

常時微動計測による橋脚基礎の ヘルスマニタリングシステム

渡邊 諭* 佐溝 昌彦*

Health-monitoring System for Bridge Pier Foundation by Micro-tremor Measurement

Satoshi WATANABE Masahiko SAMIZO

Bridge pier foundations occasionally become unstable due to scouring around piers under flood conditions. Operational restrictions imposed according to water level are practical methods to secure safe train operations. We have developed a prototype of monitoring system in order to evaluate integrity of bridge pier foundation quantitatively and easily by micro-tremor measurement. However, the system has some problems in terms of accuracy and reliability in application to evaluation of soundness of bridge piers in practical environment. Therefore, it is required to improve electrical functions and control program of the system. This paper reports the outline of study executed on upgrading of functions and principal specifications of the developed system for monitoring stability of bridge pier foundation.

キーワード：微動，固有振動数，洗掘，橋脚，健全度

1. はじめに

河川増水時には洗掘等の影響で橋脚基礎の安定性が低下する場合がある。このため、鉄道事業者は橋りょう周辺の水位に応じて必要により運転規制を行って列車の安全を確保している。これまで、増水による運転規制を解除する際の判断支援を目的として、橋脚の固有振動数が既知であれば、増水時の微動から橋脚の固有振動数が特定でき、その変化で増水時における橋脚基礎の健全性が評価できることを示すとともに、測定から評価までを自動で行える評価システムのプロトタイプ（以下、評価システム）を開発した¹⁾。しかし、システムの機能および評価精度の向上や、実用化に向けたシステムの信頼性の向上が技術的な課題として残されていた。

本検討では、それらの課題を解決することを目的として、健全性の指標となる橋脚の固有振動数を求める方法のうち、卓越振動数の探索範囲とフーリエスペクトルの解析データ取得時間について検討し、健全度評価方法の定量化と精度向上を目指した。さらに、情報技術を活用して、遠隔地から評価システムの制御と評価結果の監視が行える機能を付加した遠隔制御可能な橋脚基礎の健全性評価システム（以下、ヘルスマニタリングシステム）を製作した。本稿では、それらのシステム改良に関して検討した内容とともに、動作確認のために実施したヘルス

モニタリングシステムによる現地での稼働試験の結果について述べる。

2. 健全性評価手法の精度向上に関する検討

微動により増水時の橋脚の健全性を評価するためには、橋脚の固有振動数 f_{0l} に相当する微動による固有振動数 f_{0m} を精度良く特定することが必要となる。そこで、卓越振動数の特定精度を向上させるため、橋脚の固有振動数 f_{0l} が既知である場合に、微動測定データから算出したフーリエスペクトルにおける卓越振動数の探索範囲と、フーリエスペクトルを算出する際に用いる解析データ取得時間に着目し、微動による卓越振動数 f_{0m} の特定手法について検討した。なお、この検討は、増水による洗掘が発生しないように防護された橋脚²⁾ で測定した微動データを用いており、増水中に橋脚の固有振動数が変化しない前提で実施した。

2.1 卓越振動数の最適探索範囲の特定²⁾

微動による卓越振動数 f_{0m} は、次の二つのステップ、すなわち、第一ステップ：既知の橋脚の固有振動数 (f_{0l}) を中心として、測定データの卓越振動数の探索範囲を設定し、ついで、第二ステップ：設定した探索範囲内で微動データのスペクトル振幅が最も大きなピークを示す振動数（卓越振動数）とする、ことによって求めることにした。ここでは、どの程度の探索範囲を設定すれば微動に

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

特集：防災技術

よる卓越振動数 f_{0m} を的確に把握できるかが課題となる。

そこで、最適な探索範囲を特定するために、既知の固有振動数 f_{0l} と300秒間の微動データから解析データ長を1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 160, 200と300秒として計算した f_{0m} との差の絶対値(以下、残差)を求め、それを f_{0l} で割った値を残差の推定誤差として解析した。

ここで、増水時(桁下水位4.8m以下)の4日分のデータについて残差の推定誤差と探索範囲との関係を整理したのが図1である。図1は、 f_{0l} を中心にして探索範囲を $f_{0l} \pm \Delta f_0$ としたもので、 Δf_0 は f_{0l} のそれぞれ5, 10, 15, 20と30%とした。

