

# 茨城大学重点研究

「知的で持続可能な社会基盤及び防災セキュリティ技術研究創出事業」

## 茨城大学工学部附属 防災セキュリティ技術教育研究センター

2018年度  
報告書

茨城大学教育研究センター成果報告書「防災セキュリティ技術教育研究センター」  
平成 30 年度報告書刊行にあたって

プロジェクト代表 呉 智深

本研究の課題は、いままでに認定された茨城大学重点研究課題の活動を継続し、平成 28 年 4 月に課題募集プロポーザルとその審査により工学部附属教育研究センターとして認定され、工学部および茨城大学センター教員から構成される異分野研究者の集う場として活動を再出発しました。

この報告書では、「知的で持続可能な社会基盤および防災セキュリティ技術」という学際領域に類するテーマに沿って、学術誌論文をはじめとする研究成果に加えて、参加メンバーの学術企画の開催や参加、プロジェクト実績についても整理しました。

本プロジェクトは今までの活動を継続し、より高度化を図ります。21 世紀の地球社会は、自然災害、環境問題、資源・エネルギー制約といった地球規模の問題に直面します。このような中において、都市・交通・エネルギーなどの各種インフラストラクチャや宇宙・海洋開発に対する要求は、①インフラの強靱化や高寿命化、②環境負荷低減・循環型社会への適応、③自然との共生など際限ないものとなっており、これに対する解の一つとして各種インフラシステムのスマート化(知能化やインテリジェント化)が重要視されています。また、「教育と研究」双方の分野を対象として着実に成果を重ねつつあり、今後ますますの発展に向けて鋭意努力してゆく所存であります。

末筆とはなりますが、茨城大学工学部附属教育研究センターとして採択頂き、茨城大学関係者方に心から感謝申し上げますとともに、茨城大学を代表する研究課題の一つとして諸方面の応援と援助を頂きました。また、必ずしも十分でなかった研究交流にも関わらず、本誌に示す多大なる研究成果を上げている参加メンバーにも心から敬意と謝意を表します。

今後の研究活動への努力をお約束し、ここに平成 30 年度の研究成果を報告させていただきます。

平成 31 年 3 月 吉日  
呉 智深

「防災セキュリティ技術教育研究センター」  
プロジェクト参加教員

- 1) 知的社会基盤及び防災セキュリティシステムの構築  
主担当: 呉 智深(工学部・教授)
- 2) 社会基盤システムのエコデザイン及びライフサイクルデザインに関する研究  
主担当: 原田 隆郎(工学部・教授)
- 3) 社会基盤システムの自然災害と地域防災に関する研究  
主担当: 信岡 尚道(工学部・教授)
- 4) 社会基盤システムの劣化予測及び超高寿命化シミュレーション技術開発  
主担当: 車谷 麻緒(工学部・准教授)

メンバー

沼尾 達弥(工学部・教授)、小林 薫(工学部・教授)、今井 洋(工学部・教授)、羽淵 裕真(工学部・教授)、澁澤 進(工学部・教授)、武田 茂樹(工学部・教授)、外岡 秀行(工学部・教授)、湊 淳(工学部・教授)、横田 浩久(工学部・准教授)、平田 輝満(工学部・准教授)、成田 和彦(工学部・准教授)、石田 智行(工学部・講師)、辻村 壮平(工学部・講師)、井上 涼介(工学部・准教授)、黄 璜(工学部・外国人研究者)

## — 目次 —

### 1. 活動概要

— 1 —

### 2. 研究報告

1. Huang Huang, and Zhishen Wu :

“Monitoring and structural analysis of a rehabilitated box girder bridge based on long-gauge strain sensors.” Structural Health Monitoring 17.3 (2018): 586-597.

2. M. Kurumatani, Y. Soma, K. Terada, Simulations of cohesive fracture behavior of reinforced concrete by a fracture-mechanics-based damage model, Engineering Fracture Mechanics, 206, 392-407, (2019)

— 4 —

### 3. プロジェクト業績

1. 活動実績, 講演会資料等

— 16 —

2. 業績一覧

— 18 —

# 知的で持続可能な社会基盤および防災セキュリティ技術

## 防災セキュリティ技術教育研究センター

### 1. 研究の全体像

21世紀の地球社会は、自然災害、環境問題、資源・エネルギー制約といった地球規模の問題に直面する。このような中において、都市・交通・エネルギーなどの各種インフラストラクチャや宇宙・海洋開発に対する要求は、①インフラの強靱化や高寿命化、②環境負荷低減・循環型社会への適応、③自然との共生など際限ないものとなっており、これに対する解の一つとして各種インフラシステムのスマート化(知能化やインテリジェント化)が重要視されている。われわれは、このような要求に対して以下のように活動を行う。

【Mission 1】都市・交通・エネルギーなどの各種インフラストラクチャの設計、製造、維持管理、検査診断、長寿命化補強改造および防災減災に関するスマートな要素・システム技術を開発する。

【Mission 2】各種のスマートインフラ・セキュリティシステムを実現するための基礎技術であるスマートなセンサ・アクチュエータおよびそのネットワーク技術、電子・情報・通信技術、材料・構造技術およびシステム統合技術を創出する。

【Mission 3】学際や国際的な先進機関との緊密な連携により、スマート都市インフラ・セキュリティシステム工学の構築とR&D推進を促進する。

本年度の研究は、昨年の研究結果を踏まえ、上記に示す調査項目の枠組みに沿って実施した。

### 2. BFRP グリッドによる構造物の長寿命化に関する技術

#### 2.1. はじめに

既設の鉄筋コンクリート構造物の長寿命化と地震に対する安全性の確保は、今後の社会資本の維持管理において重要な課題である。最近では、軽量かつ高強度や耐腐食性

等に優れる連続繊維複合材(Fiber Reinforced Polymers:以下FRPとする)を用いる土木建築技術が次々と開発され、実構造物への適用も進んでいる。

FRPグリッドはカーボン、ガラス、バサルトなどの高性能連続強化繊維を樹脂に含浸させながら一体成型したFRP格子筋である。上記の研究はBFRPグリッドの付着強さに関する既往の評価式の適用性を検証することが目的である。結果として、BFRPグリッドとCFRPグリッドを用いた場合付着強さは同程度であることが実験的に示された。

そこで、本研究ではBFRPグリッドによるRC梁の補強効果を実験的に検討することが目的である。要するに、BFRPグリッドの付着試験を行い、付着強さをRC梁の性能への影響に関して評価し、解析による評価をまとめる。RC梁の下表面にBFRPグリッドを接着し、実験により構造物の曲げ性状を評価し、最終的にBFRPグリッドの適用によるRC梁の各性能向上を示した。そして、BFRPグリッドの厚さと使用した接着剤の種類によるRC梁の補強効果への影響を検討することである。

#### 2.2. BFRP グリッドの付着性能及び評価

構造物本体と補強材の付着性能は構造物全体の耐震性能に対し重要な指標である。異なる材料が共同して外力に抵抗するために材料間で応力が十分に伝達される必要がある。そのため、BFRPグリッドとコンクリート材料間で応力が十分に伝達される必要がある。そのため、BFRPグリッドとコンクリート材料間の付着性能を調べる必要がある。試験方法及び試験体の作製は、「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験(JSCE-E539)」を参考にした。

##### (1) 付着試験

鋼ボルトを事前に埋め込んだ直方体のコン

クリート塊 2 体を付け合わせる形で配置し、ポリマーセメントモルタルを用いて 2 体にまたがる形に BFRP グリッドを接着した試験体を作製した。BFRP グリッドは厚さ 3mm, 4mm, 5mm の BFRP グリッドを各 2 個用意した。試験体の作製手順としては、ダイヤモンドサンダーで表面を削り、エポキシプライマーを塗布する方法で表面処理を行い、12 時間経過後にポリマーセメントモルタル(以下 PCM とする)で BFRP グリッドを接着した。なお、BFRP グリッド 2 枚を実験体の左右両側を接着した。厚さにより 3 組を分けた、各ケースで 2 体の実験を行った。ポリマーセメントモルタルの打設後、14 日間の気中養生を行ったうえで引張試験を実施した。

