

(7) 路線バスを利用した 中小橋梁モニタリングシステムの実証実験

宮本 文穂¹・矢部 明人²・永田 雅大³

¹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

²正会員 (株)構造計画研究所 耐震技術部 構造保全技術室室長 (〒164-0011 中野区中央4-5-3)
E-mail:nagai@kke.co.jp

³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:s018vn@yamaguchi-u.ac.jp

現在、日本国内の橋梁維持管理の現場では、目視や各種センサを使ったモニタリング (Structural Health Monitoring: SHM)によって定期的に変状検知が実施されている。特に常時監視についてはSHMの有効性を示す研究成果が報告されている。一方で、SHM導入・維持に関する各種コストや技術的課題が指摘されており、より簡便な手法の開発が必要となっている。

本研究では、SHMに関する各種問題を解決する手段の一つとして、国内の多くの橋梁がスパン10m～20m程度の短スパン橋梁であることを鑑み、それらを対象に、公共交通機関である路線バスを利用した新たなモニタリング手法の提案および検証と実証実験を行った。

Key Words : public bus, short & medium span bridge, condition assessment, vibration, SHM, field test

1. はじめに

我が国は今後、膨大な数の橋梁を点検して適切に維持管理していく必要がある。「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」は2008年5月16日、現状認識として、「見ない、見過ごし、先送り」が3大危険因子であり、損傷の早期発見・早期対策の予防保全システムが必要であると提言している。本研究では、路線バスからの振動計測による橋梁モニタリング¹⁾の実証実験を行い、実用化に向けての検証結果および今後の課題について示している。これにより、経済的理由などにより点検実施が困難な中小橋梁モニタリングへの適用が期待できる。

2. 実験概要

本システムでは、路線バスの後輪バネ下に加速度センサを設置し、橋梁通過時の振動からたわみ特性値¹⁾を算出する。たわみ特性値が基準値に達した場合、その橋梁に何らかの重大な損傷が生じていると判断し、早急に目視点検へ向かうという流れである。本システムの概要を図-1に示す。

今回の実証実験では、初めて運行中の路線バスにセンサを設置し、約1年間かけて合計39回計測を行った²⁾。また、運行条件のたわみ特性値への影響を調べるために、天候・対向車数・乗車人数・走行速度を記録した。

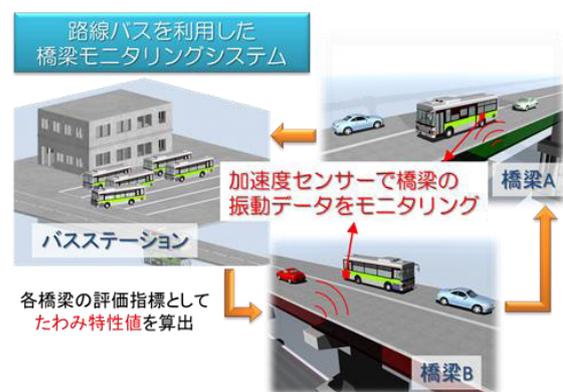


図-1 路線バスによる橋梁モニタリングシステムの概要

3. たわみ特性値の抽出原理

走行する路線バスと橋梁の関係については、橋梁-路

面-車両の動的連成系の運動方程式で定式化される。その1回走行時の応答は橋梁側車両側双方非正常の応答となる³⁾。一方で、橋梁や路線バスの力学的な条件、および路面凹凸の条件をそろえて繰り返し計測した結果を連ねる場合、計測結果のばらつき条件が一定の確率分布で表すことができれば、その繰り返し応答は非正常応答の繰り返しということになり、定常性を有する応答として取り扱うことが可能であると考えられる。

ここで、一定速度で走行する路線バスの後輪車軸の鉛直変位 $\delta_a(t)$ は、橋梁の剛性とバスの車両重量に依存する静的変位 $\delta_{sa}(t)$ と、路面凹凸と橋梁と車両振動特性に依存する動的変位 $\delta_{da}(t)$ の和として、

$$\delta_a(t) = \delta_{sa}(t) + \delta_{da}(t) \quad (1)$$

と表すことができる。また、路面凹凸は平均値0の定常ランダムガウス過程であり、橋梁と車両の相互作用を含む動的変位はエルゴード過程により、フーリエ級数で展開可能であると考え、動的変位 $\delta_{da}(t)$ は、

