

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18883

研究課題名（和文）弾性波と電磁場応答を統合したコンクリート中鋼材表層部の腐食の非破壊評価手法

研究課題名（英文）Nondestructive evaluation of metal corrosion in the concrete structures integrating elastic wave and electromagnetic response

研究代表者

鎌田 敏郎（KAMADA, TOSHIRO）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：10224651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：かぶりコンクリートの品質の影響を受けず、コンクリート内部に浸透する数kHz～数100kHz帯域の高周波交流磁場と、これを印加した際の鋼材上の誘導電流の表皮効果を組み合わせることにより、コンクリート中鋼材表層部の腐食を検出する手法について検討した。鋼材表層で発生する微小磁場を安定して検出できる電磁場検出システムの開発を行い、ロックイン検波（位相敏感検波）により、鋼材表層性状の変化を高精度に測定する信号処理手法を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、鋼材腐食の状況を、その初期段階から適確に検出できる新しい非破壊評価方法を評価したことである。RC床版内部の鉄筋腐食やコンクリート/土中の道路標識/照明柱地際部の鋼材腐食など、従来の外観目視では状況把握が困難であるにも関わらず、構造物の耐力低下や第三者被害につながりかねない検査項目に対して本手法の貢献度は極めて高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Combining several kHz to several hundred kHz of higher frequency band magnetic field which reaches deep into concrete and eddy currents induced by the magnetic field on the surface of the metal, a new nondestructive evaluation method of metal corrosion in the concrete structures was studied. An electromagnetic sensory system that can detect considerably small level of magnetic field generated near the surface of metal was also developed and evaluated using phase sensitive detection scheme and was found to be possible for detecting magnetic properties of the corrosion of metal in highly sensitive.

研究分野：構造物維持管理 構造診断 非破壊評価 コンクリート工学

キーワード：コンクリート中鋼材腐食 高周波交流磁場 電磁場応答 電磁場検出センサ 非破壊評価

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

コンクリート中鋼材の腐食状況を把握する非破壊評価手法としては、従来、電気化学的手法として自然電位法、分極抵抗法などが使用されてきた。これらの手法は、原理的には、腐食電流の挙動によって腐食現象を間接的に評価するものであり、腐食による生成物の状況をダイレクトに把握できるものではなかった。また、近年では、低周波磁場(数 10Hz)により加振された鋼材の振動を、EHF 帯域(数 GHz)の電磁波のドップラ現象を利用して検出する加振レーダ方式や、励磁コイルなどによりコンクリート内部の鋼材に低周波の渦電流を発生させ、その変化を磁気センサにより検出する方法(渦流探傷試験法)など、鋼材の腐食による材料としての物理的変状そのものを捉えようとする新しい研究の動きもあるが、いずれの方法も、腐食生成物の存在する鋼材表層部の状態を十分把握できるレベルにまで達していないのが現状である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、上記の先行研究を踏まえて、コンクリート中の鋼材腐食に対する検出能力を格段に向上させるため、コンクリート内部に深く浸透するパルス状磁場にコンクリート中の鋼材表層部で作用する数 kHz~数 100kHz 帯域の交流磁場を重畳し、その際に発生する弾性波と電磁場応答を統合することにより、全く新しい非破壊評価法の検討を行うこととした。

3. 研究の方法

図-1 に、本研究の周波数範囲を示す。鋼材表面近傍の腐食層は表皮深さ 100 μ m~1mm の範囲で発生しており、磁気エネルギーがこの領域に効率的に浸透する周波数帯域が数 kHz~数 10kHz であることを示している。このような鋼材表層部分の腐食に対し、先行研究では使用されていない数 kHz~数 100kHz 帯域の交流磁場を適用することで、腐食層の存在に起因する磁場の乱れを効率的に発生させることによって鋼材腐食の検出を行うこととした。

