてモルタルを地中に施工する場合などは，セメント系材料の含水状態が電気的特性に影響することが想定されるが，これらの影響についても不明点が多く残されている[6)]。

以上の観点から，本研究では導電性を高める材料として炭素繊維に着目し，炭素繊維混入モルタルのインピーダンスを測定し，炭素繊維混入率がモルタルの電気抵抗に与える影響について実験的に検討した。また，今回作製した炭素繊維混入モルタルの接地抵抗低減材への適用性を検討するためにフレッシュ特性，力学的特性，電気的特性と市販の接地抵抗低減用導電性モルタル（以下導電性モルタルとする）の各特性との比較も実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で使用した材料を**表－1** に，モルタルの示方配合を**表－2** に示す。本研究では，W/C=50%，S/C=1.9 のモルタルを基準とし，炭素繊維混入率（以下 V_f とする）を体積比で 0～5.0%の範囲で変化させた。炭素繊維は，CFRP（炭素繊維強化プラスチックス）を原料としたミルドファイバーを使用した。また，目標空気量を 3.0%とし，消泡剤を使用したが，流動性確保のため AE 減水剤を使用した V_f=5.0%のみ，10%と大きな値となった。

表－1　使用材料

材料	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント 密度　3.15g/cm^3，比表面積　3340cm^2/g
細骨材	砕砂 表乾密度　2.60g/cm^3 粗粒率　2.63，吸水率　1.74%
炭素繊維	PAN系炭素繊維 密度　1.7g/cm^3，平均繊維長　60μm
AE減水剤	リグニンスルホン酸系高機能タイプ
消泡剤	ポリアルキレングリコール系

*1 香川高等専門学校専攻科　創造工学専攻　(学生会員)
*2 香川高等専門学校　建設環境工学科教授　博(工)　(正会員)
*3 香川高等専門学校　電気情報工学科准教授　博(工)　(非会員)
*4 香川高等専門学校専攻科　創造工学専攻　(非会員)

表－2　モルタルの示方配合

炭素繊維混入率 V_f (%)	単位量(kg/m^3)				C×(%)*		空気量の実測値 (%)
	W	C	S	炭素繊維 CF	AE減水剤	消泡剤	
0	315	630	1183	0	-	5T	2.5
0.5	315	630	1170	9	-	5T	1.3
3.0	315	630	1105	51	-	5T	1.9
5.0	315	630	1053	85	1.0	5T	10.0

注) *：1T=C×0.003(%)

市販の導電性モルタルは特殊な炭素粒子とセメント成分を主成分とするプレミックスタイプであり，製品25kg に対して水 8kg および製品質量の 0.8%の AE 減水剤を使用した。

2.2 試験項目および方法

モルタルの練混ぜには二軸強制練りミキサを使用し，セメント，細骨材を投入し，30 秒の空練り後，水と混和剤を投入し，90 秒間の本練りを行った。本練り後，炭素繊維を投入し，60 秒間の練混ぜを行った後，軸に付着した炭素繊維を掻き落とし，さらに 60 秒間の練混ぜを行った後にモルタルを排出した。

供試体は，圧縮強度試験，静弾性係数試験および電気的特性の確認のために φ100×200mm の円柱供試体を，曲げ強度試験のために 40×40×160mm の角柱供試体を各配合につき，それぞれ 3 本ずつ作製し，型枠に打ち込んで 24 時間後に脱型した。力学的特性を確認するための供試体は所定の材齢まで，水温 20℃の恒温槽で水中養生を行った。電気的特性を確認するための供試体は，水中養生を 7 日間行った後，気中養生を行った。**表－3** に試験項目および測定項目を示す。

