

(23) 中小橋梁を対象としたバスモニタリングシステムの長期実証実験と損傷検知

田中 英哲¹・宮本 文穂²・江本 久雄³

¹学生会員 山口大学大学院学生 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:t024vn@yamaguchi-u.ac.jp

²フェロー会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:miya818@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学大学院助教 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:emoto@yamaguchi-u.ac.jp

現在、我が国では高度経済成長期に建設された多くの橋梁が高齢化を迎えており、目視や各種センサを用いたモニタリング (Structural Health Monitoring : SHM)、特に常時監視を行い、変状を早期発見することが望まれている。しかし、その中でも多くの割合を占めるスパン10m~20mの中小橋梁は、各種コストや技術的課題が指摘されている。

本研究では、SHMに関する各種問題を解決する手段として公共交通機関である路線バスを用いた新たなモニタリング手法を提案している。そこで、中小橋梁を対象とした長期にわたる実証実験の検証を行うと共に、様々な環境 (人工的損傷、日本国外) においての実証実験での検証、考察を行っている。

Key Words : public bus, short & medium span bridge, vibration, SHM, long term application, artificial damage, overseas application

1. はじめに

我が国に存在する膨大な数の中小橋梁を定期的に点検して適切に維持管理していくためには、簡便で効率的な橋梁モニタリングシステムの開発が必要となる。著者らは、定期路線バスの後輪バネ下に加速度センサを取り付け、既存橋梁を通過する際の振動計測から対象橋梁の安全性能などの性能低下を検知する中小橋梁モニタリングシステム (以下、バスモニタリングシステム) ^{1) 2)} の開発を進めている。提案するバスモニタリングシステムは、公共交通機関である路線バスを利用した主として中小橋梁を対象とするモニタリング手法であり、老朽橋梁の安全性能が著しく低下する「加速期」から「劣化期」³⁾ への移行の検知を目指している。本論文では、宇部市で行っている運行中の路線バスを利用したバスモニタリングシステムの約3年間にわたる長期実証実験の結果を示す。その際、橋梁の構造変状を効率的に検知できる可能性のある指標としてたわみ特性値を定義した。また、たわみ特性値の感度を調べるため、撤去橋梁を用いて人工的な損傷 (高欄撤去) を導入した場合のたわみ特性値に及ぼす影響についての検討も行った。さらに、バスモニタリングシステムの海外での適用例として、新リスボン大学

(ポルトガル) と共同で実施した実証実験とその検証結果を通して今後の実用化に向けた検討を系統的に行った。

2. 路線バスからの振動計測を利用したモニタリングシステムの原理と概要

バスモニタリングシステムは、公共交通機関である路線バスを利用した主として中小橋梁を対象としたモニタリング手法である。バスモニタリングシステムの概要を図-1に示す。

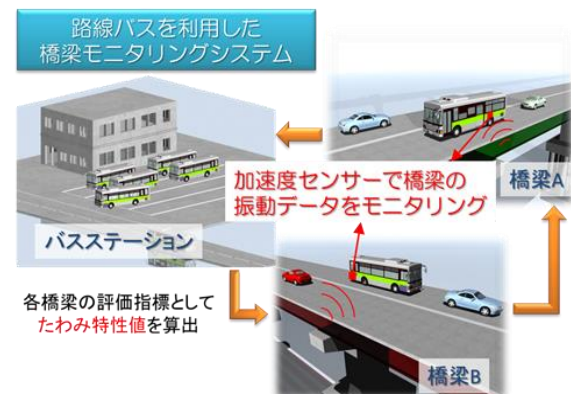


図-1 路線バスによる橋梁モニタリングシステムの概要

路線バスが中小橋梁を通過する際の橋梁および路線バス後輪バネ下の鉛直変位（鉛直加速度波形を2回積分することで得られる推定たわみ）は、橋梁の剛性とバスの車両重量に依存する静的変位の他、路面凹凸に起因し平均値0のランダムガウス過程という統計的性質を持つ非定常振動成分、橋梁や車両といった運動方程式に支配される振動成分、運行条件の違いやデータ抽出処理方法の違いによる外乱因子の和として式(1)のように表すことができる。

$$\delta_a(t) = \delta_{sa}(t) + S_r(\Omega, t) + \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{2\pi f t} df + \delta_x(t) \quad (1)$$

