

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02218

研究課題名（和文）カーボンファイバセンサネットワークによる腐食および洗堀の早期検知システムの構築

研究課題名（英文）Development of early detection system for corrosion and scour using carbon fiber sensor network

研究代表者

呉 智深（Wu, Zhishen）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・特命研究員

研究者番号：00223438

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,030,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高耐久性ロングゲージカーボンファイバセンサおよび水中ワイヤレスセンシング技術を使用し、水中構造物におけるカーボンファイバセンサネットワークの開発によって、腐食および洗堀の早期検知システムの構築を行う。まず、一定の空間領域内での微小ひずみ応答ワイヤレスセンシング技術を開発する。また、動的ひずみ応答を用いたひずみモーダル解析手法による洗堀の同定手法の提案を行う。さらに、各損傷量の同定による更新した構造物のパラメータとひずみ測定による構造物の疲労程度評価の連成で総合的な水中構造物の評価システムを構築し、システムを実証する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の水中コンクリート構造物の点検・調査は、主に目視観察が中心であり、客観的な評価が不足していると考えられる。また、コア採取による調査は労力・コストが高く、広範囲の調査には不向きである。本研究では、水中で使用できる高耐久性のロングゲージひずみセンサを用いて、各領域のひずみ応答を計測し、構造物のたわみ、回転、ひび割れ、腐食、支承変状などを直接算定し、橋梁構造物の洗堀や腐食を早期に検知するシステムを構築した。さらに、自動ロボット打音装置を開発し、AIを活用してコンクリート構造物の欠陥を検出し、コンクリートの表面欠陥や内部および深い欠陥を正確に検出し、評価することが可能であることが確認された。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a carbon fiber sensor network in underwater structures using highly durable long-gauge carbon fiber sensors and underwater wireless sensing technology to establish an early detection system for corrosion and scouring. Firstly, we will develop wireless sensing technology for detecting small strain responses within a defined spatial area. Additionally, we will propose an identification method for scouring based on strain modal analysis using dynamic strain responses. Furthermore, we will construct a comprehensive evaluation system for underwater structures by coupling the updated structural parameters obtained from damage identification with fatigue assessment based on strain measurements. Finally, we will demonstrate the system's capabilities.

研究分野：土木、維持管理、光ファイバセンシング

キーワード：ロングゲージカーボンファイバセンサ ひずみモーダル解析 腐食同定 洗堀同定

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、既設構造物のアセットマネジメントを行う場合、適切な点検・調査を行い、その現状を把握しなければならない。大半の水中にあるコンクリート構造物の点検・調査について、潜水土による目視観察が中心で、客観的な評価が成されていないものと考えられる。また、コンクリートコアを採取し、調査を行う方法も考えられるが、労力・コストともに負担が大きく、広範囲を対象とした調査ができないことも考えられる。特に本研究では、水中構造物の劣化や局所的な橋脚基礎地盤の洗堀が発生した被害例が数多く報告され、現存の施設状況を正確に把握することが重要とされている現状から、水中構造物の様々な早期損傷の検知手法を提案する。

水中構造物の劣化予測や予防保全型維持管理技術を高度化させることが望まれ、構造ヘルスマニタリング (SHM) の活用に対する期待が大きい。また、モニタリングシステムにより構造物の各種性能を総合評価することと、余寿命を予測することの実現が強く求められている。しかし、個別の要素技術が多数提案される一方で、実務に活用されるものは少なく、疲労・鉄筋腐食などの各種劣化状態を総合的に評価するためには様々なセンサ技術を組み合わせる必要がある。さらに、各種センサの耐久性はモニタリングシステムの信頼性を左右するが、水中測定システムも未だに解決されていないという現状である。

### 2. 研究の目的

以上のことを踏まえて本研究では、独自開発した耐食性といった優れた特徴を有するロングゲージカーボンファイバセンサを用いて、水中構造物の各エリアの静・動的ひずみ応答を計測できる水中用カーボンファイバセンサを作製し、また、水中と陸上の各センサのデータを計測する分布型ワイヤレスセンシング技術の開発を行い、水中構造物に対するセンシングシステムを創出することを目的とする。カーボンファイバは導電性を有しており、約 20 年前からカーボンファイバ材料の圧電効果や内部損傷による電気抵抗の変化を以て関連のひずみ計測や損傷検知を図ることが発想され、国内外において研究が行われるようになった。しかし、圧電効果による電気抵抗変化の微弱さやファイバの離散特性による線形性の欠如、温度や湿度の影響など、様々な問題が散在しており、定量的なセンシング性状が得られずに研究開発が頓挫してしまうのが現状である。研究代表者らは先駆して研究を進め、最新の研究成果において、カーボンファイバセンサの定量的計測に関する本質的な進展が得られるようになった。具体的には、カーボンファイバの離散特性を反映する代表長さ (50cm 以上) を確保したうえで、ある一定の長さ以上としたときに、電気抵抗の変化とひずみの相関関係は安定的な線形性を有することを突き止めた。

