

小型 IoT センサを活用した実橋梁における 構造ヘルスマニタリング

川崎 佑磨¹・井上 和真²・大川原 大智³・小西 優真⁴・山元 沙貴⁴
木暮 悠暁⁵・浅見 健斗⁶

¹正会員 立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
E-mail: yuma-k@fc.ritsumeai.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 群馬工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)
E-mail: inoue@cvi.gunma-ct.ac.jp

³学生会員 新潟大学 工学部社会基盤工学プログラム (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐二の町 8050)

⁴学生非会員 立命館大学 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

⁵学生非会員 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

⁶学生会員 群馬工業高等専門学校 専攻科環境工学専攻 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

本稿は、安価かつ小型の IoT センサを活用した実橋梁における構造ヘルスマニタリングに関する取り組みを報告するものである。モニタリングの対象橋梁は、RC 床版と 5 本鋼主桁を有する 2 径間連続桁橋であり、供用後 18 年が経過している。IoT センサは、シングルボードコンピュータである Raspberry Pi を中心として、カメラや距離計を有しており、データ通信端末である USB ドングルを使用してネットワークに接続可能であるとともに、ネットワークを介して遠隔操作が可能である。また、IoT センサは太陽光パネルの発電によって稼働することができるため、電源敷設工事などを行うことなく、重機などを用いずに人力のみで IoT センサの設置・稼働が可能である。この IoT センサを活用して、RC 床版下面のひび割れと積層ゴム支承のせん断変位の長期計測を行うが、本稿ではその実施計画について報告する。

Key Words: *IoT sensing, structural health monitoring, reinforced concrete slab, laminated rubber bearing, Raspberry Pi*

1. はじめに

我が国では、南海トラフ地震、首都直下地震などの大型地震が高い確率で近い将来発生することが予測されている。情報化が発達して交通・電力等ライフラインに極度に依存した大都市と、高齢化・人口減少が進む地方があるが、どちらも大地震に対して脆弱である。地震防災の観点から、社会基盤構造物の果たす役割は大きく、可能な限りの被害最小化と災害発生時の迅速な事後対応への備えが求められている。地震後に橋梁が通行可能か、早期交通開放をするためには、被災度の迅速な判定技術も必要である。近年、センサ、ICT 技術などの発達に伴ってモニタリング技術の活用が期待されている。このような技術を利活用して地震災害軽減を目指すために、土木学会地震工学委員会に「地震災害軽減のためのダメージフリー構造技術に関する調査研究小委員会」が 2020

年 4 月に設立された。小委員会の WG3「モニタリングや地震後の診断技術に関する WG」では、ダメージフリーであることをモニタリングで評価可能か、を大きな課題として取り上げており、その一環として IoT センシングによる実橋のモニタリングに関する基礎的検討を進めてきた。

IoT センシングによるモニタリング対象橋梁として、高度かつ高価なモニタリングシステムの導入が難しい地方の林道橋を選定した。地震前の状態把握、地震中の各部材の挙動、地震後の被災度判定が可能なシステムを目標として検討を進めている。実橋梁のモニタリング開始は 2022 年 9 月 21 日を予定しており、本報告では、IoT センシング技術の実例や既往研究のレビューと著者らが適用する IoT センシングの概要について報告する。

2. 実橋を対象とした IoT センシングの概要

(1) 既往研究のレビューと本研究の位置付け

土木、建築あるいは地震工学分野においても従来技術の IoT 化に関する研究が多くなされている。長谷川らは、市販の地震計 (CV-374AV) に Raspberry Pi を接続し、計測データをデータ収集サーバまでインターネット経由で転送する事例を示した¹⁾。Zuo らは、Raspberry Pi と高精度レーザー変位計を AD 変換モジュールで接続した橋梁支承の変位モニタリング手法を開発し、実橋梁に対して交通荷重載荷時の支承変位の計測を実施した²⁾。涌井らは、MEMS 型加速度計を取り付けた基盤を Raspberry Pi と接続したシステムで加速度計測およびデータ取得を行い、加速度計測による屋根雪荷重の推定を実施した³⁾。これらの先行研究のように、Raspberry Pi のようなシングルボードコンピュータを計測システムに活用を行う事例が増えるとともに、現地で取得したデータは通信を介して、クラウドやサーバに保存でき、より容易に計測データにアクセスすることが可能となった。

小野寺らは地震後の支承部の被害調査の迅速化ならびに早期運転再開を支援する目的で、LoRaWAN 通信と LTE・3G 通信を活用した小型変位センサを開発した⁴⁾。