ここでは、式(1)から得られる推定たわみを、その橋梁区間で平均したものを「たわみ特性値 μ_a 」⁴⁾として定義する。なお、既往の研究より運行条件を含む種々の外乱因子 $\delta_x(t)$ の影響を考慮するために、中心極限定理を利用してサンプル数 N を増やすことにより変位の有無の判定に影響しない程度に「たわみ特性値」が収束することが知られている。

3. 宇部市バス路線における中小橋梁の長期モニタリング

(1) 実験の概要

バスモニタリングシステムを適用した長期的な計測例として、宇部市バス路線を利用した実証実験を継続して実施している。これは、宇部市内で実際に運行中の路線バスを利用した長期実証実験であり、2010年12月から現在まで約3年間に亘って実施しており、今後も継続する予定になっている。図-2に本実験で使用した路線バスの外観、加速度センサ設置状況を示す。なお、加速度センサのケーブルは車内の床にある排水用の穴を通じて配線している。バス車内において、加速度センサとデータロガー、パソコンを接続し、橋梁通過時の振動をリアルタイムで確認することができる。実用化の際には、加速度センサ、データロガーおよびパソコンへの電源供給については路線バスの電源を利用することを想定しているが、今回は持ち運び可能な充電式バッテリーを使用している。なお、路線バスルート上の対象橋梁として設定している主な橋梁名、諸元などを表-1にまとめて示す。本論文では、一例として路線バスルート上の宇部市が管理している橋梁（PC桁橋）の1つである「新権代橋」（図-3参照）についての計測結果を示す。

(2) 実験結果

2010年～2013年までの計56日間の計測データより求めた「新権代橋」の往路と復路のたわみ特性値の推移を図-4(a), (b)にそれぞれ示す。なお、往路、復路でデータ

の数に違いがあるのは橋梁上で停止してしまった場合など無効な場合があり、有効データ数に違いが生じたためである。また、図-4(a), (b)中にはたわみ特性値がどの程度低下したときに、対象橋梁に重大な変状が生じたと判断するか重大劣化判定基準を設けている。これについては、導入プレストレス力が50%減少するような劣化が生じた場合にはたわみ特性値が1.93倍となり、また、導入プレストレス力が90%減少するような劣化が生じた場合にはたわみ特性値が2.86倍に達することが明らかとなっている⁵⁾。そこで、たわみ特性値の最初に計測した15回分の平均値を基準とし、その1.93倍にあたるたわみ特性値を劣化Phase1の判定基準（赤い線）、2.86倍にあたるたわみ特性値を劣化Phase2の判定基準（緑の線）とした。実際には、継続的にたわみ特性値を計測していき、判定ラインに達した時に対象橋梁に何らかの重大な損傷が生じていると判断して直ちに目視点検を行うこととす