## (2) 付着試験結果と分析

BFRP グリッドに関する荷重－変位関係を図 2-1 に示した。荷重をかけ始めてからしばらくは、変位がほとんど増加しない。これは、BFRP グリッドを接着しているポリマーセメントモルタルに 15mm 程度の厚みがあり、拘束力が働いたためと考えられる。その後、予亀裂近傍のポリマーセメントに亀裂が入ってからは、BFRP グリッドに直接的に荷重がかかるため、変位が急速に増加し始める。図 2 を示すように、5mm の BFRP グリッドの曲線の傾きは一番小さいことが確認できる、それは、5mm の BFRP グリッドが変位を抑制効果が良いと考える。

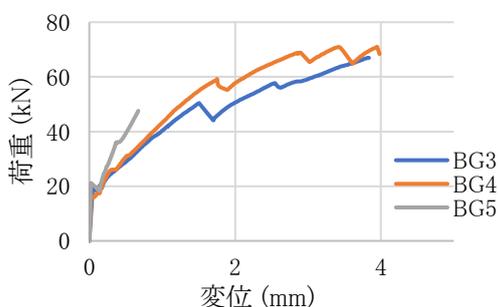


図 2-1 荷重－変位関係

## (3) 有限要素解析による付着性能の評価

付着性能について計算値と実験値を比較するため、有限要素法で付着試験のモデルを

作り、解析を行った。解析の結果を見ると、BG3 と BG4 の場合、実験結果と解析した結果は大体同じ挙動を示した。最後の剥離破壊荷重も同じ値に至ったことを確認したが、BG5 の場合に、実験値と解析値に大きな差異が出てきた。その原因について、BG5 の試験体を作ったとき、二つのコンクリートブロックを付け合わせる形で配置するため、それを組立したとき、二体のコンクリートブロックは真つすぐ配置しないため、それで、試験体を偏心が発生したから、試験ははじめからすぐに破壊するようになった。

連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針に示されている下記の式から求められる剥離破壊エネルギー  $G_f$  及び最大せん断応力  $\tau_y$  を付着強さの指標として、各種 FRP グリッドの付着強さの評価を行う。

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b^2 E_f t}$$

$$\tau_y = \Delta \epsilon_f E_f A_f / s_g / b$$

ここで、 $E_f$ : FRP グリッドの引張弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $b$ : FRP シートの幅 (mm),  $P_{\max}$ : 最大荷重 (N),  $t$ : FRP シートの厚さ (mm),  $\Delta \epsilon_f$ : ひずみ増加量,  $E_f$ : FRP シートの引張弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $A_f$ : FRP シートの断面積 (mm<sup>2</sup>),  $s_g$ : ひずみゲージの間隔 (mm) である。なお、上記式は FRP シートに関する式のため、FRP グリッドをシート形状に換算する必要があるが、過去の研究ではこの換算により FRP グリッドの付着強さをうまく評価できることが示されている。FRP シートの幅は FRP グリッドの格子間隔 50mm とし、FRP シートの厚さは断面積をシート換算幅で除したものとした。算定の結果は表 1 に示す。

表 1 剥離破壊エネルギー  $G_f$  (N/mm)

BFRP グリッドの種類	剥離破壊エネルギー $G_f$ (N/mm)
BG3	0.81
BG4	0.80
BG5	0.71

## 2.3.BFRP グリッドによる構造物の性能に関する評価

### (1) RC 梁の曲げ強度試験

RC 梁の下で BFRP グリッドを接触配置して、ポリマーセメントモルタルにより接着した補強された RC 構造物に関する 4 点載荷曲げ強度試験を行い、BFRP グリッドの補強効果を実験的に検討した。また、BFRP グリッドの厚さを補強された RC 梁の様々な性能への影響に関して評価し取りまとめる。試験体寸法は  $150 \times 300 \times 1800\text{mm}$  とし、試験体は全部 4 体を作製した、1 体は無補強試験体で、ほかの 3 体は補強試験体として対比試験を行った。ここで、BG3 は厚さ 3mm の BFRP グリッドにより補強されたはりとする、同じく、BG4、BG5 はそれぞれ厚さ 4mm と 5mm のグリッドにより補強されたはりとし、特に無補強はりは BG0 とする。支点位置は端から 100mm。せん断スパン長は 500mm、曲げスパン長は 600mm とした。

### (2) 試験結果及び評価

BFRP グリッドを接着することによる効果を示すため、各はりの載荷荷重－変位曲線を 1 つのグラフにまとめて図 2-2 に示す。ここで降伏荷重 ( $P_y$ ) は、荷重－変位関係の変曲点とした。降伏荷重は、無補強の 127.33kN に比べ補強供試体は 154～158kN と顕著に増加し、厚さが大きい方が若干高くなる (BG5 > BG4 > BG3)。

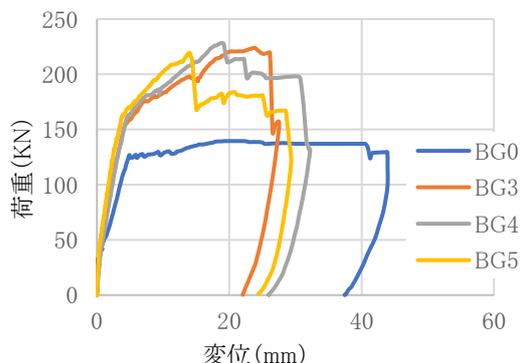


図 2-2 各梁の載荷荷重－変位曲線

補強供試体は全て補強材の剥離により終局に至った。各試験体の最大荷重は大きな差が見られないが、無補強試験体より 59%の

増加が確認できた。また、補強試験体鉄筋降伏以後の剛性および曲げ終局耐力は顕著に向上したことが見られた。これは、鉄筋と BFRP の引張強度および弾性係数があまりにも差があるためだと考えられる。そのため断面剛性に関しては鉄筋に依存し、応力負担に関しては BFRP グリッドに依存するため、鉄筋降伏以後は補強試験体の方が断然に高い剛性が維持でき、高い終局耐力に達成できたと考えられる。

鉄筋降伏後。各はり変位変化の速度は  $BG3 > BG4 > BG5$ 、これは 5mm の BFRP グリッドの厚さが高いから、繊維含有率が高い、はり全体の拘束効果が顕著であるため、変位の増加を抑制することである。だが、BG5 の試験体が一番早く曲げ終局耐力に至った原因は接着剤とする PCM の引張強度は限界があるため、限界を超えると、はりの耐力がすぐ落ちることである。

### (3) ひび割れ抑制効果の考察

図 2-3 のひび割れスケッチにより、BFRP グリッドによりひび割れの分散効果が十分に見られ、とくに BG4 と BG5 のひび割れ本数が多い、これはコンクリートと BFRP グリッド間の応力伝達が良いと分かった。各はりの側面の各位置のひずみの進展状況に関しては、側面 1～7 のひずみと載荷荷重の関係を評価した。全てのはりの側面のひずみは初期から増加している一方である。また、ひび割れ発生時点および鉄筋降伏時点では傾きが小さくなり、変形がより速くなる。一方、側面 (CON2～CON3) のひずみは、圧縮側にあるので、マイナスのひずみを生じ、鉄筋降伏後、圧縮ひずみが小さくなっていき傾きの向きがプラスの方向に変化しようとしたことが分かった。これは、中立軸が次代に上側へ進展し、鉄筋降伏後、CON2 へ近づいたためである。

