

平成 26 年 6 月 22 日現在

機関番号：92604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360182

研究課題名(和文) 構造物ヘルスマonitoringセンサへの効率的な無線電力供給に関する研究

研究課題名(英文) Study on wireless power charging effectively for structure health monitoring sensors

研究代表者

名兎耶 薫 (NAGOYA, KAORU)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・主任研究員

研究者番号：50416715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：様々な産業分野でワイヤレス給電技術の活用が期待されており、実用化に向けた開発が盛んにおこなわれている。しかしながら給電効率などの技術的課題や運用周波数などを含めた制度化や人体防護指針対策など、まだまだ課題は多い。本研究では、構造物の健全性評価を目的とした埋設型センサデバイスに対して実用的且つ効率的なワイヤレス給電を実現するため、給電対象物の自動認証、給電効率の最大化解析、制御、給電開始、そして給電停止に至る全プロセスの自動化を実行するワイヤレス給電システムを開発し、室内実験でその実用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：There are high hopes for wireless charging technologies across a variety of industrial fields and there has been a boom in development aimed at making such technologies commercially viable. However, a large number of issues remain, such as technical issues with feed efficiency, the systematization of operating frequencies and strategies for dealing with personal protection guidelines. In this research, in order to realize both practical and efficient wireless charging to embedded sensor devices aimed at evaluating structural soundness, a wireless charging system was developed which carries out the automation of all processes from automatic recognition of the objects to be charged, feed efficiency maximization analysis, control, power up, and all the way to power down, and its viability has been verified in experiments in the laboratory.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：モニタリング 電力伝送 ワイヤレス給電 電磁界共鳴 健全性評価 センシング

1. 研究開始当初の背景

近年、新規建設投資が困難な予算上の問題や、省資源・地球環境への配慮によって、良質な社会資本のストックと合理的な維持管理体制を確立することが喫緊の課題となっている。国民生活を支える社会基盤である大型土木構造物、例えばダム・トンネル・橋梁などの多くは、高度成長期に建設されたもので設計寿命に近づいており、その劣化は著しい。しかしながら、全面改築することは難しく、国民生活の安全・安心を守るための対策として、劣化した構造物を補修・補強して延命させる手段が講じられている。適切な補修・補強を行うためには、まず各構造物の現状の劣化程度を把握し、今後の劣化進度を予測する必要がある。現在の構造物の点検作業は、目視確認や打音検査が主流であり、点検者のスキルによっても結果はバラつき、その信頼性には疑問がある。また、仮に点検によってコンクリート構造物表面のひび割れ・剥離が発見された場合でも、構造物の応力状態を推定することは難しく、安全裕度を判断することができない。この解決法の一つとして、構造物内部に各種モニタリングセンサを埋設しておき、コンクリートや鉄筋の応力を計測し、更に構造物に加わる土圧・水圧等の外力などの物理量変化を捉える方法が考えられる。しかしながら、既存の埋設型センサによれば、センサへの電源供給およびデータ通信のためのケーブルが必要で、このケーブルラインを介した炭酸ガスの浸入によってコンクリートの中性化が促進され、鉄筋の腐食、更には構造耐力の低下を招くことが懸念される。また、電池を搭載した無線式センサによれば、サンプリングレートにもよるが、数年程度の駆動しか期待できず、50年以上の構造物寿命に比べ極めて短期間のモニタリングしかできない。そこで、電池を搭載しない各種モニタリングセンサをコンクリート構造物内部やその背面に埋設し、外部から効率的にワイヤレス給電する技術が確立されれば、構造物寿命と同程度に長期間運用可能な構造物モニタリングシステムの構築が可能となる。

2. 研究の目的

土木・建築構造物の健全性評価を目的として構造物内に埋設される各種モニタリングセンサに対し、効率的にワイヤレス給電する技術を確立し、電池寿命に因らず構造物寿命と同程度に長期間運用可能な構造物モニタリングシステムを実現することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

主なワイヤレス給電方式として、マイクロ波方式、レーザ方式、電磁誘導方式、磁界共鳴方式がある。コンクリートは、特に打設直後には含水率およびイオン濃度が高く、高周波電磁波は媒質内部での伝搬損失が大きい

