

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K22005

研究課題名(和文)鉄筋コンクリート部材内部のひずみを非接触かつ非破壊で計測できる手法の開発

研究課題名(英文)Development of nondestructive and non-intrusive strain estimation method for concrete components

研究代表者

藤本 郷史(Fujimoto, Satoshi)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授

研究者番号：30467766

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文): センサ類を予め埋設して配線しない限り、コンクリート内のひずみ・変形を非破壊で計測することは難しい。そこで、本研究では、コンクリートのひずみ・変形を、部材内外を接続する電気的な配線なしに計測する方法を開発を目指した。インダクタンス要素を部材内に設置する手法を実験的に検討し、計測方法の確立を進めるとともに、開発手法の活用方策、適用性検証を進めた。その結果、提案手法の実現性を実験的に確認し、申請書に記載の各種荷重・環境条件下における影響を把握した。この検討の中で、コイル埋設が不要で、提案法よりも有用性の高い方法を考案し、その実現性を実験的に示すと共に、そのメカニズムを実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築物は、長期にわたって使用されるので、経年変化や地震等の被災によって竣工時の性能が低下していないか検査によって確認する必要がある。鉄筋コンクリート部材のような構造要素の場合には、応力(荷重)、ヤング係数、ひずみ(変形)などがこの検査において重要な指標となる。ところが、鉄筋コンクリートでは、ひずみゲージなどのセンサ類を予め埋設して配線しない限り、竣工・経年後に部材内のひずみを計測して、建築部材の性能確認に役立っているのは難しいのが実情である。本研究は、このような背景のもとに、ひずみ・変形を非破壊にとらえる手法を開発し建築物の維持管理等に役立てようとするものである。

研究成果の概要(英文): Estimation of strain in concrete is difficult unless sensors are preinstalled in the concrete. This research project aims to develop a strain measurement and estimation method without preinstalling and wiring of sensors. Molding of inductance element was proposed and experimentally verified. The effective use of such methods were also investigated. Influence of various load and environmental conditions were experimentally investigated. During these investigations, a method without molding any inductance element was also found effective. The method was experimentally verified and mechanism of correlation to strain was experimentally investigated.

研究分野：建築材料

キーワード：モニタリング センシング ひずみ コンクリート 電気化学 インピーダンス 非破壊計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の建築物ストックは延床 77 億  $m^2$  に上る。建設業就業者数がピーク時の 7 割まで減少する一方、維持管理工事の比率は年々上昇しており、建築物ストックの効率的で質の高い維持管理の実現が近年の最も大きな課題といえる。

ここで、建築物は、長期にわたって使用されるので、経年変化や地震等の被災によって竣工時の性能が低下していないか検査によって確認する必要がある。鉄筋コンクリート部材のような構造要素の場合には、応力（荷重）、ヤング係数、ひずみ（変形）などがこの検査において重要な指標となる。ところが、鉄筋コンクリートには、ひずみゲージなどのセンサ類を予め埋設して配線しない限り、非破壊で部材内のひずみを計測する手段がないという課題があり、竣工・経年後に部材内のひずみを計測して、建築部材の性能確認に役立てるのは難しいのが実情である。

電子式センサによる計測・モニタリングは、維持管理等の効率化に期待が高い。ひずみ計測においても、ひずみゲージに電子部品を組み合わせることで無線センサ化することで、非破壊で配線不要なひずみ計測を実現するという技術開発の方向性もありうる。しかしながら、電子部品を部材内に埋設する方法では、センサを構成する電子部品の寿命が建築物寿命より短いという共通した欠点が存在することが指摘できる。

### 2. 研究の目的

以上の背景のもとに、本研究では、鉄筋コンクリート部材内部のひずみ（変形）を、部材内外を繋ぐ電気的な配線を行わず、また、電子部品を埋め込むことなく、非破壊に計測できる方法を開発することを目的としていた。研究申請時には、鉄筋コンクリートのインピーダンス計測において通常モデル化に用いられることのないインダクタンス要素（コイル）を部材内に設置するという方法により、配線不要で非破壊な部材内ひずみ計測を実現することを目的としていた。さらには、提案手法を活用した維持管理・被災調査等のあり方・運用法を検討する構想であった。

### 3. 研究の方法

研究申請時には、申請書に示す A~C の項目・方法によって研究を進める計画であった。研究期間にはこの計画に沿って研究を行った。中間報告の通り、予期しない実験棟の改修工事（初年度採択の 1 か月後～初年度末まで）およびコロナ禍（2-3 年目）の影響により、実験が大幅に遅延したほか、研究の展開によって提案手法の精度限界が判明したこと、より有望な手法を発見したことなどによって研究期間の延長も含め、いくつかの変更が生じた。