無補強はりを除いて、補強はりの上面ひずみがコンクリート圧縮ひずみ限界より大きくなっていることにより、各はりの破壊型は曲げ破壊し、圧縮側のコンクリートが圧壊するまでになったと判断でき、実際の試験結果と一致した。これは、補強試験体は高引張強度を持ち

BFRP グリッドを下接触接着されたためである。引張側のコンクリートは、異常に過大なひずみ

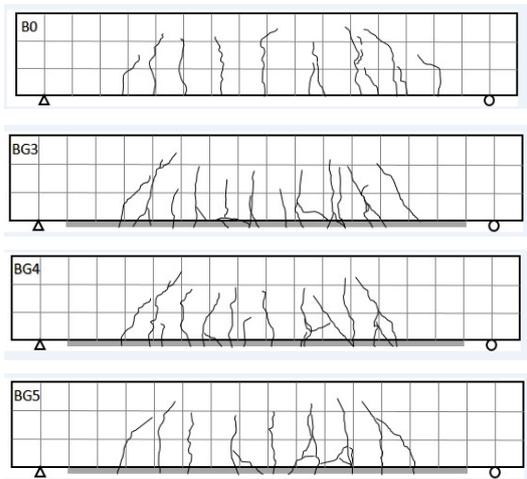


図 2-3 ひび割れスケッチ

みを生じたのは、はりの中央辺りにひび割れが発生されたひずみゲージがひび割れ開口とともに伸びていき過大な値を計測したためであると考え。

#### (4) 各接着剤の付着性能の考察

接着剤による BFRP グリッドの補強効果を検討するため PCM を代わりにエポキシパテを接着剤として BFRP グリッドを接着した。PCM で使う場合と同じ試験を行った。PCM とエポキシパテによる接着する方法 PCM の場合と比較するため試験体の寸法及び試験方法も同じく設置しておき、梁の下に BFRP グリッドの接着はエポキシパテを使用した。PCM による接着した試験体と比較するため、ここで、PCM の場合の各はりの荷重－変位曲線もまとめて示した。RC はりの荷重－変位関係図を示すように、BG3 の場合、PCM とパテによる補強試験体(以下 PCM はりとパテはりとする)の荷重－変位曲線は大体同じ挙動を示した。BG4 の場合で、鉄筋降伏および曲げ終局耐の優劣を比較することが目的である。PCM はりとパテはりはほぼ同じ挙動を示したが、曲げ終局耐力を超える場合、パテはりの耐力はすぐ落ちることが確認した。一方、PCM はりは曲げ終局耐力を超えた後、ある程度の耐力を持っていることが見られ、これは、パテより、PCM の弾性係数が高い、性質が柔らかいため、ひび割れの分散効果が十分に発揮する

ことである。BG5 の場合、鉄筋降伏前に、PCM はりとパテはりの挙動が一致していることが見られたが、降伏点を超えると、パテより PCM の変位の変化が穏やかになったのが確認した。そして曲げ終局耐力を見ると、PCM はりの曲げ終局耐力が 219.48kN である、パテはりより約 7%を増加することが分かったが、これは、PCM はりの耐力および剛性がパテはりよりある程度上昇することが分かった。

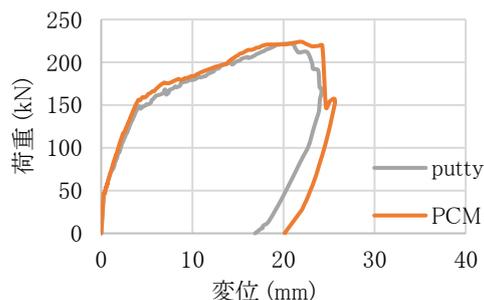


図 2-10 BG3 の中央荷重－変位の曲線

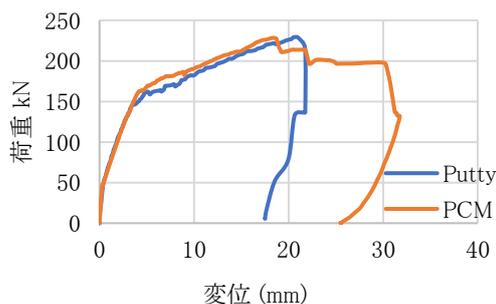


図 2-11 BG4 の中央荷重－変位の曲線

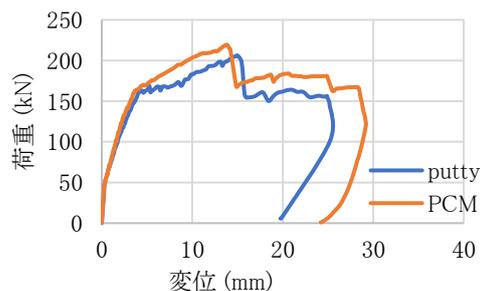


図 2-12 BG5 の中央荷重－変位の曲線

#### 2.4.結論

本研究で得られた成果が以下のように示した。

(1) BFRP グリッドを RC 梁下に接着することによって、梁の様々な性能向上を確認できたため、RC 梁の補強効果を十分に示したことである。

(2) BFRP グリッドの付着性能は、補強された梁の評価にとって非常に重要なものである。本研究では、厚さによって BFRP グリッドの付着強度及び破壊モードを実験的に検討した。

(3) RC はりの 4 点曲げ載荷試験に通じて、厚さ高い BFRP グリッドによる補強されたはりの降伏点は比較

(4) 接着剤の種類は、補強 RC はりへの影響を及ぼすことが確認した。結果として、エポキシパテより、PCMを使用した補強されたはりの曲げ耐力、ひずみ分散効果が優れることが検証した。まだ、実際施工あるいは便益の角度で、PCM は最適だと考えられる。

### 3. 光ファイバーセンサーによる道路橋の長期評価に関する研究

#### 3.1.はじめに

道路橋の一斉老朽化が問題視され、道路橋の安全性の確保が強く望まれている。近年、道路橋の中でも耐久性が高いと言われてきたプレストレストコンクリート(以下、PC)道路橋の損傷が多数報告されている。本来、PC 道路橋は通常の使用状態において主桁断面に引張応力の発生、すなわち曲げひび割れの発生を許容しない設計となっている。しかし、施工不良やコンクリートのクリープ・乾燥収縮による残存プレストレス量の減少によって設計時の性能を満足しない PC 道路橋が増加している。加えて、大型車両数の増加や車両重量の規制値引上げなどが合わさり、主桁にひび割れが発生した PC 道路橋が報告されている。このような PC 道路橋は、交通荷重を受けることでひび割れが開口し、除荷されると再び閉じるという現象が起こり得る。ひび割れの開口は、ひび割れが成長する原因や水分・塩化物イオン等の劣化因子が侵入する要因となり PC 道路橋の劣化を早める恐れがある。そのため、交通荷重による PC 道路橋のひび割れ等の損傷を早期に検知することが喫緊の課題となっている。現在、PC 道路橋の効率的な損傷検知手法として、各種センサーで構造物を常時監視して構造状態を把握する構造ヘルスマonitoring(以下、SHM)に関する研究が行われている。本研究室では、高精度な

分布計測を可能としたロングゲージ FBG センサを提案し、ひずみ計測技術及び性能評価に関する研究を進めてきた。しかし、実橋梁に対する損傷検知、健全性評価の実績は十分ではなく、より高度な健全性評価手法の構築が求められる。そのためには、ロングゲージ FBG センサのひずみ応答に道路橋の交通量、大型車両の割合等の日常交通実態に関する情報の統計データを組み合わせ、ひずみ応答特性を分析する必要がある。特に PC 道路橋のようにひび割れが発生してもプレストレスによって閉口するような場合、交通荷重の大小により応答に変化が生じる可能性があるため、交通情報が重要な要素になると考えられる。