この図によれば、探索範囲 $\Delta f_0/f_{0l}$ が5%の場合は残差の推定誤差は0.008~0.495となり、30%では0.056~0.14となる。一方、10%では0.008~0.029と5段階の探索範囲の中で最も小さくなる。探索範囲と残差の推定誤差との関係がこのような傾向を示すのは、探索範囲が狭い場合には探索範囲内にピークを特定できない場合があり、反対に広い場合には橋脚の固有振動数 f_{0l} とは異なる振動数のピークを特定してしまうためと考えられる。このことから、当該箇所の場合最適探索範囲を $\Delta f_0/f_{0l}$ が10%とすることによって、既知の卓越振動数 f_{0l} と微動による固有振動数 f_{0m} の残差の推定誤差のばらつきを小さくすることができる。

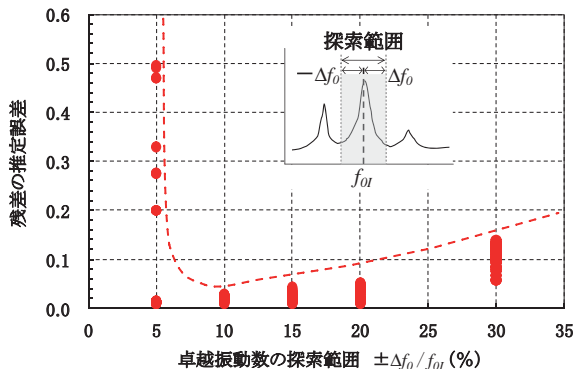


図1 卓越振動数の探索範囲と残差の推定誤差との関係

2.2 データ取得時間長の特定²⁾

2.1節で、微動データから卓越振動数の最適探索範囲の特定方法について述べたが、処理するデータ取得時間長(以下、解析データ長)によっては微動から求める卓越振動数 f_{0m} にばらつきが生じる可能性がある。このばらつきをできる限り少なくできる解析データ長について検討する。ここでは、解析データ長を1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 160, 200と300秒の16段階に設定し、最適探索範囲の検討で求めたものと同様に、解析データ長別に残差の推定誤差を求めた。なお、微動による卓越振動数 f_{0m} を探索する範囲は $\Delta f_0/f_{0l}=10\%$ とした。解析データ長ごとに残差の推定誤差の

平均値と標準偏差($\pm \sigma$)の範囲を解析データ長と残差の推定誤差との関係を図2に示す。

これによれば、解析データ長が60秒より短くなると、残差の推定誤差は急激に大きくなり、それが60秒よりも長くなると残差の推定誤差の最大値はほぼ一定の値になることがわかる。解析データ長が60秒以上のデータについて残差の推定誤差の平均値 m と標準偏差 σ を求めると、それぞれ、 $m=0.0145$ と $\sigma=0.0030$ となる。図2に示す実線の60秒以上の範囲はちょうど $m+1\sigma$ の値に相当する。増水時には橋脚基礎の卓越振動数 f_{0m} を可能な限り速やかに評価することが望ましいため、解析データ長は可能な限り短く設定する必要がある。ここでは、残差の推定誤差がほぼ一定となる60秒を最適解析データ長とすることが妥当であると判断した。

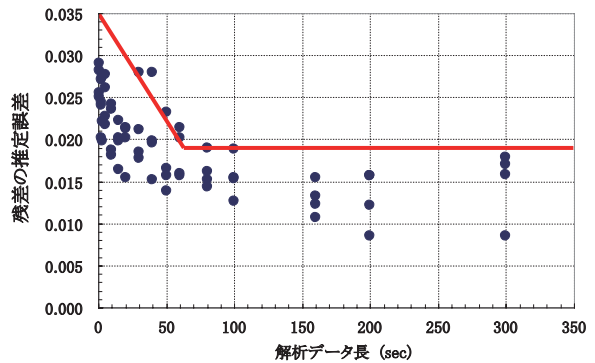


図2 解析データ長と残差の推定誤差との関係

3. 既往の評価システムの課題

既往の評価システムは橋脚の微動測定から固有振動数評価までを自動で行い、かつある程度の期間を稼働させられる機能を有していたが以下の点で課題が存在しており、評価システムを現場で適用する上で不都合な点であった。