図-2 長期計測に使用した路線バス

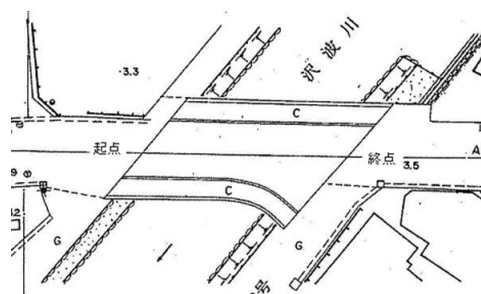
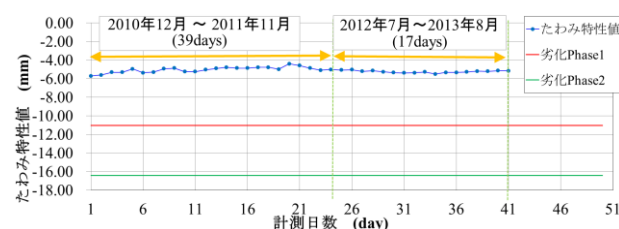
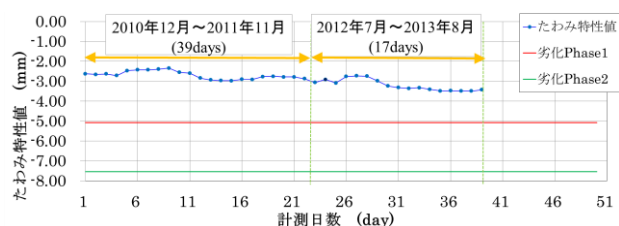


図-3 新権代橋の平面図



(a) 床波→西岐波学校前



(b) 西岐波学校前→床波

図-4 たわみ特性値の推移（新権代橋）

る。なお、点検は往路または復路のどちらかのたわみ特性値が基準に達した時点で行う必要があるといえる。

図-4はデータ区間15の移動平均法で表したものであり、たわみ特性値の1つの点が15回分の平均値を表している。図-4の(a)と(b)を比較すると、往路と復路でたわみ特性値の値は異なっている。これは、図-3に示すように「新権代橋」の形状が左右対称ではないためであると考えられる。たわみ特性値の長期推移においては、図-4(a)ではわずかな上下はしているが、ほとんど変化は見られなかった。一方、図-4(b)ではたわみ特性値の最低値が漸減していることが分かる。しかし、どちらも重大劣化判定基準には達しておらず、今のところ往路、復路ともに重大な損傷は起きていないという結論に至る。

4. 人工的損傷がたわみ特性値に与える影響

ここでは、バスモニタリングシステムにおけるたわみ特性値の感度を調べるため、撤去橋梁を用い、人工的損傷（高欄撤去）がたわみ特性値に与える影響についての検討を行った結果を述べる。

(1) 実験条件

本実験では、重量約 15t の観光バスに前述と同様に加速度センサを設置し、架け替えのために撤去される橋梁を対象として実施した。対象橋梁は図-5 に示すような国交省管轄の橋長 168.29m、8 径間、ゲルバー形式 RC-T 桁橋である。計測は季節の変化、高欄の有無等を考慮して、それぞれ 2012 年の 9 月、2013 年の 1 月、2 月、3 月の計 4 回実施している。

(2) 実験結果

合計4回の計測結果から算出した15回分のたわみ特性値の平均値を図-6に示す。図-6より、コンクリート製高欄の撤去は第2回計測と第3回計測の間に行われており、高欄撤去前後のたわみ特性値を比較する。まず、第3径間（図-5参照）について、高欄撤去後の2つのたわみ特性値（-2.97、-2.89）は撤去前のたわみ特性値（-2.67、-2.61）に比べ、約1割低下している。これは、橋全体の曲げ剛性の低下がたわみ特性値に影響を与えたためであると考えられる。しかし、ゲルバー構造部を含む第2径間では、第4回計測のたわみ特性値（-2.24）は高欄撤去前のたわみ特性値よりわずかに増加した値となっている。これは第2径間がゲルバー構造部を含む径間であり、ゲルバー構造部がたわみ特性値に何らかの影響を与えていると考えられる。従って、ゲルバー構造部を含む径間については、今後シミュレーション解析を含む種々の検討を継続していく必要がある。