そこで、本研究では損傷を有する PC 道路橋を対象に、ロングゲージ FBG センサで常時計測から得られた大型車両等の交通情報を考慮したモニタリングを試みる。そして、道路橋の交通情報を考慮したロングゲージ FBG センサの評価システムを構築するとともに、対象橋梁の損傷検知および健全性評価を行うことを目的とする。

#### 3.2.ロングゲージ FBG センサによる実橋梁の性能評価

センサー部と伝送路が 1 本の光ファイバで繋がっている FBG センサの特性を活かし、センサー部を含む任意の区間に張力を与えて端部を定着することで実質ゲージ長を拡張した 2)。これにより、接着区間に均一なひずみを生じさせ分布的な計測を可能とした。ロングゲージ化後も FBG センサと同様に高精度かつ高速な静的計測、動的計測が可能であると確認されている。反射波長帯が異なるロングゲージ FBG センサを直列に接続し、既存構造物に敷設することで全体の変状を効率的に捉えることができる。

図 3-1 に本研究の計測対象である対象橋梁 A を示す。対象橋梁 A は、新潟県に位置し、供用開始から 40 年経過した、橋長 300 m の 4 径間連続 PC 箱桁橋である。H21 年に第 1 径間の第 8 ブロックで PC ケーブルの破断が確認され、H23 年に外ケーブル補強工法

が施された。外ケーブルは、架替えまでの暫定対策であることを考慮して、破断しているケーブル断面積相当の本数としている。センサを敷設した第 1 径間における FBG センサの配置図を示す。橋台 A1 に近いセンサをセンサ①としてセンサ⑪まで敷設している。なお、センサのゲージ長は全て 1000 mm とした。

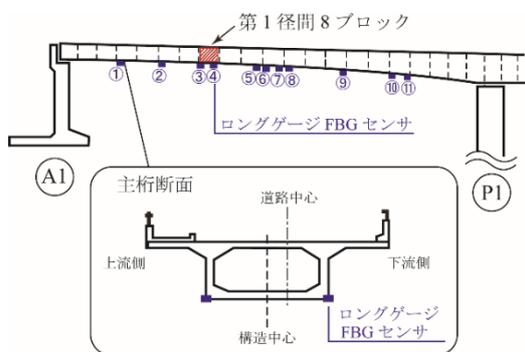


図 3-1 対象橋梁 A とロングゲージセンサ配置

### 3.3. 試験結果と経年推移

図 3-2 に上流側の静的載荷試験の結果と経年変化, 図 3-3 に動的載荷試験の結果と経年変化を示す。H23 年補強前の結果から補強後の H29 年までの結果を比較すると、ひずみの増加が確認できる。そのため、外ケーブル補強工法が十分に機能せずに構造性能の低下が懸念される。しかし、補強後は全てのセンサにおいて異常なひずみの増加は見られないため、構造状態は安定していると考えられる。計測の結果を見ると、静的載荷試験結果の特徴として、損傷がある第 8 ブロックに位置する FBG センサ④のひずみが③や⑤に比べて小さい値を示す傾向がある。一方で、図-4 の動的載荷試験では、センサ④が最も大きい値を示し、静的載荷試験と異なる挙動を示すことがわかる。そのため、交通荷重がある一定の大きさを越えた際にセンサ④の範囲で既存のひび割れが開口したと考

えられる。センサ④が位置する第 8 ブロックはひび割れと PC 鋼材の腐食が集中しているため剛性が低下しており、塑性ヒンジのような作用をしている可能性がある。この現象を以下、ヒンジ現象と呼ぶ。

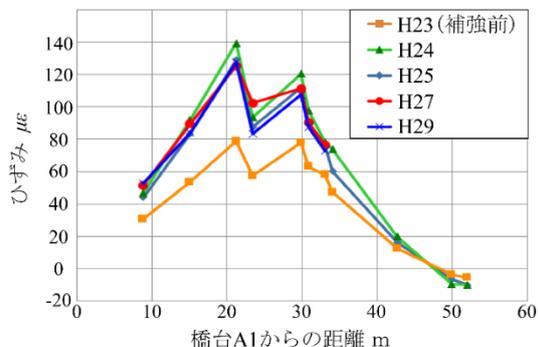


図 3-2 静的載荷試験の結果

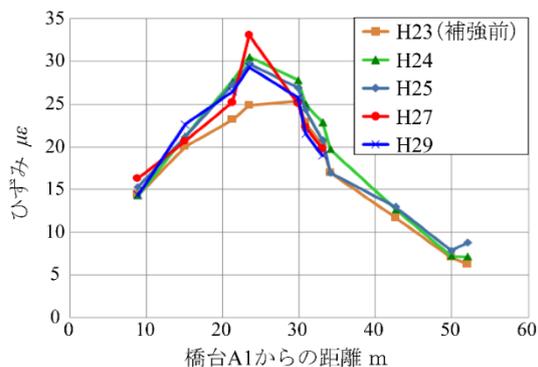


図 3-3 動的載荷試験の結果

### 3.4. ポイントひずみとロングゲージひずみの検証

計測対象において、FBG センサ④で計測されたひずみの低下現象を詳細に検証するため、主桁底面のひび割れとその周辺にゲージ長 60 mm のひずみゲージ(以下、SG)を図-5に示すように貼り付けた。上流側にはA1側のSGをSG1としてSG8まで100 mm 間隔で計 8 箇所貼り付け、下流側にはSG9からSG11まで計3箇所貼り付けて計測を行った。サンプリング周波数はFBG センサと同じ 100 Hz とした。図 3-1 に示すように、SG3とSG4の間、SG8の隣、SG9の箇所、SG11の箇所にはひび割れを確認している。図 3-4 に静的載荷試験, 図 3-5 に動的載荷試験の計測結果を示す。図中の点線はひび割れ位置を示

す。静的載荷試験より、上流側の SG1 から SG8 には突出した大きな値は検出されず、同位置の FBG センサ④と比較しても値が約  $60\mu\epsilon$  下回る。それに対して、主桁表面のひび割れにある SG9 と SG11 のひずみは同位置の FBG センサのひずみを大きく上回っている。上流側の FBG センサ④の位置に存在するひび割れも同様に FBG センサの計測値以上のひずみが生じていると考えられる。センサ④のひずみ低下現象はひび割れの開口により、ひび割れ近辺のひずみが解放されることが原因だと考えられる。次に、静的載荷試験では圧縮ひずみだった SG4 のひずみが動的載荷試験では引張ひずみとなっているのが見てとれる。そのため、SG3 と SG4 の間に生じているひび割れは交通荷重がある値を超えた際に変化すると言える。

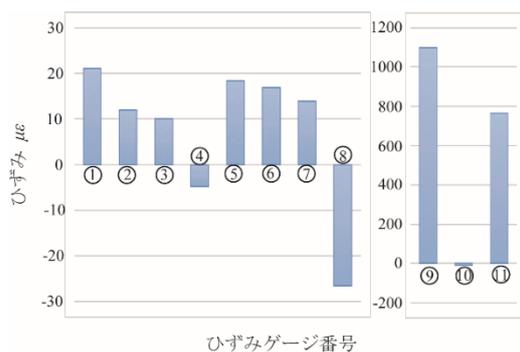


図 3-4 ひずみゲージの静的載荷結果(点線:ひび割れ)

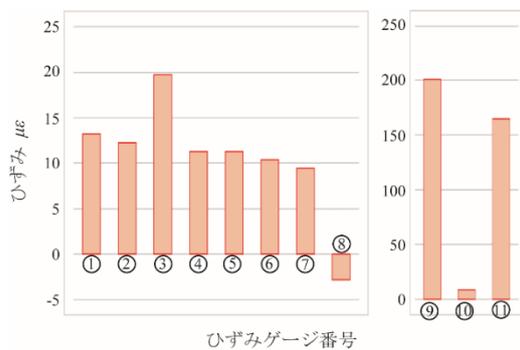


図 3-5 ひずみゲージの動的載荷結果(点線:ひび割れ)