3. 実験結果および考察

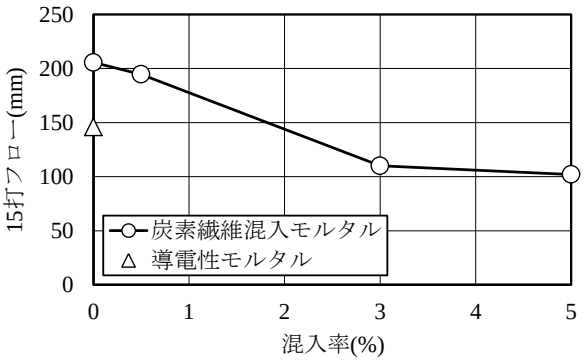
3.1 フレッシュ特性

図－1 に炭素繊維混入率と 15 打フローの関係を示す。炭素繊維混入モルタルでは，炭素繊維混入率の増加に伴い，フロー値が減少する傾向が認められた。また，V_f=5.0%では，AE 減水剤を使用しているにもかかわらず小さい値となった。

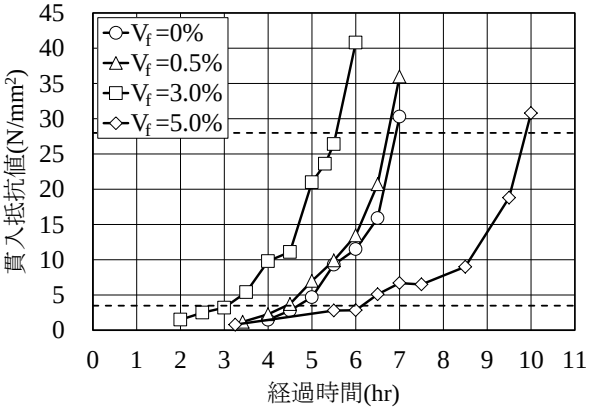
図－2 に凝結試験結果を示す。なお，図中の点線は貫入抵抗値 3.5N/mm^2 に達した時間が始発，28N/mm^2 に達した時間が終結であることを示している。V_f=0～3.0%までは，炭素繊維混入率の増加に伴い，始発までの時間が短くなっていることがわかる。また，V_f=0～3.0%に比べて，V_f=5.0%は凝結時間が遅延しているが，これは，AE 減水剤を添加したことによるものと考えられる。

表－3　試験項目および測定項目

試験項目	測定項目
フレッシュ特性	空気量(JIS A 1128に準拠)
	モルタルフロー(JIS R 5201)
	凝結時間(JIS A 1147に準拠)
力学的特性	圧縮強度(JIS A 1108に準拠)
	静弾性係数(JIS A 1149に準拠)
	曲げ強度(JIS R 5201)
電気的特性	LCRメーターにより供試体に交流電圧を印加し，インピーダンスを測定する



図－1　炭素繊維混入率と 15 打フローの関係



図－2　凝結試験結果

3.2 力学的特性

図－3 に，材齢 28 日における炭素繊維混入率と圧縮

強度の関係を示す。V_f=0%を除き，炭素繊維混入率の増加に伴って,圧縮強度は低下していることがわかる。これは，**図－1** に示したように炭素繊維混入率の増加に伴うモルタルフロー値の減少は，特に V_f=3%以上で顕著となり，ワーカビリティーの低下により供試体の締固めが十分でなかったためであると考えられる。

図－4 に，材齢 28 日における炭素繊維混入率と静弾性係数の関係を示す。本実験結果からは，炭素繊維混入率と静弾性係数の間に相関は認められなかったが，V_f=0%に比べて，炭素繊維混入モルタルの静弾性係数は，若干小さくなる傾向にあった。また，V_f=0%と導電性モルタルの圧縮強度は，ほぼ等しくなったが，静弾性係数は，約 10kN/mm^2 の差があることがわかった。

図－5 に，材齢 28 日における炭素繊維混入率と曲げ強度の関係を示す。炭素繊維の混入率の増加に伴って，曲げ強度は増加することがわかった。V_f=0%と導電性モルタルの曲げ強度は，ほぼ等しい値となった。

