

橋梁遠隔長期モニタリングシステムの開発と実用化

岡林隆敏*・室井智文**・樺山好幸***
増田大樹****・奥松俊博*

Development of Bridge Remote Monitoring System

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Tomofumi MUROI**, Yoshiyuki MOMIYAMA***,
Daiju MASUDA****, and Toshihiro OKUMATSU*

To recognize the level of structural deterioration by change of natural frequency, high accurate structural identification is indispensable. Also, automated remote monitoring system would be effective for management. The remote monitoring system with high accurate structural vibration-estimation method was developed and the system was installed to the highway bridge in service. This paper shows the abstract of the system and results of about one-year bridge monitoring.

Key words : *bridge vibration, remote monitoring, structural Identification, AR model*

1. はじめに

近年、交通量の増大、車両の大型化、あるいは老朽化などによる道路構造物の損傷が顕在化している。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、道路構造物の蓄積・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。そのためには、膨大な道路構造物に対する点検・調査などの維持管理業務の効率化、定量的な構造物の健全度評価・診断などを支援するための技術が求められる。その手法の一つとして、遠隔モニタリングシステム¹⁾²⁾の導入が考えられる。

遠隔モニタリングシステムとは、遠隔地における情報を時間的、地理的な制約を受けることなくリアルタイムに取得することができるオンラインシステムのことである。橋梁維持管理に適用することで、橋梁の挙動をリアルタイムに参照することができ、劣化損傷の早期発見が可能となる。

本研究では、橋梁の健全度を診断するためにこれらの振動特性に着目する。老朽化に伴う振動特性の変動は非常に

緩やかに進展するため、振動特性の変動から健全度を評価するためには、長期に渡る橋梁動態観測を行う必要がある。また、橋梁の振動特性は、老朽化による影響だけではなく、気温の変化に伴う部材の伸縮によっても変動するので、こうした影響を考慮した上で健全度を評価する必要がある。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、振動特性に着目した健全度診断を行うためには、判断材料となる基礎資料が不足している。

そこで、本研究では、橋梁振動特性の長期モニタリングを目的とした遠隔モニタリングシステムを開発し、実橋梁における振動特性の変化を1年間実測することを目的とした。小型かつ軽量で、常時の計測を無人化・自動化できるシステムを開発することを目標とした。対象橋梁は、近畿自動車道に架設されている高架橋(PC合成桁、4主桁)で、長崎大学をモニタリング基地として振動特性の経時変化をモニタリングし、温度変化との関係を明らかにする。

平成17年6月24日受理

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

** 日本道路公団試験研究所 (Japan Highway Public Corporation)

*** 株式会社オーデックス (ODEX)

**** 株式会社フォーラムエイト (Forum 8)

2. 遠隔モニタリングシステムの構成

遠隔モニタリングシステムの機器構成は、

- ① センサーや信号集録装置のある検出部
- ② 採取したデータを送信するサーバ部
- ③ データ受信や数値解析を行うクライアント部

から構成される。開発した遠隔モニタリングシステムを図-1に、使用機器一覧を表-1に示す。

検出部は、各種センサーおよび増幅器などから構成される。橋梁動態観測に使用するセンサーとしては、振動計(加速度計, 速度計, 変位計), ひずみ計, 温度センサー, 騒音計, ネットワークカメラなどが挙げられる。本システムでは、橋梁振動を検出するための圧電型加速度計, 部材の表面温度を測定するための熱電対から検出部を構成した。

サーバ部は、信号集録装置, A/D 変換カード, 計測用 PC (サーバ), 通信機器から構成され、データの記録・自動送信を行う。使用可能な通信機器としては、携帯電話や PHS といった移動体通信, 無線 LAN などが挙げられる。本研究では、計測現場を大阪府門真市, モニタリング基地を長崎大学とした遠隔計測を行うため移動体通信を利用

