橋梁動態長期計測システムの開発と遠隔計測への適用

長崎大学大学院　学生員　○増田　大樹　　長崎大学工学部　フェロー　岡林　隆敏
㈱オーデックス　正会員　　樅山　好幸　　長崎大学工学部　正会員　　奥松　俊博

１．はじめに

従来、橋梁の損傷箇所の発見は主に目視点検で行なわれてきたが、道路資産の蓄積・増加に伴い、作業コストと効率性の両面から効率的な維持管理技術を確立する必要がある。その手法の一つにモニタリングがある。しかし、これまで橋梁の長期モニタリングにより経時的な振動特性の変動と健全度との関係について検証した例は少なく、これらの長期観測結果をデータベース化することで、今後の維持管理に貢献できると考える。本研究は、構造物動特性推定システム[1]を、日本道路公団の協力を得て近畿自動車道の高架橋（PC 合成桁）に適用し、長期的な橋梁動態観測より橋梁の健全度診断を実現しようとするものである。

２．モニタリングシステムの概要

（１）システムの構成

システムの構成を図-1 に、サーバの構成機器一覧を表-1 に示す。本システムは、計測現場の加速度応答および表面温度を測定するためのサーバと、一切の解析処理を行い固有振動数を算出するためのクライアントから構成されている。サーバ・クライアント間は PHS によるダイヤルアップ通信でオンライン化し、相互に通信することができる。このため、機器のメンテナンスを除けば現場に赴く必要がないため、効率的な動態観測を実現することができる。遠隔モニタリングシステムを構築するにあたっては、以下の 3 点を開発目標とした。

① 常時の計測の完全自動化
② 現場内計測機器の遠隔制御
③ 固有振動数の高精度推定

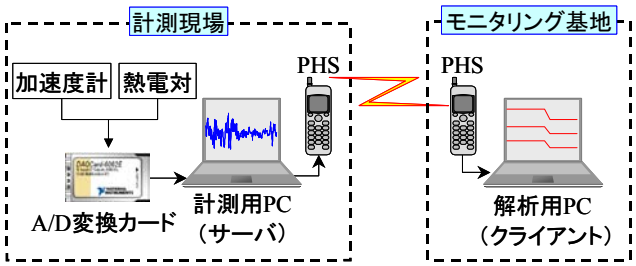


図-1　システムの構成機器

表-1　サーバの構成機器

機　器　名	メーカー（型番）	数量
圧電型加速度計	TEAC（707LF）	4
圧電型加速度計用アンプ	TEAC（SA610 - H）	4
信号調節用キャリア	National Instruments（SC-2345）	1
フィールドスルーモジュール	National Instruments（SCC-FT01）	4
熱伝対	山里産業	2
熱伝対入力モジュール	National Instruments（SCC-TC02）	2
DAQ Card	National Instruments（6062E）	1
PC	Panasonic（CF-28）	1
PHS	日本無線（AH-J3003）	1
外部アンテナ		1

（２）高精度振動数自動推定のアルゴリズム

構造物に損傷が発生した場合、剛性の低下に伴い構造物の固有振動数は低下する傾向がある。この振動数の変化を検知することで、構造物の損傷発生を検知することができると考えられる。しかし、そのためには、微小な振動数変化を検出することのできる高精度なアルゴリズムが必要となる。そこで、本システムでは、AR モデルを用いて橋梁の固有振動数を高精度に算出する構造同定アルゴリズムを開発した。図-2 にクライアントにおける解析フローを示す。加速度応答を y とすると、AR モデルは

$$y(k)+\sum_{s=1}^{n} a_s y(k-s)=e(k)\cdots（1）$$

で表される。ここで、a_s は AR モデルパラメータである。（1）式の特性方程式とその根は

$$z^n-a_1z^{n-1}-a_2z^{n-2}-\cdots\cdots-a_n=0\cdots（2）\qquad z_k=X_{\mathrm{Re}}^k+iX_{\mathrm{Im}}^k\cdots（3）$$

となる。この根と振動パラメータの関係が

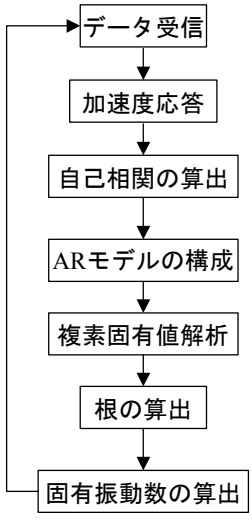


図-2　解析フロー

$$h_k\omega_k = (-1/\Delta)\log\sqrt{X_{\mathrm{Re}}^2 + X_{\mathrm{Im}}^2} \cdots （4）$$

