

移動体通信による樺島大橋の振動特性遠隔モニタリング

奥松俊博*・岡林隆敏*・Jawaid Bashir Ahmad**
・田代大樹**・出口浩二**

Monitoring of Vibration Characteristics of the Kabashima Bridge by Mobile Communication System

by

Toshihiro OKUMATSU*, Takatoshi OKABAYASHI*, Jawaid Bashir Ahmad**,
Daiki TASHIRO** and Koji DEGUCHI**

Automated remote monitoring system would be effective for the management of infrastructures and high accurate structural identification is indispensable to recognize the level of structural deterioration by change of natural frequency. In this study, we developed the remote monitoring system by mobile communication system and high accurate structural vibration-estimation method. The system was installed to the Kabashima Bridge, an existing bridge in service in Nagasaki. This paper shows the abstract of the system and a few months' bridge monitoring results.

Key words: remote monitoring, vibration characteristics, structural Identification, AR model

1. はじめに

橋梁構造物は、車両走行による荷重変動、風また地震動などの外力を絶えず受けるため、損傷および劣化が経時的に発生していく。そのため、継続的に維持管理を行う必要がある。また高度経済成長期に建設された多くの橋梁は建設後50年を経過しており、維持管理体制を早期に構築する必要がある^{1),2)}。国および地方公共団体の財政的状況から、多額の予算を既存橋梁の維持管理に充てることは難しいため、効率的で信頼性のある維持管理方法を確立することが現在の課題である。従来、主として行われてきた目視点検による維持管理方法では、人的コストや効率性の面で問題が残るため、新しい維持管理手法の確立が求められる。さらに、労働人口の減少、公共投資額の削減などの背景から、低コストかつ効率的な維持管理システムの開発が必要とされている。

構造物の健全度を評価するための様々な技術が数多

く提案され^{1),3),4),5)}、維持管理手法として確立している。橋梁に損傷・劣化が発生すると、局所的な剛性の低下が起り、その結果、固有振動数に変化を生じるが、その変化量は微細である^{6),7)}。また損傷の度合いや位置によっても、振動特性の変化に影響を及ぼす。これらの理由により、振動特性の変化から橋梁の健全度評価を行うためには、高精度な分解能を有する振動特性推定手法の開発が必要である。

本研究では、鋼ランガー桁橋の長期的な振動特性の変化を確認するために、ARモデルを用いた構造物振動数の高精度推定法^{8),9)}を樺島大橋（長崎市）に適用し、常時微動から固有振動数を観測した。計測については、移動体通信による遠隔モニタリングを適用し、効率化を図った。本報告は、システムの概要および数ヶ月に渡る実橋梁の固有振動数の変化についてまとめたものである。

平成18年6月23日受理

* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

** 大学院生産科学研究科 (Graduate school)

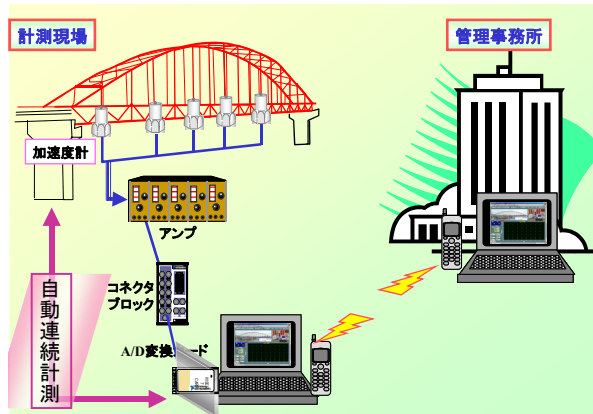


Fig. 1 遠隔モニタリングシステムの概要

Table 1 遠隔モニタリングシステムの概要

機器名	メーカー(型番)	個数
圧電型加速度計	TEAC(707LF)	8
圧電型加速度計用アンプ	TEAC(SA-611)	8
BNC端子台	National Instruments(BNC-2110)	1
A/D変換カード	National Instruments(DAQCard-6062E)	1
ノートパソコン	akia	1
データ通信カード(PHS)	SLI CardH TM 64(CH-S203C/TD)	1

2. 遠隔モニタリングシステムの構成

長期に渡る道路構造物の維持管理を目的とした遠隔モニタリングシステムを開発するため、計測・通信・解析・記録に関する過程を自動化することを念頭においた。本研究では、道路構造物の健全度を推定するための指標として、微小な振動数の変化を検出するため、ARモデルを適用した。仮想計測器ソフトウェアLabVIEWにより構造同定エンジンを開発し、これを現場に設置するクライアントPCに搭載した。Fig.1は遠隔モニタリングシステムの概要を模式的に示したものである。構成機器の一覧をTable 1に示す。