5. 海外における実証実験

バスモニタリングシステムの海外での適用例として、ポルトガルで実施したリスボン市内における実証実験について述べる。

(1) 実験条件

本実験は、山口大学と新リスボン大学との共同研究として、新リスボン大学の Prof. Valter J. G. Lucio らグループの協力のもと行われた。実験に使用したバスは、実際にリスボン市内を運行している路線バスである。総重量は約 14t であり、3 軸の加速度センサを後輪バネ下部分に設置した。対象橋梁については、新リスボン大学の近くにある 2 橋を選定し、本論文では対象橋梁名をそれぞれ FCT-in、FCT-out と呼ぶこととする。両対象橋梁の概要を表-1 に示す。なお、両橋梁の中央部には路線バスと対象橋梁の連成を確認するため、速度センサをそれぞれ設置しており、路線バスが対象橋梁を通過した際の速度データも計測した。それぞれの対象橋梁において、走行速度 40km/h で 15 回ずつの計測を行った。

(2) 実験結果

路線バスが対象橋梁を通過した際の後輪バネ下部と両対象橋梁桁中央部の加速度応答をそれぞれ比較したもの

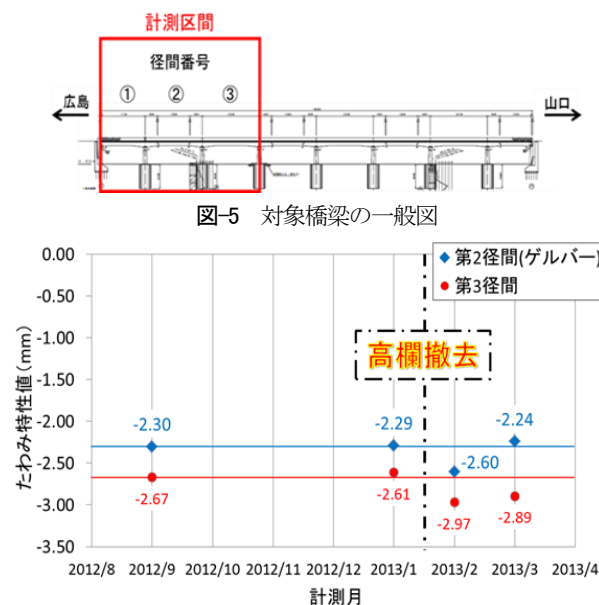


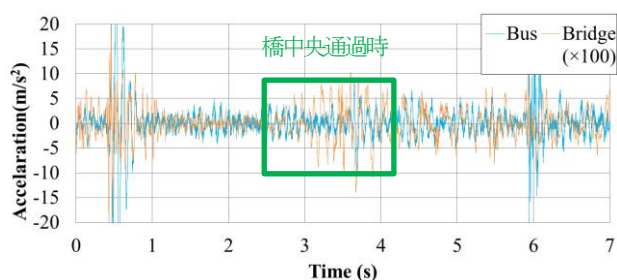
図-6 高欄撤去によるたわみ特性値の変化

表-1 対象橋梁の概要

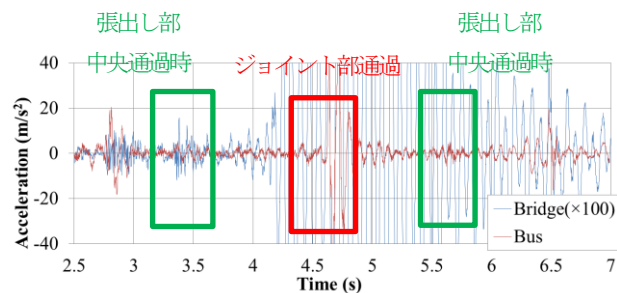
橋梁名(仮)		上部工形式			橋長(m)	
FCT-in	径間番号	起点側	1	3径間連続PC版桁橋	16.00	68.13
			2		36.13	
			3		16.00	
		終点側				
FCT-out	径間番号	起点側	1	RCT桁張出橋	10.65	49.04
			2		13.87	
			3		13.87	
		終点側	4		10.65	

