

論文 コンクリートの各種性状が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響

岡本 祐輝*1・福山 智子*2・千歩 修*3

要旨: 本研究は、交流インピーダンスを利用した鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食診断の精度向上に資することを目的に、複合材料であるコンクリートの各種性状の違いが、交流インピーダンス測定から得られる導電性抵抗(Re)や容量性挙動を示す位相差(θ)の周波数応答特性に及ぼす影響について 10^{-1} ~ 10^6 Hz の範囲で検討を行った。その結果、 10^4 Hz 時の Re は、開口容積の増加、材齢の経過、W/C の低下、粗骨材の含有、含水率の減少に伴い増加し、 10^6 Hz 時の θ は、開口容積の増加、粗骨材の含有、含水率の減少に伴い -90° に近づき、 10^0 Hz 時の θ は、電解質量の増加、開口容積の減少、含水率の増加に伴い -90° に近づく傾向を示した。

キーワード: 交流インピーダンス, 周波数応答特性, 導電性抵抗, 位相差, 容量性挙動

1. はじめに

微・非破壊的に鉄筋腐食診断を行うことが可能な方法の1つである交流インピーダンス法は、鉄筋コンクリートに周波数の異なる交流波を印加した際の複素インピーダンスを測定するものであり、鉄筋とコンクリートの界面のインピーダンスから鉄筋の腐食程度を診断する手法である。しかし、かぶりコンクリートの含水率や塩化物イオン、細孔構造などがインピーダンスに影響を及ぼし、正確な診断が困難な事例が報告されている(例えば1)2)。

本研究は、コンクリートの各種性状が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響を把握し、その結果を鉄筋腐食診断精度向上に資する事を目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1(a), (b)に実験概要と試験体条件の概要を、図-1(a)~(c)に試験体形状と測定概要を、表-2にコンクリート・モルタルの調合と基礎性状を示す。

本研究は、複合材料であるコンクリートの各種性状の違いが交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響の検討を行うために、表-1(a)のようにコンクリートの細孔溶液濃度の違いや不均質な骨材の材料条件を、単一電解質や均一直径の誘電体を用いて均質化して検討(単純化した系)を行った上で、表-1(b)のコンクリート・モルタル(複合材料)での検討を行った。

表-1(a)の単純化した系での検討においては、図-1(a)の試験体形状の試験体を用い、電解質種類及び物質質量、誘電体の混合割合の影響に関して検討を行った。

電解質種類及び物質質量の検討においては、電解質とし

て NaCl や KCl を溶解した寒天ゲル(G), または溶液(S)を試験体として測定を行った。

誘電体の混合割合の検討では、誘電体としてポリスチレン球(PS)やガラス球(GL)の混合割合を変化させた試験体を用いて測定を行った。寒天ゲルは、寒天粉末を精製水に煮沸しながら溶解した後、気中で静置し硬化させて作製した。

表-1(b)のコンクリート・モルタル(複合材料)での検討では、開口形状、材齢・W/C・粗骨材、含水率の影響に関して検討を行った。ここでは、開口は細孔などのマイクロな導電経路をマクロに模擬して電荷の移動経路の検討を行うことを目的としている。

開口形状の検討においては、図-1(b)のように、電極間に横(L), 縦(H), 深さ(D)の異なる開口を設けたモルタル試験体を作製し測定を行った。各試験体は打設1日後に脱型し、所定の材齢まで水中養生を行った。

材齢・W/C・粗骨材の影響の検討においては、図-1(c)の形状のコンクリート試験体(C)と、ウェットスクリーニングによりコンクリートから粗骨材を取り除き、同様のモルタル成分からなるモルタル試験体(M)を作製し測定を行った。各試験体は、打設1日後に脱型し所定の材齢まで、水中養生を行った。

含水率の影響の検討においては、図-1(c)の試験体に対して、材齢208日から9日間吸水させ、飽水状態と仮定した試験体から、含水率を20°C60%RHの恒温室、乾燥炉を用いて含水率を順次低下させて測定を行った。

体積含水率は、式(1), (2)を用いて算出した。

$$\text{体積 } V = (W_1 - W_2) / \rho_w \quad (1)$$

$$\text{体積含水率(\%)} = [(W_3 - W_4) / \rho_w] / V \times 100 \quad (2)$$

*1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 (学生会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 助教 博士(工学) (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士 (正会員)