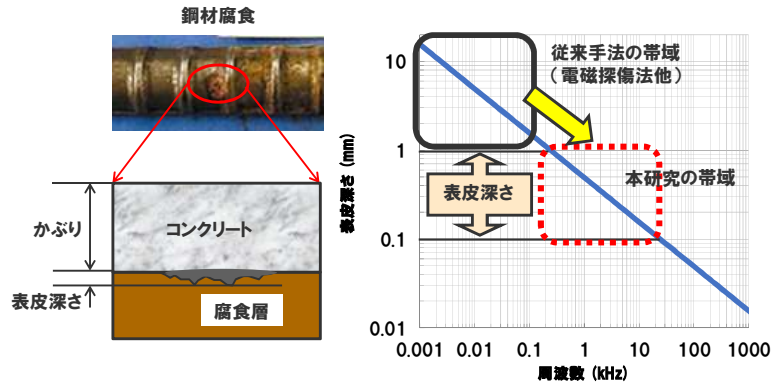


図-1 本研究の周波数範囲

具体的な研究の推進過程として、

- I : 鋼材腐食の初期段階を精度良く検出可能とする磁場発生方法の開発
- II : 微小な弾性波と電磁場応答を高感度に検出できる受信システムの開発
- III : 弾性波と電磁場応答を組み合わせることにより鋼材腐食を検出するための統合型信号処理・データ解析システムの開発、を行うこととした。

まず I では、通常のかぶり 30mm 程度を想定した場合、磁場の急峻な立上りを実現するパル

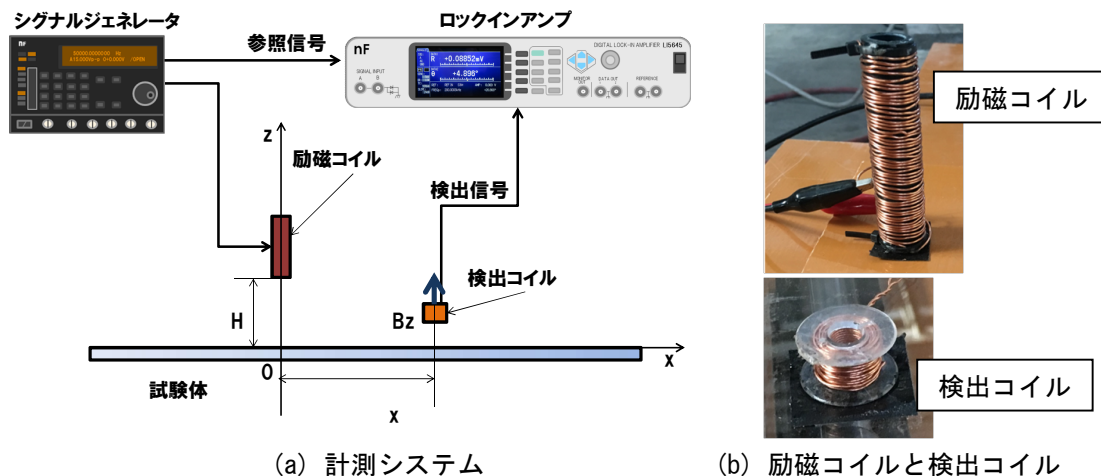


図-2 計測システムの概要

ス電流発生装置を適用することなく、鋼材表面に磁場が到達することが明らかになった。このため、交流磁場のみで磁場を発生させ評価を行った。また、Ⅱでは、鋼材表層部で発生する 10^{-6} ~ 10^{-4} T レベルの微小磁場を選択的に検出可能な差動型磁気計測回路を構成し、微小磁場を安定して検出できる電磁場検出システムの開発を行った。具体的には、交流磁場を発生する電流を参照信号とし、電磁場検出センサで計測された電磁場応答のロックイン検波（位相敏感検波）により、鋼材表層性状の変化を高精度に測定する高度信号処理手法を試みた。また、Ⅲでは、Ⅱにより受信される電磁場応答の振幅・位相差情報を評価指標とし、これらの値が、腐食が発生していない健全な鋼材部の指標値に対して局所的に変化する領域をマッピング処理することにより、腐食段階、腐食範囲を可視化した。

4. 研究成果

(1) 計測システムの概要

高周波交流磁場を発生、検出できる計測システムを構築し、電磁場応答の評価を行った。磁場発生、受信に用いた装置の概要を表-1 にまとめた。また計測システムの概要を図-2 に示した。励磁コイルは巻き数 50 ターン、コイル直径 20mm、検出コイルは巻き数 50 ターン、コイル直径 10mm のものを用いた。励磁コイル、検出コイルの写真を図-2(a)、図-2(b) に示す。

表-1 計測システムの概要

使用目的	機材	仕様
発振器	シグナルジェネレータ (WF1946B)	0.01μHz~15MHz
同期検波器	ロックインアンプ (LI5645)	1mHz~250kHz
励磁コイル	空芯コイル (直径 φ20mm×高さ 70mm)	巻数 50 ターン
検出コイル	空芯コイル (直径 φ10mm×高さ 10mm)	巻数 50 ターン

