

論文 プレストレストコンクリートを構成する材料の電気化学的判別に関する基礎的検討

福山 智子*1・岡本 祐輝*2・千歩 修*3

要旨: プレストレストコンクリート (PC) の電気化学的非破壊検査手法の構築を目的に、PC 部材を模擬した試験体を対象に誘電緩和測定を行い、部材を構成する各種材料 (セメント硬化体、PC 鋼材、シース管) の組合せが測定系の複素電気容量と複素コンダクタンスに及ぼす影響の把握とこれによる材料の判別可能性について検討を行った。複素電気容量や複素コンダクタンスの実数部は材料と対応した周波数分布を示すが判別については相対的なものとどまること、複素電気容量虚数部は極大値が含水量に関する指標となり、複素コンダクタンス虚数部のピーク周波数と極大値から材料種類や含有量の判別の可能性があることを示した。

キーワード: プレストレストコンクリート, 誘電緩和測定, 複素電気容量, 複素コンダクタンス, 誘電損失

1. はじめに

近年、ポストテンション型のプレストレストコンクリート (以下、PC) 構造物についてシース管内のグラウト充填不良部における鋼材腐食とその進展事例が複数報告されており^{例え、1)2)}、グラウト充填不良や腐食を非破壊で早期に検知する実用技術が求められているといえる。

PC 部材内の不具合の非破壊検査技術に関しては、適用範囲に限界はあるが、放射線、弾性波、磁界などを利用した非破壊手法が実用段階まで研究されている。また、腐食が電気化学的現象であることからインフラ構造物を対象とした自然電位法や分極抵抗法といった手法についても検討が行われている。しかし、PC のようなシース管内で発生した鋼材腐食を対象とした欠陥の非破壊検出に関しては未解決の問題も多い。

本研究で適用する誘電緩和測定^{例え、3)}は、その測定値が材料界面に形成されるキャパシタ/抵抗など材料の層構成と直結する電荷挙動の情報を与えるため、医学分野での生体構造解析などを対象としたトモグラフィ技術に既往研究^{例え、4)}がある。

また、誘電緩和測定はコンクリートの電気化学的特性の把握^{例え、5)-7)}にも用いられており、筆者らは誘電緩和測定によるモルタル細孔特性の定量化のため、セメント硬化体や骨材、細孔溶液が形成する複合材料中の電荷挙動把握に関する検討をこれまでにしている^{例え、8)9)}。

これに加え、モルタル、プラスチック、各種金属といった PC 部材を構成する各種材料を用いて作製した試験体を対象に誘電緩和応答を測定し、1.測定の実現性、2.電極が測定結果に及ぼす影響、3.入力電位振幅が測定結果に及ぼす影響について検討も行っている¹⁰⁾。

本研究の最終的な目的は、誘電緩和測定によるシース管内部のグラウト充填不良や鋼材腐食の検出手法の構築である。しかし、PC 部材を構成する材料はシース管、PC 鋼材、セメント硬化体だけでなく空気層 (充填不良部)、腐食生成物など多岐にわたり、また既存構造物で用いられているシース管の材質は金属・プラスチックなど様々であることから、目的の達成のためには測定結果に対する個々の材料の寄与分に関する基礎情報が必要である。

そこで、本報では既報¹⁰⁾に引き続き PC 部材を模擬した試験体を対象に誘電緩和測定を行い、健全な PC 部材を構成する各種材料とその組合せが系の誘電緩和特性に及ぼす影響の把握とベースライン構築、これによる構成材料の判別可能性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に実験計画を、表-2 に試験体を使用したモルタルの調合と基礎性状を示す。図-1 に示す通り、試験体のモルタル部は 120×55×75mm とし、測定電極として 45×75×1mm のステンレス鋼板を 2 枚埋設した。シリーズ 1 (図-1 (a)) では PC に一般的に用いられる材料やモルタルの材齢が誘電損失の周波数特性に及ぼす影響について検討するため、PC 鋼材を想定した鉄、シース管を模擬した 3 種の材料 (ポリエチレン、ステンレス鋼、亜鉛めっき鋼) を電極間の所定位置にそれぞれ埋設した。シリーズ 2 (図-1 (b)) は上述の各種材料の組合せと異種材料界面の面積増加が誘電損失に及ぼす影響把握を目的とした。試験体はモルタル打設後 1 日で脱型し、20°C の恒温室にて所定の測定材齢まで水中養生を行った。