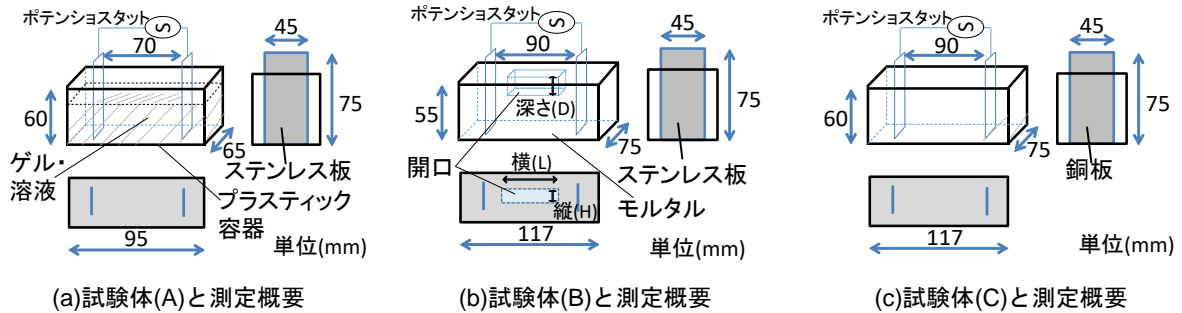
表一 実験概要と試験体条件の概要

(a)単純化した系(ゲル・溶液)での検討

検討項目	試験体概要 (試験体名称・条件)				電圧	形状
	名称	概要	名称	概要		
電解質種類 及び 物質の影響	G-基準	ゲル基準(寒天粉末で作製したゲル)	G-KCl 0.02mol	0.02mol/L KCl 溶液に寒天粉末を溶解	1V	(A)
	G-NaCl 0.02mol	0.02mol/L NaCl 溶液に寒天粉末を溶解	G-NaCl 0.1mol	0.1mol/L NaCl 溶液に寒天粉末を溶解		
誘電体の混合 割合の影響	—	—	S-NaCl 0.5mol	0.5mol/L NaCl 溶液	0.01V	
	G-PS.(混合割合)	ゲルに対して、Φ6mm ポリスチレン球(PS)を体積当たり、0, 7, 14, 22cm ³ 置換			1V	
	G-GL.(混合割合)	ゲルに対して、Φ16.6mm ガラス球(GL)を体積当たり、0, 7, 14, 22cm ³ 置換				

(b)コンクリート・モルタル(複合材料)での検討

検討項目	試験体概要 (試験体名称・条件)				電圧	形状
	名称	概要	名称	概要		
開口形状 の影響	M.基準 1	基準試験体 1(開口なし)	M.基準 2	基準試験体 2(開口なし)	0.01V	(B)
	M.2-15-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 2-15-15	M.2-45-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 2-45-15		
	M.5-15-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 5-15-15	M.5-15-45	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 5-15-45		
	M.5-45-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 5-45-15	M.5-45-45	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 5-45-45		
	M.20-15-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 20-15-15	M.20-15-45	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 20-15-45		
	M.20-45-15	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 20-45-15	M.20-45-45	横(L)-縦(H)-深さ(D) : 20-45-45		
材齢・W/C・ 粗骨材の影響	名称 : M-SL.(材齢), C-SL.(材齢) 概要 : 材齢 7 日, 14 日, 21 日, 28 日に飽水状態で測定 (水中から取り出し表面水を拭った状態で測定)				(C)	
含水率の影響	名称 : M40.MC, M50.MC, M60.MC, C40.MC, C50.MC, C60.MC 概要 : 材齢 216 日から, 気中または乾燥炉を用いて含水率を変化させて測定					



図一 試験体形状と測定概要

表二 コンクリート・モルタルの調査と基礎性状^(注)

形状	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位質量 (kg/m ³)			空気量 (%)	スランブ・フロー (cm)				
				C	S	G						
(B)	50	—	245	490	1470	—	3.0	23.5×22.5				
				450	785	974			1.1	16.0		
(C)	50	46.9	180	360	861	974	0.9	20.0				
				60	48.4	300			912	974	1.0	24.0

注) 使用材料 C : 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)
 (B) S : 錦岡産陸砂(表乾密度 : 2.66g/cm³, 吸水率 : 1.43)
 (C) G : 常盤産砕石(表乾密度 : 2.68g/cm³, 吸水率 : 2.61)
 (C) S : 錦岡産陸砂(表乾密度 : 2.67g/cm³, 吸水率 : 1.73)

ここで, W_1 : 飽水時気中質量(g), W_2 : 飽水時水中質量(g),
 ρ_w : 水の密度(g/cm³), W_3 : インピーダンス測定時の質量(g), W_4 : 絶乾質量(g)