- (1) 消費電力の抑制のため、データ処理装置のコンピュータは必要最低限の性能のものが採用されており、リアルタイムで演算処理を行い、健全性を評価できるチャンネル数に制約がある。
- (2) 評価結果の確認や測定条件の変更を行うためには、データ処理装置の直接操作が必要である。
- (3) 評価システムの動作電源は、現地にはシステムを動作させる電源設備がないことを前提に、AC電源ではなくバッテリー(鉛蓄電池)を用いているが、1~2ヶ月ごとの交換が必要である。

これらを解決するために要求される性能としては次のような点が挙げられる。

- (a) 微動計測データの演算処理能力の向上のための、処理装置内のプロセッサや内部メモリを増強する。
- (b) 遠隔地からの評価システムの制御と健全性評価結果の継続的な監視を可能とするため、橋りょう上での微動計測から得られた評価結果や測定条件の

設定情報をインターネット上のデータサーバー(以下、サーバー)に保存するための無線通信機能を付加する。図3に示すようにこれらのデータの共有化により、遠隔地からのアクセスによってリアルタイムでの計測監視が可能となる。

- (c) バッテリー消費量の低減のため、バッテリーと太陽電池とを併用し、バッテリーへ逐次充電する機能を付与するとともに、バッテリーの電圧監視および電圧低下時のシステムの休眠および自動復帰機能を付与する。

このように、新たな評価システムでは (a) ~ (c) の機能を付加したシステム開発が必要であるとともに、上述の卓越振動数の最適探索範囲およびデータ取得時間長の検討結果に基づいて橋脚の微動から固有振動数を定量的に評価するための演算処理プログラムの改良が必要となる。以下では、システムのハード面およびソフト面の改良内容についてそれぞれ述べる。

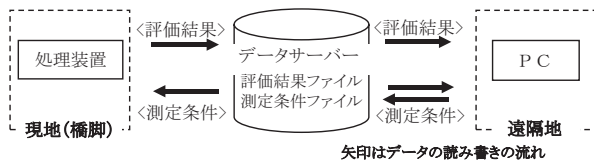


図3 遠隔地からの制御とデータ共有化のイメージ

4. 既往の計測システムの改良

4.1 計測機器および演算処理装置の機能向上

4.1.1 ヘルスモニタリングシステムの機器構成

ヘルスマニタリングシステムの機器構成の概略を図4に示す。ヘルスマニタリングシステムは、測定対象の橋脚上に設置する「速度センサ」と「水位計」、システムの制御と健全性評価を行う処理装置からなる「計測処理装置」、計測システムとサーバーとのデータ伝送用の「通信端末」、それらの動作電源となる「電源部」、などから構成されている。また、現地で処理装置との間を無線LAN接続して評価システムの制御・監視を行うモニターPCも必要により用いることができる。また、遠隔地では、インターネット上のサーバーに対して複数のPCからアク

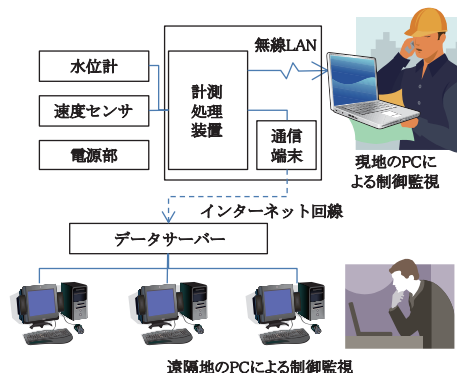


図4 ヘルスマニタリングシステムの概略構成図

セスでき、PCごとに評価結果の確認や改良型評価システムの測定条件を変更するなどの制御が行える。

4.1.2 演算処理装置の仕様比較

改良前後の評価システムにおける処理装置の主な性能の比較を表1に示す。主な変更点は、プロセッサとプロセッサOSの変更、通信用携帯電話への対応、ウォッチドッグタイマーによる自己動作チェック機能の追加などである。なお、ヘルスマニタリングシステムでは消費電力を抑えるため、処理装置本体にディスプレイを具備していない。このため、動作の確認や現地での設定は、無線LANにより接続したモニターPCを用いて行うこととした。