*1 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)

*2 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)

*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 工博 (正会員)

表-1 実験計画

試験体名	埋設材料		材齢 [日]
	種類	厚さ [mm]	
Fe	鉄*1	1.0	7 21 409
P	ポリエチレン*1		
St	ステンレス鋼*1		
Zn	熔融亜鉛めっき鋼*1		7 21
P2	ポリエチレン*2		
St2	ステンレス鋼*2		
Zn2	熔融亜鉛めっき鋼*2		

*1: 図-1(a)中の*1として埋設したもの

*2: 図-1(b)中の*2として埋設したもの

表-2 モルタルの調査

W/C [%]	単位水量 [kg/m³]	単位質量 [kg/m³]		空気量 [%]	スランプフ ロー [mm]
		C	S		
50	245	490	1471	5.0	210x210

C: 普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm³)

S: 錫岡砂 (表乾密度: 2.67g/cm³, 吸水率: 1.73%, 粗粒率: 2.68)

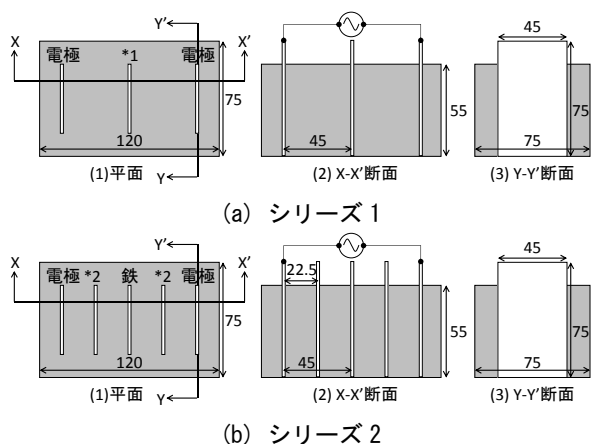


図-1 試験体の形状と材料構成

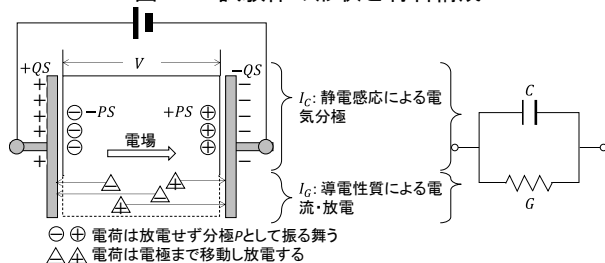


図-2 花井による二重平行板キャパシタモデル³⁾

2.2 測定概要

水中から取り出し表面水を拭った直後 (飽水状態) の試験体を対象に, 20°C60%RH 環境下でポテンシオスタットによる誘電緩和測定 (電気容量とコンダクタンスの周波数分布測定) を行った。測定時の試験体の材齢は表-1に示す通りである。印加する交流電圧の電位振幅は1V, 周波数は10⁶Hzから10⁻²Hzとし, 高周波側から低周波側に各桁 (例えば10⁶~10⁵Hz) につき8点の測定を行った。

2.3 複素電気容量と複素コンダクタンス

本報で適用する誘電緩和測定は, 物質に交流電場を印加して物質内電荷に各周波数に対応する分極を生じさせ, 物質の誘電特性や導電特性に関係した情報を得る手法である。高周波から低周波に順に印加される周波数信号とその時間スケールに応じて電子状態, 分子の振動, 分子

の配向, 粒子の配向の変化が観測できる¹⁾ようになるとされ, これらの応答が積算され電気容量やコンダクタンスの周波数分布が得られる。

また個別には誘電緩和を示さない物質であっても, 2種以上の誘電体からなる不均質体の場合には材料界面に時間遅れを伴う表面電荷の蓄積が行われるため, 電気容量やコンダクタンスは材料構成に関する情報を包含する。

既報¹⁰⁾で用いた図を図-2 (花井³⁾のモデルを参考に筆者が作図) に再掲し, 本報で検討する指標である複素電気容量と複素コンダクタンスについて概説する。

電気的に中性の物質は静電場におかれることでQSに充電され, 電極に面する材料の端部に電荷PS (P: 極板1cm²当たりの感応電荷, S: 極板面積[cm²]) が現れる。この現象を静電感応といい, PSを感応電荷という。PSは電極板に面して現れるが, 物質に拘束されているため放電することはない。次に, 物質に交流電場を印加すると, QSに時間変化が生じる。このQSは電極板間にある誘電物質内は移動できないが, 交流電場に応じて外部回路を両電極板へ交互に移動し, 式(1)に示すような電気容量Cに依存した変位電流I_Cとして外部からは観測される。