2.2 交流インピーダンスの測定方法

本研究では, 図一(a)~(c)の様にステンレス板, または, 銅板を電極として使用し, 市販のポテンシostatを用いて, 1V, または 0.01V の交流電圧を印加した。測定は, 外部環境が変動しない様に, 20°C・60%RH の恒温室内で行った。本研究では, 周波数 10⁻¹Hz~10⁶Hz に おける測定結果を示す。

図一(b)の試験体を用いた開口形状の検討では, 材齢 28 日に水中から試験体を取り出し, 表面水を拭った状態で測定した。図一(c)の試験体を用いた, 材齢・W/C・

粗骨材の検討では, 材齢 7, 14, 21, 28 日に水中から試験体を取り出し, 表面水を拭った状態で測定を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 交流インピーダンスの周波数特性について

誘電体に外部から電場を印加すると, 電場の方向に従って, それに含まれている正負の電荷の相対位置にずれが生じる分極という現象が起こる³⁾。

周波数に伴い電場の向きが変化する交流電界下では, 電界の変化が速い高周波数域では, 電荷が激しく振動し高い電流量が, 電場の変化が緩やかである低周波数域では, 配向性のイオンが電場方向に向く分子配向や電荷の移動といった現象が観測され, また, 導電相中に誘電体が存在する場合, 導電相と誘電体との界面にイオンが分離して滞る界面分極という現象が生じ電気容量が観測される⁴⁾。このように周波数に伴う導電性抵抗の変化や容量性挙動(電気容量)の変化の測定結果を利用することで, 鉄筋コンクリート構造物の劣化状況やコンクリートの緻密性などの把握ができると考えられる。

交流インピーダンスにおいて, 複素数として得られるインピーダンスと, 位相差は, 式(3), (4)で表される。

$$Z = Re + j Im \quad (3)$$

$$\theta = \{\arctan(Im/Re)\} \times (180/\pi) \quad (4)$$

ここで、Z: インピーダンス(Ω), Re: インピーダンス実数部(Ω), j: 虚数単位, Im: インピーダンス虚数部(Ω), θ : 位相差($^\circ$)

インピーダンスの実数成分・Reは導電性に関わる抵抗値を表し、 θ はインピーダンスの実数成分と虚部成分の比率を表し入力信号に対する出力信号の位相のずれを示しており、一般的に θ が -90° に近づく程、コンデンサとしての容量性挙動を示し、 90° に近づく程、インダクタとしての誘導性挙動を示す。本研究では、Reと θ をそれぞれ、導電性抵抗と容量性挙動に関する指標として用い、周波数応答特性について検討を行う。

3.2 単純化した系(ゲル・溶液)での検討

(1) 電解質種類及び物質量的変化がインピーダンスに及ぼす影響

図-2(a), (b)に、電解質種類及び物質量の違いに伴うRe, 図-3に θ の変化を示す。図-2(b)は、電解質種類の影響を比較するために図-2(a)からG-基準試験体の測定結果を除いたものである。

図-2(a)より、電解質量の増加に伴い、 10^6 Hzより低周波数域でReの低下が確認できる。

また、図-2(b)より、G-KCl 0.02molとG-NaCl 0.02mol試験体は、ほぼ同程度の抵抗値を示しているが、0.02mol試験体とG-NaCl 0.1mol・S-NaCl 0.5molでは差が表れていることから、 10^6 Hzより低周波数域では、電解質種類よりも物質量に伴う影響が大きく表れると考えられる。

図-3より、 θ においては $10^4 \sim 10^6$ Hz、 10^{-1} Hz $\sim 10^4$ Hzと異なる周波数域で試験体間の差が確認できる。 $10^4 \sim 10^6$ Hzでは、G-基準試験体が 0° から大きく変化し、より大きな容量性挙動を示しているのに対し、電解質を含む試験体では、 0° に近い値を示している。

また、 10^{-1} Hz $\sim 10^4$ Hzにおいては、G-基準試験体が約 10^1 Hzより低周波数域で位相差が 0° から変化している

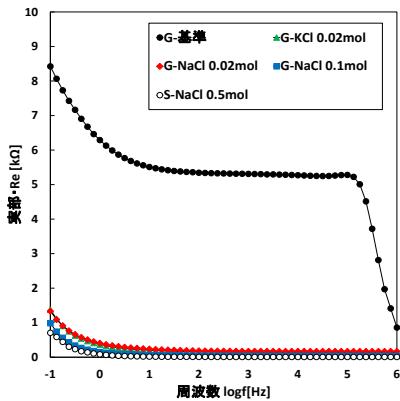


図-2(a) 電解質種類及び物質量の違いに伴う Re の変化

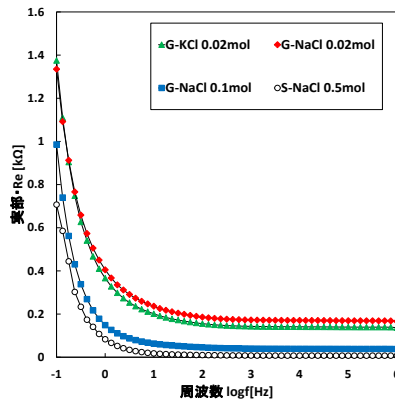


図-2(b) 電解質種類及び物質量の違いに伴う Re の変化(G-基準を除く)

