

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760446

研究課題名(和文)電気化学ノイズ法による鉄筋腐食メカニズムの把握と非破壊腐食診断手法の開発

研究課題名(英文)Development of Non-destructive Corrosion Inspection Technique for Reinforced Concrete Structures Utilizing Electrochemical Noise Method

研究代表者

福山 智子 (FUKUYAMA, Tomoko)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、RC構造物の腐食診断に電気化学ノイズ法を適用しコンクリート内部の鉄筋の腐食状態を天候や気温などの外的環境要因の影響をフーリエ解析により除去してモニタリング可能な技術の開発を目指した。しかし腐食反応自体と環境要因の周波数が重なっており影響を除去することが困難であったため、まずはコンクリートの細孔特性に着目し、これとRCの電気化学的特性の相関を精査した。その結果、細孔の体積増分と比表面積増分の比(細孔形状に関するパラメータ)がインピーダンス周波数特性と相関があり、材料の種類や含水状態が未知の場合であってもコンクリートの細孔特性により電気化学特性がある程度説明可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study is a development of non-destructive corrosion monitoring system for reinforced concrete structures utilizing electrochemical noise method. Electrochemical noise method was regarded as a technique which allows removal of environmental factors effect from electrochemical measurement using Fourier analysis. However it was difficult to remove the effect of environmental factors from measurement value, because the frequencies of environmental factors overlapped with the frequencies of corrosion response.

Based on the above result, we changed our course and focused on concrete pore structures to explain electrochemical properties of concrete. This study demonstrates that there are relationships between pore structures and concrete impedance frequency characteristics. This indicates that if there is no information about concrete materials or moisture state, we can explain electrochemical properties of concrete by concrete pore structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鉄筋腐食 維持管理

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート（RC）構造物を長期的に安全に使用するためには、構造物の現在の状態を把握して適切に対策（維持保全）を行う必要がある。RC 構造物の寿命は鉄筋の健全性によりほぼ決定されるため、鉄筋の腐食発現を正確に把握できる手法が必要であるといえる。

本研究では、実構造物の腐食診断に電気化学ノイズ（EN）法を適用し、コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を非破壊モニタリング可能な技術の開発を行うことを目的とした。EN とは、鉄筋表面に存在するイオンの活動を反映した電位や電流の信号であり、高速でデータサンプリングを行うことで微小な反応を拾い上げる手法である。

本研究では、EN 測定値のフーリエ変換により実 RC 構造物が曝されている天候や気温などの外的環境要因の影響を除去し、外部からの各種要因が腐食反応やコンクリートの物性に及ぼす影響を把握した上で、鉄筋の腐食機構と電気化学ノイズの発生機構との関係性を明確にすることを目的とした。

しかし、これらの外的要因と腐食反応の周波数が重なっており、影響を除去することが現時点で困難であることが判明した。また、申請者がこれまでに行ってきた実構造物の調査においては、電位測定による腐食判定と鉄筋腐食の実態（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。

この過程で、鉄筋の腐食診断を正確に行うためにはコンクリート中の鉄筋の電気化学的特性だけでなく、コンクリート自体の電気化学的特性の把握も不可欠であるとの結論に至った。

そのため、EN による腐食診断手法の開発の前にコンクリート自体の電気化学的特性を把握するために、コンクリート固有の物性である細孔特性に着目して研究を行う方向

に方針を転換し、コンクリート細孔特性と電気化学的特性の間の相関について検討することとした。

2. 研究の目的

本研究では、上記を踏まえコンクリートの細孔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細孔構造のパラメータの抽出を行うことを目指した。

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。

本研究では、細孔特性をパラメータとして実構造物から採取したコンクリートの電気化学特性を整理した。これを用いて今後の実験室実験による結果との関係性を明確にし、鉄筋腐食に関する電気化学的データの解析手法を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、解析対象とするコンクリートの電気化学的特性として、コンクリートを電気的回路とみなした場合の静電容量やその位相特性に着目した。この際、これらの特性は含水率だけでなく細孔径分布や細孔比表面積分布に影響を受けていると仮定した。