本稿の著者のうち、大川原・井上らは、豪雨時に対する河川状況の把握とその情報発信や構造物の維持管理を目的として、太陽光パネルによる発電によって稼働する IoT センサを開発した⁵⁾。また、供用後に撤去した RC 床版を対象に、IoT センサによるひび割れ撮影実験を実施し、構造物の維持管理への活用実現性を示した。

本稿では、大川原・井上らが開発した IoT センサを実橋梁の構造ヘルスマニタリングに活用し、その計画について報告する。

(2) IoT センサによる実橋梁の構造ヘルスマニタリングシステムの設計思想

本稿の IoT センシングによる構造ヘルスマニタリングシステムの設計思想として、「日本各地どこにでもあるような橋梁」に適用することとし、長大橋のような特殊橋梁は対象としないこととした。また、電源敷設工事や基礎工事などの大掛かりな工事を必要とせずに IoT センサを供用中の橋梁に設置することを基本としている。

採用する IoT センサは、シングルボードコンピュータである Raspberry Pi を基本とする。Raspberry Pi の特徴として、一般的なパソコンと比べ安価であること、micro SD カードに OS や各種データを格納するためシステム変更が容易なこと、多くのインターフェースによるカメラやスクリーンなど多くの機器と接続可能なことなどが挙げられる。また、インターネットに接続可能なコンピュータとのことであり、遠隔によりモニタリングに必要なプ

ログラミングを書きかえることもでき、計測間隔などを必要に応じて遠隔で操作することで変更が可能である。

IoT センサの電源供給システムは、太陽光パネルで発電した電気を鉛蓄電池に蓄え、IoT センサに電源を供給するシステムである。

実橋を対象とした IoT センサは屋外で活用するため、大雨や強風、猛暑など天候や鳥などの動物に対して、堅牢なケースが必要となる。その一方で、Raspberry Pi から発熱される熱の排熱や湿気対策もケースに施す必要がある。IoT センサの構成例として、Raspberry Pi 4 に距離センサ (LiDAR)、カメラモジュール、AD 変換器、通信用 USB ドングルを接続したセンサー一式を写真-1 に示す。写真-1 には掲載していないが、AD 変換器はブレッドボード等を介してひずみゲージを接続することができる。



写真-1 IoT センサの構成例

3. 計測対象橋梁の現状

(1) 計測対象橋梁の概要

対象とする橋梁は、群馬県下仁田町が管理する A 橋で、2004 年に竣工された供用 18 年の 5 本の鋼桁と RC 床版を有する 2 径間連続橋である。A 橋の諸元を表-1、橋面上の写真を写真-2、全景を写真-3、主桁配置を図-1 に示す。起点側の拡幅部は幹線道路 (国道) との接続部になり、A 橋の A2 橋台側に製材会社がある。そのため、長い木材を積んだ大型トラックが進入できるように設けられたものであり、進入路である A1 橋台側は拡幅された構造となっている。通行量は、比較的重量の大きなトラックが 1 日に複数回往来し、一般車両は終点側の山間部に居住する住民や農作業者が往来するため、比較的穏やかな交通量である。また、下仁田町役場が発行する防災マップでは、自然災害などで避難する際に必要な橋梁に指定されている。また、A 橋の下には、一級河川の鑄川が流れる。鑄川は、2019 年台風 19 号の際には下仁田町内の水位観測所で氾濫危険水位に達するとともに、流域においては護岸流出が生じるなどの被害が生じた⁶⁾。

表-1 A橋の諸元

設計条件	
橋長	55.500m
桁長	55.300m
支間長	27.40+27.40m
道路区分	第3種第5級
活荷重	A活荷重
形式	2径間連続桁橋
支承・支持条件	天然ゴム系積層ゴム支承 A1・A2：可動，P1：固定
有効幅員	6.50~23.50m
斜格	90° 00' 00"
使用鋼材	耐候性鋼材 SMA400, SMA490Y
適用示方書	平成8年12月 道路橋示方書 同解説 平成8年7月 鋼道路橋設計ガイドライン(案)



