

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709038

研究課題名(和文) コンクリートの細孔構造が溶液の存在形態と電気的連続性に及ぼす影響

研究課題名(英文) Influence of concrete pore structure on states of pore solution and its electrical continuity

研究代表者

福山 智子 (Fukuyama, Tomoko)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：60587947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実構造物を対象とした電気化学的測定データの変動要因を定量的に明らかにするため、コンクリートの細孔構造が溶液の存在形態と電気的連続性に及ぼす影響に関して検討を開始した。その後の研究の進展に伴い、細孔溶液だけでなくコンクリートを構成する各種材料中の電荷挙動を把握するため、各種材料を混和・埋設したモルタル試験体を対象として誘電緩和測定実験を実施した。その結果、電気容量・コンダクタンス・誘電損失といった誘電緩和指標の解析手法、測定の再現性、細孔構造(モルタルの緻密さ)、含水率や塩化物イオンが指標に及ぼす影響、電気化学的測定による埋設材料の定量に関して成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, the investigations about influences of concrete pore structure on states of pore solution and its electrical continuity were conducted to clarify the data variance factors of electrochemical measurements on actual structures. Following the progress of the subsequent research, dielectric relaxation measurements were conducted on mortar specimens which contain various materials to ascertain not only pore solution but also charge behaviors in various constituent materials of concrete.

As a result, dielectric relaxation indexes analyzing methods, reproducibility of measurement, pore structure, influences of moisture content or chloride ion on indexes, and quantification method of buried material using electrochemical measurement became clear through the research.

研究分野：建築材料

キーワード：誘電緩和 電気容量 コンダクタンス 電荷 インピーダンス

1. 研究開始当初の背景

RC 構造物中の鉄筋の腐食診断には電気化学的手法が広く用いられている。たとえば、自然電位測定は腐食箇所の検出や腐食状態の診断に有効であるとされており、数値的な判定基準が広く知られている。しかし、研究代表者がこれまでに行ってきた実構造物の調査においては、判定基準と鉄筋腐食の実態（錆びている／錆びていない）が乖離しており、診断に苦慮することが多くあった。同様に、腐食実態をコンクリートの電気抵抗や鉄筋-コンクリート界面の分極抵抗を用いて直接推定することが難しいことが多い。

また、実 RC 構造物では、同じ環境条件であっても、材料の品質、施工の精度などの影響で劣化の程度が構造物ごとに異なり、腐食状態と劣化外力との相関を典型的に整理することも非常に困難であった。これは、他の実構造物調査でも同様の報告があり、汎用的な腐食調査手法はいまだ確立されていないといつてよい。

コンクリート表面からの一般的な非・微破壊診断では、コンクリートの影響が測定値にノイズとして重畳することは避けられない。このノイズはコンクリートの品質の問題といわれているが、結局はコンクリートの含水状態の影響、ひいては細孔構造の差異の問題に還元することができる。コンクリートの細孔構造の差異によって、内部の水分の存在形態（液体・気体）が変化し、細孔内の溶液の濃度や溶液の電気的な連続性が変化するためである。

研究代表者は上記の考察を経て、鉄筋腐食診断に用いられる自然電位・コンクリート抵抗・鉄筋界面の分極抵抗など（以下、電気化学特性値）とコンクリートの微細構造の幾何学的特性の相関について検討を行ってきた。

例えば、実構造物から採取したコアを深さ方向にスライスし、スライスごとにコンクリートの細孔径分布などの測定結果から、 $1\mu\text{m}$ 以下の細孔を表面張力により溶液が気化しない領域と仮定して、スライスしたそれぞれのコアを細孔溶液が充填された1つの導体素子とみなし、鉄筋位置までのスライスの積層を素子の直列回路と考え解析を行った。

その結果、電気化学特性値をコンクリートの細孔特性で整理することで、測定値のばらつきを説明することができる可能性が示唆されている。

上記の研究を踏まえ、本研究では、コンクリートの幾何学的構造と電気化学特性の相関についてより詳細に検討し、電気化学特性への影響度の大きいパラメータの抽出を行うことを当初目的としていた。