しており、通信速度や通信コストについて総合的に判断した結果、PHS を使用することとした。

クライアント部は、解析用 PC (クライアント) と通信機器から構成され、データの受信を受信し、それをもとに数値解析を行い橋梁の振動特性を自動推定する。

3. 長期計測の概要

(1) 長期計測の目的

PC 橋は、老朽化に伴いコンクリートの剥離, 鉄筋の露出・腐食, 遊離石灰の湧出など, さまざまな問題が発生する。本計測では、こうした損傷の顕著な一般的な PC 合成桁を対象に、橋梁の振動特性などの挙動を1年間計測し、モニタリングシステムの耐久性および橋梁の健全度評価のためのデータを蓄積する。また、今後の補修・補強対策などに反映するための基礎資料を得ることを目的とする。

本研究の最終的な到達目標は、橋梁の振動特性の変化から健全度を診断することである。老朽化が進行した橋梁は、剛性が低下することで固有振動数は低下し、減衰定数は増加するという観点から、健全度を評価するための指標として、橋梁の固有振動数および減衰定数に着目している。しかし、これら振動特性は、剛性の低下だけではなく、気温の変動に伴う部材の伸縮などによっても変動する。したがって、定量的な健全度診断を行うためには、あらかじめ温度変化による振動特性の季節変動を明らかにする必要がある。そこで、本計測では、実橋梁に加速度計および熱電対を設置し、平成16年3月から平成17年3月にかけて約1年間にわたる長期計測を行い、振動特性の年変動を実測する。

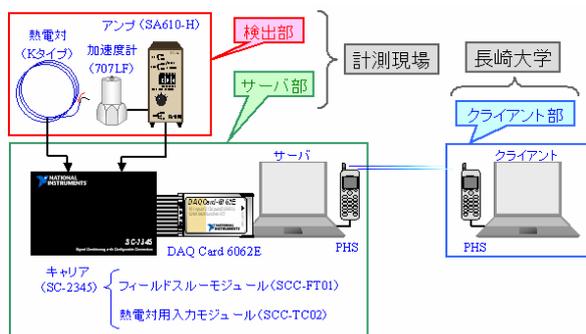


図-1 システムの構成

表-1 使用機器一覧

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
熱伝対センサー	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
シールドケーブル	National Instruments		1
デスクトップPC			1
ノート型PC	Panasonic		1
PHS	日本無線	AH-J3003S	1
カード型PHS	セイコーインスツルメンツ	CH-S202C	1
PHS用外部アンテナ			1

(2) 対象橋梁

対象橋梁は、近畿自動車道に架設されている高架橋(PC合成桁(4主桁))のうち、大阪府門真市に架設されているP39—P40橋脚間の下り線(B-LINE)部分で、橋長は33mである。対象橋梁の一般図を図-2に、対象橋梁とモニタリング基地となる長崎大学の位置関係を図-3に示す。

(3) 計測機器の設置

本計測では、長崎大学をモニタリング基地とした遠隔計測により、対象橋梁の常時モニタリングを行う。計測項目は、床版下部の鉛直方向の加速度(計4ch)および、コンクリート桁下フランジの表面温度(計2ch)である。なお、実測した加速度応答に基づき、開発した数値解析プログラムが固有振動数および減衰定数を算出する。各物理量の測定に使用するセンサー、計測機器は図-4のように設置する。

4つの主桁を内側から順にG1, G2, G3, G4とし、加速度計をG1, G3の1/4点およびG2, G4の1/2点に設置

する。また、熱電対は G2, G4 の P39 側に設置し主桁表面温度を測定する。計測機器は、前述した遠隔モニタリングシステムを使用し、十分な防水、防砂、防塵対策を施した上で P39 橋脚上部に設置する。これらの使用機器の電源は、橋脚下部に設けられているループ式車両検出器から供給する。

(4) 計測ネットワークの構築

遠隔計測を行うにあたって、PHS を利用した計測ネットワークを構築する。通常の遠隔計測では、サーバ部とクライアント部に組み込んだ PHS 同士の直接通信によってデ