写真-2 A橋の全景：橋面



写真-3 A橋の全景：側面

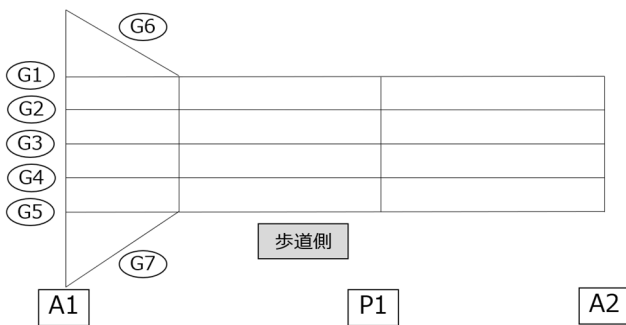


図-1 A橋の主桁配置図

(2) 対象橋梁の現状：外観・表面変状の有無

a) RC床版

本橋梁は片側（G5側）が歩道となっている。その歩道側のRC床版下面の外観を写真-4に示す。橋軸直角方向にひび割れ幅0.1mm程度のひび割れが複数確認でき、さらにそのひび割れから遊離石灰が析出している箇所も複数ある。一方で、車道側のRC床版下面は、いくつか橋軸直角方向のひび割れは確認できたが、遊離石灰は確認されなかった。前述の通り、木材を積載した大型トラックの通行による疲労の影響と考えられる。また、歩道側に傾斜をつけているため、雨水などが歩道側に集積されることなどから、橋面から床版下面へ水が浸透している可能性も否定できない。繰り返しの車両通行によってこのひび割れが進展していれば、維持管理だけではなく、自然災害発生時の橋梁の耐荷性にも影響を及ぼす可能性がある。したがって、車道側および歩道側のひび割れの挙動をπ型ひずみゲージで、ひび割れからの遊離石灰析出の様子をカメラでモニタリングすることにした。

b) 積層ゴム支承

A1橋台側のG3桁のゴム支承を写真-5に示す。外観では、オゾンや紫外線劣化による表面ひび割れもなく、残留ひずみも少なく、良好な状態である。本研究では、このゴム支承を対象にカメラモジュールを設置して、静止画像および動画をモニタリングで記録することにした。なお、ゴム支承には変位量が確認できるように、メジャーおよび蓄光テープを貼付した。温度変化に追従して変位しているか、仮に地震動を受けた場合、どの程度せん断変形したかを簡易的に記録するためである。



写真-4 A橋のRC床版下面の状況



写真5 A橋のA1側G3桁の積層ゴム支承の状況

4. IoT センサによる計測項目と計測方法

(1) IoT センサによる各構造部材の計測項目

A 橋の現地調査結果を踏まえ、IoT センシングにより長期計測を予定している項目の一覧を表-2 に示す。計測頻度について、通常時は1日あるいは1時間あたりに1データを基本として、豪雨時や地震時など必要な場合は計測頻度を短く設定変更する。設定変更は、遠隔操作できる。現地の状況に応じて、適宜変更を行う。

表-2 IoTセンシングによる計測項目

対象箇所	計測対象	データの取得方法	計測頻度	目的
RC床版	下面のひび割れ	写真(カメラ)	1枚/日	劣化・損傷の進展などの確認
		ひずみゲージ(π型)	1データ/時間	
積層ゴム支承	積層ゴム支承のせん断変位	写真(カメラ)	1枚/時間, 地震時は動画	1日および地震時の変位履歴
		ひずみゲージ(鋼材用)	1データ/時間	鋼桁の伸縮量の推定

(2) IoT センサの各構造部材の計測方法

a) RC 床版

RC 床版へのカメラモジュール設置の概要を図-2 に示す。鋼桁のフランジ部にアクリル板あるいは木板を橋渡しして万力にて固定する。カメラモジュールは防水対策をした上で、RC 床版下面を撮影できるように設置・固定する。RC 床版へのカメラモジュールおよびπ型ひずみゲージの設置は高所作業となるため、専門業者に設置を依頼する。

b) 積層ゴム支承

積層ゴム支承へのカメラモジュール設置の概要を写真-6 に示す。ゴム支承の橋軸方向の変位を撮影できる位

置にカメラモジュールを設置・固定する。積層ゴム支承およびゴム支承近傍の鋼桁へのひずみゲージ設置は、橋台から作業可能であるため、専門業者ではなく著者らが設置作業を行う予定である。