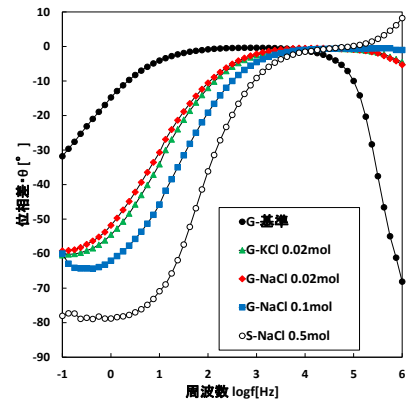


図-3 電解質種類及び物質量の違いに伴う θ の変化

のと比較し、電解質を含む試験体では、約 $10^3 \sim 4$ Hzより低周波数域と、相対的に高周波数域側で位相差に変化が表れ始めることが確認された。

(2) 誘電体(PS・GL)の混合割合の変化がインピーダンスに及ぼす影響

図-4に誘電体の混合割合の違いに伴うReの変化を、図-5にポリスチレン球(PS)の混合割合の違いに伴う θ の変化を、図-6にガラス球(GL)の混合割合の違いに伴う θ の変化を示す。G-PS試験体とG-GL試験体のReに大きな差が生じているが、これは、G-PS試験体とG-GL試験体の各々でゲルの作製を行ったため、ゲルの硬化条件の違いに伴い表れた結果ではないかと考えられる。

図-4より、PS・GSの増加に伴い、約 10^5 Hzより低周波数域で変化が表れ、基準となるゲル試験体(G-PS.0, G-GL.0)と比較しReの増加が確認できる。

図-5, 6より、 θ においては、約 $10^4 \sim 10^6$ Hz、約 $10^{-1} \sim 10^1$ Hzにおいて 0° から大きく変化が生じ、また、PS・GSの混合割合の違いに伴う変化は、約 $10^{-1} \sim 10^1$ Hzにおいて差が生じることが確認された。

3.3 周波数応答特性の検討に用いるパラメータと応答特性に関する考察

図-2~6の結果より、電解質や誘電体量の変化に伴い、導電性抵抗や異なる周波数域の容量性挙動に変化が生じることが確認されたため、以下では、① 10^4 Hz時のRe, ② 10^6 Hz時の θ (θ_{high}), ③ 10^0 Hz時の θ (θ_{low})と電解質種類及び物質量、誘電体の混合割合との相関性に関して検討を行う。これは、 10^4 Hz時のReでは、全試験体について θ がほぼ 0° の値を示した周波数であるため、この周波数は、純粋な導電性に関わる抵抗成分と考えられる。また、 10^6 Hz時の θ , 10^0 Hz時の θ は、ともに位相のずれが負の値を示しており、荷電粒子や配向性イオンの周波数に伴う電場の変化に対応する反応、または、異種誘電体の界面の影響に伴う反応が表れていると考えられる。