表1 新旧評価システムの主な仕様比較

| | 改良型評価システム | 既存の評価システム |
|-------------|--|---------------------------------------|
| 電源 | DC11V~14V AC85~132V (UPS 付き) | DC11V~14V AC85~132V |
| 通信速度 (通信端末) | 送受信最大 384kbps | — |
| プロセッサ OS | サブコンパクト PC Onboard Via MARK 533MHz Windows XP embedded | PDA GENIO e830W インテル PXA272 520MHz |
| システムメモリ | 512MB | 128MB |
| I/O | USB2.0×2 (通信端末、メモリ用) | SD メモリ |
| ディスプレイ | なし (出力端子はある) | PDA 画面 |
| Ethernet | 無線 LAN (IEEE802.11b/g) | 無線 LAN (IEEE802.11b) |
| 記録媒体 | USB メモリ (4GB) | SD メモリカード (2GB) |
| 測定間隔 | 10分~256時間 | 1分~255分 |
| 測定時間 | 1分~連続稼働 | 1分~連続稼働 |
| 動作監視 | ウォッチドッグタイマー | — |
| 動作環境 | 5~50℃, 防塵防滴構造 | 0~50℃, 防塵防滴構造 |
| FFT 処理 ch 数 | 6 | 1 |
| 評価 ch 数 | 6 | 1 |
| 外形寸法 (mm) | 300W×300D×185H | 238W×238D×125H |
| 質量 (kg) | 4.0 | 2.9 |

4.1.3 通信方法およびサーバー

現地のシステムからサーバーへの通信手段は、現地での設備をできる限り簡素化するために無線方式とした。また、無線によるデータ通信には2GHz周波数帯のデータ通信専用の携帯電話を用いることとした。ヘルスマニタリングシステムで利用するサーバーの要件には、FTP通信に対応していること、容量が10GB以上あること、利用条件が限定していない (例えば、商用利用が可能) こと、セキュリティレベルが高いこと、1日あたりのアクセス (読み出しと書き込み) 数の制限がないこと、サーバーへの同時アクセス端末数の制限が多いこと、サービスを24時間、365日維持できること、などが挙げられるため、これらを満足するサーバーを利用した。

4.1.4 電源部

ヘルスマニタリングシステムでは、橋りょう上に電源設備を新たに設けなくても稼働できるようにするため、バッテリーで稼働させることを基本とした。バッテリーは密閉型の鉛蓄電池 (12V-40Ah/個) を用いることとし、増水時の連続稼働時間の確保と電圧低下抑制の観点から、4個の並列接続とした。また、バッテリーの交換周期を延長させるため、公称最大出力24Wの太陽電池パネルを併用することとした。

特集：防災技術

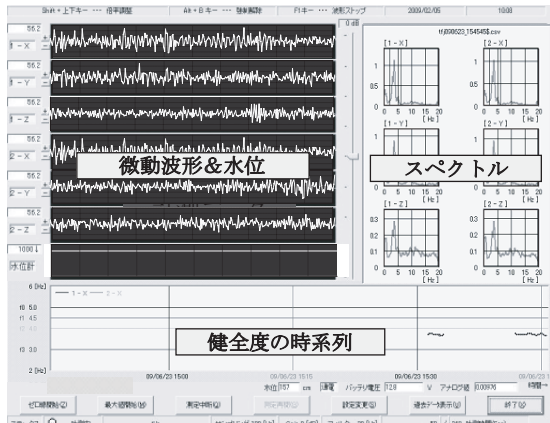
4.2 ソフトウェアの機能向上

4.2.1 遠隔地からの制御方法

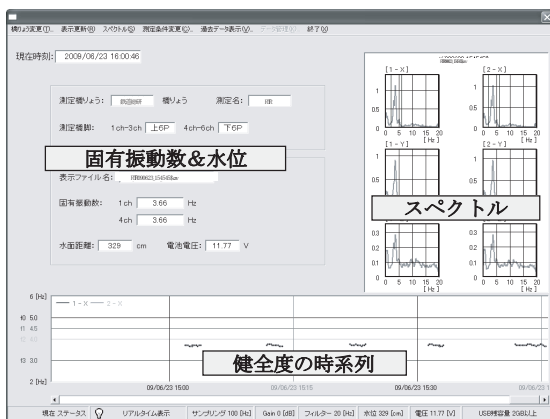
ヘルスマニタリングシステムは、起動の都度サーバーにアクセスして測定条件が記述されたファイルを読み込み、設定された条件で動作する。一方、遠隔地では必要により測定条件が記述されたファイルを書き換えることで任意の条件で測定させることが可能となる。また、何らかの理由で起動時にサーバーへアクセスできず、測定条件が読み込めなかった場合は、直前に設定されていた測定条件で動作する。なお、測定条件の設定は専用の設定プログラムを用いて行い、現行の設定をサーバーから読み込み、確認した上で設定を変更できる。

