

鋼橋のIoTデバイスを活用した 健全性モニタリング手法の開発

ふるのしょうご いのうえまさお あそかつし いしだようへい とだかずお
古野 昌 吾¹・井上雅夫¹・阿曾克司¹・石田陽平¹・戸田一夫¹

¹ (株) 新日本コンサルタント 本社 (〒931-0857 富山県富山市奥田新町1番23号)

橋梁の健全性の評価方法は、橋梁定期点検要領等に表示される外観目視や打音・触診による点検結果をもとに専門技術者が診断するものが主であり、定量的・客観的データを取得することにより健全性を評価する手法については明確に規定された指針類は示されていない。このような背景の中、大規模橋梁については各種センサーを活用した健全性のモニタリング手法が検討・適用されてきた。しかし、小規模橋梁へ大規模橋梁のパッケージを転用する場合は多額の費用が生じるため、センサーを活用した健全性モニタリングは乗り越えるべき障壁が多いのが現状である。本稿では、比較的安価な加速度センサー、IoTカメラ、赤外線センサーを設置し、これらをパッケージ化したシステムとして、主桁のたわみを可視化するモニタリングシステムを構築した。これを供用中の橋梁に実証フィールドとして適用し、構造物の維持管理に資する健全性の評価手法としての有用性を検証した。

Key Words : モニタリングシステム, 加速度センサー, センサーネットワーク, クラウドビューワー, たわみ算出アルゴリズム, 経年劣化判定方法

1. はじめに

日本国内約73万カ所(橋長2m以上)にも及ぶ道路橋は、そのうち約30%が既に50年以上に渡り社会基盤の一翼を担ってきた。これらの多くの橋梁は、設計上の耐用年数を一斉に迎え¹⁾²⁾、補修をして健全度を回復させ長寿命化をはかるか、更新・撤去などの対応を迫られる。これらの対処法を決定する際の情報として重要となる「調査・点検」は、点検新技术、IoTセンシング技術、構造解析、ICT技術といった様々な技術の研究開発が進んでいるが、劣化の進展具合(潜伏期、進展期、加速期、劣化期)を日常的に監視し、確認する橋梁モニタリングが有効と考えられる。本研究では、国内の多くの橋梁がスパン10m～20m程度の中小橋梁であることを鑑み、また、コンクリート橋梁を対象とした研究は多数行われていることから、中規模の鋼橋梁を対象に、公共交通機関である路線バスを用いて加速期後半から劣化期初期の構造的損傷に起因する安全性能低下を検知する新たなモニタリング手法を開発した。モニタリング主体は、主桁に均等間隔に設置された加速度センサーからのデータに基づく支間中央のたわみであり、長期間(5年以上)可動可能なシステムである。平成30年1月より富山市と橋梁(鉸桁橋、建設後50年)の研究協定を締結しており、令和4年1月からはモニタリングを開始し、その状況は市においても常時、確認できる。本研究で開発したモニタリングシステムは、定期点検の簡素化もしくは点検間隔の長期化などによる維持管理コストの削減につながる可能性がある。

また、地域の交通インフラである路線バスを橋梁の日常的・定量的監視に活用しており合理的である。

2. モニタリングシステム

(1) システムの概要

橋梁は、3径間(支間長 $L=28.7\text{m}$)の単純鋼鉸桁橋で2車線である(図-1)。その1径間においてモニタリングを行う。計測値、評価対象等を表-1に、計器設置位置を図-1に示す。加速度センサーは、上流側車線の主桁(以下、「計測桁」)に設置している。最重要の評価項目は、計測桁支間中央のたわみである。たわみは、上部工に作用する荷重と上部工の剛性から決まる。上部工を構成する部材(主桁、横桁、床版等)の損傷が上部工の剛性に影響する。