図-7(a)~(c)に電解質種類及び物質量的変化がRe,

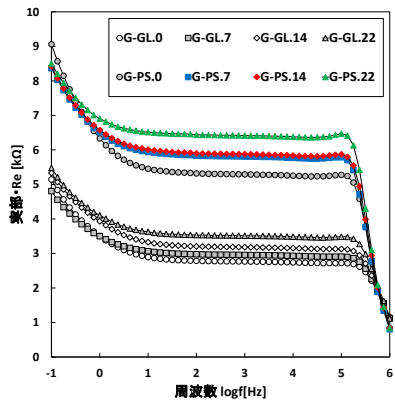


図-4 誘電体の混合割合の違いに伴う Re の変化

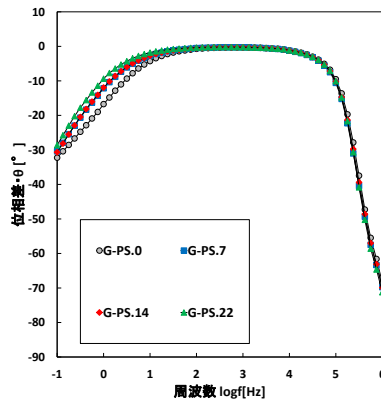


図-5 ポリスチレン球(PS)の混合割合の違いに伴う θ の変化

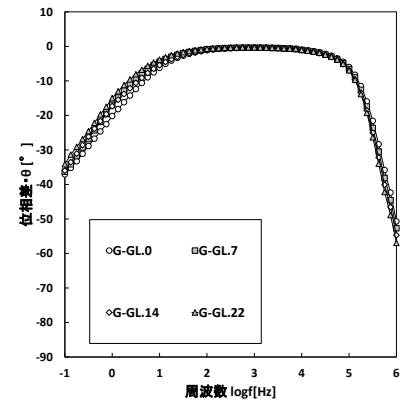


図-6 ガラス球(GL)の混合割合の違いに伴う θ の変化

θ に及ぼす影響を、図-8(a)～(c)に誘電体の混合割合の変化が Re または θ に及ぼす影響を示す。今回の検討では、G-基準試験体の電解質の物質量を 0mol と仮定して比較を行っている。

図-7(a)より、電解質量の増大に伴い、抵抗値がほぼ 0 に低下していることが確認できる。これは、電解質の物質量の増加に伴い導電性に寄与する電荷量が増加したためであると考えられる。

図-7(b)と図-7(c)を比較すると、θ_{high}では電解質の増加に伴い G 試験体では θ が 0°、S 試験体では 10° と正の方向に推移するのに対して、θ_{low}では電解質の増加に伴い θ が -90° に近づき、大きな容量性挙動を示し、θ_{high} と θ_{low} で異なる傾向を示していることが確認できる。

図-8(a)より、PS・GLの増加に伴い、Reの増加が確認できる。また、図-8(b)と図-8(c)を比較すると、θ_{high}ではGLの増加に伴い値が負の値の方向へ推移していくのに対して、θ_{low}ではGLの増加に伴い値が正の方向に推移していき、誘電体の増加においても θ_{high} と θ_{low} で異なる傾向が確認された。PSにおいても明確な傾向は確認できないが概ね同様の傾向を示している。

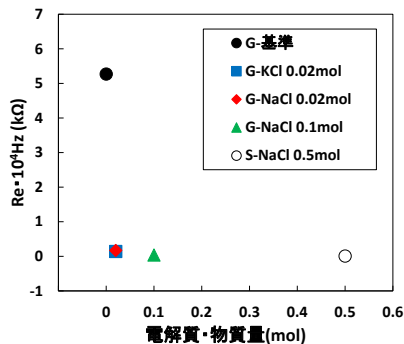
図-7, 8の結果より、電場の変化速度の速い高周波数域の θ_{high}は、電解質の物質量の増加による導電性を高める要因に伴い小さくなり、誘電体体積の増加に伴い大き

くなっていることから、電場の切り替え速度に追従可能な可動性電荷量と相関する溶媒全体の系としての容量性挙動に影響を受けると考えられる。

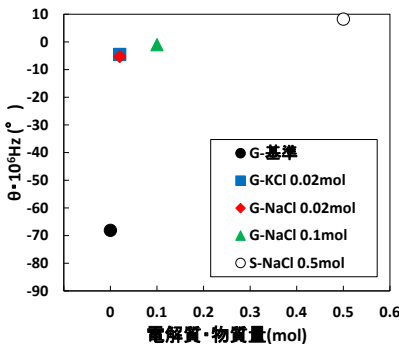
また、電場の変化速度の小さい低周波数域の θ_{low}は、電解質の物質量が多いほど大きな容量性挙動を示し、また、誘電体体積の増加に伴い、容量性挙動が低下することが確認された。この、電解質の物質量の増加に伴う容量性挙動の増加は、電極と溶媒との接触面で発生する分極現象に起因するもので、電離したイオンが電極表面に蓄積し薄膜を形成することで生じた現象であると考えられる⁵⁾。

また、誘電体の混合に伴い θ_{high} と θ_{low} が異なる傾向を示すのは、高周波数域では誘電体の内部における電荷のずれに伴う分極の影響が表れたのに対して、低周波数域では、電極界面の影響が容量性挙動に大きな影響を及ぼすため、電極界面に蓄積された電荷に伴うキャパシタに対して逆向きに作用する、誘電体相界面への電荷の蓄積(界面分極)が大きく表れたために生じた結果ではないかと考えられるが、詳細に関しては更なる検討を要する。