#### 研究項目 A：ひずみを計測する手法の確立

申請時の計画に基づいて、文献調査等から維持管理検査や被災時などにおける事例を分析し、非破壊なひずみ検知における要求性能を把握した。この分析に基づいて、小型試験体による要素試験の実験計画を立案した。（研究項目 A-1）この実験計画に基づいて実験を実施し、さまざまな材料・荷重・環境条件におけるインピーダンス計測値とひずみとの相関を分析した。また、これらの実験を通じて、ひずみ計測のための最適な条件（例えば、インダクタンス要素の選定）などを導出した。これらの実験においては電極埋設型小型試験体も用いたが、この実験結果を詳細に分析したところ、インダクタンス要素の埋設を行わない場合にもひずみ推定を行える可能性が見出された。（研究項目 A-2）また、研究項目 A-1 の要求条件と研究項目 A-2 の実験結果を照らし合わせて、インダクタンス要素の埋設による各種影響を分析したところ、インダクタンス要素の寸法が大きくなるために、提案手法の実現性が低下することが判明したため、耐久性検討についての幅広い実験的展開は実施できなかった。一方で、上述の新たに見出した方法では、インダクタンス要素の埋設を要しないという利点があり、有望と考えられた。

#### 研究項目 B：提案手法の活用方策の検討・提案

申請時の計画に基づいて、研究項目 A-1 での分析に基づき計測結果の用途・部位に応じた運用方法などについて整理した。非破壊計測に基づくひずみ推定では、予め情報が保管されている場合に精度が確保されるため、申請書に記載の事項のうち、特に情報保管の方法については新しい情報保管方法技術を開発した。また、上述の研究項目 A-2 で見出した新手法と申請計画の提案手法を比較し、検査の手順が簡便化できることを確認した。（研究項目 B-1）一方で、周波数掃引による多次元計測によって情報がない場合に対応できないかについても検討を進めた。等価回路を用いた方法、申請書記載の ML 法などを検討した。その結果、周波数掃引計測と lasso 法を組み合わせ、以前の科研費研究成果と組み合わせることで、含水率・圧縮強度の同時推定を実現した。さらに、この解析手法を研究項目 A-2 で見出した傾向と組み合わせ、ひずみ推定の実現性も確認した。さらに、この方法のメカニズムを実験的に明らかにした。（研究項目 B-2）

#### 研究項目 C：適用性検証のためのスケールアップ・多点化および長期計測の検討

スケールアップ・多点化については、小型試験体による提案手法開発と並行して進めるために、埋設ゲージを試用した中型試験体を作製して検討した。多点化装置ではノイズ上昇が顕著に影

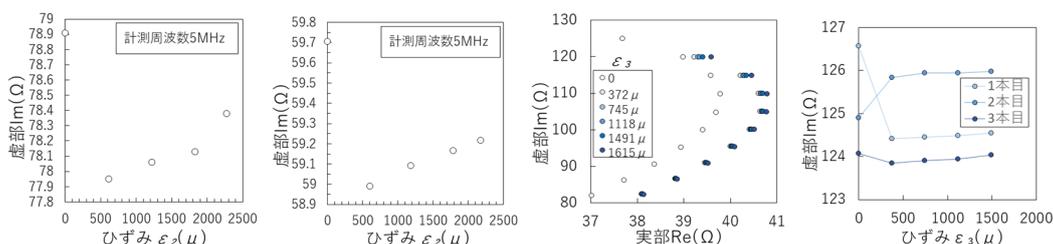
響することが判明し装置構成を変更するなどの問題が生じたが、計測点間の相関に着目した異常検知手法を導入・開発して、計測点の多点化を実験・解析的に検討した。なお、長期計測については、温度変動によって模擬し実験的分析をおこなった。(研究項目 C-2) なお、以上のような中規模化・多点化・長期計測対応については、研究項目 A の検討において申請時の期待ほどの推定精度が得られなかったため、実験的に幅広い展開ができなかった。(研究項目 C-1)

#### 4. 研究成果

本章では、前ページに述べた実施事項について成果の概略を報告する。なお、文献調査結果など報告するまでもないもの、実施したが研究成果の公表に至っていないもの、目標に達することができなかった前述のもの、などについては報告を控えた。