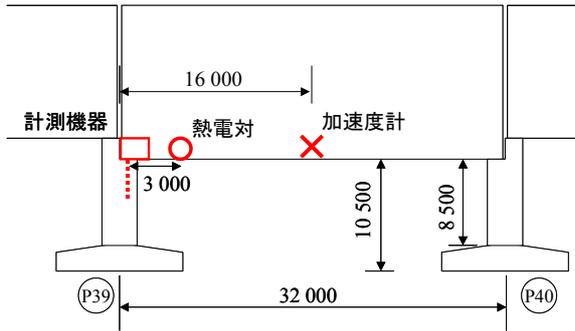


図-2 対象橋梁一般図

ータの送受信を行う。しかし、本計測におけるサーバ部の設置箇所は図-4 のように四方をコンクリートの壁面で囲まれており、閉塞的な空間となっている。このため、計測機器周辺の電波状態が悪く、事前の予備計測におけるダイヤルアップ接続の成功率は30%程度であった。そこで、サーバ・クライアント間の通信を補強するために、図-5 に示す PHS 用外部アンテナを導入した。この結果、ダイヤルアップ接続の成功率はほぼ 100%となった。本研究で構築した遠隔計測ネットワークを図-6 に示す。

(5) 計測方法

床版下部の鉛直方向の加速度を 4ch、コンクリート桁下フランジの表面温度を 2ch の合計 6ch を、サンプリング周波数を 100Hz として計測した場合、すべてのデータをモニタリング基地に転送するためには、約 40 万円/月の通信コストが発生することになる。しかし、振動特性および表面温度の 1 日変動や日平均を算出するために十分なサンプル数を確保することができれば、すべてのデータを転送する必要はない。そこで、データの転送は 4 時間毎に実行することとして、加速度応答、表面温度の計測方法を以下のように定める。