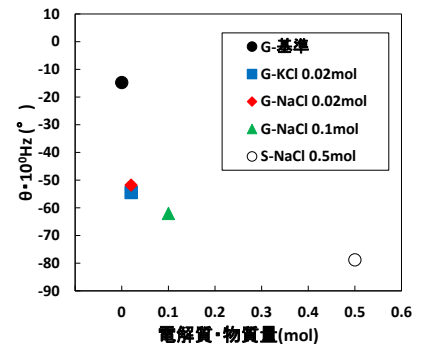
以下では、単純化した系での電解質や誘電体の変化が Re、θ に及ぼす影響に関する傾向の考察を用いて、複合材料であるコンクリート・モルタルの性状変化と Re または θ との関係性について検討と考察を行う。



(a) Re · 10⁴Hz と電解質・物質量



(b) θ_{high} と電解質・物質量



(c) θ_{low} と電荷質・物質量

図-7 電解質種類及び物質量の変化が Re・θ に及ぼす影響

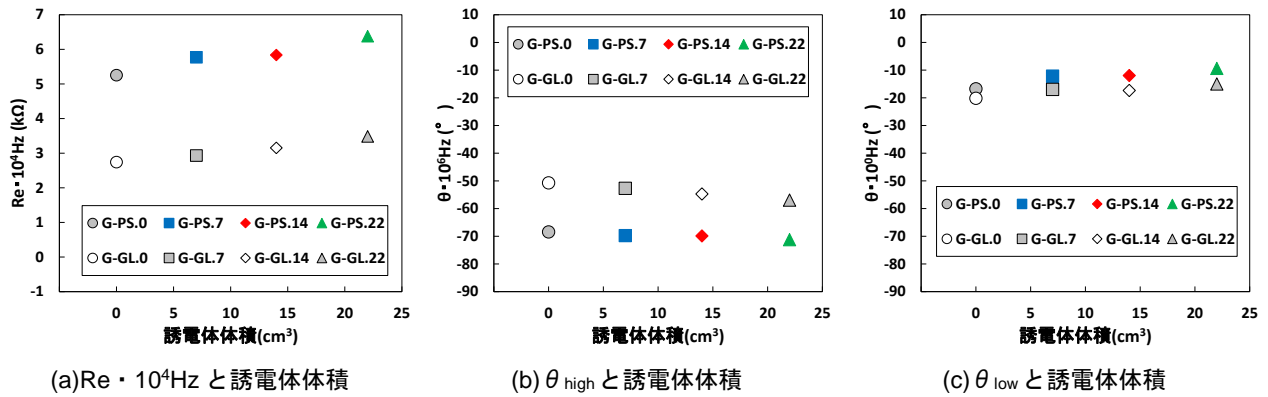


図-8 誘電体の混合割合の変化が $Re \cdot \theta$ に及ぼす影響

3.4 コンクリート・モルタル(複合材料)における周波数応答特性の検討と考察

図-9(a)に開口容積, (b)に材齢・W/C・粗骨材, (c)に含水率が $Re \cdot 10^4 \text{Hz}$ に及ぼす影響を示す。

開口容積の増加, 材齢の経過・W/Cの低下・粗骨材の含有, 含水率の低下に伴い Re の増加が確認できる。 10^4Hz 時の Re は, 導電性に関わる抵抗値であり, これらの要因は, コンクリート中の導電経路の減少や複雑化に伴う結果であると考えられる。

図-9(a)より, 同じ開口容積の試験体である, M.5-15-45とM.5-45-15, M.20-15-45とM.20-45-15を比較すると, 同程度の抵抗値を示していることから, 電極間に存在する開口形状の影響は小さく, 開口容積が Re に及ぼす影響が大きいと考えられる。

図-9(b)より, C-SL試験体とM-SL試験体間の Re の差は, 材齢の経過やW/Cの違いの影響と比較的大きく, 粗骨材が Re の増加に及ぼす影響が大きいことが確認できた。

図-10(a)に開口容積, (b)に材齢・W/C・粗骨材, (c)に含水率が θ_{high} に及ぼす影響を示す。

開口容積の増加, 粗骨材の含有, 含水率の低下に伴って, θ が負の値に推移し, 容量性挙動の増加を示すことが確認できる。 10^6Hz 時の θ は, 3.3節での検討から, 溶

媒全体の系としての容量性挙動に影響や誘電体の含有に伴う容量性挙動の増加が確認できた周波数である。

図-10(b)から, W/C40-60のすべてのC-SL試験体とM-SL試験体間に θ の差が生じており, 誘電体(PS・GL)の混合に伴う影響と同様, 粗骨材の含有は, 容量性挙動の増加に影響を及ぼすことが確認された。

図-11(a)に開口容積, (b)に材齢・W/C・粗骨材, (c)に含水率が θ_{low} に及ぼす影響を示す。

開口容積の減少, 体積含水率の増加に伴って, θ が負の値に推移し, 容量性挙動の増加を示すことが確認できる。 10^0Hz 時の θ は, 3.3節での検討から, 電解質の増加に伴い容量性挙動の増加, 誘電体の混合に伴い容量性挙動の低下が確認できた周波数である。