本研究の水中用カーボンファイバセンサでは、優れた耐久性を有するカーボンファイバを用いるため、従来の技術に比べ耐久性・施工性において優位性がある。また、センサや測定器の優位性に加え、研究代表者らにより提唱されたエリア分布センシング技術を基に、水中用カーボンファイバセンサによる各エリアのひずみ応答を高精度に計測し、構造物のたわみ、回転、ひび割れ、腐食や支承変状、および各種動的特性を直接算定するとともに、水中構造物の各部材から川床までの性能全般や健全性の評価を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究を細分化すると、下記の三項目に分類される。

#### (1) 水中用カーボンファイバセンサネットワークを開発する

1 年目は、早期損傷検知の精度や構造性能の評価を実用レベルに高めることを目的として、今まで考案してきたカーボンファイバセンサの性能と水中への適性を高める。具体的にはカーボンファイバのひずみ計測の直線性の代表長さを配慮したロングゲージ手法や高応力緊張を用いた精度・測定範囲向上手法、すべり止めとなる固定部の構造的な工夫により、線状・平面状・立体状の様々な形状の自己感知材料を製作する。また、水中構造物の微小振動の計測に対して、センサの防水化・長寿命化 (計測性能: 精度 0.5  $\mu$ 、サンプリング周波数 5KHz、長期性能: 精度 3  $\mu$  以下、使用寿命 50 年以上) が必要である。本研究では、防水性と高伸度を有する繊維とカーボンファイバセンサを一体成型しているため、構造物の水中部分や水上部分に関わらず自由に設置することができる。

一方、水中構造物において、複数個のセンサにより連続点計測するために、水中での完全な防水・水密性の確保と陸上とのデータ通信の確保が可能な測定、通信デバイスが必要である。そのため、今まで研究代表者らが使ってきた小型計測モジュールを改良する。そして、水中と空気中での通信が可能な RF 波水中無線ユニットを増設することで、水中分布型ネットワークを構築する。具体的には、水中用カーボンファイバセンサを橋梁基礎の最も損傷が出現し易い箇所に設置し、改良した無線ユニットによりひずみ応答データを計測し、水面浮体型通信コネクタにより分散した各無線ユニットのデータを収集する。

#### (2) 動的ひずみ応答による早期段階の腐食および洗堀の同定手法を開発する

2 年目は、まず、水中用カーボンファイバセンサにより取得した静・動的ひずみの分布応答によ

る構造物の内部応力、たわみ、回転変形、荷重、固有周波数および振動モード形などの物理量の同定手法を構築する。そして、構造解析による各物理量と腐食損傷の関係を検討した上、腐食量の同定手法を構築する。また、川床の洗堀において、河道掘削および増水により構造物の基礎条件が変わることに伴い、橋脚の振動モードが変わることが知られている。そこで、本研究では、従来検査困難である早期の洗堀を検知するため、動的ひずみ応答によるモーダルアナリシス手法を構築し、局所的な損傷に敏感なひずみ振動モードによる洗堀量の同定手法を構築する。更に、各損傷量の同定による構造物の物理モデルのパラメータを更新し、ひずみ応答から捉えた交通・風・波・地震の頻度などの構造物の載荷情報を併用して疲労程度を評価する。(研究項目(2)の解析フローは図-1に示す)