2. 研究の目的

これまでの研究成果をもとに、本研究はコンクリートの微細構造のいまだ解明されていない電気化学特性について基礎的な研究を完成し、実構造物の診断データの補正手法

を開発することを目的とし、以下の項目について検討を行うこととしていた。

- (1) コンクリートの細孔構造（径の太さや細孔量）が溶液の存在形態（気体・液体）にどのように影響を及ぼすかを実験的に検討し、コンクリート表面から鉄筋までの電気的連続性がどのように維持されているか、またその特性が鉄筋の腐食診断に用いられる自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗などにどのように影響を及ぼすかについて明らかにする。
- (2) 細孔溶液の組成や化学的特性が電気化学的特性に及ぼす影響について明らかにする。特に、塩化物イオンが侵入した場合や、コンクリートの含水状態の変化に伴う細孔溶液の濃度増減の影響を考慮する。
- (3) 実構造物を対象とした腐食診断を行うためには、実験室測定と現場測定データ間の補正が必要である。現場調査を行い、表面硬度や透気性に関するデータ収集とそれに対応するコアの空隙構造を分析し、表面品質と内部品質の相関について検討する。

3. 研究の方法

本研究では、鉄筋の腐食診断に理論的な裏付けを与え正確な診断を行うことを目的とし、コンクリートの細孔構造・溶液組成と腐食鉄筋の電気化学特性との関係を検証することを試みた。

コンクリートが腐食診断の障害となる原因としては、環境外力などの影響でコンクリートの含水率が異なるためであると考えられているが、この問題は細孔構造の差異に原因を求めることができる。コンクリートの細孔は様々な物質移動の経路となるが、含水率はその幾何学的性質（細孔構造）で決まり、化学的性質（溶液組成）は含水率に影響を受けるためである。

これらの背景を踏まえた本研究の当初目的は、電気化学的な測定値の変動要因となっているコンクリートの影響を定量的に明らかにし自然電位法や交流インピーダンス法といった電気化学的手法に及ぼす影響度を把握することで、正確な腐食診断を行うための基礎資料を得ることであった。しかし、その後の検討の結果から、コンクリートの物性が測定値に及ぼす影響を明確にするためには、鉄筋の自然電位や鉄筋/コンクリート界面のインピーダンスの測定だけではなく、コンクリート自体の誘電緩和測定がより適していると結論し、実験に採用するに至った。

誘電緩和測定は、交流電場に対する複合材料の周波数応答を利用した非破壊内部解析法として様々な分野で用いられている。これは、複合材料を構成する物質同士が接触する各界面に材料の誘導率の相対的大小に起因するキャパシタが形成されていることを利用したもので、各周波数における材料全体の電気容量・コンダクタンスを測定・解析することによって材料の内部構造を明らかに

する手法である。

測定電極に相当する2枚の鋼板をモルタル中に埋設し、実験パラメータに応じてモルタルへの材料混和・含水率調整や電極間への各種材料の埋設などを行った(図1)。

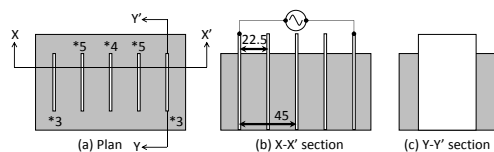


図1 試験体形状の例

4. 研究成果

①コンクリートの電気化学特性と空隙構造の相関(図2):コンクリートの空隙特性に関する指標と静電容量の相関を比較し、空隙特性が静電容量におよぼす影響について検討を行った。その結果、 $0.07\mu\text{m}$ 以下のインクボトル空隙が静電容量に影響していることが確認でき、研究代表者の既往の研究に基づく「 $0.1\mu\text{m}$ 以下の空隙特性が静電容量に影響する」という仮説を補強する結果が得られた。