これに対し, 全ての導電体はその材料中の電位差に応じて移動する電荷を含んでおり, この電荷の多寡が各材料固有の導電性質となる。そしてこの電荷の動きが導電電流I_Gとして観測される。

以上より, 図-2の回路に流れる全電流I (式(2)) はI_GとI_Cとの和となる。複素コンダクタンスG*Vの実数部Gは材料自体の導電特性であるコンダクタンス, 虚数部G"は感応電荷発現による容量機構の寄与分を表す。また, 複素電気容量C*は式(3)に示すように, 実数部Cは電気容量, 虚数部C"は導電性電荷の寄与分を表し, この虚数部は誘電損失 (外部電界の電気エネルギーに対する材料の熱エネルギー消費) を意味する。式(4)(5)は, 測定周波数における複素電気容量と複素コンダクタンス虚数部の算定式である³⁾。

$$I_C \equiv \frac{d(QS)}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dV}{dt} = j\omega CV \quad (1)$$

$$I = I_G + I_C = GV + j\omega CV = GV + jG^*V \equiv G^*V \quad (2)$$

$$QS = \frac{I}{j\omega} = C^*V = CV + \frac{G}{j\omega}V = CV - j\frac{G}{\omega}V \quad (3)$$

$$= CV - jC''V$$

$$\Delta C'' = (G - G_I)/2\pi f \quad (4)$$

$$\Delta G'' = (C - C_h) \cdot 2\pi f \quad (5)$$

ここに, QS: 電荷量 [C], t: 時間 [s], C: 電気容量 [F],

V: 電圧の複素数表現 [V], j: 虚数単位, ω:

角速度, I: 回路の全電流 [A], : コンダクタン

ス [S], G_l : コンダクタンスの低周波極限值 [S],
 C_h : 電気容量の高周波極限值 [F]

複合体中の電荷挙動は材料自体の誘電率や導電率、異種材料同士が接触する界面の幾何学的特性（面積）などによって決まることから、筆者らは既往の研究^{8)~10)}において電気容量とコンダクタンス（本報では「複素電気容量の実数部」と「複素コンダクタンスの実数部」）に着目し、電荷挙動やその可動性と材料界面の相関によるセメント複合体の微細構造解析に関する検討を行ってきた。

これに対し、本報では複素電気容量と複素コンダクタンスの虚数部に特に着目する。これら指標の虚数部は、系をキャパシタと見なした時の導電電荷寄与分と、系を導体と見なした時の感応電荷寄与分の割合をそれぞれに表すものである。本報では、PC 鋼材やシース管、セメント硬化体だけでなく、欠陥（腐食生成物、空気層）をも PC 部材を構成する「材料」とみなし、これら指標の周波数分布に基づく材料種類の判別については欠陥検出の可能性についてベースラインを構築するため、健全な PC 部材を模擬した試験体を用いて測定を行うことを目的としている。なお、複素電気容量と複素コンダクタンスの虚数部は、誘電緩和測定により実測した電気容量、コンダクタンスの値を用いて式(4)(5)に基づき算定する。また、極限值 (G_l , C_h) については、測定機器の性能により便宜的に 10^2Hz と 10^6Hz の値をそれぞれ用いた。

3. 実験結果とその考察

3.1 材齢の影響

本節では材齢が指標に及ぼす影響を検討するためシ

リーズ1の Fe, P, St, Zn 試験体を対象に測定を行ったが、Fe と St, P と Zn がそれぞれ類似した周波数分布を示していたため Fe と P のみを例示する。