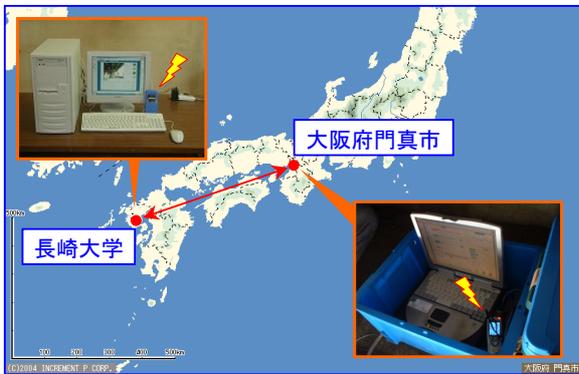


図-3 対象橋梁とモニタリング基地の位置関係

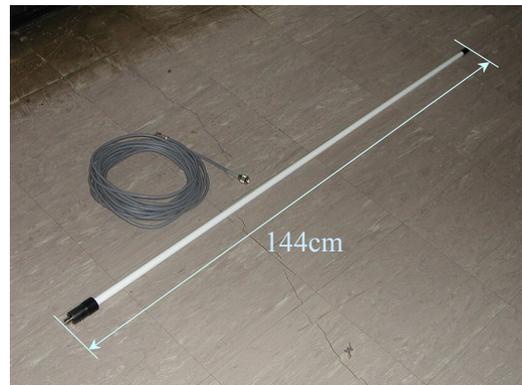


図-5 PHS 用外部アンテナ

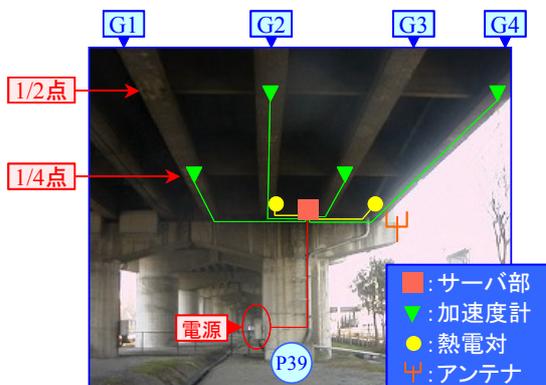


図-4 計測機器の設置箇所

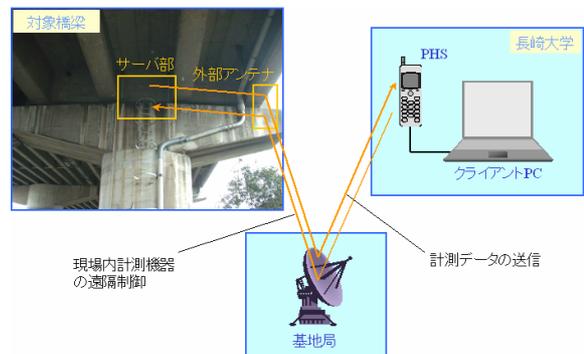


図-6 計測ネットワークの構成

1日(24時間)の計測を4時間間隔で6つの転送区分に分割する。この転送区分内で、加速度応答は最大振幅を含む5分間分のデータを、主桁表面温度は5分間毎に算出した平均温度を抽出し、各転送区分の終了時にまとめて送信する。データの送信方法を図-7に示す。これらの計測データは、モニタリング基地である長崎大学から、図-8に示すモニタリング画面によって確認することができる。以上の条件で計測を行った場合、発生する通信コストは、約1~2万円/月となり、大幅なコストダウンが可能となる。

(6) 高精度振動特性自動推定法

本システムでは、道路構造物の健全度を評価するための指標として、固有振動数および減衰定数に着目する。これら振動特性は、遠隔計測によって取得した加速度応答から算出することができる。

老朽化の進展に伴う振動特性の変動は非常に緩やかに進行するもので、その変化量は極めて微小なものである。したがって、振動特性の変化に着目した損傷診断を行うためには、振動特性を高精度に推定することのできるモニタリングシステムが求められる。

本システムでは、ARモデル³⁾⁴⁾を適用した構造同定アルゴリズムを採用することで、振動特性の高精度推定を実現している。ARモデルとは、時系列解析の一種で、自己

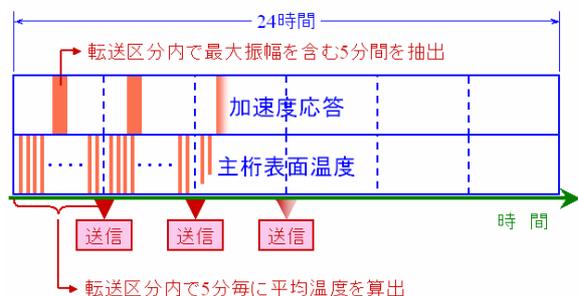


図-7 データの送信方法

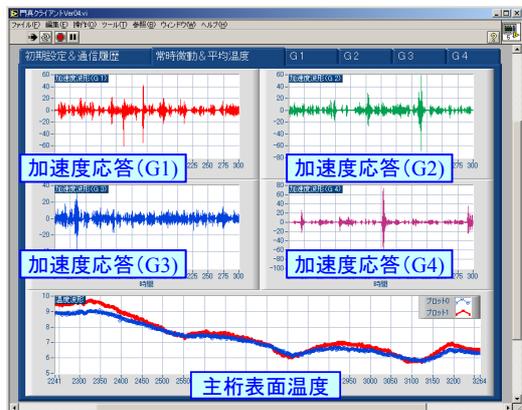


図-8 モニタリング画面

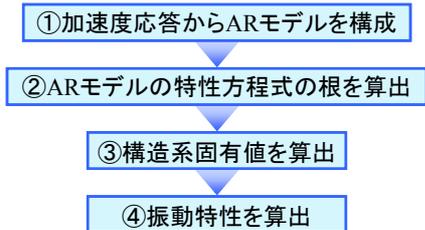


図-9 高精度振動特性自動推定のフロー

回帰モデルとも呼ばれる。ARモデルを適用した振動特性自動推定のフローを図-9に示す。以下に本推定法について示す。

① ARモデルの構成

加速度応答を $y(k)$ とすると 次のARモデルは、次式で表される。

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

ここで、 $e(k)$ は白色雑音過程であり、 $a_1 \sim a_n$ はARパラメータである。このARパラメータは、実測した加速度応答の標本値を利用してYule-Walker方程式より算出する必要がある。Yule-Walker方程式は