ためマイクロ波方式の適用は難しい。更に、電磁波の生体への安全性についての観点から社会的制約が大きい。レーザ方式はコンクリート表面での反射と吸収によって適用できない。また電磁誘導方式は、伝送距離は20cm程度が限界で、本研究が目標としている1.5m程度(空气中1m+コンクリート中50cm)の伝送距離は確保できない。一方、磁界誘導方式は2006年のMITの研究報告で、理論上2mで40%、1mで90%以上の電力伝送効率を得られることが示されており、適用周波数は10MHzと低いためコンクリート中における伝搬損失は小さく、構造物に埋設したモニタリングセンサへのワイヤレス給電としての実現性が高い。しかしながら、電磁界共鳴方式は電磁誘導の原理を基本とし、送受電側とも極めて高いQ値のアンテナ設計を施すことで数mのエアギャップでも高い電力伝送効率を実現する方法であるため、アンテナ周辺に存在する誘電体、導電体或いは磁性体などの外的要因、或いは送受電アンテナ間の距離(結合状態)に応じた相互リアクタンスの変化によって、安定した電力伝送を実現できず、これを如何に補償するかが課題となる。そこで、本研究では以下に示す(1)~(5)の検討をおこなった。

(1) ワイヤレス給電装置

送受電アンテナの距離によって生じる相互リアクタンスの変化を補償する方法として、送電側のキャパシタンスを可変コンデンサで調整し相互リアクタンスの変化を相殺し、また相互リアクタンスの変化に伴って生じる共振周波数の変化分を電源周波数の調整によって最適化するワイヤレス給電装置を開発した。

(2) 電源効率の改善

ワイヤレス給電の総合効率は、1次側(給電側)の電源効率、送受電コイル間の伝送効率、そして2次側(受電側)の整流効率等の積となる。電源効率改善には、リニア方式に比べスイッチング方式の方が一般的に優れているが、スイッチング方式は周波数帯域が狭く出力ノイズが大きいなど劣る点もあるため、双方の検討をおこなった。

(3) 受電センサデバイス

構造物の健全性評価を目的としたセンサデバイスの実用例として、ひずみ温度センサデバイスと埋設型超音波振源を開発し、その実用性を室内実験により検証した。また後者については、トモグラフィ解析を活用し損傷状況の可視化を試みた。

(4) コンクリートの経時的電気物性

受電アンテナが埋設されるコンクリートの電気特性は、アンテナの共振特性に影響を及ぼすことが考えられ、またワイヤレス給電効率(伝搬媒体損失)を事前に電磁界解析で

予測する際にも重要となる。そこで、コンクリートの主成分となるモルタルのフレッシュ性から凝結に至る比誘電率及び導電率データを精度良く測定する方法について検討し、各種パラメータを取得した。

(5) 電磁界解析

コンクリートや地盤による誘電損失や磁界暴露による人体への安全性評価、そしてワイヤレス給電の送受電アンテナ設計や給電効率の事前予測には、電磁界解析が重要な役割を果たす。そこで、ワイヤレス給電のシミュレーションに適した電磁界解析手法を選定し、またその解析精度を検証した。

4. 研究成果

(1) ワイヤレス給電システム

安定的かつ高い電力伝送効率を得るためワイヤレス給電に特化した高周波電源と共振整合器(RRC)を開発した。RRCは、共振回路に接続されている容量(エアバリコン)を自動調整して最適な共振回路になるように制御するシステムで、任意に設定した下限容量値から上限容量値までスイープさせ共振回路のインピーダンス特性と位相特性を測定し、電力伝送効率が最大となる周波数と、その周波数において共振条件を満たす容量を特定するものである。本システムの構成は共振回路を駆動する高周波電力増幅器、共振特性を測定する測定ユニット、設定・測定結果を表示するソフトウェア、パソコンそして共振調整用のエアバリコンとなっている。ワイヤレス給電装置を図1、処理フローを図2に示す。本システムは、構造物表面に取付けたRFIDによって給電対象物を自動認証し、そのトリガ信号によってRRCの最適解析・調整、給電開始、そして給電停止の一連の動作を自動化させたものである。更に、構造物表面に取付けたRFIDと一体化されたアンテナコイルとセンサ側の受電アンテナの複共振作用によってワイヤレス給電距離を飛躍的に向上させ、目標としていた1.5m程度のワイヤレス給電を実現した。