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

と表すことができる。ここで、 $S_r(\Omega, t)$ は路面凹凸の密度関数、 Ω は路面空間周波数、 $X(f)$ はフーリエ係数である。式(2)において、第2項のサンプル平均は0である。したがって、 $\delta_{da}(t)$ により得られた十分な数のサンプル N 個の平均は0に近づいていく。次に、 $\delta_a(t)$ における計測値から k 個サンプリングして平均し、

$$\overline{\delta_a(t)} = \frac{\sum_{j=1}^k \delta_a(j)}{k} \quad (3)$$

と表す。このサンプリング平均の分布は中心極限定理により、正規分布に従うことから、 $\overline{\delta_a(t)}$ はある一定の値 μ_a に収束する。以上のように、振動データから不要なデータを取り除いていき、橋梁のたわみに関する情報のみを抽出する作業をデータ濃縮と呼んでいる。ここで、十分な数 n 個のサンプル平均値 $\delta_a(j)$ に対して、

$$\mu_a = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{\delta_a(t)_i}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{nk} (\delta_a(j))_i}{nk} \quad (4)$$

を定義し、たわみ特性値と呼ぶことにする。今回の実証実験では、路線バスのバネ下鉛直変位 $\delta_a(t)$ は、

$$\delta_a(t) = \delta_{sa}(t) + \delta_{da}(t) + \delta_x(t) \quad (5)$$

と表されるとし、運行条件による外乱因子 $\delta_x(t)$ の特性と対策について問題解決することを目指した。

4. 実験結果

ここでは主に、径間 23.6m の PC 橋梁である「新権代橋」に関する結果を例として記述する。

(1) 計測された振動データとたわみ特性値について

路線バス通過時の橋梁の加速度応答を調べるため、桁中央付近にセンサを設置した。路線バス通過時の橋梁側加速度と路線バスバネ下加速度を比較した結果を図-2に示す。加速度応答の大きさについては、バス側の方が大きい値をとるものの、2つの波形はおおよそ相似していることが確認できた。さらに、時間-周波数解析により、路線バスの通過に伴って、桁中央、後輪バネ下共に約 12Hz 付近で振動していた。橋梁と路線バス後輪バネ下が一体となって振動しているため、バネ下振動情報から橋梁のたわみ特性を抽出することが可能であるといえる。

桁中央約 10m 通過した時の加速度応答を抜き出し、2回積分することによって、推定たわみを求めた(図-3)。どの加速度応答からも、類似した波形が得られるよう、抜き出し区間を指定した。次に、推定たわみの時間方向

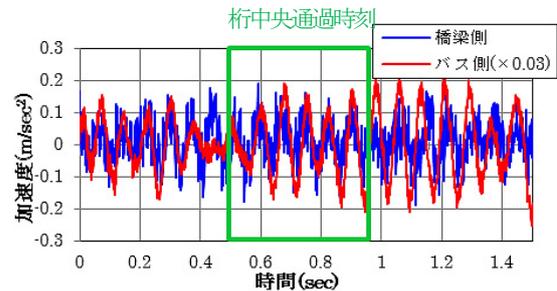


図-2 橋梁通過時の桁中央・バネ下加速度応答の比較

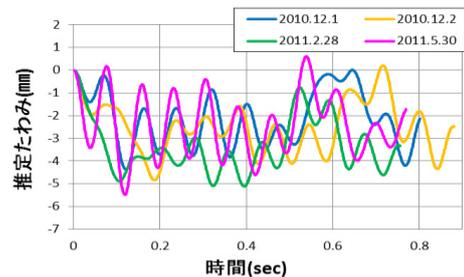


図-3 後輪バネ下より求めた推定たわみの変化 (新権代橋：西→床)

表-1 たわみ特性値 (mm) と各運行条件 (新権代橋：西→床)

年月日	たわみ特性値	天候	対向車数(台)	走行速度(km/h)	乗車人数(人)
2010年12月1日	-2.13	晴れ	0	45	8
2010年12月2日	-2.51	曇り	1	40	7
2011年2月28日	-3.36	曇り	1	45	6
2011年5月30日	-2.39	晴れ	0	40	12
2011年6月1日	-2.07	晴れ	0	45~50	9
2011年6月2日	-1.89	晴れ	0	45	13

に平均をとることによって算出したたわみ特性値と計測時の運行条件を表-1に示す。たわみ特性値は、計測回数ごとにばらついており、運行条件の違いもそれに影響を与えていると考えられる。

(2) 各運行条件とたわみ特性値の相関について

運行条件による外乱因子 $\delta_x(t)$ の特性を知るために、たわみ特性値と各運行条件の相関を求めた(表-2)さらに、相関係数によって、相関の強さを分類した。その結果、各運行条件について、橋梁や径間、進行方向によって、異なる傾向が得られた。しかし、一つ一つのデータを確認すると、どの運行条件でも、たわみ特性値はある程度の範囲でばらつくことが確認できた。現時点で、たわみ特性値は加速度データの抜き出し範囲によって、大きく変化する可能性もある。たわみ特性値算出の自動化の実現後に、運行条件のたわみ特性値への影響について再び考慮する必要があるといえる。