上記を検証するために実構造物から採取したコンクリート試料（図 1）に対し①吸水試験、②吸水試験重量測定時の静電容量測定、③水銀圧入法による細孔径分布の測定などを実施し、コンクリートの静電容量に細孔特性が及ぼす影響について統計的に検討を行った。

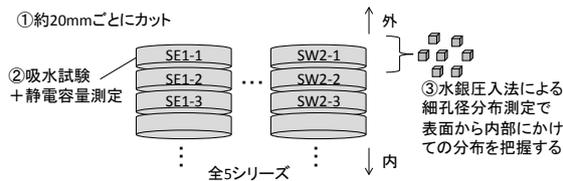


図1 実験概要

4. 研究成果

図2は、自然環境課で鉄筋コンクリートの交流インピーダンスを測定した際の各周波数における位相角を示したものである。67号棟と68号棟（調査対象とした実構造物）が他の測定箇所と比べて顕著な差異を示している。本研究ではこの位相角が示す差異について、コンクリートの細孔特性との相関の面から検討を行った。図3は、各測定区間（細孔径区間）での体積増分に対する比表面積の増分の関係の例を示したものである。0.1 μ m以上の細孔径では各測定区間での比表面積の増加がほぼみられなかったため、0.1 μ m未満の区間のみについて分布図を作成した。ここで、あるひとつの平均細孔径 Dave を有する円筒細孔により容積が増加するものと仮定すれば、その区間で増加した比表面積は $dA=4dV/Dave$ と求めることができる。しかし、実試料では細孔が単純な円筒であるとは限らず、実際に図3においてもそれぞれの構造物ごとに傾きが異なっているのが見て取れる。これは各試料コンクリートの細孔の形状に関する情報を示しているものと考えられる。図4は、図2から得られた0.2Hzにおける位相角の線形補間値と図3から得られた容積増分に対する比表面積の増分割合（グラフの傾き）の関係を示したものである。位相角の大きさは、電気回路としてのコンクリートの特性、特に静電容量を表している。この結果より、容積増分あたりの比表面積の増加量というコンクリートの細孔特性と位相角の間に相関があることが確認された。

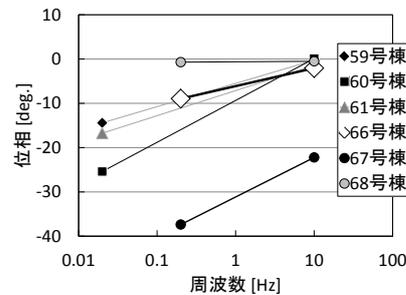


図2 位相の変化

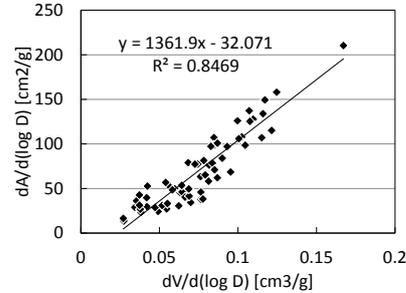


図3 0.1 μ m以下の細孔のLog微分細孔容積とLog微分細孔比表面積分布の相関

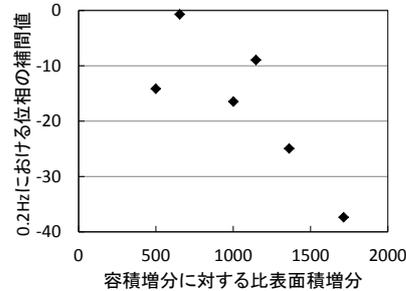


図4 細孔特性と位相の関係

図5は、上記とは別の調査対象構造物から採取した試料に対し吸水試験と静電容量の測定をした結果の例を示したものである。図6は、水銀圧入法により得られた各円盤のLog微分細孔容積分布をそれぞれ重ね合わせたものである。図より、細孔が大径になるほど、5つのシリーズ間のばらつきが少なくなっている様子が見て取れ、0.5 μ m以上の領域においてLog微分細孔容積が水準(i)(ii)(iii)すべてでおおむね一致していることを分散分析で確認した。吸水試験では、粗大な空隙にまず水が浸入するので、0.5 μ m以上の粗大空隙の影響をまず検討することは妥当であると考えられる。図-7は、図-5のグラフの傾きと、図-6の傾きの対応をもとに細孔特性と静電容量の相関を示したものである。この結果より、細孔特性が静電容量の変化に影響している可能性が明らかになった。