図1 ワイヤレス給電装置

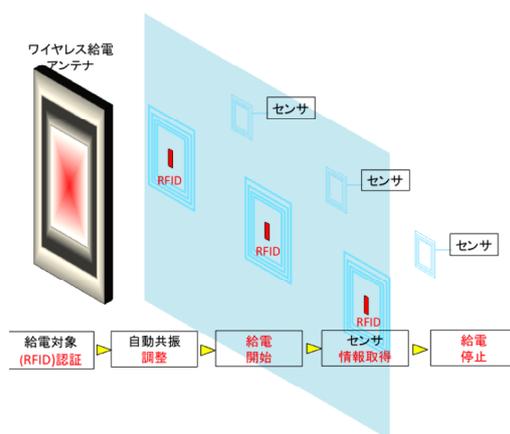


図2 処理フロー

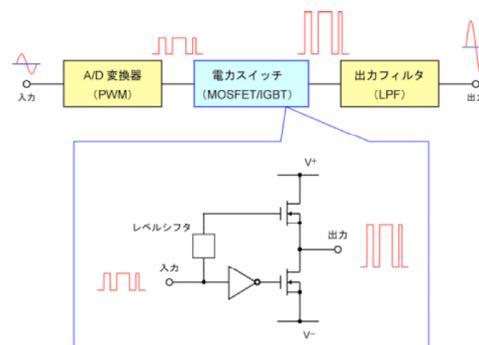


図3 スイッチング方式の模式図

(2) 電源効率の改善

電源効率を検討するにあたりスイッチング方式とリニア方式の二つの方式について比較検討した。スイッチング方式の中には変調方法によっていくつかの方法がある。ここでは一般的なパルス幅変調(以下、PWM)方式で検討した。PWM方式では、入力のアナログ信号で矩形波のデューティ比を変調し電力スイッチで増幅後、出力フィルタ(ローパスフィルタ、以下LPF)を通すことで復調している。スイッチング周波数は、「出力信号周波数 \ll LPFの遮断周波数 \ll スイッチング周波数」の関係となる。今回の使用周波数範囲は100kHzから150kHzであり、前述の関係を考慮すればスイッチング周波数は数MHz程度と推測される。しかしながらMHz帯でのスイッチングには課題も多く回路も複雑化する。またスイッチング損失はスイッチング周波数に比例するという問題もある。次にリニア方式によれば、出力段に電力を供給する直流電源電圧の低電圧化によって67%の効率が得られ、また制御回路の消費電力を10W、ファンの消費電力を5Wと仮定したとき理論上の総合電源効率は48.7%となった。以上の結果から、スイッチング方式は周波数帯域が狭く出力ノイズが大きいなどのデメリットがあり、またこれらの対策に時間がかかることや

回路構造などが複雑になることから本研究ではリニア方式を採用した。図4に開発したアンプのブロック図を示す。

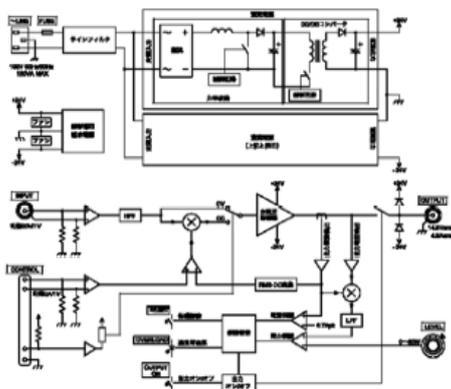


図4 アンプブロック図

(3) 受電センサデバイス

構造物の健全性評価を目的とした受電センサデバイスを二種類開発した。一つは、ひずみ温度センサデバイスである。これは、市販のひずみ計 KM-100BT と温度センサに熱電対を利用したもので、ワイヤレス給電した電力によってひずみ量と温度を計測し、そのデータ（バイナリーデータ）を微弱無線モジュールを介してパソコン側に送信し、パソコン側で物理量変換して表示させるものである。二つ目は、圧電素子を組み込んだ埋設型超音波デバイスである。構造物内部に埋設した超音波デバイスにワイヤレス給電し、超音波パルスを発生させ、その超音波信号を構造物表面に取付けた加速度計で受振するシステムである。必要となるエネルギー量が大きいため、ワイヤレス給電した電力を一時的に電気2重層コンデンサに蓄え、一定量蓄電された時点でCPUを起動し、圧電素子を駆動させる形態とした。また、本デバイスで得られる受振波形データを元にトモグラフィ解析をおこなうことで構造物内の弾性波速度分布を出力し、欠陥部位の可視化が実現できる。システム構成を図5、トモグラフィ解析結果(例)を図6に示す。