(3) たわみ特性値の移動平均について

本研究では、様々な運行条件を含むばらつきは、サンプル数 N が多くなれば、中心極限定理によって一つの値に収束すると仮定した。これによって、より合理的なシステムが構築できるといえる。移動平均法により、たわみ特性値のばらつきを低減し、変化を観測することにした。データ区間を変化させて移動平均法で結果を算出し、その時のたわみ特性値の標準偏差をまとめたものを図-4に示す。ここで、データ区間とは、平均をとるデータの個数である。データ区間を大きくすると、たわみ特性値のばらつきが小さくなっていくことがわかる。さらに、ある程度のデータ区間を超えれば、それ以降、標準偏差に大きく変化が見られなくなることがわかる。これによって、前述した中心極限定理が成り立つことが証明された。今回はデータ区間を14として、たわみ特性値の推移を移動平均法で表すこととした。その結果を図-5に示す。たわみ特性値は計測ごとにばらつきを生じるため、大小

に推移している様子がわかる。このように、たわみ特性値を常時計測していくことにより、橋梁の経年劣化をモニタリングしていく。

5. 劣化判定基準の決定

本手法では、対象橋梁は现阶段において、健全な状態に保たれているものとし、たわみ特性値 μ_a を求める。さらに、有限要素法の一つであるサブストラクチャー法を用いた走行振動シミュレーションにより、劣化状態におけるたわみ特性値 $\hat{\mu}_a$ を求める。この時の変化率 α を構造変状検知パラメータとして、以下の式で表す。

$$\alpha = \frac{\hat{\mu}_a}{\mu_a} \quad (6)$$

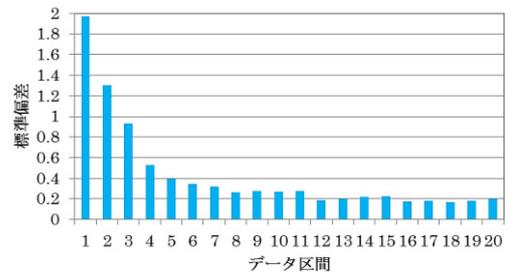


図-4 データ区間の違いによる標準偏差 (新権代橋：西→床)

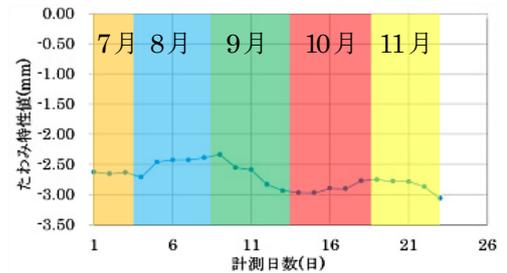


図-5 たわみ特性値の推移 (新権代橋：西→床)

表-2 たわみ特性値と各運行条件の相関

橋梁名	径間	通過方向	天候	対向車数	乗車人数	走行速度
蛇瀬橋	A	近→小	—	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	中程度の正の相関がある
	B		—	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない
	C		—	—	ほとんど相関がない	弱い負の相関がある
	D		—	弱い負の相関がある	ほとんど相関がない	弱い正の相関がある
	E		—	—	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない
蛇瀬橋	A	小→近	—	—	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない
	B		ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない
	C		ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	—
	D		中程度の負の相関がある	ほとんど相関がない	弱い負の相関がある	弱い負の相関がある
	E		弱い負の相関がある	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない	弱い正の相関がある
新権代橋	—	床→西	—	弱い正の相関がある	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない
	—	西→床	—	弱い負の相関がある	ほとんど相関がない	中程度の正の相関がある
白土第二橋	A	西→吉	—	—	弱い負の相関がある	中程度の負の相関がある
	B		—	ほとんど相関がない	中程度の正の相関がある	弱い負の相関がある
	A	吉→西	—	強い負の相関がある	弱い負の相関がある	ほとんど相関がない
	B		—	—	ほとんど相関がない	ほとんど相関がない