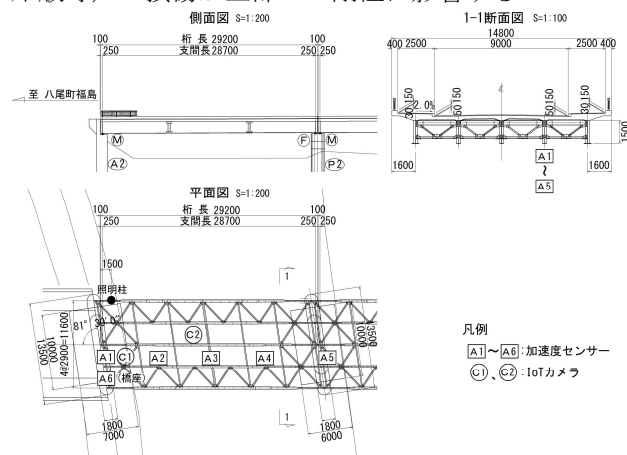


図-1 某橋梁構造概要

表-1 計測値等一覧

凡例	計測値	評価対象	計器	計測頻度
A1～A5	1)主桁の加速度	主桁支間中央のたわみ	加速度センサー	常時
A6	2)橋台天端の加速度	支承の可動性	加速度センサー	常時
C1	3)支承の近接画像	支承及び主桁端部の損傷	IoTカメラ	3回／日
C2	4)床版の近接画像	床版の損傷	同上	同上
T1, T2 (図-4参照)	5)路上の赤外線	大型車の通行	赤外線センサー	常時

そのため、たわみは上部工全体の健全性と関係のある定量的指標となる。システム構成概要を図-2に示す。加速度センサーとIoTカメラのデータは、各々、民間クラウドにおいて処理・保存され、大型車センサー（赤外線）のデータは、富山市センサーネットワークにおいて処理・保存される。現状ではクラウド上でのシステム連携はとっていないが、将来的にはAPIによる相互連携が可能である。各センサーは乾電池で駆動し、加速度センサーのデータを送信する機器のみ商用電源を必要とする。

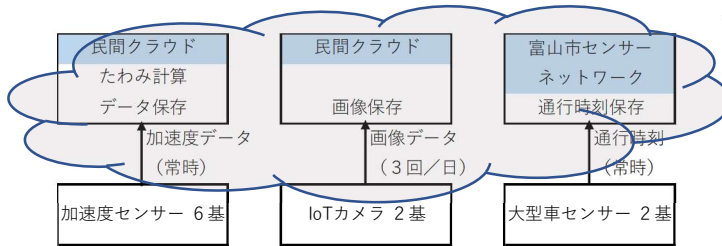


図-2 システム構成

(2) 主桁支間中央のたわみ

加速度二階積分からたわみを計算する方法は、積分誤差を補正する必要があるため、今回は、支間中央の加速度および支間4等分点（5点）の傾斜角（加速度から算定）から支間中央のたわみを算定する積分誤差が生じない方法³⁾を採用した（図-3）。

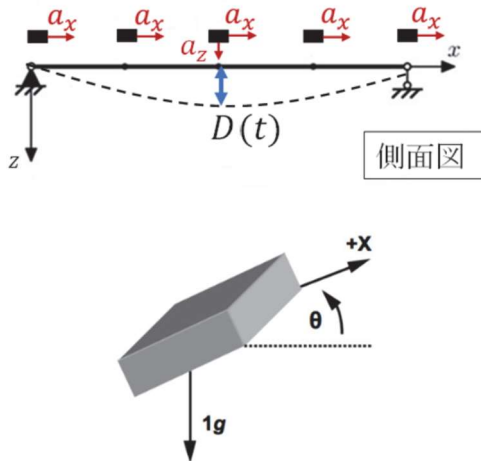


図-3 たわみおよび傾斜角模式図

たわみの評価項目を表-2に示す。

表-2 たわみの評価項目

評価項目	目的
路線バス通過時の週間平均たわみの長期的変化	上部工剛性の微小な低下の把握
たわみの設計荷重時たわみとの比較	上部工剛性の有意な低下の把握

現在、路線バスは、上流側、下流側の各車線を毎日6便、運行している。その車両重量は、7.8t、乗客込み最大総重量は、10.7tである。たわみは、バスの走行速度（衝撃）、総重量（乗客数）により変化する。走行速度および乗客数は、曜日および時刻の影響を受けると考えられる。たわみの週間平均は、これを加味したものとなるので、上部工剛性に変化が無ければ、ほぼ一定と考えられる。バスの車両重量が変わらないのに、たわみの週間平均が長期的に増加傾向を示せば、上部工剛性が低下傾向を示していると判断できる。バス通過時のたわみを特定するためには、バスが計測桁の径間（以下、「計測径間」）を通過した正確な時刻が必要となるため、路面に設置した大型車センサー（赤外線センサー）により通行時刻を把握する。設計において、荷重および解析を安全側にモデル化していること、交通実態より設計活荷重（TL20）となることは極めて稀であることより、たわみが設計荷重時のたわみを超えた場合には、上部工剛性が有意に低下した可能性が高い。そのため、この場合には、橋梁管理者にアラートメールを送信するとともに、技術者が現地で損傷の有無を確認することになっている。なお、TL20および群衆荷重に対する計測桁のたわみは14.7mm（設計計算書より）であることより、15mmをアラートレベルとした。