図-2 A橋のRC床版撮影用カメラの設置方法

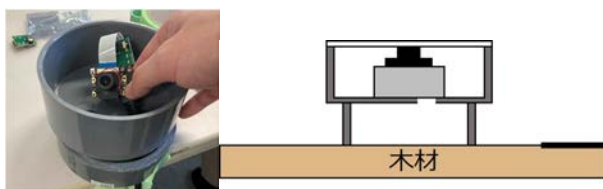


写真-6 A橋のA1側G3桁の撮影方法

5. まとめ

本稿では、小型 IoT センサを活用した実橋梁の構造ヘルスマonitoringの実施計画について報告した。今回のIoT センサによる計測計画では、先行して RC 床版と積層ゴム支承のモニタリングを実施するが、下記のような追加計測項目やシステムの発展性があると考えられる。

- ・距離計による積層ゴム支承の変位計測
- ・MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度計による地震観測

- ・積層ゴム支承の地震時挙動の動画撮影
- ・河川内橋脚における傾斜計測による洗堀の検知
- ・河川水位計測
- ・河川状況の動画撮影の発信
- ・IoTセンシングにより得られたデータと3次元CIMモデルとの連携
- ・LPWA (Low Power Wide Area) 通信による低消費電力通信の活用
- ・長く続く曇天に対応するために太陽光発電と風力発電の併用

謝辞：本研究の遂行にあたり群馬県下仁田町役場から多大なるご協力を、土木学会地震工学会「2021年度次世代地震工学融合研究チーム（代表者：川崎佑磨）」、土木学会地震工学会「地震災害軽減のためのダメージフリー構造技術に関する調査研究小委員会」からご助言を頂いた。また、高専ワイヤレスIoTコンテストWiCON2022（採択校：群馬高専）、2022年度近畿建設協会研究助成による助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

REFERENCES

- 1) 長谷川将士, 藤田凌太, 片岡俊一, 丹波澄雄: Raspberry Pi を用いた地震計測装置のIoT化, 計測自動制御学会東北支部 第309回研究集会 (2017.6.23), 資料番号 309-10, 2017. [Hasegawa, M., Fujita, R., Kataoka, S. Tamba. S: IoT of the seismometry device using Raspberry Pi, The Society of Instrument and Control Engineers Tohoku Chapter workshop No.309-10, 2017.]
- 2) Zuo Rongzhi, 党紀, 鵜野禎史, 清水和弘, 鈴木康寛: IoTセンシングによる橋梁支承の変位モニタリング手法の加発, 第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集
- 3) 涌井将貴, 五十嵐賢次, 本吉弘岐, 富永禎秀, 伊山潤: 加速度計測による屋根雪荷重の推定方法に関する研究 観測用建物モデルを対象とした検証, 日本建築学会構造系論文集, 87巻 796号 p. 524-533, 2022 [Wakui, M., Igarashi, K., Motoyoshi, S., Tominaga, Y., Iyama, J: Estimation method of roof snow load using acceleration measurement validation for an observational building model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ) Vol.87 issue 796 p. 524-533, 2022.]
- 4) 小野寺周, 吉田善紀, 豊岡亮洋, 林吾介, 高橋宏寿: 変位センサーによる支承部の地震後損傷推定手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No54, pp.47-52, 2021.
- 5) 大川原大智, 井上和真, 大塚叶登, 浅見健斗: 防災および構造物の維持管理のための安価な小型IoTセンサの開発ならびに実現に向けた取り組み, 日本自然災害学会 自然災害科学, Vo.41, 特集号, 2022 (印刷中). [Ohkawara, D., Inoue, K., Ohtsuka, K., Asami, K.: Development of Low Cost Small IoT Sensors for Disaster and Structural Maintenance and Initiatives for Realization, Japan Society for Natural Disaster Science, Vol.41, 2022.(in printing)]
- 6) 群馬県 県土整備部 河川課: 令和元年 洪水記録 令和元年 東日本台風 (台風第19号) 10月11日-13日, 2020.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BRIDGES USING SMALL IOT SENSORS

Yuma KAWASAKI, Kazuma INOUE, Daichi OHKAWARA, Yuma KONISHI, Saki YAMAMOTO, Haruaki KOGURE and Kento ASAMI

This paper reports an approach to structural health monitoring of bridges using inexpensive and compact IoT sensors. The bridge to be monitored is a two-span continuous girder with RC slab and five main steel girders and has been in service for 18 years. The IoT sensor uses a Raspberry Pi, a single-board computer. It has a camera and a range finder and can be connected to a network using a USB dongle, a data communication terminal. It can be remotely controlled via the network. The IoT sensor can be operated by generating electricity from solar panels, so it can be installed and operated by human power without using heavy machinery and without installing a power supply. This paper describes a plan for long-term measurement of cracks on the underside of RC slabs and the shear displacement of laminated rubber bearings using the IoT sensor.