3.3 電気的特性

(1) 測定方法の検討

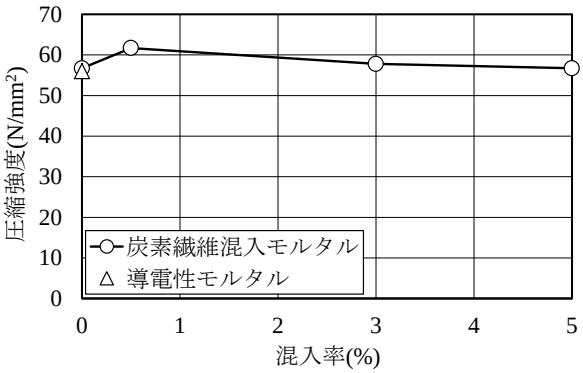
本研究では LCR メーターを用い，電圧 5V の交流電流を，0.1Hz から 5MHz まで周波数を変化させ，供試体に供給した。また，計測したインピーダンスと位相差より，インピーダンスの抵抗成分を算出した。測定は，15 週間にわたって行った。

セメント系材料のインピーダンスを測定する一般的な方法は，大きく分けて 2 端子法と 4 端子法があり，多くの研究結果が報告されている [6),7)]。モルタルのインピーダンスを測定するにあたり，どの方法を採用するか検討した。

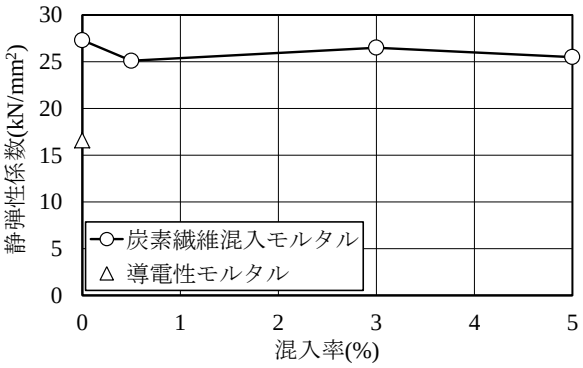
4 端子法は，異なる 3 つの接続方法を検討した。1 つ目の方法は，導電性グリースを塗布した直径 100mm の鋼製円盤を供試体の両端面に電流電極として付着させた。さらに，アルミ製の板を供試体の側面に電位差電極として配置した。2 つ目の方法は，電流電極は 1 つ目の方法と同じとし，電位差電極として銅線を供試体側面に巻き付けた。3 つ目の方法は，等間隔に置いた 4 本の針電極（釘）を電流・電位差電極として，供試体側面に触れさせた。

2 端子法は，**図－6** に示すように，直径 100mm の鋼製円盤を電位差と電流の共通電極として導電性グリースを塗布し，それを供試体の両端面に付着させ，LCR メーターに接続した。

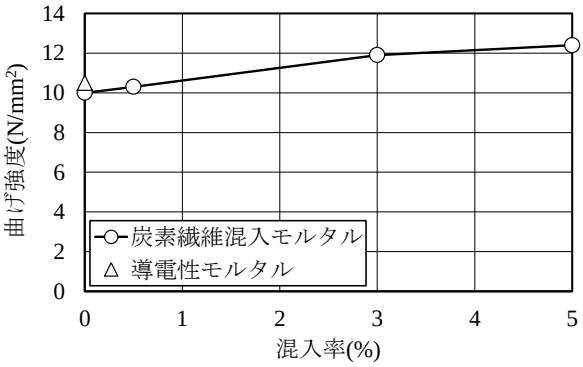
図－7 に，V_f=0%の No.1 の供試体を対象にした，4 端子法と 2 端子法の周波数と抵抗成分の関係を示す。測定方法,材齢にかかわらず,周波数の増加に伴って，抵抗成分は低下していることがわかる。2 端子法では，低周波数領域から高周波数領域まで測定することがで