図-11(b)から, W/C40%のM-SL.21日試験体, M-SL.28日試験体は, 他の試験体と比較し大きな容量性挙動を示している。セメントの割合が多いW/C40%試験体では, セメントによる電解質・物質により容量性挙動の増加する結果が表れたのではないかと考えられる。

また, 図-11(c)から, C.MC試験体とM.MC試験体の粗骨材の有無に伴う θ を比較すると, 体積含水率が約10%以上とより高い含水状態における θ では粗骨材の含有に伴う容量性挙動の低下がみられるが, 体積含水率が約10%以下と含水率がより減少した状態では, 粗骨材の

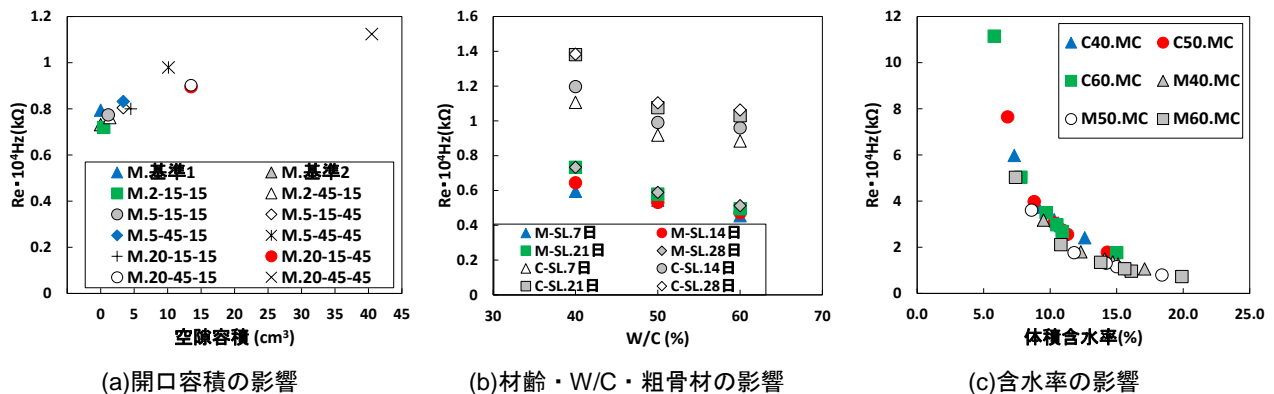


図-9 コンクリート・モルタル性状の変化が $Re \cdot 10^4 \text{Hz}$ に及ぼす影響

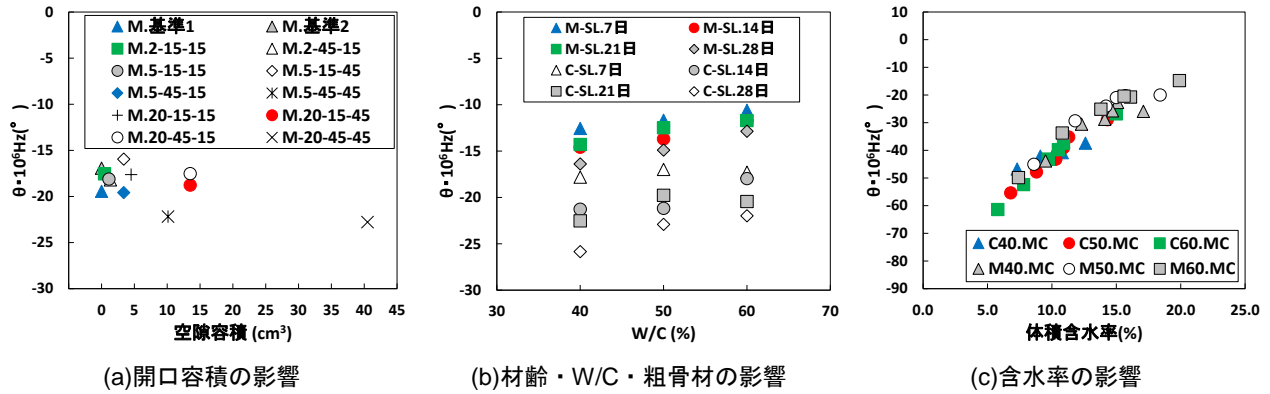


図-10 コンクリート・モルタル性状の変化が θ_{high} に及ぼす影響

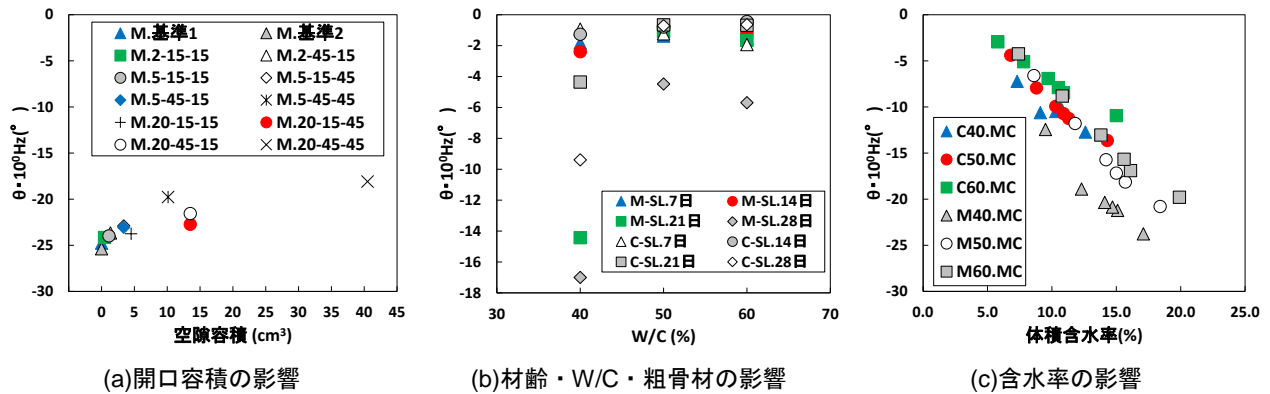


図-11 コンクリート・モルタル性状の変化が θ_{low} に及ぼす影響

含有に伴う明確な傾向はみられない。 10^0Hz 時の θ では、含水状態が高い状態において、粗骨材の含有に伴う容量性挙動の低下の要因として表れる可能性がある。

これまでの結果より、表-3に各種性状の変化と Re または θ の関係性に関して示す。これらの、 Re と θ の周波数応答特性を考慮したうえで測定を行う事で、複合材料であるコンクリートから得られる測定結果の解釈の補正につながると考えられる。

表-3 各種性状の変化と Re または θ の関係性

性状の変化	$\text{Re}:10^4\text{Hz}(\text{k}\Omega)$ (↑:増加↓:低下)	$\theta:10^6\text{Hz}(\text{°})$ (↑:0へ↓:90へ)	$\theta:10^0\text{Hz}(\text{°})$ (↑:0へ↓:90へ)
電解質量の増加	↓	↑	↑
誘電体(粗骨材)の増加	↑	↓ (含水率が高い場合)	↓
開口容積の増加	↑	↓	↑
材齢の経過	↑	↓	50%.60% :傾向なし
W/C	↑(W/Cが小さい 程高いRe)	↓	40%:↓傾向