本研究では、構造変状として対象橋梁が PC 橋梁であることに着目し、プレストレス力の低下を想定した⁴⁾。シミュレーションにより算出したたわみ特性値の平均値を表-3 に示す。プレストレス力が 50%低下するような損傷を生じた場合、たわみ特性値が 1.93 倍、90%低下するような損傷を生じた場合、2.87 倍に達するということが求められた。たわみ特性値の初期値を基準とし、その 1.93 倍にあたるたわみ特性値を劣化 Phase1 の判定基準、2.87 倍にあたるたわみ特性値を劣化 Phase2 の判定基準とする(図-6)。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、直ちに目視点検を行う。さらに、現段階で、対象橋梁がどのくらいで判定ラインに達する恐れがあり、点検が必要となるのかを評価する指標として、点検必要度を設けることにする。初期値を基準とし、計測されたたわみ特性値の最低値が劣化 Phase1 の判定基準のどのくらいまで達しているのかを以下の式で表す。

$$\frac{|\text{たわみ特性値の初期値} - \text{過去のたわみ特性値の最低値}|}{|\text{たわみ特性値の初期値} - \text{判定基準}|} \times 100 \quad (7)$$

西岐波学校前から床波バス停方向へ通行する時のたわみ特性値の初期値は-2.63、最低値は-3.06である。したがって、式(7)より、点検必要度は18%と求められる。点検必要度が100%に達することは、図-6でたわみ特性値が劣化Phase1の判定ラインに達するのと同じことを意味する。この点検必要度は、橋梁点検の優先順位の決定に役立つことも期待できる。

表-3 シミュレーションにより算出したたわみ特性値 (新権代橋：西→床)

速度 路面凹凸	健全	劣化Phase1 プレストレス力 50%低下	劣化Phase2 プレストレス力 90%低下
30km/h Average	-0.84	-1.62	-2.41
40km/h Average	-0.83	-1.62	-2.41
50km/h Average	-0.84	-1.63	-2.42
平均	-0.84	-1.62	-2.41
構造変状パラメータ		1.93	2.87

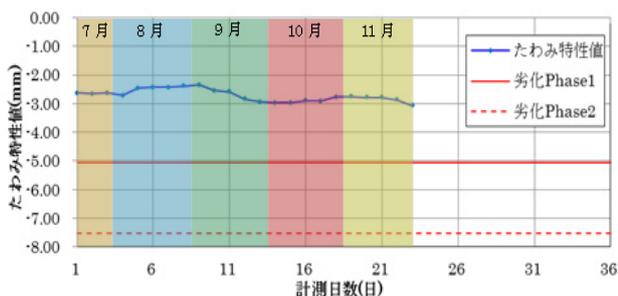


図-6 新権代橋の劣化判定ライン (新権代橋：西→床)

6. まとめ

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- ① 本研究では、宇部市交通局、同土木建築部の協力のもと、実際に運行している路線バスに加速度センサを設置し、実証実験を行った。路線バスの通行により、橋梁と後輪バネ下が一体となって振動していることが確認できた。また、この二つの振動は同じ振動数で揺れており、相似性がみられた。したがって、橋梁通過時の路線バスの後輪バネ下加速度応答からその橋梁のたわみ特性を推定できると考えられる。
- ② たわみ特性値は、各橋梁・径間・進行方向ごとで異なる数値をとるが、常に同じ部分を抜き出してその変化を観測することが重要であると言える。
- ③ 運行条件による外乱因子 $\delta_x(t)$ の特性を知るために、本研究ではたわみ特性値と各運行条件の相関を求め、相関係数によって、相関の強さを分類した。その結果、各運行条件について、橋梁や径間、進行方向によって、異なる傾向が得られた。
- ④ 本研究では、移動平均法により、たわみ特性値のばらつきを低減し、変化を観測することにした。データ区間を変化させて移動平均法で結果を算出し、その時のたわみ特性値の標準偏差をまとめると、ある程度のデータ区間数を超えれば、それ以降、標準偏差に大きく変化が見られなくなることが確認できた。したがって、様々な運行条件を含むばらつきはサンプル数 N が多くなれば、中心極限定理によって一つの値に収束するといえる。これによって、より合理的なシステムの構築が可能となる。

参考文献

- 1) 矢部明人, 宮本文穂, 磯田聡史, 谷信幸: 路線バスによる中小橋梁モニタリング手法の開発, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.2, pp.1-9, 2013.
- 2) 宇部市: 世界初の橋梁モニタリングシステム実証実験について, http://www.city.ube.yamaguchi.jp/houdou/kigyuu_koutsuu/h22/monitoring.html (参照 20130610)
- 3) 金哲佑, 川谷充郎: 単一車両走行による橋梁振動データを用いた橋梁の健全度評価, 鋼構造論文集, 第 15 巻 第 58 号, pp.37-46, 2008.
- 4) 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.