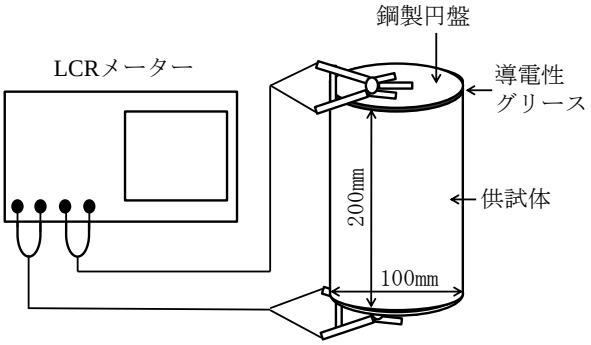
図－3　炭素繊維混入率と圧縮強度の関係（材齢 28 日）



図－4　炭素繊維混入率と静弾性係数の関係
（材齢 28 日）



図－5　炭素繊維混入率と曲げ強度の関係（材齢 28 日）



図－6　測定回路（2 端子法）

きたが，4 端子法を用いると，10kHz よりも高い周波数での測定を正確に行うことができなかった。これは，供試体と電極との設置界面が実験結果に与える影響が，電極数の多い 4 端子法の方が大きいことによるものと考えられる。以上より，本研究では 2 端子法により測定することとした。また，土木学会では断面修復材の体積抵抗率の評価を周波数が 60～100Hz の範囲で行うことを基準として定めている [7]。この周波数範囲でのモルタルの抵抗成分は，高周波数領域における抵抗成分より高いことがわかる。

(2) 電極材料による影響

供試体の両側に付着させる電極の材料を変化させた時の抵抗成分の変化について検討するために，鋼製円盤の他に，アルミニウム板，銅板を用いて，実験を行った。材齢 33 日において，V_f=0%の供試体（No.1）を対象にした電極を変化させた場合の，周波数と抵抗成分の関係を**図－8** に示す。図より，電極を変化させた場合でも，周波数の増加に伴い，抵抗成分は低下することがわかる。また，100kHz 以下の周波数領域では，同一供試体を用いて実験を行ったにもかかわらず，電極の種類により，抵抗成分が大きく変化していることがわかる。しかし，300kHz 以上の周波数領域では，電極の種類を変化させても，モルタルの抵抗成分がほぼ等しくなった。どの電極が測定誤差を小さくできるかは検討できなかったが，本研究では，低周波領域において供試体と電極との界面に見られるインピーダンス [8]による影響が小さい鋼製円盤を電極として使用することとした。

(3) インピーダンスプロット

抵抗器とコンデンサが並列に接続された RC 並列回路のインピーダンス $\dot{Z}$ は式(1)で表される。また，式(1)を変形すると，式(2)のように表される。

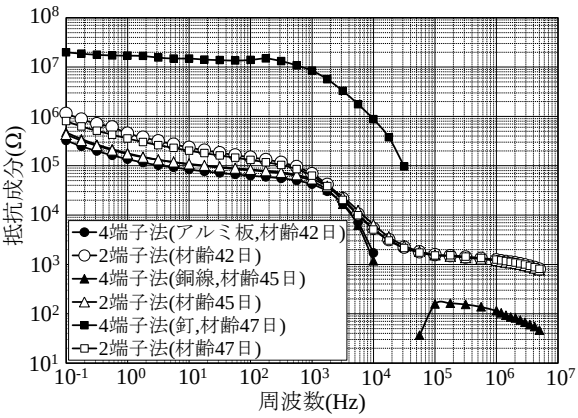
$$\dot{Z} = \frac{R}{1 + j\omega CR} \tag{1}$$

$$\left(-\frac{\omega CR^2}{1+(\omega CR)^2}\right)^2 + \left(\frac{R}{1+(\omega CR)^2} - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \tag{2}$$

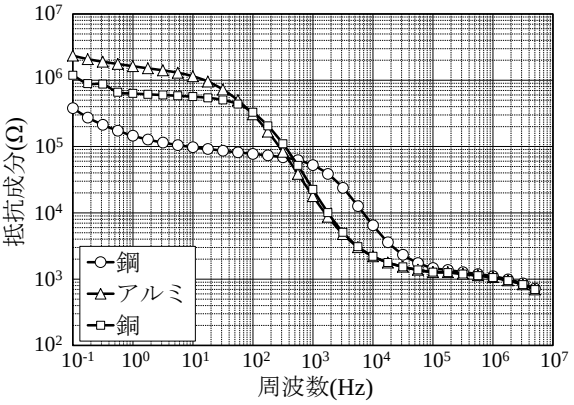
ここに，$\dot{Z}$：インピーダンス(Ω)，R：電気抵抗(Ω)，
j：虚数単位，ω：角速度(rad/s)，C：静電容量(F)