### 3.5.既存損傷の評価

対象橋梁 A で計測されたひずみ振動のスペクトル解析によるモード値算出する原理を図 3-6 と図 3-7 に示す。

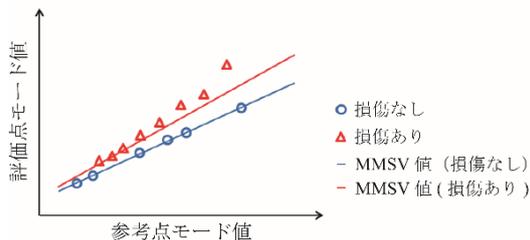


図 3-6 MMSV 解析のイメージ

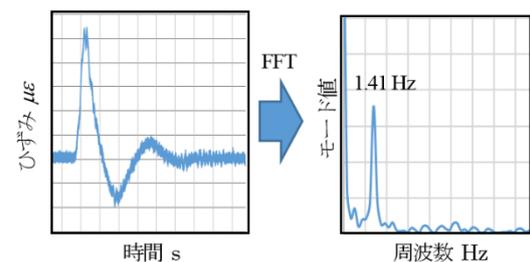


図 3-7 ひずみ振動とフーリエ・スペクトル

対象橋梁 A の実測結果において、1 次モード 1.41 Hz が得られた。本研究では、1.41 Hz のモード値で MMSV 解析を行うものとする。MMSV 解析の参考点としては FBG センサ⑥を選定した。本来、損傷発生確率を考えれば、センサ①、②、⑩、⑪を選択することが望ましいが、①と②はひずみ応答が弱い、⑩、⑪は断線等のセンサ異常によりデータが欠損している期間がありデータが不足しているという問題があったため参考点としなかった。なお、センサ⑥はひび割れ等の損傷は確認されていない。評価点は静的載荷試験時に  $100\mu\epsilon$  を超えるセンサ③と⑤、損傷が確認されている④とした。まず、静的載荷試験と動的載荷試験に見られるセンサ④のひずみの変化がモード比の変化として現れるかを確認し、MMSV 解析のヒンジ現象の検知性能を検証する。MMSV 解析の基準となる健全状態を、動的載荷試験と同等のひずみであるセンサの最大ひずみが  $40\mu\epsilon$  以下の交通荷重データとして、モード比をプロット後、近似直線を引いて初期値とした。そして、ヒンジ現象発生の可能性がある  $40\mu\epsilon$  以上を評価値として

MMSV 解析を行った。

図 3-8 を見ると、センサ③と⑤は交通荷重の大きさに関わらず、近似直線の傾きが一致している。それに対して、センサ④は  $40 \mu\epsilon$  以上の場合にはプロットおよび近似直線が初期値と比べて下回ることが確認できる。傾きが減少する原因としては、ひび割れが発生した面においてひび割れが開閉することにより、エネルギーが消費され振動が抑制されてモード値が減少したと考えられる。

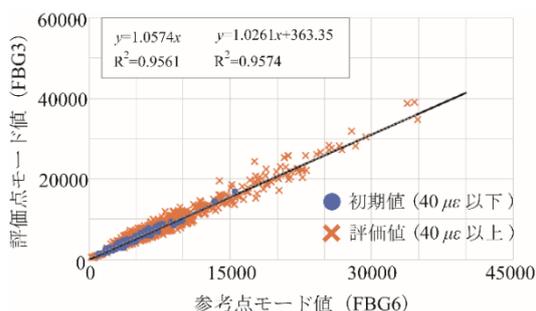


図 3-8 最大ひずみで分割した場合「 $40 \mu\epsilon$ 以下」の MMSV 解析結果

次に、対象橋梁 A においてひび割れの開口によるヒンジ現象が、どの程度のひずみが生じたときに発生するのかを確認するため、最大ひずみ  $40 \mu\epsilon$  以上のデータを  $\pm 10 \mu\epsilon$  毎に最大ひずみが「 $40 \mu\epsilon \sim 50 \mu\epsilon$  のデータ」、 「 $50 \mu\epsilon \sim 60 \mu\epsilon$  のデータ」というように分割してそれぞれで MMSV 解析を行った。そして、分割したデータのひずみが近似直線の傾きが変化するひずみ値を検証した。その結果、「 $60 \mu\epsilon \sim 70 \mu\epsilon$  のデータ」から傾きが変化し始め、 $100 \mu\epsilon$  以上のデータで傾きの変化率が最大となった。 $60 \mu\epsilon \sim 70 \mu\epsilon$  のデータと  $100 \mu\epsilon$  以上のデータを評価した結果を示す。

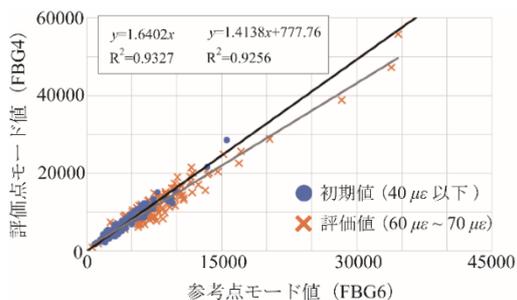


図 3-9 最大ひずみで分割した場合「 $60 \mu\epsilon \sim 70 \mu\epsilon$ 」の MMSV 解析結果

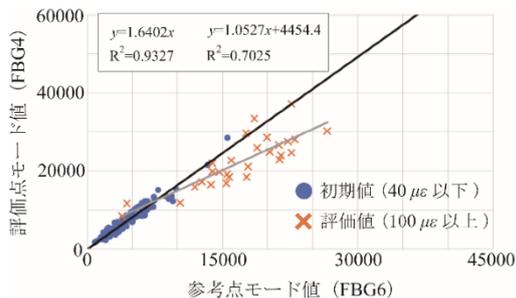


図 3-10 最大ひずみで分割した場合「 $100 \mu\epsilon$ 以上」の MMSV 解析結果

### 3.6.健全橋梁との比較

#### (1) 比較橋梁

また、茨城県にある道路橋を比較橋梁 B (健全)とした。供用後 50 年以上が経過しているが、損傷等の報告はなく、目視で確認できるひび割れもない。比較対象橋 B の桁底面に配置したセンサ位置を図 3-11 に示す。比較橋梁 B ではロングゲージ FBG センサと SG を配置し、健全状態ではどの程度計測値に差が生じるか確認する。また、交通荷重の大小によって MMSV 解析結果に変化が生じるかを検証する。

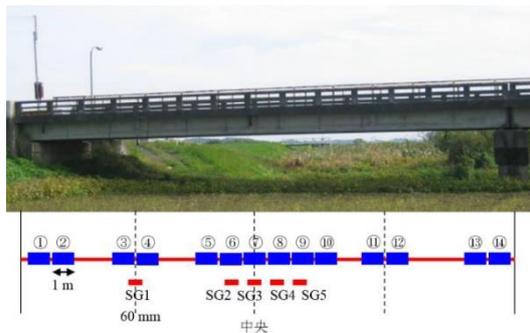


図 3-11 比較対象橋 B のセンサ配置 (桁底面)

#### (2) 検証結果

比較対象橋 B に車両が通行した際、同時刻に発生した FBG センサと SG のひずみの分布を図 3-12 に示す。FBG センサと SG の計測値が全ての地点において同程度であることがわかる。そのため、損傷がある場合のみ FBG センサと SG の計測値に差が生じるもの