ここで、励磁コイルおよび検出センサとして空芯コイルを使用することで、励磁磁場と検出磁場の位相差を精度高く評価できるようにした。

基礎実験として、腐食させた鋼板、および丸鋼を対象に(Ⅰ)で構築した高周波交流磁場を作用させ、その電磁場応答を(Ⅱ)で構築した受信システムで計測し評価した。実験では、腐食状況（腐食面積、腐食厚さ）、および励磁周波数やセンサ設置位置の違いが評価指標（位相差の差）に与える影響を明らかにした。

(2) 鋼板の腐食に関する評価

鋼板の腐食に関する評価を行った。図-3 に供試体の外観、表-2 に作製した供試体の仕様を示す。

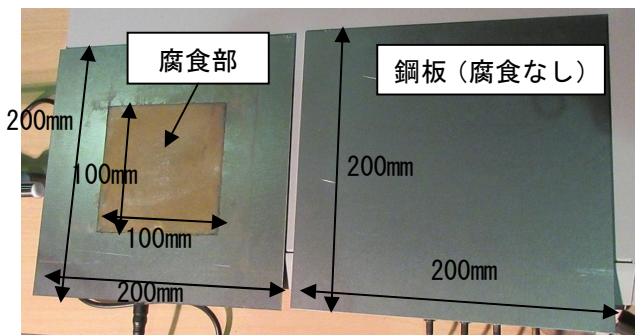
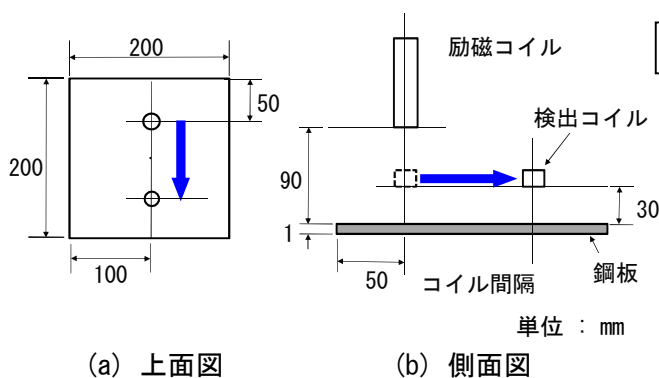


図-3 供試体の概要

表-2 供試体の仕様

腐食範囲 (mm × mm)	減肉量 (g)	腐食厚 (μm)
100×100	2	25
50×50	1	50
35×35	0.5	155

中央部に、電食により面積がそれぞれ 100mm×100mm、50mm×50mm、35mm×35mm となる 3 パターンの腐食部を設定し、50、100、150、200kHz の周波数を用いて計測を行った。鋼板の中心線上に励磁コイルを設置し、その真下の位置から鋼板の辺に対して直角方向に 10mm、または 5mm ピッチで中心から離れる方向へ検出コイルを移動させることで計測を行った。計測配置を図-4 に、計測状況を図-5 に示す。腐食面積 100mm×100mm の鋼板を用いて、50、100、150、200kHz の 4 周波数を用いて計測を行った結果を図-6 に示している。腐食がある場合と腐食がない場合を比較するため、それぞれの周波数とコイル間隔において腐食がない鋼板と、腐食がある鋼板での位相の差（位相差 $\Delta\theta$ ）を求めた。ここで、位相差 $\Delta\theta$ は腐食がない状態と腐食がある状態の位相の差を表している。グラフより、周波数の値に関係なく、コイル間隔が 85mm 近傍において位相が大きく変化することがわかる。またこのコイル間隔で位相差 $\Delta\theta$ は絶対値として大きな値を示した。これによって、腐食がある状態と腐食が無い状態の差を検出できることが分かった。これは腐食の有無により高周波で表層を流れる渦電流の分布が変化し、それ



(a) 上面図

(b) 側面図

図-4 計測配置

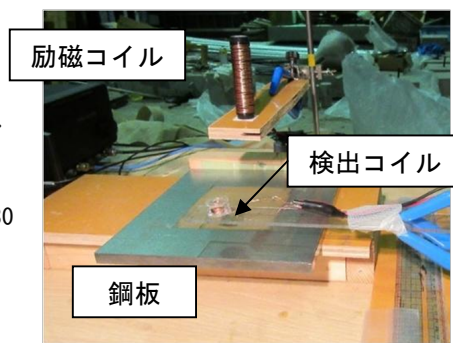


図-5 計測状況

にしたがい空中の磁場分布も変化した結果、同一のコイル間隔における位相に差が表れ、位相差 $\Delta\theta$ が発生したものと考えられる。また、この位相が大きく変化するコイル間隔は、磁力線が下向きから上向きへ変化する変曲点に対応しており、励磁コイルと検出コイルの鋼材面からのリフトオフに関係があることを理論解析により明らかにした。