図-3, 図-4 はモルタルの材齢が複素電気容量に及ぼす影響について示したものである。(a)は測定生データの対数表示 $\log C$, (b)はある周波数とそれよりも1つ上の周波数における測定値の差分をとることで各周波数における応答増分をとった $d(\log C)$, (c)は複素電気容量の虚数部である。(a)については、St, Zn を含むすべての試験体の $\log C$ が広い範囲に分布しており、材齢による差異を判別できなかった。(b)においては St, Zn を含むすべての試験体の $10^4 \sim 10^5\text{Hz}$ で若干の材齢の影響（若材齢ほど同一周波数における変化量が小さく、かつ高周波側に分布がシフトしている）が見られたが、それ以外の周波数域では材齢の影響が明確ではない結果となった。(c)では St, Zn を含むすべての試験体においてピーク周波数は 10^1Hz 近傍にあり、若材齢であるほど高いピークを示す結果となった。これは、飽水した試験体を測定しているため若材齢であるほど体積当たりの含水率が高く、測定系内の導電電荷量が大きくなるためと考えられる。ただし、水 (H_2O) を特徴づける誘電損失は 25GHz 近傍（マイクロ波領域）に存在し¹¹⁾通常電磁波照射などにより測定されるものである。本実験において 10^1Hz 近傍にピークが得られた理由については、1.電気的周波数域での測定がマイクロ波領域に対して相対的に低周波であり緩和型（分布の広いすそ野をもつ）の応答が得られること、2.導電電荷挙動が細孔構造に影響を受けること、3.式(4)(5)の適用において実際の極限值ではなく測定器の性能に制約された極限值を用いたことなどが考えられる。