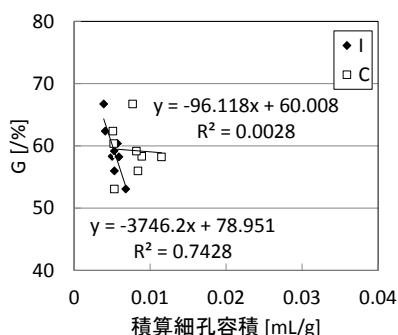


図2 インクボトル容積 I, 連続空隙容積 C と静電容量の関係の例

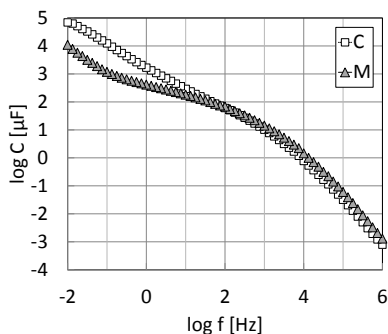


図3 コンクリート試験体とモルタル試験体の電気容量の比較の例

②コンクリートを構成する各材料界面の電気容量(図3):コンクリート試験体とモルタル試験体の比較により、粗骨材界面にキャパシタが形成されることを示した。

③測定データのばらつきに関する検討:同一環境,同一試験体を対象に複数回行った測定データ間の分散分析により,誘電特性は複数回の測定であっても同一とみなすことができるが,導電特性についてはイニシ

ャルチャージの問題から,絶対値として取り扱うには注意が必要であることを明らかにした。

④細孔構造と含水率が電気化学特性に及ぼす影響の確認:コンクリートの調合(水セメント比・骨材粒度分布)により変化させた細孔特性(総量,径分布,ヒステリシスなど)と電気化学的指標の相関について検討し,電気容量,コンダクタンス,サセプタンスといった指標から,電荷挙動を明らかにし含水率の違いと細孔構造の違いを切り分けることができることが明らかになった。

⑤塩化物イオンの影響:塩化ナトリウム水溶液を試験体に吸水させることで試験体中の正負電荷の量を増加させ,電荷量の違いが電気化学的指標のピーク周波数に及ぼす影響について明らかにした。

⑥電荷挙動と埋設材料種類の相関(図4):導体(鉄,亜鉛めっき鋼,ステンレス)と絶縁体(ポリエチレン)をそれぞれ埋設したモルタル試験体を対象とした。電気容量,コンダクタンス,誘電損失などによる埋設材料の種類や厚さの判別やその適用範囲を明らかにすることで,コンクリートに含まれている導体/絶縁体,液体/固体という条件の違いを電荷挙動により説明可能であることを明らかにした。この結果が,実構造物を対象とした電気化学的測定データの補正に結び付くと考えられる。

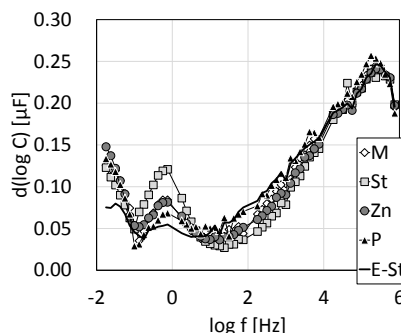


図4 電気容量測定による埋設材料の判別

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計13件)

- [1] 福山智子, 岡本祐輝, 千歩修: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,コンクリート工学年次論文集,査読有,採用決定
- [2] 岡本祐輝, 福山智子, 千歩修: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,コンクリート工学年次論文集,査読有,採用決定
- [3] 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, 査読有, 82(740), pp.1537-1546, 2017