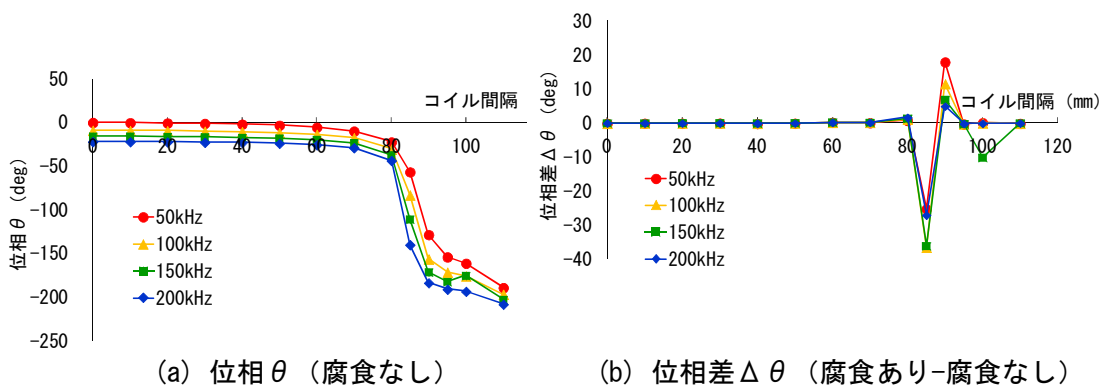


図-6 コイル間隔と位相 θ 、位相差 $\Delta\theta$ の関係

一方、腐食面積の大きさ、腐食深さが位相差 θ に及ぼす影響を調べるため、3種類の供試体を用いてコイル間隔と位相差 $\Delta\theta$ の関係を評価した。実験結果として、図-7に200kHzの結果のみを示す。本研究で選定した周波数範囲においては、周波数の違いにより位相差 $\Delta\theta$ がピークとなるコイル間隔には、ほとんど差がないことが分かった。また、図-8に腐食状況と位相差 $\Delta\theta$ の最大値との関係を示す。グラフより、腐食深さが大きくなるほど位相差 $\Delta\theta$ のピーク値の絶対値が大きくなる傾向が確認された。但し、本実験条件では、腐食深さと同時に腐食範囲も変化する条件のため、今後引き続き評価を進める必要がある。本実験条件の範囲では、腐食範囲が35mm×35mm程度で腐食深さが155 μm 程度あれば、本計測手法で検出が可能であることが明らかになった。

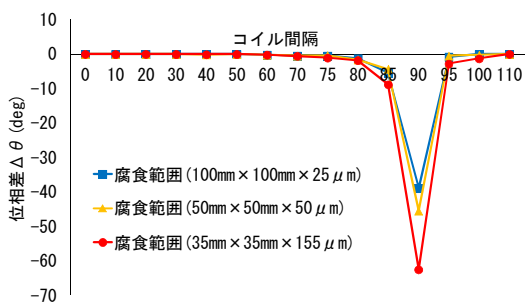


図-7 コイル間隔と位相差 $\Delta\theta$ の関係 ($f=200\text{kHz}$)

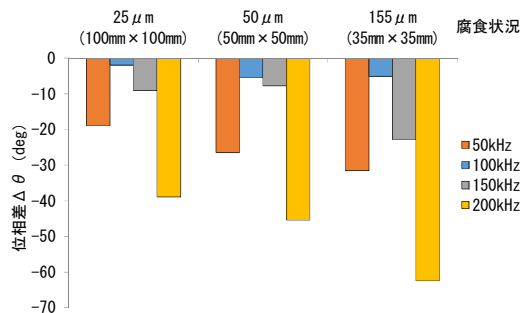


図-8 腐食状況と位相差 $\Delta\theta$ のピーク値との関係

(3) 丸鋼の腐食に関する評価

丸鋼の腐食に関する評価を行った。図-9 に供試体概要、図-10 に計測配置、図-11 に計測状況を示す。本実験では腐丸鋼の長手方向中央部に長さ 10mm の円周状の範囲を電食にて腐食させた供試体を作製した。計測では腐食部分から 50mm 離れた位置を計測の基準点として、10mm 間隔で計 9 点の計測を行った。