RC 構造物の電気化学特性はコンクリート自体の特性（材料種類，細孔特性など）や含水状態といった様々な影響を受けており，その影響を包含したうえで得られる測定値である。本研究では，コンクリート自体の細孔特性と周波数特性の相関を確認し，材料の種類や含水状態が一定でない，あるいは未知の場合であっても，コンクリートの細孔特性により電気化学特性がある程度説明可能であることを見出した。ただし，本調査で分析した試料は限られており，この成果を実務に適用するためにはより詳細な検証が必要であると考えられる。

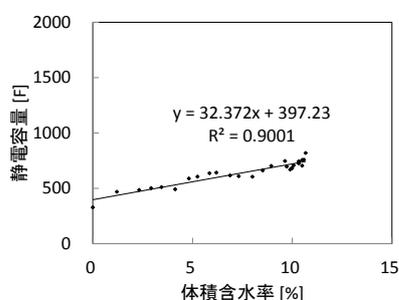


図 5 体積含水率と静電容量の関係

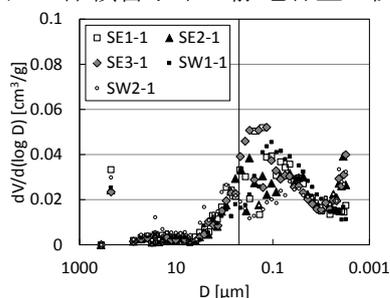


図 6 各円盤の Log 微分細孔容積分布

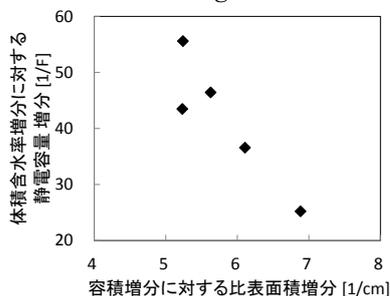


図 7 細孔特性と静電容量の関係

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 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 福山智子・野田貴之・長谷川拓哉・千歩修・白石聖・兼松学・今本啓一・野口貴文：軍艦島構造物群の劣化調査—その 16: 鉄筋コンクリート構造物の周波数特性とコンクリート細孔構造間の相関に関する検討，日本建築学会学術講演，神戸大学，2014.9.14
- ② 野田貴之・福山智子・長谷川拓哉・千歩修・白石聖・兼松学：軍艦島構造物群の劣化調査—その 15: かぶりコンクリートの性状が電気化学的鉄筋腐食診断に及ぼす影響に関する検討，日本建築学会学術講演，神戸大学，2014.9.14
- ③ 田中章夫・今本啓一・兼松学・清原千鶴・野口貴文・福山智子・白石聖：軍艦島構造物群の劣化調査—その 14: 島内コンクリートにおける見掛け含水率の推定，日本建築学会学術講演，神戸大学，2014.9.14
- ④ 福山智子・野田貴之・長谷川拓哉・千歩修：コンクリートの細孔特性と静電容量の相関に関する検討，日本建築学会北海道支部研究発表会，釧路工業高等専門学校，2014.6.28
- ⑤ 野田貴之・福山智子・長谷川拓哉・千歩修・白石聖・兼松学：かぶりコンクリートの電気化学的抵抗値と空隙特性の関係性についての基礎的検討，日本建築学会北海道支部研究発表会，釧路工業高等専門学校，2014.6.28
- ⑥ 梅津裕二・今本啓一・野口貴文・福山智子：軍艦島構造物群の劣化調査—その 7 自然電位法による鉄筋腐食分布および腐食進行調査—，日本建築学会学術講演，北海道大学，2013.8.30-9.1
- ⑦ 福山智子・白石聖・兼松学・野口貴文：実 RC 構造物の腐食診断におけるコンクリートの細孔容積と塩化物濃度の寄与に関する検討，日本コンクリート工学会年次論文集，名古屋国際会議場，2013.7.9-11
- ⑧ 梅津裕二・今本啓一・野口貴文・福山智子：軍艦島構造物群の劣化調査—その 4 自然電位法による鉄筋腐食調査，日本建築学会学術講演，名古屋大学，2012.9.12-14

[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

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：