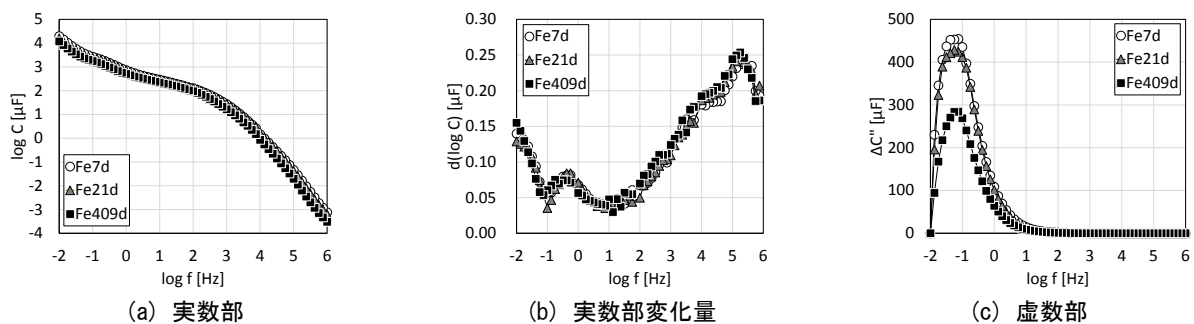


図-3 材齢が Fe 試験体の複素電気容量に及ぼす影響（シリーズ1）

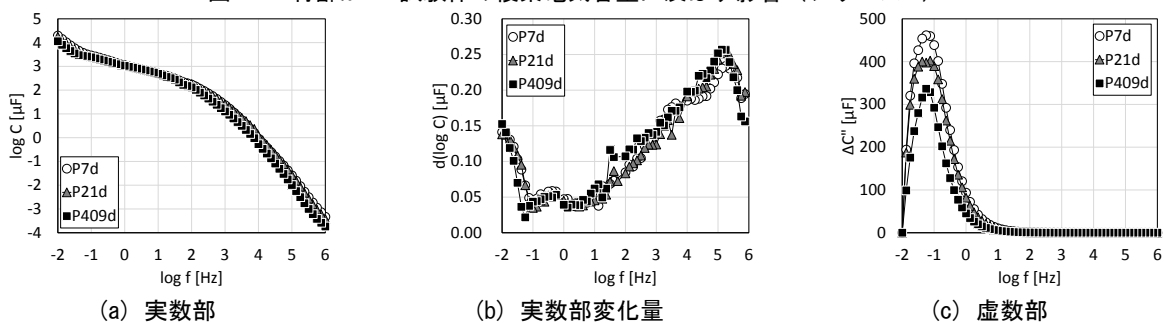


図-4 材齢が P 試験体の複素電気容量の変化量に及ぼす影響（シリーズ1）

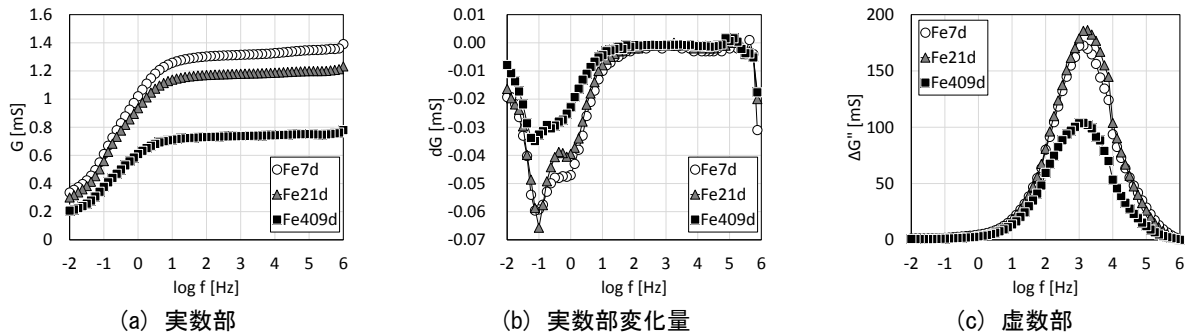


図-5 材齢が Fe 試験体の複素コンダクタンスに及ぼす影響 (シリーズ 1)

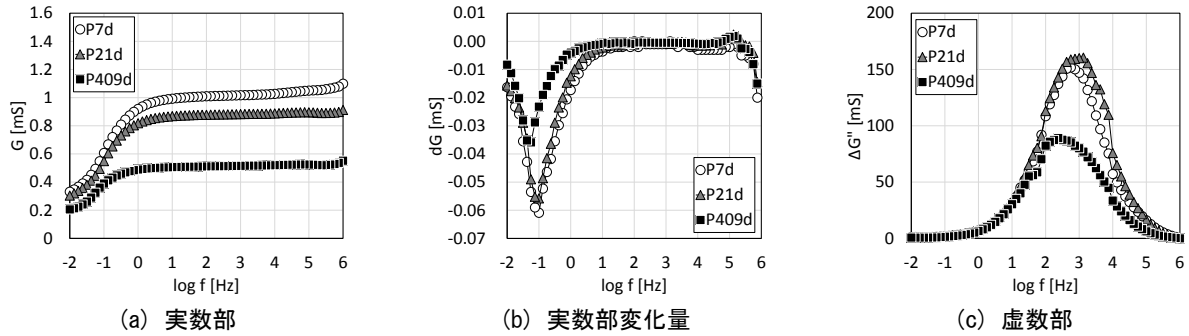


図-6 材齢が P 試験体の複素コンダクタンスに及ぼす影響 (シリーズ 1)

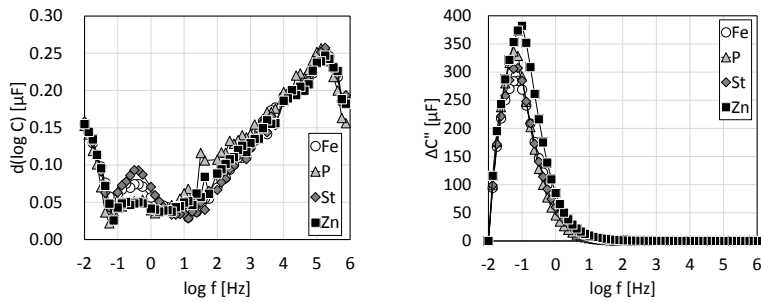


図-7 埋設材料の種類が複素電気容量に及ぼす影響 (シリーズ 1, 材齢 409 日)

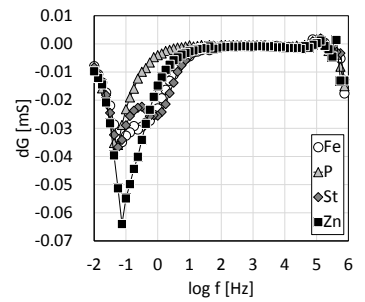


図-8 埋設材料の種類が複素コンダクタンス実数部の変化量に及ぼす影響 (シリーズ 1, 材齢 409 日)

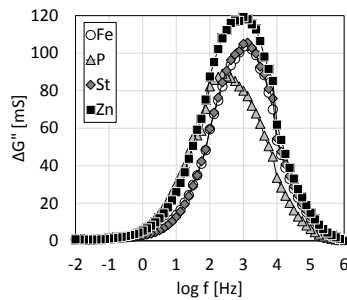


図-9 埋設材料の種類が複素コンダクタンス虚数部に及ぼす影響 (シリーズ 1, 材齢 409 日)

また、ピーク周波数については、材齢に伴いピークが高周波側にシフトする若干の傾向が見られたが明確ではないため追試による確認が必要である。

図-5, 図-6 はモルタルの材齢が複素コンダクタンスに及ぼす影響について試験体 Fe と P について示したものである。(a) は測定生データ G, (b) はある周波数とそれよりも 1 つ上の周波数における測定値の差分をとることで各周波数における応答増分をとった dG, (c) は複素