(3) 発生頻度が高い損傷の有無・程度

上部工剛性に与える影響は小さいが、橋の使用性に影響し、かつ発生頻度が高い損傷として、支承部の機能障害、主桁端部の腐食、床版の床版ひびわれ、抜け落ちがある。これらの部材の一部について、IoTカメラにより取得した画像により損傷の有無・程度を把握する。また、支承の上下に設置した加速度センサーによる加速度の比較により支承の可動性を把握する。

3. 計測結果と精度検証

(1) 大型車検知

赤外線センサーを車両走行方向に2基設置し、車両長から大型車を識別する方法がある。しかし、この方法は、1週間以上の長期計測では商用電源が必要、また、遠隔監視のために現地にPC、通信装置が必要でありコストが課題であった。

上記課題を解決するため、今回のモニタリングシステムでは、以下の手法を採用した。

某橋梁の上・下流側の各車線に1基ずつ、橋梁の照明柱にセンサーを路面から高さ2mの位置に設置、検

出範囲を遮蔽物で制限し、路線バス等の大型車両（車高2m以上）のみを検知する（図-4）。反対車線の車両の誤検知の防止のため、センサーを道路方向に55°傾けた。そして、富山市センサーネットワーク（クラウド）を利用して検知データ収集した。

現地にて、通行車両と検知データを突き合せた結果、車高2m以上の車両を確実に検知し、2m未満は検知しないことを確認した（写真-1）。

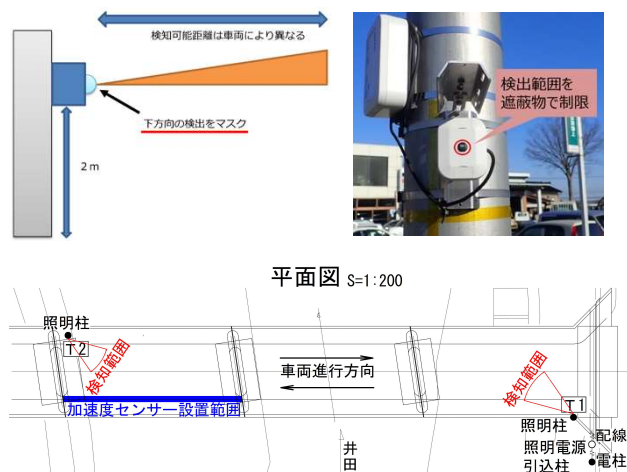


図-4 大型車センサー設置概要図



写真-1 大型車センサーの検知、不検知事例

(2) バス通過時のたわみ

路線バスは、前述の車両重量7.8t（中型バス）のほかに車両重量4.2t（マイクロバス）も使用されている。各便でどちらが使用されるかは日により変わる。たわみの長期的変化の分析は、重い方の中型バスを対象に行う。計測径間に、大型車としては中型バスのみが載荷された時のたわみを分析対象データとする。このデータは、たわみ履歴から以下の条件を全て満たすものとする。

- ① 上流側車線を中型バスのみ通行：橋の手前のバス停Aの発車時刻（時刻表）以降で上流側大型車センサーが大型車検知し、その前後各5秒に検知なし。かつ、たわみが0.6～1.0mmの範囲内（マイクロバス通過時の実測たわみが0.32mmより）
- ② 下流側車線を大型車が通行せず：①の検知時刻から4秒後～8秒後（上流側センサーで検知されてから計測桁の支間中央までバスが40～20kmで走行する時間）の間に下流側大型車センサーが大型車を検知せず

この条件を満たしたたわみの事例を表-3に示す。バ

ス停Aの発車時刻から2分前後で大型車検知されている。7月1日の16:14便は8分後に検知されている。渋滞により遅延したと考えられる。大型車通行量が少ないことが中型バスによるたわみの特定を容易としている。7月1日の10:14便の前後の大型車検知時刻を表-4に示す。10:15の検知時刻の前後各5秒には検知されていない。なお、上流側車線に中型バス、下流側車線に大型車の同時載荷状態は、6月29日の16:14便で発生した。その時のたわみは0.98mmであった。

表-3 路線バス（中型バス）通過時のたわみ

・6月29日（水）

直近バス停時刻表	15:14
大型車検知時刻	15:15:43
たわみ(mm)	0.67

・7月1日（金）

直近バス停時刻表	10:14	14:14	16:14
大型車検知時刻	10:15:46	14:16:49	16:22:29
たわみ(mm)	0.74	0.71	0.80