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(n) \end{bmatrix} \tag{2}$$

と表され、改めて、

$$Ra = -r \tag{3}$$

と表現する。ここで、 R は加速度応答の自己相関関数であり、

$$R(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i y_{i+j} \tag{4}$$

で算出することができる。以上より、(3)式の解として、ARパラメータ a が

$$a = R^{-1}r \tag{5}$$

により得られ、(1)式のARモデルを構成することができる。

② 振動特性の算出

上記の(1)式で定義されるARモデルの特性方程式は、次式のように表される。

$$z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n = 0 \tag{6}$$

よって、 n 個の特性根が得られることになる。この特性方程式の根は、

$$Z_k = X_{Re} \pm iX_{Im} \tag{7}$$

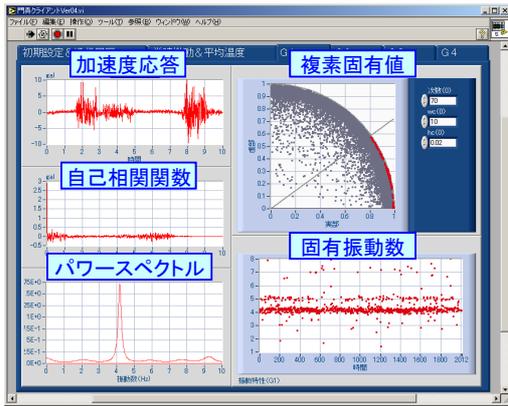


図-10 解析画面

と表すことができ、この根と振動特性の関係は

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta t) \ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2} \quad (8)$$

$$\omega_k \sqrt{1 - h_k^2} = (1/\Delta t) \tan^{-1}(X_{Im} / X_{Re}) \quad (9)$$

となる。ここで、 Δt はサンプリング時間である。次に、(9)、(10) 式の両辺を二乗し加算すると、

$$\omega_k^2 = \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 \left\{ \left(\ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2}\right)^2 + \left(\tan^{-1} \frac{X_{Re}}{X_{Im}}\right)^2 \right\} \quad (10)$$

となり、これより

$$h_k^2 = \frac{\left(\ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2}\right)^2}{\left(\ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2}\right)^2 + \left(\tan^{-1} \frac{X_{Re}}{X_{Im}}\right)^2} \quad (11)$$

となることから、特性方程式の根の実数部分 X_{Re} と虚数部分 X_{Im} より固有円振動数 ω_k 、減衰定数 h_k を推定が可能となる。

本システムでは、以上の過程を自動的に実行するプログラムを仮想計測器ソフトウェア LabVIEW⁵⁾ 6) によって作成した。解析画面を図-10 に示す。

4. 計測結果

(1) 固有振動数の検出

取得した加速度応答から、各主桁のパワースペクトルを算出した。図-11 に G1 の 0~20Hz までの周波数範囲のパワースペクトルを示す。図から明らかなように、約 4.0Hz の近傍に卓越した周波数成分が存在することが分かる。図-12 に示す G1 の固有振動数に着目しても、同様の結果が表れていることがわかる。そこで、固有振動数の年変動を示す際には、図中枠内で示している部分を抽出し、その変

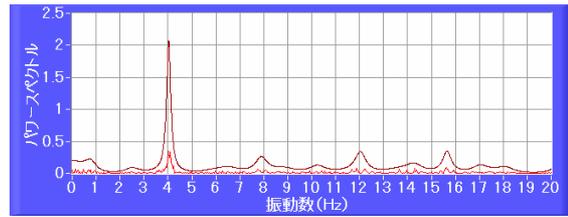


図-11 パワースペクトル (G1)

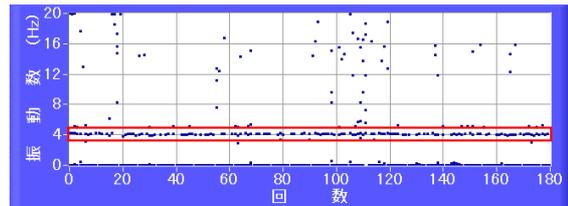


図-12 固有振動数 (G1)