式(2)は，リアクタンス（虚数）成分を縦軸，抵抗（実数）成分を横軸にとった半径が R/2 の円の方程式である。したがって，RC 並列回路の抵抗成分とリアクタンス成分の関係は，半円で表すことができる。

図－9 に，材齢 28 日における，V_f =0～5.0%と導電性モルタルについて，周波数をパラメータとした時の抵抗成分とリアクタンス成分の関係を示す。図より，V_f=0～5.0%および導電性モルタルは，形に違いはあるものの半円に近い形を描いていることがわかる。したがって，これらは RC 並列回路に近似することができるといえる。また，炭素繊維混入率が高くなるほど半円は小さくなっている。さらに，導電性モルタルを除く炭素繊維混入モルタルでは周波数が約 100Hz を下回

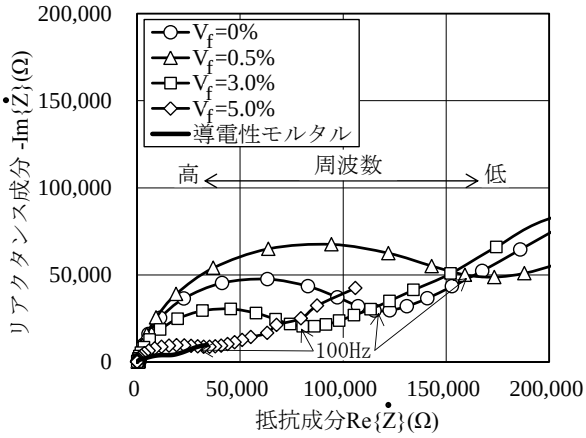


図－7　周波数と抵抗成分の関係(4 端子法, 2 端子法)



図－8　電極変化時の周波数と抵抗成分の関係

（材齢 33 日）



図－9　抵抗成分とリアクタンス成分の関係

（材齢 28 日）

ると，右肩上がりの軌跡を描いた [8]。これの詳細な原因は不明だが，電極と供試体の界面における影響が考えられる。

(4) 周波数特性

図－10 に，材齢 28 日における V_f=0%の同一配合の供試体の周波数と抵抗成分の関係を示す。図より，1kHz までは，抵抗成分は緩やかに減少し，同一配合であっても，供試体間で抵抗成分にばらつきがあることがわかる。1kHz を過ぎると，抵抗成分は急激に減少し，ほぼ一致した。なお，図示していないが，V_f=0.5～5.0%においても同様の傾向が認められた。

図－11(a) に，材齢 28 日における，V_f=0～5.0%と導電性モルタルの周波数と抵抗成分の関係を示す。図より，5kHz 以下および 100kHz 以上の周波数領域では，炭素繊維混入率が高い方が抵抗成分は小さくなる傾向にある。しかしながら，低周波数領域では，同一配合での供試体間の抵抗成分のばらつきが大きかったことから，高周波数領域の方が炭素繊維混入率の違いによる電気抵抗の変化を精度良く評価しているものと考えられる。また，導電性モルタルの抵抗成分は，いずれの周波数においても，炭素繊維混入モルタルが示す値よりも小さくなった。

また，炭素繊維混入の有無がモルタルの抵抗成分に与える影響について考察するために，**表－2** の示方配合から W/C と S/C は同一として，炭素繊維のみを除いた配合で作製した供試体（以下 N－V_f とする）でもインピーダンスを測定した。その材齢 28 日における周波数 10kHz～5MHz までの結果を，炭素繊維混入モルタルとともに**図－11(b)** に示す。図より，100kHz 以上の周波数領域では，周波数が高くなるほど，炭素繊維混入モルタル（V_f）の抵抗成分は，炭素繊維無混入モルタル（N－V_f）の抵抗成分よりも小さくなっている。これより，炭素繊維はモルタルの導電性を高める性質を有しているといえる。