3. 計測装置および計測概要

老朽化が進行した橋梁は、剛性低下により固有振動数が低下することが推察できる。そのため本研究では、橋梁の固有振動数の変化に着目し、健全度評価を行う。固有振動数の変化は、老朽化による影響だけではなく、気温など季節変動による影響も無視できないと考えられる。そこで、実橋梁に加速度計を設置し、2006年1月から6月に渡り橋梁の常時微動計測を行なった。

3.1 対象橋梁

本システムを長崎市野母崎町に架設されている樺島大橋に適用し、長期計測を行った。樺島大橋は橋長227m、中央支間153mの鋼ランガー橋である。架設後



Fig. 2 対象橋梁架設位置



Fig. 3 樺島大橋

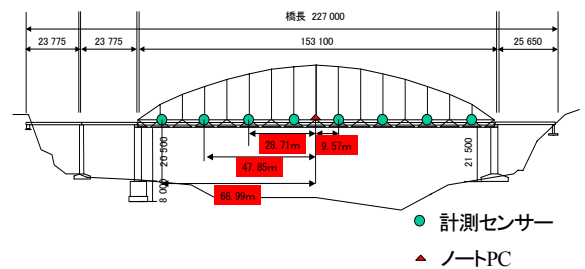


Fig. 4 計測装置設置位置

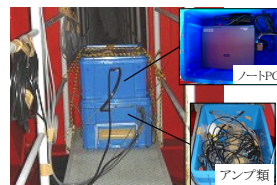


Fig. 5 メインユニット設置状況



Fig. 6 加速度計設置状況

20年を迎え、さらに渡海橋であることから、潮風の影響を受けるなど周囲の環境条件が厳しく維持管理の必要性が高い橋梁と考えられる。対象橋梁とモニタリング事務所となる長崎大学との位置関係をFig.2に、また樺島橋梁の外観をFig.3に示す。

3.2 計測機器の設置状況

本計測では、長崎大学をクライアントとした遠隔計測により、樺島大橋の鉛直方向の加速度（計 8ch）を常時モニタリングする。実測した加速度応答波形に基づき、AR モデルにより樺島大橋の固有振動数を算出する。計測センサーおよび計測機器の設置位置を Fig. 4 に示す。橋梁の横桁の下フランジ部に加速度計を設置する。またノート PC および加速度計用アンプからなるメインユニットは、樺島大橋桁下部の検査路上に設置した収納箱内部に収納した。計測機器の設置状況を Fig. 5 に、センサー設置状況を Fig. 6 に示す。

3.3 計測方法

樺島大橋を対象橋梁とした遠隔計測を行う際、その通信距離は長距離になることから、本計測では PHS による P2P のデータ通信を適用した。樺島大橋の鉛直方向の加速度 8ch 分を、サンプリング周波数 100Hz と設定して計測を実施した。継続的な橋梁維持管理のためには、常時データを観測できる体制を構築することが望ましいが、データの常時観測およびクライアントへの転送は、多額の通信コストを要することになる。本計測では、加速度データの転送を 4 時間ごとに行ない、比較的少量のデータから、定期的に固有振動数を観測するシステムとした。

加速度応答は、5 分間/ch のデータを一回区分とし、各区分の最大振幅を算出する。データの転送を 4 時間毎に行い、設定時間間隔の中で最大振幅を有する 5 分間のデータ区分を転送の対象とする。よって 6 回/日のデータ転送が行われ、30 分間/日/ch のデータ転送が行われる。この加速度応答をもとに、30 秒間を一回区分として固有振動数を AR モデルにより算出する。

4. 計測結果

Fig. 7 に加速度応答のモニタリング画面を示す。これは、計測開始初期の 2005 年 12 月 30 日から 2006 年 1 月 5 日に実施したもので、0~7ch の各 ch とともに 5 分間の加速度応答（単位：gal）を示している。±25gal 程度の範囲内で振動していることを確認した。瞬間的に卓越した加速度応答が検出されている箇所は、車両が橋梁のジョイント部分を通じた際に発生する振動である。ここでの最大振幅はおおよそ 100gal であるが、計測期間中には 200gal 程度の振幅を検出することもあった。クライアントで受信した加速度応答を基に、AR モデルで算出した複素固有値および振動特性のモニタリング画面を Fig. 8 に示す。固有値解析が特に顕著に表れた 3ch に関する解析結果である。画面左下に示