コンダクタンスの虚数部である。(a) より、 10^0 Hz よりも高周波数域で材齢に伴うモルタルの緻密化による導電性の変化とみられる分布が得られた。(b) では 10^{-2} ~ 10^1 Hz の範囲で材齢に伴い dG の絶対値が減少し、またピーク周波数が低周波側にシフトしていることがわかる。これは、低周波数になるほど導電電荷の移動は平衡状態になるため、含水によって導電電荷が相対的に多い若材齢の試験体では平衡に達するまでに移動する量が多くなるためと考えられる。(c) は感應電荷の寄与分に関する指標であるが、若材齢ほど大きい値をとるのはセメントの水和が進行するに従い感應電荷の可動性が減少するためと考えられる。

3.2 埋設材料の種類の影響

本節では、PC 部材構成材料を模擬した各種材料が指標に及ぼす影響を検討することを目的に、シリーズ 1 の Fe, P, St, Zn 試験体を対象に測定を行ったが、すべての材齢がそれぞれ類似した周波数分布形状を示していたため材齢 409 日における測定結果を例示する。

図-7 は埋設材料の種類が複素電気容量実数部の各周波数における変化量 $d(\log C)$ と虚数部に及ぼす影響について示したものである。実数部については7, 21, 409日のいずれの材齢においても $10^{-1} \sim 10^4 \text{ Hz}$ の範囲で埋設材料に対応したピーク順列 (St, Fe, Zn, P) が表れており、大きさの相対比較による判別が可能であった。これに対し、虚数部はすべての算定結果について、 10^{-1} Hz 近傍で極大値をとるが、極大値自体の大きさにはばらつきがあり材料種類の傾向は見られない結果となった。これは水の導電電荷 (セメント硬化体部分) の影響が大きく、埋設材料の寄与分が小さいため、セメント硬化体部分のばらつきによりこのような結果になったものと考えられる。

図-8, 図-9 は埋設材料の種類がコンダクタンスの実数部の各周波数における変化量 dG と虚数部に及ぼす影響について示したものである。実数部ではいずれの材齢においても Fe と St は $10^{-2} \sim 10^4 \text{ Hz}$ の範囲で2つの極小値をとるが、P と Zn については1つのみであった。これは外部との電荷のやり取りが可能かどうか依存するものと考えられる。虚数部については、すべての材齢の $10^2 \sim 10^4 \text{ Hz}$ の範囲で埋設材料の種類に対応した周波数において Zn, St, Fe, Zn の順で極大値をとった。Fe と St はほぼ同じ分布を示しており、ピーク周波数は金属である Fe, St, Zn については 10^3 Hz 近傍、プラスチックである P のみ $10^{2.5} \text{ Hz}$ となった。

3.3 異種材料界面面積の影響

本節では、各種埋設材料-モルタル間の界面面積が指

標に及ぼす影響を検討し材料の種類を判別することを目的にシリーズ1とシリーズ2を比較する。これは、各種材料を試験体中心部に1枚のみ埋設した試験体 (シリーズ1) と、鉄板+各材料2枚を組み合わせた試験体 (シリーズ2) を対象としたものである。3.1節と同様に Fe と St, P と Zn がそれぞれ類似した周波数分布形状を示しており、また材齢7日と21日の測定結果もまた両者がほぼ類似の周波数分布形状を示していたことから試験体 Fe と P の材齢21日の測定結果のみを例示する。

図-10, 図-11 は異種材料同士の界面面積が複素電気容量に及ぼす影響を示したものである。図-10(a), 図-11(a)では、界面面積が増加すると $10^0 \sim 10^3 \text{ Hz}$ の範囲で $\log C$ が低下し、図-10(b), 図-11(b)では、 $10^{-1} \sim 10^4 \text{ Hz}$ の範囲でシリーズ2の $d(\log C)$ が大きくなる。図-11(c)では、St と St2 がほぼ同じ値を示しているが、他の材料のシリーズ1とシリーズ2の比較の傾向ではシリーズ1 (面積が小さい) がより大きい値をとる結果となった。