(5) 含水率による影響

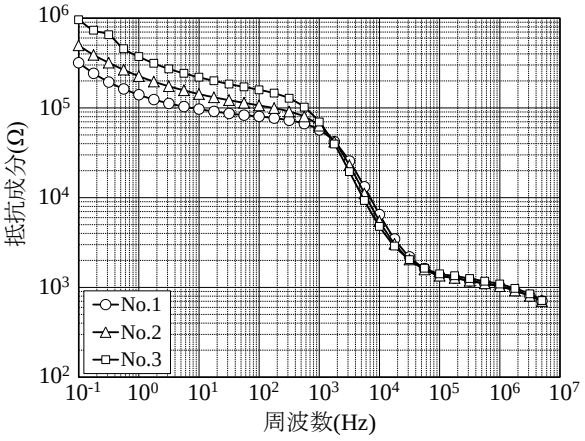
対象とする周波数は，高周波数領域では，電極の種類を変化させても，ほぼ等しい抵抗成分を得ることができたこと，および高周波数領域の方が，同一配合における供試体間の抵抗成分のばらつきが小さかったことを考慮して，1MHz とした。

供試体の含水率は，式(3)により算出した。

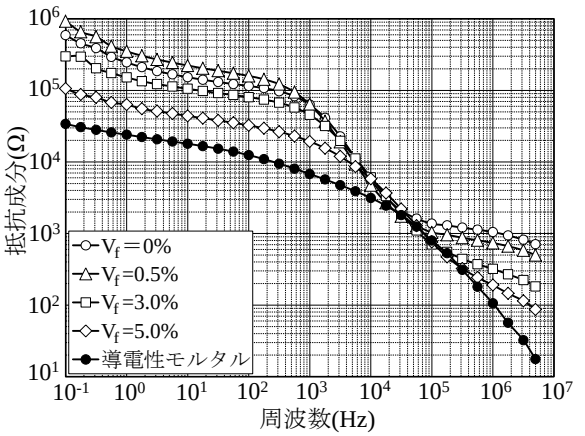
$$W' = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \qquad (3)$$

ここに，W'：含水率(%)，W：インピーダンス測定時の質量(g)，W_0：乾燥後の質量(g)

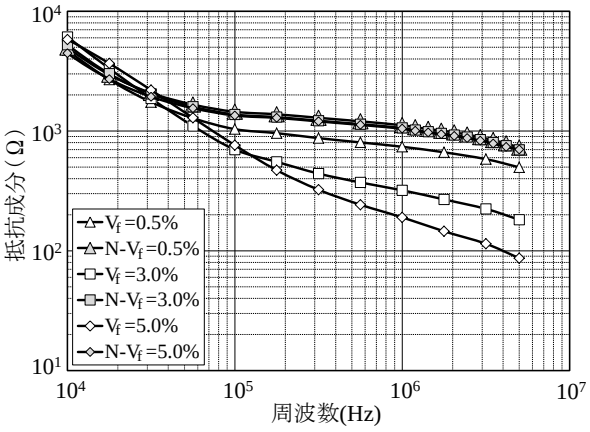
なお，W_0 は測定終了後，供試体を割裂し，110℃の乾燥炉で質量が一定となるまで乾燥させた時の値である。