と考えられる。次に、ひずみ応答値が最も大きく、損傷発生確率が高いスパン中央センサ⑦位置を MMSV 解析で評価した。FBG センサ①, ②は振動応答が弱いため、センサ③を参考点とした。MMSV 解析の結果を図 3-13 に示す。図 3-13 には、最小で  $10\mu\epsilon$ 、最大で  $129\mu\epsilon$  のひずみデータが含まれるが異常なプロットは確認できない。そのため、大型交通荷重による損傷は発生していないと判断できる。一般に、コンクリートのひび割れ発生ひずみは約  $100\mu\epsilon$ 程度と言われているが、対象橋梁 B は PC 鋼材のプレストレスにより主桁に圧縮ひずみが十分に働いているため、ひび割れが発生していないと考えられる。

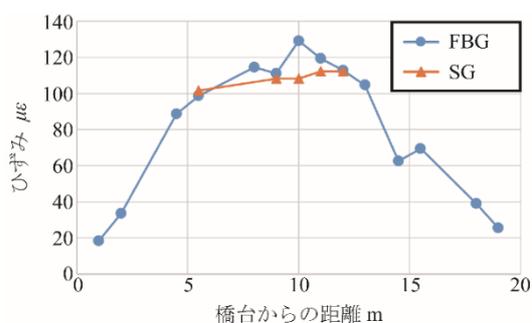


図 3-12 対象橋梁 B における FBG とひずみゲージの計測値

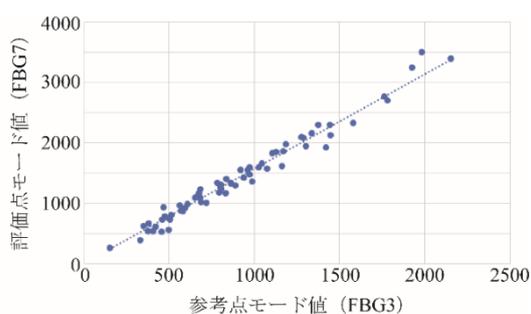


図 3-13 対象橋梁 B の MMSV 解析結果(評価点:センサ⑦)

### 3.7 結論

本研究では損傷を有する PC 道路橋を対象としてロングゲージ FBG センサで損傷検知および健全性評価を目的に、定期载荷試験および常時計測データの分析を行い、以下の知見を得た。

(1) 対象橋梁 A は、2011 年から行っている定

期载荷試験の経年変化より、安定した状態と判断できる。

(2) MMSV 解析の結果より、対象橋梁 A では最大  $60\mu\epsilon$ 以上のひずみが生じる際にヒンジ現象が発生する。

(3) PC 道路橋のようなひび割れがプレストレスの影響で開閉する場合、交通荷重の大きさによって、MMSV 解析の傾きが減少する可能性があることを示した。

## 4. ワイヤレスカーボンファイバセンサによる建築構造物の健全性モニタリングに関する研究

### 4.1 はじめに

インフラ長寿命化計画では 2030 年までに老朽化に起因する重要インフラの重大事故ゼロと国内の重要インフラ・老朽インフラの全てでセンサ・ロボット等の最新技術を活用し、コストを抑えながら安全性の向上、点検・補修の高度化することを目標として定めた 1)。このような状況から構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring: 以下 SHM) という技術が注目されている。SHM を適用する際の課題として計測する範囲が広いこと、計測機器を設置するスペースと電源を確保する必要があることなどが挙げられる。これらの課題を解決する手段として、常に通信を行わず、電池で複数年稼働可能で電源の確保が必要ないワイヤレス通信を用いて SHM をする手法の提案がされている。SHM とワイヤレス通信を組み合わせるとひずみなどを計測すると、センサとワイヤレス端末を接続するだけで計測可能であるため計測スペースの縮小化も可能になる。

既往の研究ではが耐久性・引張強度に優れているカーボンファイバのセンサ材としての優位性を検証し、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る静的計測試験を行いワイヤレス計測の正確性を確認した。しかし、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実際に構造物の計測を行っていない。そこで本研究では、カーボンファイバセンサを用いたワイヤレス計測手法の開発を目的に、カーボンファイバセンサを構造物に取り付け、ワイヤレスモジュール

を用いて計測を行った。

## 4.2 カーボンファイバセンサ

炭素繊維は導電性を有し、ひずみが生じると、電気抵抗が変化する。その変化から構造物に生じるひずみを把握することができる。炭素繊維束をエポキシ樹脂で含浸させ、電極として両端に導電性ペーストであるドータイトを塗布しセンサを作製した。作成した供試体を万能試験機で引張試験を行った。ひずみゲージの値をひずみの正しい計測値として参照する。

カーボンファイバ試験で計測したひずみ-時間関係を図 4-1 に示し 1 サイクル目の荷重増加時のカーボンファイバセンサとひずみゲージの測定結果を相対評価した(図 4-2)。実験で得られた値から結果を考察する。カーボンファイバセンサでのひずみ値とひずみゲージでのひずみの値は同じような値を示しており、決定係数 R<sup>2</sup> も 0.9997 を示しているので、カーボンファイバはセンシングセンサとして十分な精度を示した。

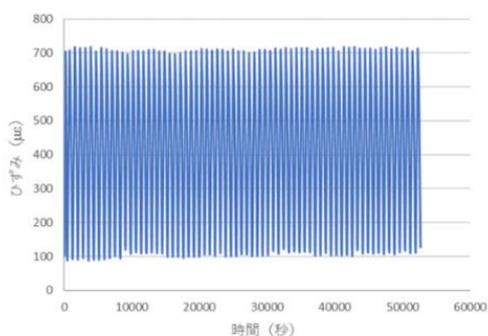


図 4-1 ひずみ-時間関係

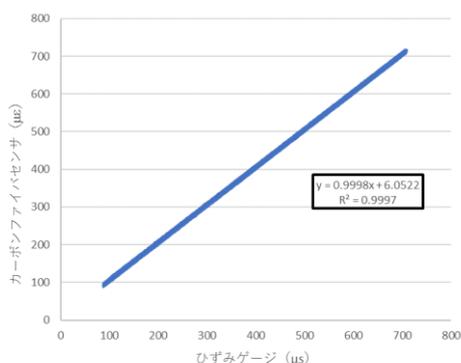


図 4-2 カーボンセンサとひずみゲージの相

対関係

## 4.3 ワイヤレス計測

### (1) 使用するワイヤレス端末

本研究で使用する端末は、モノワイヤレス株式会社製の TWELITE とする。小型で通信距離が 1 km、低消費電力という特徴をもつ。本研究ではモノワイヤレス株式会社製の TWELITE DIP をセンサ側に、TWELITE を USB 型にした MONOSTICK を PC と接続して計測を行う。

### (2) 性能試験

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構造物のひずみを計測するにあたって、無線で計測したひずみの通信距離の長さおよび正確性の検証を目的とする。供試体の片端を固定し自由端を振動させ、ひずみを TWELITE に繋げたカーボンファイバセンサによって離れた場所にある PC で計測し、供試体と無線でデータを受信する PC との距離を伸ばし続け、データを受信できる限界の距離を確認した。その後、通信距離が 0 m と限界通信距離の場所で供試体のひずみを有線をつないだひずみゲージと TWELITE に繋いだカーボンファイバセンサとひずみゲージで計測した。

PC が供試体のひずみを受信できた最大距離は約 50 m であった。TWELITE の通信距離は約 1 km とあったが今回の限界通信距離は約 50 m であった。その要因としては、TWELITE の周波数帯である 2.4 GHz 帯は様々な電子機器に用いられており、それらの電波により TWELITE の通信距離が著しく短くなったと考えられる。次に、通信距離 0 m と 50 m の時に有線で繋いだひずみゲージと TWELITE に繋いだひずみゲージとカーボンファイバセンサで計測したひずみを図 4-3、図 4-4 に示す。また、それぞれの距離での有線のひずみゲージと無線のカーボンファイバセンサを無線のひずみゲージを基準に比較した。通信距離 50 m でのカーボンファイバセンサと無線のひずみゲージの相対比較を見ると(図 4-5)、ばらつきが生じているため、正