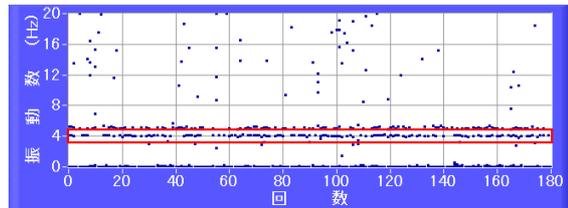


図-13 固有振動数 (G4)

動を固有振動数の年変動として算出することとした。G2、G3 についても同様の措置を施すこととした。唯一、G4 のみは、図-13 に示すように、約 5.0Hz の近傍にも固有振動数が検出されているが、他の 3 主桁と比較検討するために、G4 についても、図中枠内で示す部分を抽出する。

(2) 固有振動数の年変動

固有振動数の年変動の算出方法について以下に記す。

まず、蓄積したデータの中から連続する 3 日間のデータを抽出し連結する。次に、この連結データをもとに 10 日間前後の間隔で固有振動数の平均値を算出する。これを繰り返して、得られた平均固有振動数の推移から固有振動数の年変動を算出する。算出した固有振動数の年変動を図-14 に示す。横軸は経過日であり、また縦軸の主軸は固有振動数 (Hz)、副軸は温度 (°C) である。

固有振動数の変動波形に着目すると、気温の低下とともに、固有振動数が 4 主桁とも増加している傾向が顕著に表れていることがわかる。変動の主な原因としては、気温の変化によって、PC 桁に働くプレストレスが変化したことなどが考えられる。また、主桁ごとに変動波形を比較すると、各主桁とも同じような軌跡を描いていることがわかる。このことから、温度変化による影響が、各主桁に一様に及

ばされていることがわかる。

各主桁の固有振動数の変動量は表-2 に示すとおりである。この結果から、対象橋梁の固有振動数は年間を通して一定に保たれているのではなく、気温の変動とともに変化していることが明らかになった。

(3) 減衰定数の年変動

固有振動数の年変動と同様の算出方法で、減衰定数の年変動を算出した。算出結果を図-15 に示す。概して、固有振動数の年変動と同様に、外気温の低下とともに、減衰定数が上昇する傾向にあることがわかる。しかし、4つの主桁の挙動には、固有振動数に見られるような規則性が見られない。したがって、固有振動数、減衰定数の両面から健全度を診断するためには、さらに高精度な減衰定数推定法が必要である。

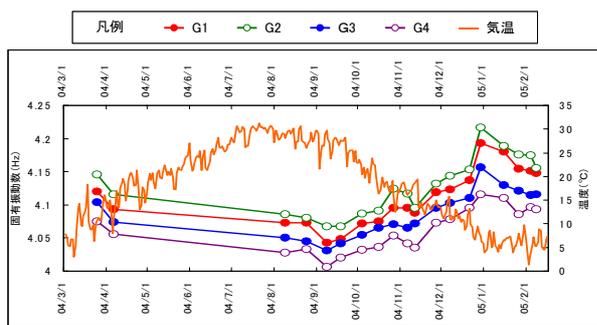


図-14 固有振動数の年変動

表-2 固有振動数の年変動量

	固有振動数 (Hz)				気温 (°C)
	F1	F2	F3	F4	T0
最大値	4.193	4.217	4.157	4.116	31.2
最小値	4.043	4.068	4.031	4.006	1.3
変動量	0.15	0.149	0.126	0.11	29.9

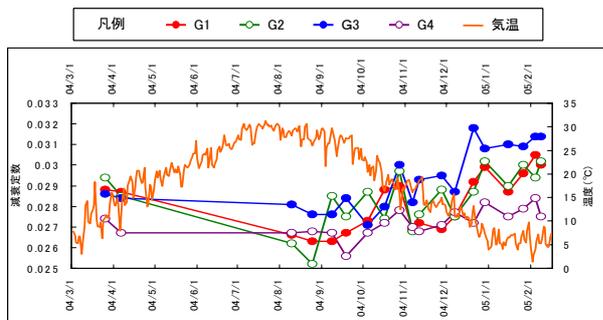


図-15 減衰定数の年変動

(4) 計測システムの耐久性

長期計測を実施する場合、計測システムの耐久性が問題となる。特に計測用 PC やアンプ、信号調節モジュールなどの計測機器から発生する熱に対する対策が必要である。また、橋梁振動計測を行なう場合、計測システムは屋外に設置することが一般的であるため、計測機器を設置する際には、十分な防水・防塵対策を施す必要がある。よって機