- [4] Tomoko Fukuyama, Yuki Okamoto, Takuya Hasegawa, and Osamu Senbu: Fundamental study on dielectric relaxation characteristics of cementitious materials, Journal of Asian Concrete Federation, 査読有, 3(1), pp.20-26, 2017
- [5] 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, 査読有, Vol.70, pp.201-208, 2017
- [6] 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, 査読有, vol.70, pp.193-200, 2017
- [7] 福山智子, 岡本祐輝, 長谷川拓哉, 千歩修: 誘電緩和現象を利用したコンクリートの微細構造解析技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 38(1), pp. 251-1256, 2016
- [8] 野田貴之, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: セメント系材料の性状が交流インピーダンス測定に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 38(1), pp.675-680, 2016
- [9] 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: コンクリートの細孔構造と交流インピーダンスの相関に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 38(1), pp.1245-1250, 2016
- [10] 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: 含水状態を変えたコンクリートの交流インピーダンス測定に基づく空隙構造の解析, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, vol.16, pp.213-218 2016
- [11] 福山智子: コンクリートの電気化学的特性の周波数依存性に関する研究事例, コンクリート工学, 査読有, vol.54, pp.315-321, 2016
- [12] 福山智子, 野田貴之, 長谷川拓哉, 千歩修: コンクリートの空隙特性と高周波静電容量の相関に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, No.1, pp.1669-1674, 2015
- [13] 野田貴之, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: 実構造物から採取したコンクリートコア試験体における吸水性状と細孔構造の相関性についての検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, No.1, pp.553-558, 2015

[学会発表] (計 15 件)

- [1] Tomoko Fukuyama, Osamu Senbu:

Nondestructive Electrochemical Testing Method for Prestressed Concrete Structures, ICCSEE 2018 : 20th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering, 2018

- [2] Tomoko Fukuyama, Yuki Okamoto, Takuya Hasegawa, Osamu Senbu: FUNDAMENTAL STUDY ON DIELECTRIC RELAXATION CHARACTERISTICS OF CONCRETE, The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 2016
- [3] 福山智子, 岡本祐輝, 長谷川拓哉, 千歩修: 誘電緩和測定によるコンクリート粗骨材界面の情報の取得, セメント技術大会, 2016
- [4] 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: セメントペーストの誘・導電特性に及ぼす混和材料と細孔構造の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2016
- [5] 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: セメントペーストの誘・導電特性に及ぼす混和材の影響, 日本建築学会大会, 2016
- [6] 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: 各種性状の変化が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2016
- [7] 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修: 粗骨材やセメントマトリクスが交流インピーダンスに及ぼす影響, 日本建築学会大会, 2016
- [8] 福山智子, 野田貴之, 長谷川拓哉, 千歩修: 実 RC 構造部材の交流インピーダンス測定に影響を及ぼす各種要因, 第 12 回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium, 2015
- [9] 福山智子, 野田貴之, 長谷川拓哉, 千歩修: 実 RC 構造部材の交流インピーダンス測定に関する調査報告, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2015
- [10] FUKUYAMA Tomoko, NODA Takayuki, HASEGAWA Takuya, SENBU Osamu: Effect of Concrete Pore Structures on Phase Shift in Electrochemical Impedance Spectroscopy for Corrosion Measurement of Reinforcing Bars, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 2015
- [11] 福山智子, 野田貴之, 長谷川拓哉, 千歩修, 兼松学, 清原千鶴, 今本啓一, 野口貴文: 旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査 その 11: コンクリートの含水状態, 日本建築学会大会, 2015
- [12] NODA Takayuki, FUKUYAMA Tomoko, HASEGAWA Takuya, SENBU Osamu: Study on Effect Factors of Cover Concrete on Electrochemical

Corrosion Diagnosis for Reinforced Bar,
International Conference on the
Regeneration and Conservation of
Concrete Structures, 2015

()

研究者番号 :

[13] 野田貴之, 福山智子, 成田玲生奈, 長谷川拓哉, 千歩修 : 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンが高周波容量式水分計の測定値に及ぼす影響, 第 12 回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium, 2015

(4) 研究協力者

()

[14] 野田貴之, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修 : 硬化コンクリート中の塩化物イオンが高周波容量式水分計の測定値に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2015

[15] 野田貴之, 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修, 濱崎仁, 兼松学, 今本啓一, 野口貴文 : 旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査その 12: 鉄筋腐食状況, 日本建築学会大会, 2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福山 智子 (FUKUYAMA, Tomoko)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号 : 60587947

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者