確な通信は行えていない。

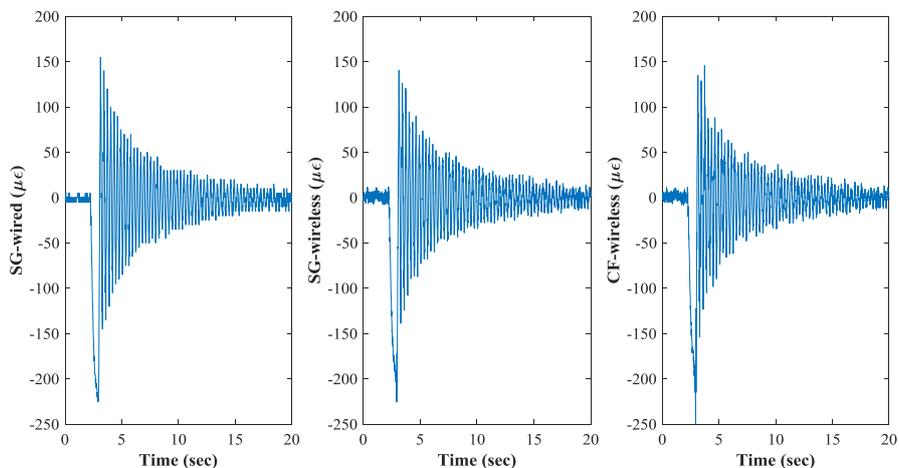


図 4-3 動的計測

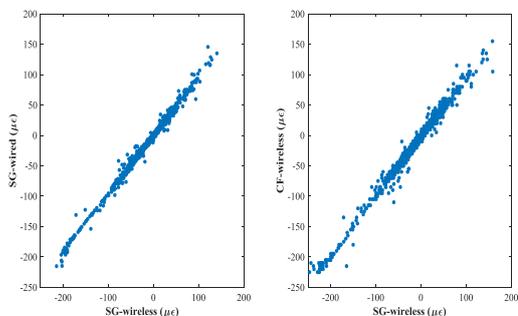


図 4-4 精度の比較

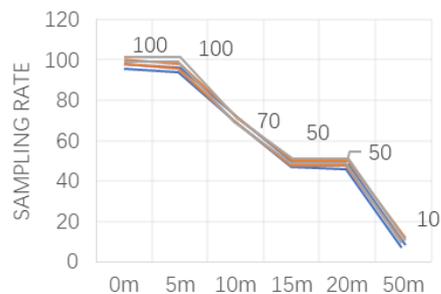


図 4-5 計測距離と最大サンプリング周波数

#### 4.4 既存構造物への適用

##### (1) 測定対象

本研究では、茨城大学工学部都市システム工学科 S3 棟を計測対象とする。カーボンファイバセンサの設置場所は、地震が発生した場合、S3 棟が振動する方向、ひずみは端部に発生しやすいこと、設置する際の安全性などを考慮し、S3 棟 1 階の海岸実験室の柱に設置した。カーボンファイバセンサは柱の上部と下部に 2 本ずつ連続で設置した。

計測システムについては、カーボンファイバセンサで計測したひずみを無線で計測用の PC に伝送し、インターネットなどを利用し記録用の PC に伝送できるシステムを構築した。設置場所及びシステムの構築図を図 4-6 に示す。

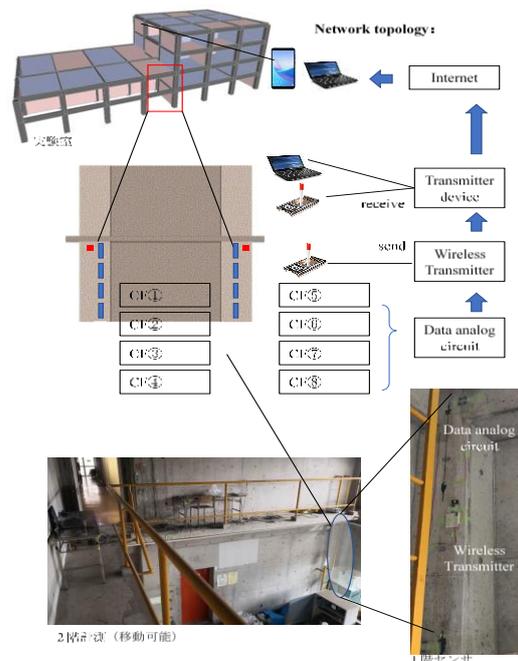


図 4-6 建築物のワイヤレスカーボンファイバセンシングシステムの構築図

## (2) 計測結果

カーボンファイバセンサ設置後、地震が起きずひずみを計測できなかったため、構造解析でカーボンファイバセンサ設置場所に生じると予想されるひずみと(図 4-7)、回転角と変位を算出した(図 4-8)。

地震が発生すると、提案したシステムでひずみを計測でき、変位と回転角を求めることができると思う。

## 4.5 結論

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た計測手法の提案をし、実際に構造物に取り付け計測することができた。今後は計測を続け、計測したひずみから構造物の健全性を評価することが必要である。

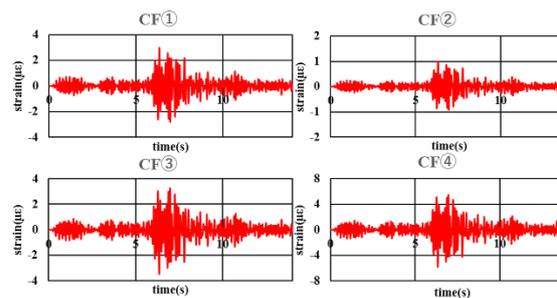


図 4-7 センサ設置場所のひずみ

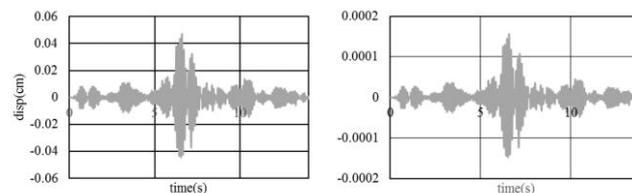


図 4-8 変位と回転角

## 活動実績

### 【実施概要】

- ・ センサ技術の開発  
光ファイバセンサ・カーボンファイバセンサ
- ・ センサ技術の検証
- ・ センサ技術の現地実証
- ・ 企業・自治体等の共同研究
- ・ 領域センシング技術によるインフラの長寿命化に関する研究会の発足と活動

### 【活動内容】

光ファイバセンシング振興協会主催の妙高大橋定例会にて協力者として発表を行った。

茨城県経営者協議会・他経済団体との茨城大学工学部研究室訪問交流会に紹介を行った。

企業・研究所との連携による、新潟県国道 18 号妙高大橋における光ファイバセンサ設置による橋梁健全性評価手法の実証実験を行った。

県内の企業・東京大学との連携による、内閣府 SIP プログラムの中で、JST 地域産学官共同研究の打ち合わせを行った。

構造ヘルスマニタリング及び知的社会基盤に関する国際会議にて領域センシング技術展示・成果 PR を行った。

国際学会 ISHMII を通じて、企業数社との連携によって光ファイバーセンサ搭載システム開発の打ち合わせを行った。

国際学会 ISHMII を通じて、カーボンセンサ及びワイヤレスコミュニケーションシステム開発の打ち合わせを行った。

県内の企業と東京大学連結し、共同研究のコアメンバ会議を行った。（地方大学・地域産業創生交付金申請）

中国長江に架設の超大橋(1000m 級)「蘇通大橋」,「潤陽大橋」を対象とした, 光ファイバーセンサとカーボンセンサの設置による安全性モニタリング技術の実証実験の打ち合わせを行った。(科研費申請)