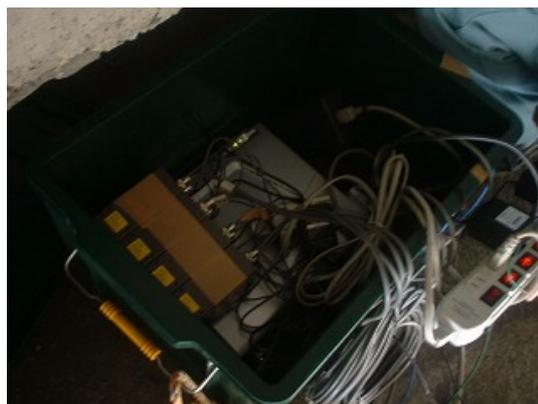


図-16 計測機器設置状況 (改善前)



図-17 計測機器設置状況 (改善後)

密性と放熱性に優れ、同時に携帯性のあるシステムであることが望ましい。

計測開始当初、図-16 に示すように、計測機器一式をひとつのプラスチック製ケースに収納していた。ケースは各種ケーブル用に開けた穴を除いては、ほぼ密閉した状態であった。PC のハードディスクおよび A/D コンバータ (PCMCIA カードタイプ) に、過度な熱上昇が原因と考えられる故障が発生した。また、ケース容量が小さく高気密性であったため、ノート PC のディスプレイを閉じた状態で収納していたことも、過度な熱が発生した原因と考えられる。その後、計測システムの収納方法について改善を行った。図-17 に示すように、過度な熱が容器内に蓄積しないよう、収納ケースに計測機器を分散させて収納した。また通気用孔を数箇所設ける等の改善を行った。このような改善により、以後、計測システムが支障なく稼動することを確認した。

5. まとめ

橋梁の健全度診断のための遠隔長期モニタリングシステムを開発し、実橋梁 (PC 合成桁, 4 主桁) に適用した。本研究によって得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 移動体通信を用いた橋梁遠隔長期モニタリングシステムを開発し、従来人的に行われてきた計測作業の自動化・無人化を実現した。また高精度振動特性自動推定エンジンを本システムに搭載することで、遠隔地の橋梁の振動特性 (固有振動数・減衰定数) の変化を長期に渡りモニタリングできることを確認した。
- (2) 1 年間の長期モニタリング結果から、固有振動数が温度変化とともに変動することが明らかになった。固有振動数は気温の上昇とともに低下し、逆に気温の低下とともに上昇する傾向にあることを確認した。

- (3) 減衰定数においては、温度が低下するとともに、全体的に減衰定数が増加するという傾向が明らかになった。しかし、固有振動数の年変動に見られたような各主桁に共通する特徴は検出されなかった。したがって、固有振動数および減衰定数の両面から健全度を診断するためには、さらに高精度な減衰定数推定法が必要となる。
- (4) 実橋梁において長期に渡り計測を行なう場合、計測システムの防塵性、防水性および放熱性を十分に考慮する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 岡林隆敏, 山森和博, 田丸康広, 吉村徹: 可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.327-337, 1998
- 2) 岡林隆敏, 吉村徹, 河村進一, 細川雅史: 無線 LAN およびインターネット技術を活用した橋梁施工管理のための遠隔計測システム, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.285-292, 2001
- 3) 中溝高好: 信号解析とシステム同定, コロナ社, 1988
- 4) 木村啓作, 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴: 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 回年次学術講演会講演概要集, pp.1279-1280, 2003
- 5) 井上泰典: 計測制御のための LabVIEW グラフィックプログラミング入門, 森北出版, 1995
- 6) LabVIEW ユーザマニュアル, National Instruments, 2000