表-4 上流側大型車センサーによる検知時刻例

9:59:55	10:15:38	10:28:38
---------	----------	----------

(3) 載荷試験

1) 荷重載荷方法

計測径間の上流側車線において、以下の2ケースの載荷を行った。

- ・動的載荷：総重量20tのダンプ2台が車間数m確保し時速30kmで走行
- ・静的載荷：総重量20tのダンプ2台が支間中央付近に車間1mで停止

（実たわみの計測方法）：計測桁支間中央から重錘付きワイヤーを吊下げ、高水敷の不動点に対するワイヤーの変位を動的に計測した。

2) 加速度から計算したたわみ

加速度から計算したたわみの実測たわみとの比較を表-5に示す。いずれのケースにおいても、実測たわみに良く近似している。動的1および静的の計算たわみの波形を図-5、図-6に示す。なお、静的載荷試験では、2台のダンプの載荷位置への進入から退出までが約50秒、そのうち約21秒間停止と、加速度変化が微小である時間が長いため、システム中のたわみ計算プログラムに修正を加えて別途、計算した。

表-5 たわみ（実測と加速度から計算）の比較（mm）

載荷ケース	動的1	動的2	静的
①実測たわみ	2.46	2.58	4.10
②加速度から計算たわみ	2.39	2.34	4.20
③構造解析たわみ	—		6.15
比②／①	97%	91%	102%



図-5 加速度から計算たわみの波形（動的載荷）

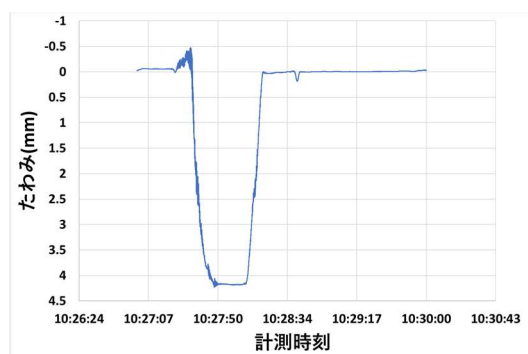


図-6 加速度から計算たわみの波形（静的載荷）

また、構造解析（平面骨組）によるたわみと他のたわみの比較を表-6に示す。

表-6 たわみ（構造解析と他値）の比較（mm）

載荷ケース	静的載荷	設計荷重*
①構造解析	6.15	14.6
②設計計算書	—	14.7
③アラートたわみ、実測	4.10(実測)	15.0

*TL20および群衆荷重

5) まとめ

システムのビューワに常時表示されるたわみの履歴の例を図-7に示す。6月30日に3.05mm、7月2日に2.48mmと20tダンプ2台連行時（動的1、動的2）のたわみを上回るたわみが発生していることがわかる。



図-7 たわみ履歴（ビューワ画面）の例

静的載荷時の加速度から計算たわみは、構造解析たわみの67%であることより、上部工全体の健全性は、機能に支障が生じていないレベルと言える。建設から50年以上の某橋梁の上部工が健全性を維持してい

るのは、大型車交通量が少ない、塩害環境下ではない等の作用の要因に加えて、維持管理や補修が適切になされてきた成果といえる。

(4) 発生頻度が高い損傷の監視

午前中に雨が降っていた7月23日の12時に、IoTカメラ（図-1のC1）により撮影された支承の画像を写真-2に示す。2年前に伸縮装置が非排水型に取替えられおり、支承に雨水が落下していないことが確認できる。また、支承、主桁端部の腐食が鮮明に映っている（写真-2）



写真-2 IoTカメラによる支承の画像（7/23 12時）

4. 今後の課題と展望

まず、今後、5年程度にわたり前述の主桁、支承・桁端部、床版の健全性評価方法の検証が必要である。現在、支承・桁端部等の画像の月単位での変化を技術者が確認して健全性を評価している。これをAIによる画像解析により代替できるように開発を進めている。モニタリングシステムの普及のためには、低コスト化が不可欠である。現システムにおいても、赤外線センサー、IoTカメラは乾電池で3年間可動するなど低コストであるが、加速度センサーの低コスト化も検討していきたい。365日24時間にわたり主桁、支承下の加速度が得られることで、活荷重、地震荷重、雪荷重、支承の可動性等の実態が把握できる。これらは、橋梁の維持管理上の有益な情報になると考える。

謝辞 橋梁でのモニタリングを許可頂いた富山市道路構造保全対策課、モニタリング全般についてご指導頂いた東京大学大学院工学系研究科 長山智則教授および 楊 曜華氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書2006.
- 2) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学, 東京大学出版 2004.
- 3) 長山智則ほか：一般道の連続鋼箱桁橋における無線加速度計を利用した簡易BWIM, 土木学会論文集A1（構造・地震工学）, Vol. 76, No. 2, 356 - 375, 2020.