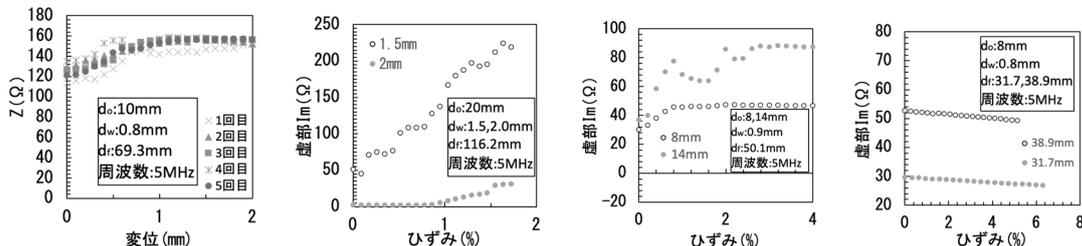
##### (1) 小型試験によるひずみ検知精度などの比較検討

前述の研究項目 A の通り、実験計画に基づいて各種の線径・コイル径などコイル種類、かぶり厚さと対応するコイル間距離、コンクリート中などにおいて、各種の荷重等の条件でひずみ・変形を付与した場合のインピーダンスとひずみ・変形の相関を実験的に分析した。また、繰り返し再現性を検証するとともに最適条件の導出を図った。以下に結果例を示す。



##### 提案手法の基本的なコンセプト確認実験の結果例

- (左) 鉄筋に巻付けコイルのインピーダンスのひずみに応じたインピーダンス変化
- (中左) 部材外を想定して鉄筋巻付けコイルの近傍に設置したコイルのインピーダンス変化
- (中右) コンクリート内部コイルのひずみに応じたインピーダンス変化
- (右) コンクリート内部の鉄筋に巻き付けたコイルのひずみに応じたインピーダンス変化

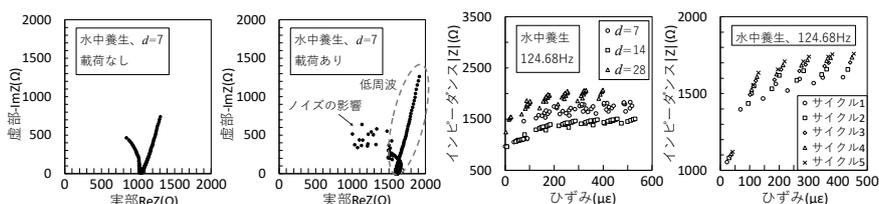


##### 各種因子に関する比較および最適コイルの選定実験結果の例

- (左) ひずみを付与した場合のインピーダンスの繰り返し再現性の検証,
- (中左・中右・右) ひずみを付与した場合のコイル線径・外径・基長の影響

##### (2) 小型試験によるインダクタンス要素の埋設が不要となる手法を示唆する発見

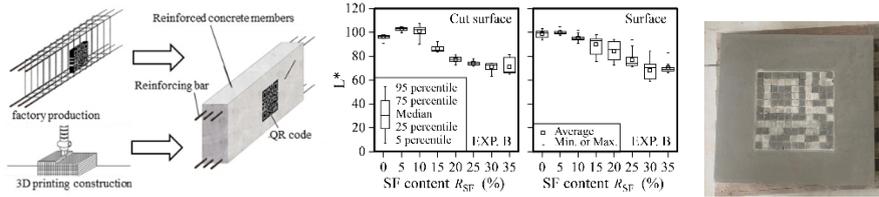
前述の研究項目 A の通り、電極埋設型小型試験体を用いて、温度・含水率等の埋設対象となるセメント系材料の基本的な物性の影響を検討する中で、コイル要素の埋設無しでもひずみ検知の可能性が見出された。ここには図表として示していないが、ひずみだけでなく(研究背景に述べた通り本申請研究で着目する基本的な力学特性である)強度についても推定できる可能性が高いことを実験的に確認した。以下に結果例を示す。



- (左・中左) ひずみが生じた場合の材料自体のインピーダンス変化の例
- (中右・右) ひずみとインピーダンスの相関(材齢および繰り返し荷重の影響)

(3) 提案手法のあり方分析に基づく情報保管技術への展開

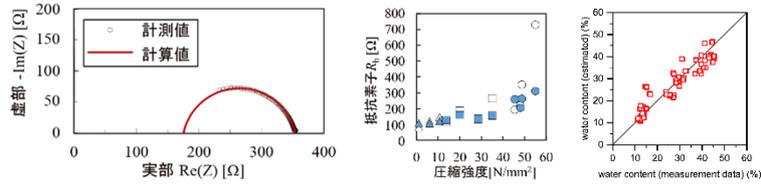
前述の研究項目 B の通り、非破壊計測に基づくひずみ推定では、予め情報が保管されている場合に精度が確保されるため、提案手法を補完する目的で、申請書に記載の事項のうち、特に情報保管の方法について、新しい技術を開発した。以下に開発技術の概略を示す。