図-12, 図-13 は異種材料同士の界面面積が複素コンダクタンスに及ぼす影響を示したものである。図-12(a) (b)ではポリエチレンが絶縁体であることから、板材の増加に対応して G も低下し変化割合も P と P2 で同等である。これに対し図-13(a) (b)のステンレスについては、界面のキャパシタ形成によりコンダクタンスが 10^4 Hz 以下で低下した。図-12(c), 図-13(c)よりシリーズ2の値が小さくなるのはセメント硬化体を他の材料に置換することで感応電荷が減少したためと考えられる。

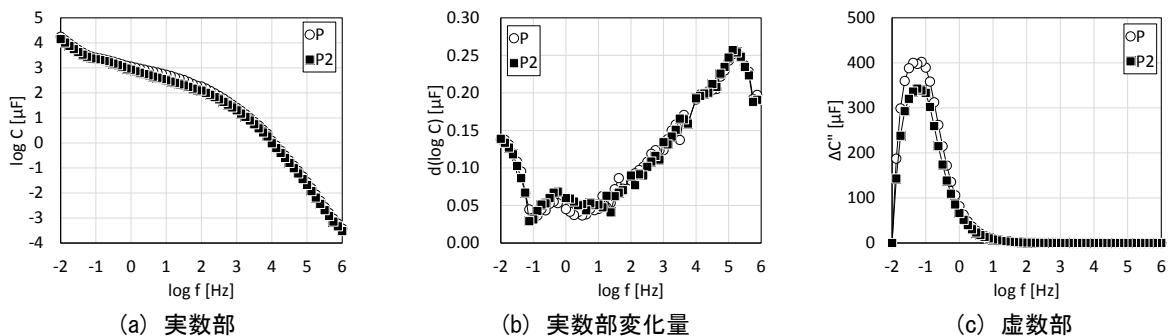


図-10 ポリエチレン-モルタル界面面積が複素電気容量に及ぼす影響 (シリーズ1と2比較, 材齢21日)

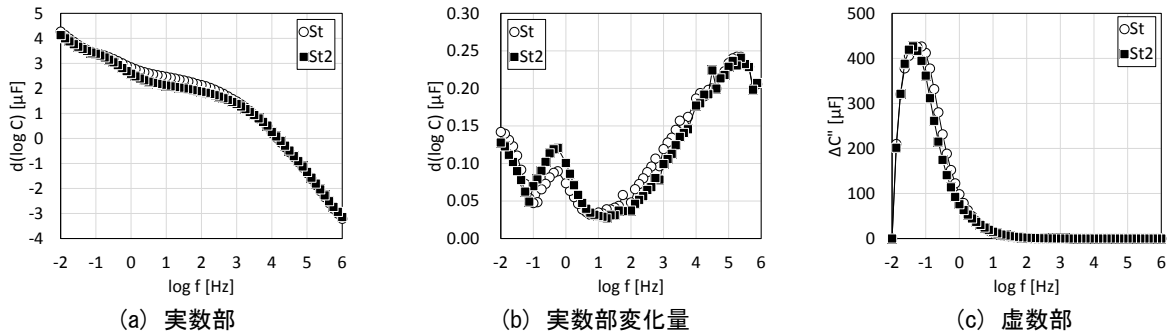


図-11 ステンレス-モルタル界面面積が複素電気容量に及ぼす影響 (シリーズ1と2比較, 材齢21日)

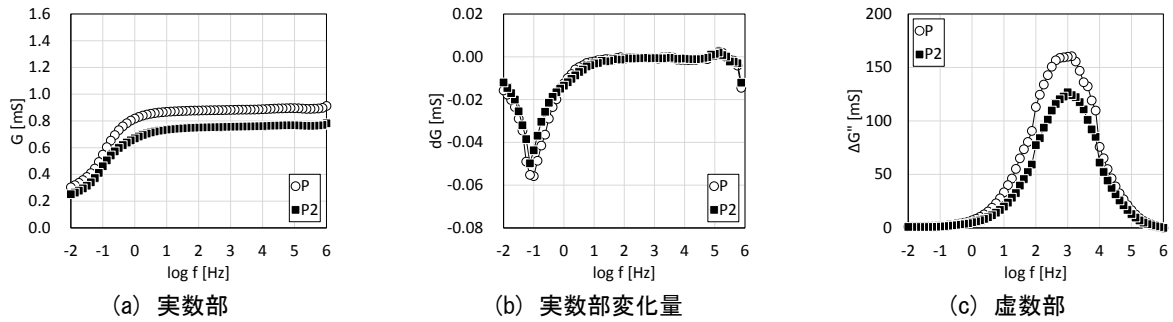


図-12 ポリエチレンモルタル界面面積が複素コンダクタンスに及ぼす影響 (シリーズ1と2比較, 材齢21日)