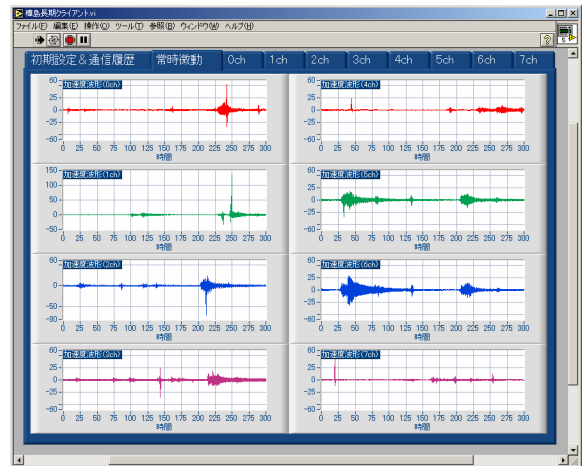


Fig. 7 加速度応答モニタリング画面

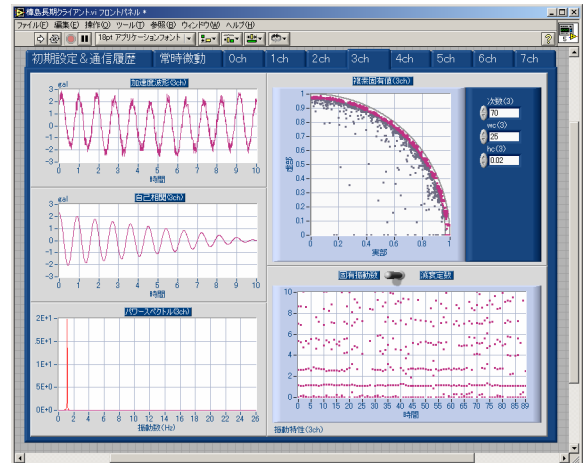


Fig. 8 振動特性モニタリング画面

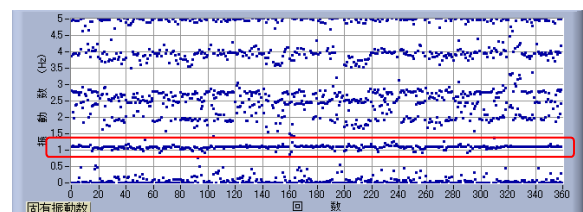


Fig. 9 推定振動数の軌跡

ているのは、加速度応答パワースペクトルである。画面右下は、推定振動数の軌跡を表したものである。横軸は推定回数、縦軸は振動数である。1Hz および 3Hz 付近に固有振動数が存在することがわかる。

4.1 固有振動数の推定軌跡

Fig. 9 は 3ch の加速度計から取得した加速度応答（短期）をもとに、AR モデルで算出した固有振動数の軌跡である。縦軸に振動数、横軸に推定回数を示す。上

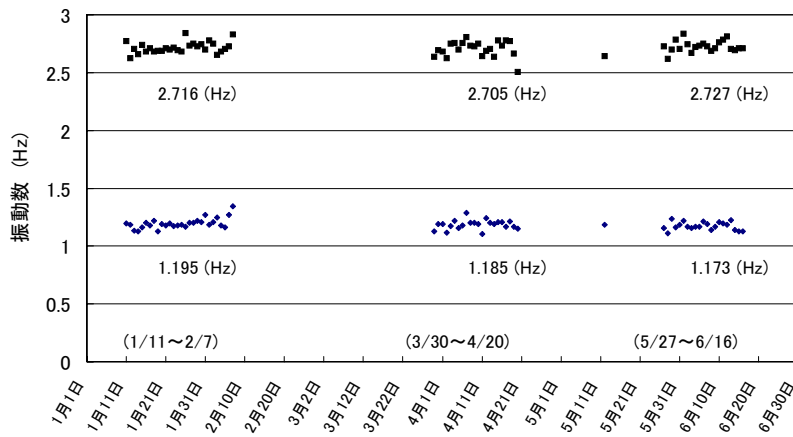


Fig. 10 推定振動数の経時変化 (6ヶ月)

Table 2 推定振動数および標準偏差

振動次数	振動数(Hz)	計測期間		
		1/11~2/7	3/30~4/20	5/27~6/16
1次	平均値	1.195	1.185	1.173
	標準偏差	0.1449	0.1377	0.1330
2次	平均値	2.716	2.705	2.727
	標準偏差	0.1745	0.1574	0.1796