を図-7(a), (b)に示す。なお、路線バス後輪バネ下の加速度応答は3軸加速度センサで得られた鉛直方向の加速度データであり、橋梁中央部の加速度応答は速度センサで得られた速度データを一回微分して加速度データに変換したものである。連続版桁橋である FCT-in では、図-7(a)に示すように橋梁中央部通過時で路線バス後輪バネ下と橋梁中央部の加速度応答はおおよそ相似していることが確認できる。しかし、張出し桁橋である FCT-out では、図-7(b)に示すように左側の張出し部中央部通過時では後輪バネ下と橋梁側の加速度応答はおおよそ相似しているものの、橋梁中央のジョイント部通過時で橋梁側に大きな応答が見られ、路線バス後輪バネ下加速度との相似性は確認できなくなった。これは中央ジョイント部通過時、つまり張出部の継ぎ目を通る際に、段差を乗り越えるような形になってしまうため、バスの重量による振動が橋梁側に大きな影響を与えたためであると考えられる。このことから、バスモニタリングシステムは、連続桁・単純桁のような橋梁形式には適用可能であるが、FCT-out のような両端からの張出し形式の橋梁には適用できないことが判明した。

ここでは、バスモニタリングシステムが適用可能であると判断した FCT-in に関するたわみ特性値算出結果について示す。FCT-in のたわみ特性値を求めるために、対象橋梁版桁中央付近通過時の約 1.8 秒分のデータ（図-7(a)中の囲んだ部分）を抜き出し、たわみ特性値を算出した。たわみ特性値が中央値に収束する 15 回分の平均値は -4.10mm （標準偏差： 0.63 ）であると算出された。今後、この値を基準として計測を継続し、たわみ特性値の変化を長期モニタリングしていくことが重要となる。



(a) FCT-in



(b) FCT-out

図-7 橋梁通過時の後輪バネ下および桁中央付近の加速度応答の比較

6. 結論

本研究における主な成果を以下に示す。

- 1) 定期路線バスを利用した新たな中小橋梁モニタリング手法の開発および実証実験の結果を示し、評価・判定方法の検討を行った。その結果、たわみ特性値の長期計測から対象橋梁の構造変状を検知できる可能性を示した。一方で、実測データから算出したたわみ特性値はばらつきが大きいことが確認された。これには運行条件の違いが大きく影響していると考えられる。約3年にわたる実証実験から長期計測によってたわみ特性値の推移を観察したが、現状では急激な低下傾向は見られず、今後も長期間にわたる計測を継続していく必要がある。
- 2) 撤去橋梁を用いた実証実験では、人工的損傷（高欄撤去）によるたわみ特性値に及ぼす影響(感度)に関する検討を行った。これより、対象橋梁の第3径間の結果より、橋全体の曲げ剛性の低下に対して、たわみ特性値は相応の感度であったと言える。一方、ゲルバー構造部を含む第2径間では、たわみ特性値へのばらつきが見られるため、今後シミュレーション解析を含む種々の検討を継続していく必要がある。
- 3) 海外でのバスモニタリングシステムの適用の結果、計測環境、車両の影響を受けることなく適用可能であることが明らかとなった。しかし、張出し形式の橋梁など、橋梁形式によっては本システムの適用が困難なものがあるということが判明した。

参考文献

- 1) Miyamoto, A and Yabe, A : Development of Practical Health Monitoring System for Short- and Medium-Span Bridges based on Vibration Responses of City Bus, Journal of Civil Structural Health Monitoring, International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (ISHMII), Vol.2, No.1, pp.47-63, 2012.
- 2) 矢部明人, 磯田聡史, 宮本文穂: たわみ特性値を利用した既存橋梁の変状検知手法の開発-解析的検討, 土木学会第66回年次学術講演会, I-275, 2011.
- 3) 土木学会: 2007年制定「コンクリート標準示方書[維持管理編]」, 2007.
- 4) 矢部明人: サブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法の開発, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.845-846, 2006.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 社団法人プレストレストコンクリート建設業協会: PC道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究 4章, ISSN1346-7328, 国総研資料第613号, pp.99-105, 2010.