その他, 外部資金, 共同研究, 外部プロジェクトに関連する会議はメンバー個々人が多数開催している。

### 【実施結果】

計画名: 社会基盤を対象とした維持管理・防災技術に関する研究

(1) 実施結果: 得られた成果、今後の課題など

(2) 資金獲得の結果: 申請・採択状況

・平成 30 年度研究推進経費「知的で持続可能な社会基盤及び防災セキュリティ技術研究創出事業」(500,000 円)

(3) 特筆すべき事項:

## 業績一覧

- ・和文,英文ともに MSP 明朝 10.5 ポイントでお願いします。
- ・余白は《記載例》にあるとおり,A4 サイズで左 2cm,右 1cm 取って下さい。
- ・カンマ,ピリオド,記号,英字,数字はすべて半角でお願いします。

### 【原著論文】

- 1) Huang, H., and **Wu, Z.**, Monitoring and structural analysis of a rehabilitated box girder bridge based on long-gauge strain sensors, *Structural Health Monitoring* **17**(3), 586–597, (2018)
- 2) Fouad, N., Saifeldeen, M. A., Huang, H., & **Wu, Z.**, Corrosion monitoring of flexural reinforced concrete members under service loads using distributed long-gauge carbon fiber sensors. *Structural Health Monitoring*, **17**(2), 379–394, (2018)
- 3) **M. Kurumatani**, Y. Soma, K. Terada, Simulations of cohesive fracture behavior of reinforced concrete by a fracture-mechanics-based damage model, *Engineering Fracture Mechanics*, 206, 392–407, (2019)
- 4) **車谷麻緒**, 会田涼太, 橋口和哉, 画像相関法による粗骨材周辺に発生・進展するひび割れの計測と可視化, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, 74, I\_295–I\_302, (2018)
- 5) 相馬悠人, **車谷麻緒**, 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料の破壊シミュレーション, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, 74, I\_233–I\_241, (2018)
- 6) **車谷麻緒**, 小塚祐輔, 橋口和哉, 佐々木浩武, 会田涼太, 加藤匠, DIC 計測と非線形 FEM による RC はりの変形・破壊挙動の定量的比較, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, 74, 107–116, (2018)
- 7) 大熊 千紗都, 岡崎 慎一郎, 吉田秀典, **車谷麻緒**, 破壊力学に基づく損傷モデルによる鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ進展解析, *土木学会論文集 B3(海洋開発)*, 74, I\_67–I\_72, (2018)
- 8) **車谷麻緒**, 佐々木 浩武, 3D プリンタを用いた鉄筋コンクリートに形成するひび割れの 3 次元可視化, *日本計算工学会論文集*, 2018, 20180008, (2018)
- 9) 池田直旺, 花立 麻衣子, 檜山和男, **車谷麻緒**, 吉永 崇, 前田勇司, SLAM 技術に基づく空間情報を用いた AR 可視化システムの構築とその適用性の検討, *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, 73, II\_48–II\_54, (2018)
- 10) **車谷麻緒**, 中野 葵, 渡辺ともみ, レベルセット関数を用いた形状評価によるコンクリート構造物のひび割れ自動計測, *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, 73, I\_29–I\_36, (2018)
- 11) **原田隆郎**, 金森豪, 桑島智明, 供用中の鋼製起伏堰を対象とした実用的な更新計画の検討, *土木学会構造工学論文集*, Vol.65A, 2019.3(掲載決定)

### 【国際会議論文】

- 1) N. Ikeda, K. Kashiyama, M. Hanadate, **M. Kurumatani**, T. Yoshinaga, Y. Maeda, An AR Visualization System for Numerical Simulations using Spatial Information based on SLAM, 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, (2018)
- 2) **M. Kurumatani**, Y. Koakutsu, K. Hashiguchi, Comparison of fracture behavior in concrete between FEM and DIC, 13th World Congress on Computational Mechanics, (2018)
- 3) Y. Soma, **M. Kurumatani**, Fracture Simulation Using a Damage Model Considering Contact and Frictional Sliding, 13th World Congress on Computational Mechanics}, (2018)

- 4) S. Okazaki, C. Okuma, H. Yoshida, **M. Kurumatani**, Simulation of crack propagation owing to deformed bar corrosion, 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, (2018)

【学会発表（国内、国際）】

- 1) 橋口和哉, 小坪祐輔, **車谷麻緒**, ステレオマッチングに基づく自作 3D-DIC 計測システムの構築に関する基礎的研究, 第 23 回計算工学講演会, 2018/6/6
- 2) **車谷麻緒**, 小坪祐輔, 橋口和哉, DIC と FEM による RC はりの破壊挙動の定量的比較, 第 23 回計算工学講演会, 2018/6/8
- 3) 相馬悠人, **車谷麻緒**, 損傷モデルによる接触や摩擦すべりを含むひび割れ進展挙動のシミュレーション, 第 23 回計算工学講演会, 2018/6/8
- 4) 会田涼太, 加藤 匠, **車谷麻緒**, 粗骨材による非均質性を考慮したコンクリートの破壊挙動の計測と数値解析, 第 23 回計算工学講演会, 2018/6/8
- 5) **車谷麻緒**, 小坪祐輔, 橋口和哉, DIC と FEM による RC はりの変形・破壊挙動の定量的比較, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018/8/30
- 6) 相馬悠人, **車谷麻緒**, 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料のひび割れ進展解析, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018/8/29
- 7) 加藤 匠, 佐々木浩武, **車谷麻緒**, 非均質性を考慮した損傷モデルによるコンクリートの 3 次元破壊シミュレーション, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018/8/29
- 8) 橋口和哉, 小坪祐輔, **車谷麻緒**, ステレオマッチングに基づく 3D-DIC 計測システムの構築に関する基礎的研究, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018/8/29

【受賞等】

- 1) 受賞者名:車谷准教授が, 受賞名:・応用力学論文賞,授与者: 土木学会 受賞日: 2018/5
- 2) 受賞者名: 会田涼太,加藤 匠,車谷麻緒, 受賞名: 第 23 回計算工学講演会グラフィクスアワード特別賞,授与者: 日本計算工学会, 受賞日: 2018/6/7

【地域貢献活動】

- 1) 呉 智深:工学部附属教育研究センター公開シンポジウム及び研究室訪問交流会(平成 30 年 11 月 27 日(火))の委員を務めた。本選ではデモ展示も行った。
- 2) 呉 智深:高校生インターンシップ(平成 30 年 12 月 5 日(水))に協力者を務めた。高校生との会談、大学生生活の紹介、デモ実験などを行った。

【競争的資金獲得】

1.申請した科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成 31 年度 基盤研究(B),「構造領域分布センサ技術による水中コンクリート構造物の早期損傷検知システムの構築」, 8,400 千円,2019 年度～2021 年度, 研究代表者:呉智深

2.採択された科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成 28～31 年度 基盤研究(C),「素地調整を省略した橋梁点検時の応急塗装手法の確立と地方自治体の中小橋梁への適用」, 4,810 千円,2016 年度～2019 年度, 研究代表者:原田隆郎

茨城大学重点研究

「知的で持続可能な社会基盤および防災セキュリティ技術研究創出事業」

茨城大学工学部附属防災セキュリティ技術教育研究センター

2018年度報告書

発行日 平成31年4月

発行者 茨城大学 工学部 都市システム工学科  
教授 呉 智深

〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1

Tel: 0294-38-5179 Fax: 0294-38-5268

※禁無断転載

茨城大学重点研究

<http://www.ibaraki.ac.jp/generalinfo/activity/researching/juuten/>

茨城大学工学部附属教育研究センター

<http://www.eng.ibaraki.ac.jp/research/centers/index.html>

防災セキュリティ技術教育研究センター

<http://www.ibaraki.ac.jp/research/centers/disaster/index.html>