含水率の増加	↓	↑	↓

4. まとめ

本研究では、ゲルや溶液を用いた試験体に対して交流インピーダンス測定を行い、交流インピーダンス測定から得られる導電性抵抗(Re)や、容量性挙動を示す位相差(θ)の周波数応答特性に及ぼす影響の把握を行った上で、コンクリートやモルタルの各種性状が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 導電性抵抗を示す 10^4Hz 時の Re は、電極間の開口容積の増加、材齢の経過・W/Cの低下・粗骨材の含有、含水率の減少に伴い増加する。
- (2) 容量性挙動を示す、高周波数域・ 10^6Hz 時の位相差・ θ は、開口容積の増加、粗骨材の含有、含水率の減少に伴い負の値に推移し、容量性挙動の増加に寄与する傾向を示した。
- (3) 低周波数域・ 10^0Hz 時の θ は、電解質の物質量の増加、開口容積の減少、含水率の増加に伴い負の値に推移し、容量性挙動の増加に寄与する傾向を示した。

参考文献

- 1) 野田貴之, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: かぶりコンクリートが電気化学的鉄筋腐食診断に及ぼす影響要因の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1276-1281, 2014年
- 2) 斯波明宏, 樋口正典, 藤田 学, 辻 幸和: かぶりコンクリートの性状が電気化学的鉄筋腐食測定法に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp745-750, 2007
- 3) 高重正明: 物質構造と誘電体入門, 裳華房, 2012.3
- 4) 花井哲也: 不均質構造と誘電率, 吉岡出版, 2000
- 5) Emmert, S., Wolf, M., Gulich, R., Krohns, S. Kastner, S., Lunkenheimer, P., and Loidi, A.: Electrode polarization effect in broadband dielectric spectroscopy, The European Physical Journal B, 83, 157-165, 2011