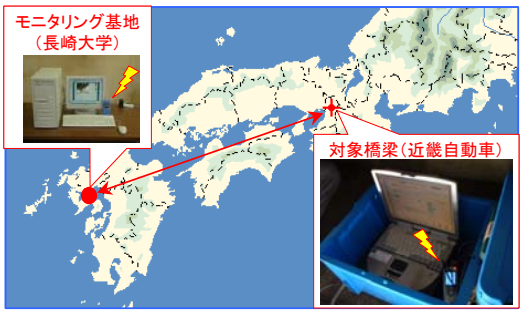
$$\omega_k\sqrt{1-h_k^{\,2}} = (1/\Delta)\tan^{-1}(X_{\mathrm{Im}}/X_{\mathrm{Re}}) \cdots （5）$$

となることから、振動数 ω_k と減衰定数 h_k が推定できる。$e(t)$ は白色雑音過程、Δ は推定データのサンプリング時間である。

３．実橋梁の長期観測

（１）対象橋梁と計測の目的

実橋梁における固有振動数の経時変化を明らかにするために、近畿自動車道に架設されている高架橋の PC 合成桁（4 主桁、橋長 33m）に各種センサーを設置し、長期的な橋梁遠隔モニタリングを実施している。橋梁の健全度評価のためのデータおよび開発した遠隔モニタリングシステムの耐久性に関するデータを蓄積することが主な目的である。モニタリング基地である長崎大学と対象橋梁との位置関係を図-3 に、センサー・計測機器の設置箇所を図-4 に示す。



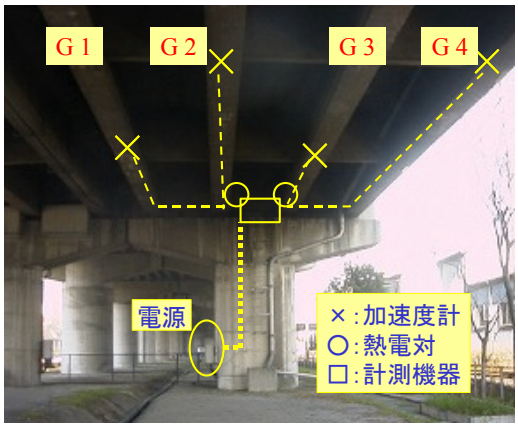


図-4　センサー・計測機器の設置箇所

（２）計測方法

サーバは 24 時間稼動させ、4 時間ピッチで計測データをクライアントへ自動送信する。加速度応答に関しては当該区間内で最大振幅を含む 5 分間分のデータを、表面温度に関しては 5 分毎に算出した平均温度をそれぞれ送信の対象としている。クライアントは、これらのデータを受信し、前述の方法で固有振動数を算出する。これを長期的に繰返し蓄積することで、固有振動数の経時変化を明らかにすることができる。

４．観測結果

各主桁の平均固有振動数の経時変化と表面温度の相関を図-5 に示す。グラフから明らかなように、3 月から 8 月にかけて平均温度が上昇するにつれて、各主桁の固有振動数が低下していることがわかる。逆に、温度が減少傾向にある 9 月から 11 月にかけては固有振動数が上昇傾向を示している。その変化量はいずれも 0.05～0.08Hz 程度と非常に微小なものであるが、本システムにより振動特性の変動を明確に捉えていることがわかる。

システムの耐久性に関しては、計測機器の熱対策が重要となる。機器の防水性を損なうことなく、放熱効果を高めることが今後の課題である。

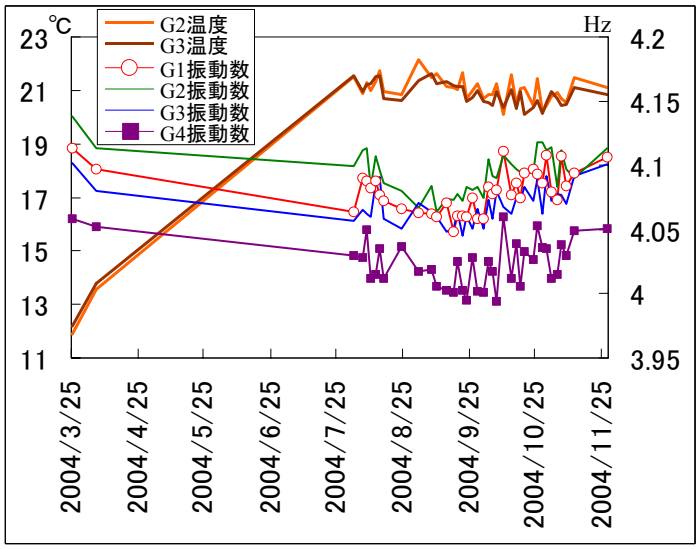


図-5　観測結果

５．まとめ

開発した遠隔モニタリングシステムを実橋梁に適用し、主桁の固有振動数および表面温度を実測した。常時の計測を自動化したことで、効率的な橋梁動態観測を実現することができる。また、検出した固有振動数の変化量が 0.05Hz 程度で極めて微小なものであることから、本システムが非常に高精度な周波数分解能を有していることを確認することができた。

［参考文献］1）木村、岡林、奥松、中宮：高精度振動特性推定法による道路橋損傷の検出可能性の検討、土木学会第 58 回年次学術講演概要　第 I 部門、pp.1279-1280（2003.9）