述のとおり，1Hzおよび3Hz近傍に固有振動数が存在することがわかる．他の振動数も算出されているが，前述の振動数に対し，比較的ばらつきが大きいことが確認できる．長期計測による固有振動数の変動を捉えるためには，明確に推定できる振動次数に着目する必要がある．ここでは，3chの1Hzおよび3Hz付近の固有振動数について抽出し，その経時的な変化について検討する．

4.2 固有振動数の経時変化

樺島大橋の固有振動数の長期変動を観測するため，2006年1月から6月の冬季から春季に至る約6ヶ月間，常時微動計測を実施した．Fig. 10は対象期間の固有振動数を，1Hzおよび3Hz付近について抽出し，プロットしたものである．各データは，加速度応答30秒間(サンプリング周期：0.01sec)を1回区分として推定した固有振動数を，1日ごとに平均処理したものである．実際の振動モードとは異なる可能性もあるが，ここでは，上記の振動数を低次より1次，2次振動として設定した．ここで，2/7~3/29および4/20~5/26の期間，データが欠損しているのは，計測システムへの電力供給が停止したためである．よって，計測期間を前期(1/11~2/7)，中期(3/30~4/20)および後期(5/27~6/16)の3期に分けて考えることにする．Fig. 10内のプロットデータの下部に表示された振動数は，それぞ

れの期間の平均値を示す．また同様の数値をTable 2にも表示している．さらに表中には，標準偏差も併せて表示した．

1次の振動数(約1.2Hz)に着目すると，前期~中期~後期の経時により，0.01Hzと微小ではあるが振動数が低下していく傾向が見られる．冬季から春季へと季節が変動することにより，気温上昇のため鋼材が伸び，全体剛性が微小ながら低下することが原因と考えられる．2次振動については，後期において，上記の説明とは逆の傾向が見られるが，前~中期にかけては，1次振動と同様の傾向があることが確認できる．このことから，本計測結果は，季節変化に伴い振動数も微細に変化することを説明する資料となり得るものである．

5. まとめ

従来，橋梁の長期モニタリングにより経時的な振動特性の変化について検証した例は少なく，振動特性に着目した健全度診断の判断材料となる基礎資料が不足していた．そこで本研究では，開発した構造物振動数モニタリングシステムを用いて，構造物振動数の長期計測を実施し，環境変化に伴う振動数の経時変化を明らかにした．その結果，振動数の変化から構造物の健全度状態を評価するためには，温度変化についても考慮する必要があることがわかった．

本論文をまとめると以下のようになる．

- (1) AR モデルに基づく構造物振動特性推定システム、および移動体通信を用いた長期モニタリングシステムを開発し、実橋梁に適用した。
- (2) 6ヶ月に渡る観測を経て、季節変化（温度変化）とともに、橋梁の振動数が増加することを確認した。
- (3) 振動数の変化から橋梁構造物の健全度評価を行うためには、温度をはじめとする環境計測が必要であることを示唆した。
- (4) 振動数が近接した場合については、振動数抽出に関し改善する余地があるため、継続的なシステムの向上が必要となる。また今後、本計測を継続して年間の振動数の変化を観測する必要がある。

構造物の維持管理を経常的に行うためには、初期の健全状態を適切に評価しておく必要がある。従来、新設構造物に対する健全度評価は、必ずしも実施されておらず、損傷発生時の健全度評価が困難となっているのが現状である。今後ますます重要となる構造物維持管理問題に対処するためには、計測システムの開発のみならず、健全度評価項目を竣工検査項目に導入するなど、包括的システムとして運用していくことが必要と考える。

参考文献

- 1) 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，東京大学出版会，2004.
- 2) 土木学会構造工学委員会 橋梁振動モニタリング小委員会：橋梁振動モニタリングガイドライン，土木学会，2000.
- 3) Fu-Kuo Chang : Proceeding of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA., 1997
- 4) Fu-Kuo Chang : Proceeding of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA., 1999
- 5) Fu-Kuo Chang : Proceeding of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring -The Demands and Challenges-, Stanford University, Stanford, CA., 2001
- 6) 中村充,安井謙：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会論文集第 517 号，pp.61-68, 1999.
- 7) 関雅樹,西村昭彦,佐野弘幸,中野聡：RC ラーメン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関する研究，土木学会論文集,No.731/I-63, pp.51-64, 2003.
- 8) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴：常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自動推定，土木学会論文集 No.759/I-67, pp.271-282, 2004.
- 9) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴：高精度自動振動数推定システムによる構造物損傷の検知に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.51A, pp.479-490, 2005.