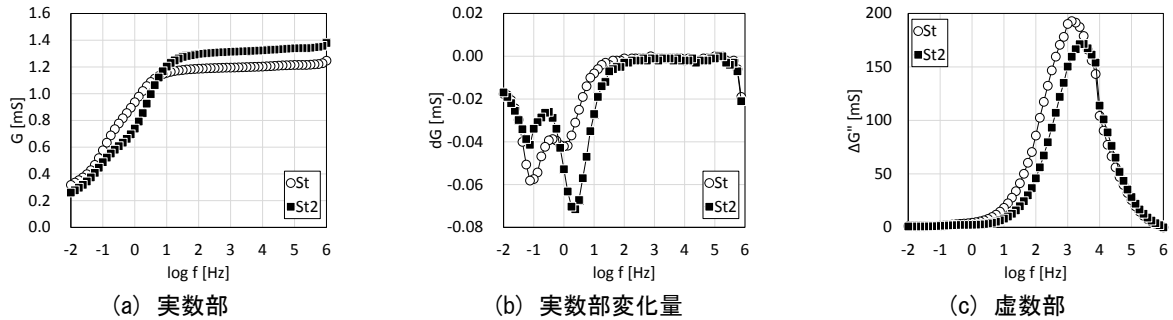


図-13 ステンレスモルタル界面面積が複素コンダクタンスに及ぼす影響 (シリーズ1と2比較, 材齢21日)

4. まとめ

PCを模擬した試験体を対象に誘電緩和測定を行い、部材を構成する各種材料とその組合せが系の電気化学的特性に及ぼす影響に関する本報の知見を以下に示す。

- 1) 電気容量の変化量 $d(\log C)$ やコンダクタンスの生データ G と変化量 dG は構成材料と対応した周波数分布を示すが、材料判別については相対的なものとどまり、材料自体のばらつきの評価が必要である。
- 2) 複素電気容量虚数部はピーク周波数ではなく極大値が含水量に関する指標となる。
- 3) 複素コンダクタンス虚数部のピーク周波数と極大値から材料の種類や含有量の判別の可能性がある。

謝辞

本研究は公益財団法人旭硝子財団、公益財団法人ノーステック財団、JSPS 科研費 16K14335 の助成を受けて実施されました。また、本研究の実施に際して、(株)構研エンジニアリング、北海道大学・林大貴氏、元橋瞳氏多くの学生にご協力をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 野島昭二：PCグラウトの充填確認方法，コンクリート工学，Vol.50，No.9，pp.851-855，2012
- 2) 玄海彰則，崎谷和也：道路橋既設ポストテンションPC桁のグラウト充填不良に対する補修について，平成25年度近畿地方整備局研究発表会論文集，2013
- 3) 花井哲也：不均質構造と誘電率，吉岡書店，2000
- 4) 音川英一，早野誠治，齋藤兆古，堀井清之：電気イ

ンピーダンス法による導電率分布可視化とその実験的検証，可視化情報，Vol.24，No.1，pp.255-258，2004

- 5) Rhim, H. C., O. Buyukozturk: Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range, ACI Materials Journal, Vol.95, No.3, pp.262-271, 1998
- 6) Jamil, M., et al.: Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques, Materials and Structures, Vol.46, pp.77-87, 2013
- 7) Neithalath, N.: Extracting the performance predictors of Enhanced Porosity Concretes from electrical conductivity spectra, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.796-804, 2007
- 8) 福山智子，岡本祐輝，長谷川拓哉，千歩修：誘電緩和特性を用いたコンクリート粗骨材界面のキャパシタ評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，pp.193-200，2017
- 9) 福山智子，岡本祐輝，長谷川拓哉，千歩修：セメントペーストの誘電緩和特性に及ぼす混和材料と細孔容積の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，pp.201-208，2017
- 10) 福山智子，千歩修：プレストレストコンクリートの劣化診断を指向したセメント系積層材料の電気化学的特性の周波数依存性に関する基礎的検討，日本建築学会構造系論文集，82(740)，pp.1537 - 1546，2017
- 11) 天羽優子：マイクロ波領域の誘電緩和で何がわかるか
<http://www.cml-office.org/atom11archive/ftp/pub/tdr/sansouken2002-01/sansouken.pdf> (閲覧日：2018年1月11日)