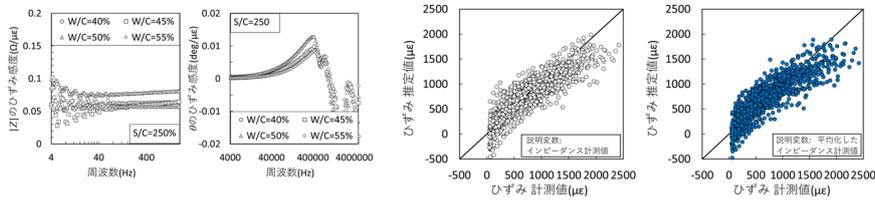
開発した情報保管技術の概略および実験結果

(4) ML 法等の導入によるひずみ等への推定解析法

前述の研究項目 B の通り、含水率推定を目的とした別科研の成果と本申請研究（ひずみや強度などの力学的特性の推定に着目）で導入・開発した解析手法を組み合わせることで分析を進めた。これまでによく用いられる等価回路法について、CPE 導入などで改良しても単体での強度推定に限界があることを確認した上で、含水率・強度の同時推定が可能な手法を開発した。さらに、②の成果に基づいてひずみ推定にも開発した ML 法を展開し、インピーダンスからひずみ推定が可能な解析手法も構築した。以下に実験・解析の結果例を示す。なお、メカニズム解明に関する実験結果は未公表のためここでは省略した。



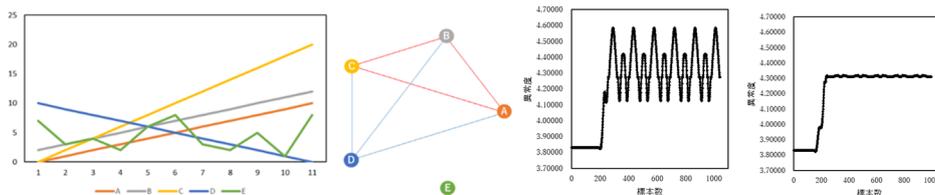
別科研成果との組み合わせによる等価回路法・lasso 法による強度・含水率同時推定の結果例 (左から、CPE 等価回路の適用, 等価回路法による強度推定, lasso による含水率推定)



ML 法の導入による材料物性変化を利用したひずみ推定

(5) スケールアップと多点化に関する実験・解析的検討

前述の研究項目 C の通り、実構造物のためのスケールアップ・多点計測に対応するために、異常検知のために、実験・解析的検討を行った。まず、電気化学計測手法の多点化については、申請計画の通りに多点化装置を導入して計測値を分析したが、多点化による高周波ノイズの顕著な上昇によって推定精度が低下することが判明した。そこで、アナライザの複数化による方法で実験を進めたため、大幅な多点化は難しかった。他方で、多点化対応の解析手法については、計測点間の相関異常に着目した手法を構築した。以下に解析結果の例を示す。



計測点間の相関異常を検知する手法の概念図 (左) と相関グラフ (中左)  
同一入力に対して設定を変えた異常度計算結果の例 (中右, 右)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 八木澤遥, 藤本郷史	4. 巻 Vol.44
2. 論文標題 色調制御により情報を保存するコンクリートの製造・施工法に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報システム・利用・技術シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 227-232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤本郷史	4. 巻 1
2. 論文標題 建築物のモニタリングと情報保管	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年度建築学会大会 情報システム部門 研究協議会資料	6. 最初と最後の頁 51-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤本郷史, 小口峻平	4. 巻 43
2. 論文標題 セメントペーストの電気化学的な含水率推定におけるlassoの適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報システム利用技術シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 502-507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小口峻平, 藤本郷史	4. 巻 42
2. 論文標題 CPEを含む等価回路モデルを用いたセメントペーストの電気化学的特性の分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 377-382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹内 瑞貴, 藤本 郷史
2. 発表標題 圧縮荷重下におけるモルタルの交流インピーダンス特性
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲島 夏彦, 藤本 郷史
2. 発表標題 交流インピーダンス計測に基づくモルタルの含水率・圧縮強度のスパース推定に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木澤 遥, 藤本 郷史
2. 発表標題 建築部材の時系列モニタリングデータへの応用を想定したグラフィカルlassoの特性に関する分析
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2021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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------