図-9 腐食を模擬した丸鋼概要

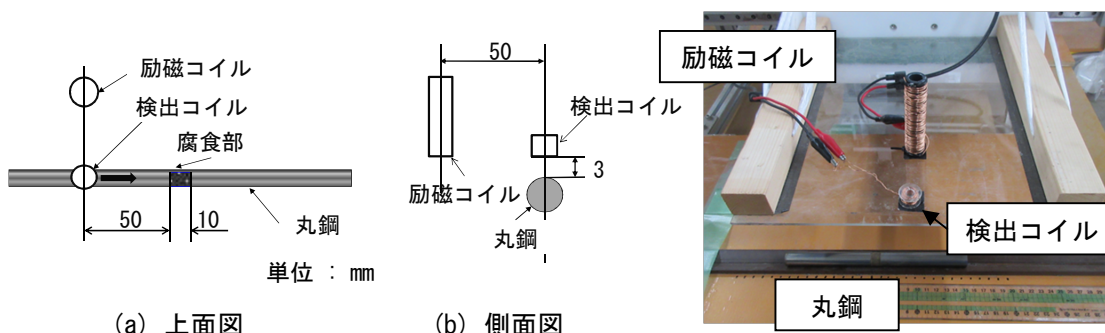


図-10 計測配置

図-11 計測状況

図-12 に結果を示す。丸鋼が腐食を有する場合には、腐食がない場合と異なる電磁場応答を示すことを確認した。具体的には、鋼板と同様に、腐食部分と健全な部分の境界付近で位相 θ が大きく変化する傾向が得られることがわかった。腐食がある丸鋼と腐食がない丸鋼を比較するため、それぞれ同じコイル間隔において腐食がない丸鋼と、腐食がある丸鋼での位相の差(位相差 $\Delta\theta$)を求めた。結果を図-12 (b) に示す。グラフより、コイル間隔が健全部分と腐食部分の境界である 50mm 近傍の範囲において、位相差 $\Delta\theta$ が大きく変化したことがわかる。このことから、本手法は、コンクリート構造物の内部鉄筋の腐食の検知などに有効な検査方法となり得る可能性が示された。

以上より、コンクリート中の鋼材表層部で作用する数 kHz～数 100kHz 帯域の交流磁場を重畳し、その際に発生する電磁場応答を適用した新しい非破壊評価法により、鋼材の腐食部を検出できる可能性があることが明らかになった。

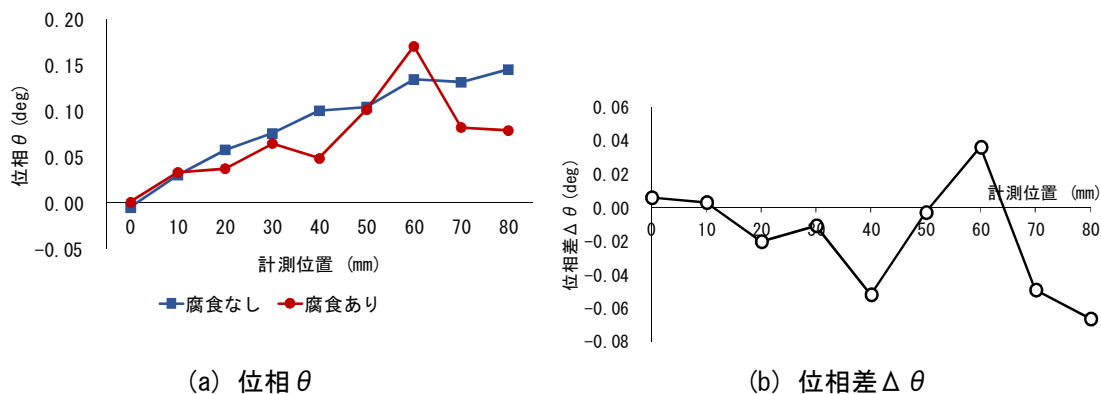


図-12 計測位置と位相 θ 、位相差 $\Delta\theta$ との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷 春葉、鎌田 敏郎、寺澤 広基、服部 晋一
2. 発表標題 高周波電磁場応答を用いたコンクリート中鋼材腐食の検出に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会全国大会 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	寺澤 広基 (Terasawa Koki) (50750246)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	内田 慎哉 (Uchida Shinya) (70543461)	富山県立大学・工学部・准教授 (23201)	