(4) コンクリートの経時的電気特性

コンクリートは pH12 の強アルカリ性を有し、例えばこの電気特性を静電容量法によって測定する電極材質は、化学反応影響を受け難い高価な金や白金に限定される。またコンクリートを構成する粗骨材が直径 20~40mm 程度あるため、最低でも 100mm 程度と大型の電極になることから測定装置から電極までの誘導線によって寄生インダクタンスや誘導線間の浮遊線間容量による誤差が生じ精度の高い測定が難しい。また非接触測定法の一つである TDR 法では、本研究で必要として

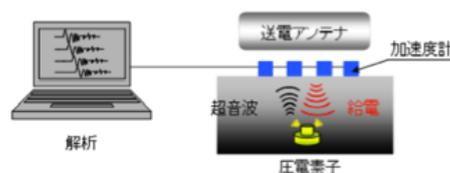


図5 システム構成

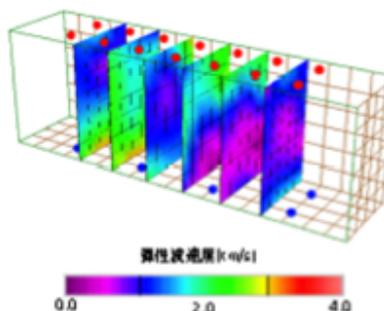


図6 トモグラフィ解析結果(例)

いる数百 kHz から MHz オーダー（以下、低周波帯域と称す）の電気特性を得ることができない。そこで非接触で低周波帯域の電気特性を測定できる装置を今回独自に考案した。具体的には、2つのトロイダルコアを用いたトランス内部（コア部）に試料となるモルタルを通過させ、モルタルの電気特性変化によって生じる電圧と位相差を計測するものである（特願 2013-104388）。本装置によってコンクリートのフレッシュ性から凝結に至る低周波帯域の電気特性が明らかとなった。

(5) 電磁界解析

ワイヤレス給電による電磁界分布を知るためには、磁界強度・電界強度・磁束密度・電束密度の4式のマクスウェル方程式を解いて誘電率や導電率を考慮し、対象となる物と電磁界の作用について計算しなければならない。解析方法は主にモーメント法、有限要素法、FDTD法の3種類がある。モーメント法は、境界上の離散化のみで近似解が得られ、解析対象物の領域内の離散近似が必要ない。また、必要な要素や節点の数が少なく解析時間が早く、開領域の問題をそのまま取り扱えるという特徴があり、金属で出来たアンテナの解析を得意とする。本研究はアンテナの解析であるので、前述の特徴よりアンテナ解析に最も適するモーメント法を選定した。使用した解析ソフトはモーメント法に基づく南アフリカ EMSS 社製3次元解析シミュレータ FEKO である。自由空間において実施した送受電アンテナ単体に対する共振特性の解析結果および磁気共鳴結合時におけるワイヤレ

ス給電効率の解析結果は、室内実験によって実測された値やその他の理論計算から得られた値と照らしてみても妥当なものであった。また、磁気共鳴結合時の解析に共振周波数のマッチングを図る手法として FEKO に実装された最適化ツール (OptFEKO) が有用である事もわかった。一方で、誘電損失媒質であるコンクリートを含む系を FEKO を用いて解析を行う場合には、電気伝導率の取り扱いや計算資源の低減方法に工夫が必要であり、現時点では十分な解析結果が得られていない。これらを解決する手法として、等価的な複素透磁率 (損失項) を利用する方法や計算資源の低減が可能な SIE および VIE の適切な適用が考えられる。また鉄筋 (高透磁率) を含む系に関しては、SIE や VIE ではなく、FEM を適用することが適当と考えられるが、やはり計算資源の低減方法を確立する必要がある、今後の課題として残った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① 柴 建次、加藤 結大、鈴木 雄也、名児耶 薫、補助人工心臓用ワイヤレス電力伝送トランスフォーマの試作、ライフサポート学会誌、査読有、25 巻、3 号、2013、90-100

〔学会発表〕 (計 2 件)

- ① 鈴木 雄也、柴 建次、名児耶 薫、補助人工心臓へのワイヤレス給電、第 22 回ライフサポート学会フロンティア講演会、査読無、2013
- ② 原 和也、柴 建次、名児耶 薫、電極界面分極の影響を考慮したモルタルの電気的特性の測定、平成 23 年電気学会全国大会、査読無、2011

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 1 件)

名称：電気特性測定装置、電気特性測定方法およびプログラム
発明者：柴建次、名児耶薫
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2013-104388
出願年月日：2013 年 5 月 16 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

名児耶 薫 (NAGOYA, Kaoru)
研究者番号：50416715

(2) 研究分担者

柴 健次 (SHIBA, Kenji)
研究者番号：10343112