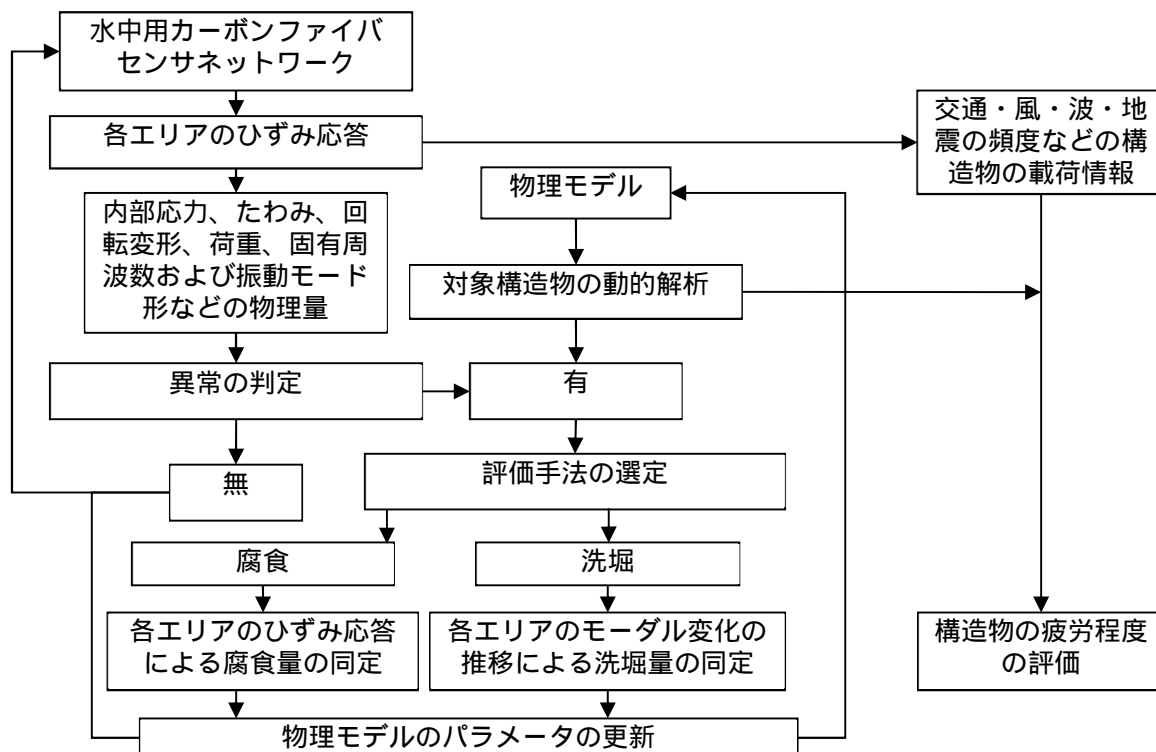


図-1 解析フロー

また、研究項目(1)で開発したセンサおよび測定装置の計測性能と耐久性を究明するために、腐食試験用の鉄筋コンクリート梁供試体を作製する。腐食過程を5段階とし、それぞれの供試体の促進腐食試験を行い、取得した動的ひずみ応答から鉄筋断面の減少量の検知精度を検証する。加えて、橋脚供試体を深さ1~2mの土砂基礎に敷設し、3レベル以上の洗堀量を考慮した模型実験を行い、橋脚のひずみ分布計測によるひずみモードの変化の推移から洗堀深さおよび腐食・洗堀の複合作用の検知を検証する。その後、起振器で橋脚供試体に振動を与え、疲労程度に関する評価を行う。

### (3) 構造物の水中部分や水上部分のひずみ分布による構造物健全性を評価する

3年目は、研究項目(1)と(2)の完遂とともに、開発したセンサ、装置、そして早期損傷検知アルゴリズムを基に、総合的な早期損傷検知システムを構築する。そのために、開発したシステムを国内外の河川橋梁に実装し、早期損傷検知システムの検証を行う。(研究の進め方を図-2に示す)具体的には、水流および日常車両通行時に各センサから得られる動的ひずみ情報を構築した損傷検知システムに適用し、環境ノイズ等の影響を検討し、システムの実用性を検討する。そして、水中用カーボンファイバセンサの分布計測を用いた、静・動的マクロひずみ応答に基づく構造物の各種応答物理量の算定手法を活用した、インフラ構造物の供用時から終局限界に至るまでの各種性能を評価できる健全性総合評価システムの構築を行う。