図－10　V_f =0%における周波数と抵抗成分の関係（材齢 28 日）



(a) 炭素繊維混入モルタルと導電性モルタル

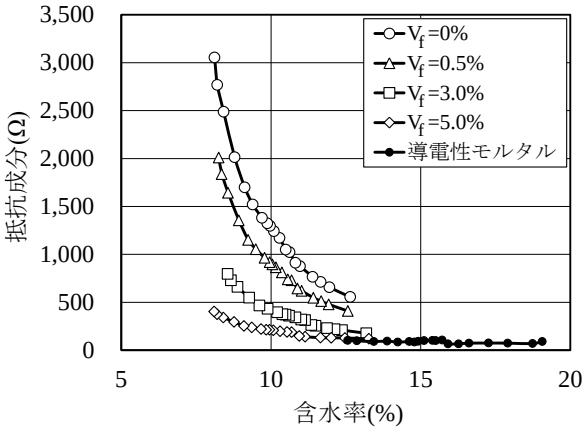


(b) 炭素繊維混入モルタルと炭素繊維無混入モルタル

図－11　周波数と抵抗成分の関係（材齢 28 日）

1MHz における含水率と抵抗成分の関係を**図－12** に示す。図より，含水率が高いほど，抵抗成分は小さくなっていることがわかる。さらに，同一含水率で各モ

ルタルの抵抗成分を比較すると，炭素繊維混入率が高い配合の方が，抵抗成分は小さくなっていることがわかる。また，含水率の低下に伴う抵抗成分の変化量は炭素繊維混入率が高いほど, 小さくなることがわかる。以上の結果より，炭素繊維混入率が高いほど，含水率がモルタルの抵抗成分に与える影響は小さいといえる。また，導電性モルタルは，炭素繊維を混入させたモルタルよりも抵抗成分は低い。さらに，含水率の低下に伴う抵抗成分の変化量も，炭素繊維混入モルタルよりも小さくなった。



図－12　含水率と抵抗成分の関係(周波数 1MHz)

4. まとめ

本研究では, モルタルの導電性を高める材料として, 炭素繊維に着目し，接地抵抗低減用導電性モルタルへの適用も視野に入れ，炭素繊維混入モルタルのフレッシュ性状，力学的特性，電気的特性について市販の導電性モルタルと比較検討した。その結果，明らかになったことを以下に述べる。

(1) 炭素繊維混入率が高いと，フローは低下し，凝結試験において，始発までの時間が短くなる。

(2) 炭素繊維混入率が増加すると，圧縮強度は低下，曲げ強度は増加する傾向にある。

(3) モルタルのインピーダンスは，RC 並列回路の近似によって求めることができると考えられる。

(4) 同一配合であっても, 供試体間には低周波数領域における抵抗成分にばらつきがあるが，1kHz 以上の周波数領域では, そのばらつきは小さくなる。これは, 高周波領域では再現性のある安定した結果が得られ, 今後の電気的特性の評価方法としての有効性を示唆しているものと考えられる。

(5) 炭素繊維混入率が高い方が, 抵抗成分は小さくなる。また，含水率の低下に伴い，抵抗成分は増加する。さらに，炭素繊維混入率が高いほど，含水率が抵抗成分に与える影響は小さい。

(6) 市販の接地抵抗低減用導電性モルタルは, 炭素繊維を混入させたモルタルよりもいずれの周波数においても抵抗成分は低い。さらに，含水率が抵抗成分に与える影響も炭素繊維混入モルタルよりも小さい。

謝辞

本研究を行うにあたり，摂南大学熊野知司教授，村本建設(株)高井伸一郎氏，ウイスカー(株)徳井康之氏には，炭素繊維の提供および貴重な技術情報を交換させて頂きました。ここに記し深く感謝致します。

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, コンクリート工学会年次論文集, Vol.34，No.1，pp.1396-1401，2012

2) 牧角龍憲：ピッチ系炭素繊維混入によるコンクリートの発熱機能の付加, 土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.667-668，2005

3) 三田紀行，山崎尚志，渡辺信公：接地効果のある戸建住宅用コンクリート基礎に関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.25-26，2006

4) 渡邉信公，清水洋隆，吉村孝平，吉澤研一：コンクリート内の鉄筋が電気抵抗特性におよぼす影響, 平成 16 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.23-19-23，2004

5) 福上大貴，水越睦視，太良尾浩生，上松航星：コンクリートの電気抵抗率の測定方法およびその影響因子に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会，pp.73-74，2012

6) 鹿島孝之，河野広隆，渡辺博志，田中良樹：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究， コンクリート工学会年次論文集, Vol.21, No.2, pp.895-900，1999

7) コンクリート委員会・規準関連委員会：土木学会基準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案) (JSCE-K 562-2008)」の制定，土木学会論文集 E，Vol.64，No.3，pp.427-434，2008

8) 生田博将：交流インピーダンス法(固体電解質系), 電気化学および工業物理化学，Vol.68，No.5, pp.356-360，2000