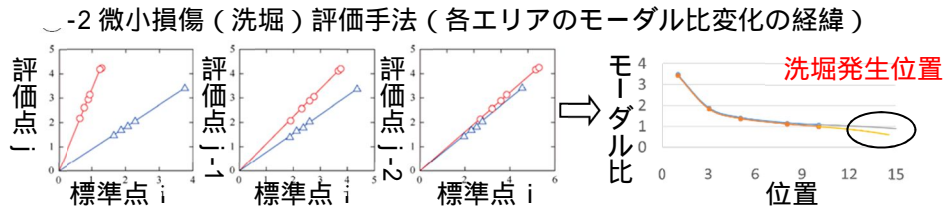
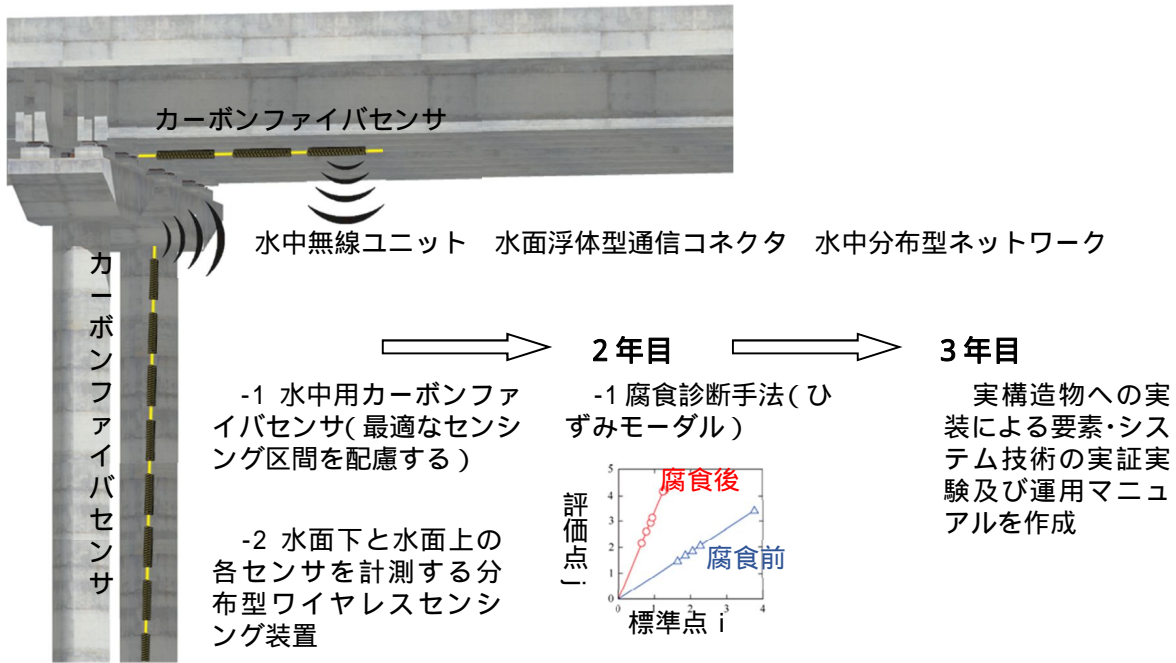


図-2 健全性モニタリングシステム

#### 4. 研究成果

本研究では、水中用高耐久性ロングゲージひずみセンサによる各領域のひずみ応答を計測し、静・動的分布ひずみを用いて構造物のたわみや回転、ひび割れや腐食、支承変状、および各種動的特性を直接算定するとともに、橋梁構造物の洗堀および腐食の早期検知システムを構築した。1. 微小ひずみ応答を測定できるカーボンファイバセンサの実製作・性能究明および実用性を検討した。カーボンファイバセンサとワイヤレスモジュールを組み合わせてひずみ等の物理量を計測できる限界通信距離は約 50 m であった。2. 構造解析による洗堀や腐食などの損傷と構造物の振動特性の関連性を確立した上、動的ひずみ応答を用いたひずみモデル解析手法による各段階の損傷の同定手法を提案した。構造解析からひずみ応答を算出し、そのひずみからひずみ分布と変位、回転角を算出することができた。3. 開発したセンサ、装置、検知アルゴリズムを基に、実構造物の損傷評価法の検証を進めた。構造解析から算出したこれらの値とカーボンファイバセンサが計測したひずみとひずみから算出した変位と回転角を比較することによって構造物の健全性を評価できると考える。さらに、自動ロボット打音装置を開発し、AI を用いてコンクリート構造物の欠陥を検出し、検査精度を向上させる自動検査手法を提案する。提案された手法でコンクリートの表面欠陥(ひび割れ)、内部および深い欠陥(デラミネーション)を検出し、正確な評価を行う能力を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Hussein Ahmed, Huang Huang, Okuno Yuki, Wu Zhishen	4. 巻 302
2. 論文標題 Experimental and numerical parametric study on flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid combinations of steel and BFRP bars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 116230 ~ 116230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2022.116230	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 Wu Zhishen, Huang Xi, Huang Huang	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of an automated hammer testing system for concrete structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJSMSS.2023.10053447	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 Alhebrawi Mohamad Najib, Huang Huang, Wu Zhishen	4. 巻 13
2. 論文標題 Artificial intelligence enhanced automatic identification for concrete cracks using acoustic impact hammer testing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Civil Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 469 ~ 484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13349-022-00651-8	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Huang Huang, Wu Zhishen
2. 発表標題 マクロひずみモード解析による洗掘検知に関する研究
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hussein Ahmed、Huang Huang、Wu Zhishen
2. 発表標題 INVESTIGATION ON FLEXURAL BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH HYBRID FRP-STEEL BARS
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
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
研究分担者	車谷 麻緒  (Kurumatani Mao)  (20552392)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授   (12101)	
研究分担者	原田 隆郎  (Harada Takao)  (00241745)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授   (12101)	
研究分担者	岩下 健太郎  (Iwashita Kentaro)  (30544738)	名城大学・理工学部・准教授   (33919)	

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
---------	---------