4.2.2 評価結果の監視画面

評価結果は現地の処理装置に接続されたUSBメモリ内に保存されるとともに、随時サーバーにアップロードされる。このため、サーバーにアクセスできる複数の端末(PC)から同時に評価結果が確認できる。本システムには、現地での監視用と遠隔地での監視用の2種類の監視画面がある。それらの画面の例を図5に示す。現地では測定されている微動の波形がモニターできる一方で、遠隔地では微動の各方向成分のスペクトル図と微動から求めた固有振動数の経時変化および水位を数値として表示できる。



(a) 現地での監視画面



(b) 遠隔地での監視画面

図5 ヘルスマニタリングシステムの監視画面の例

4.2.3 測定モード

ヘルスマニタリングシステムには3種の微動測定モードがある。第一は、主に平水時に用いる「隔測モード」で、一定時間ごとに所定の時間だけ微動を測定し、測定終了時に固有振動数を算出するものである。測定間隔は10分～256時間まで分単位で選択可能である。また、測定時間も1分～60分まで分単位で設定できる。第二は、増水した際に用いることを想定した「常測モード」で、連続測定により逐次固有振動数を算出し、2分ごとにサーバーへ評価結果を伝送する。固有振動数を算出する頻度は任意に設定可能であるが、通常10秒ごととしている。また、常測モードでは測定の開始時刻と停止時刻を設定することも可能である。第三は所定の水位に達すると予め定めた測定モードに自動で移行する「水位連動モード」である。水位情報には評価システムが有する超音波水位計で測定した値を用いる。

なお、時刻設定により常測モードが終了した場合や何らかの理由により測定モードが特定できない場合は、強制的に60分間隔で5分間測定する「隔測モード」に移行する。

4.2.4 システムの休眠と自動復帰機能

ヘルスマニタリングシステムがバッテリーと太陽電池とを併用して稼働する条件での機能として、バッテリーからの出力電圧がある一定値以下となった場合には、バッテリーの過放電を防止するためにシステムを強制的に停止させ、休眠モード(バッテリーの電圧監視と処理装置内部のタイマーのみ動作している状態)に移行させる。また、休眠モードに移行した後、バッテリーが充電され、システムの動作可能な電圧値まで上昇した場合には、自動的に評価システムを再起動させる。

4.2.5 システムの自己動作チェック機能

処理装置はヘルスマニタリングシステムのハードウェアおよびソフトウェアの動作を自己診断している。ハードウェア上の問題でシステムの動作が停止していると判断した場合は、強制的にシステムを再起動させる。また、ソフトウェア上の問題と判断した場合はシステムの電源をオフにし、次の起動を待つ。この機能は、異常動作を必要以上に繰り返すことによるバッテリーの消耗を防止すること、およびシステムの障害発生時の保守軽減を目的としている。

5. 現地稼働試験

5.1 現地稼働試験の概要

ヘルスマニタリングシステムの動作を確認するため、平成21年6月30日～平成21年12月9日までの約半年間にわたり現地試験を実施した。試験を行った橋脚は、上下別線の橋りょうで両者が隣接しており、上下線の橋脚は連絡通路でつながっている。下部工の基礎はいずれ

もケーソン基礎であり、いずれも根固めブロックで防護されている。上部工は上り線が3径間連続の下路鋼桁，下り線が鋼トラス桁である。速度センサは各橋脚の天端に設置し，計測処理装置等は連絡通路に設置した。なお，事前に実施されていた衝撃振動試験の結果から，上下線の橋脚とも固有振動数 f_{or} は6.4Hzであった。速度センサを設置した橋脚の全景を図6に，連絡橋に設置した計測処理装置と電源装置を図7に示す。



(a)上り線橋脚 (b)下り線橋脚
図6 測定対象橋脚



図7 システム設置状況

5.2 現地試験結果

5.2.1 データ通信機能の確認

144回のサーバーへのファイル送信にあたり，散発的に1~3回程度の頻度でファイルの未送信が発生した。この問題については，その後に通信ロジックを見直すことで解決できた。なお，通信障害が発生した場合でも処理装置のメモリ内には測定データと評価結果のデータは保存され，データが消散することはなかった。

5.2.2 バッテリー電圧の変化と電圧低下時の動作

図8は，今回の現地試験中の常時測定を実施した期間を含む7日間におけるバッテリー電圧の経時変化を示す。これによれば，日中は太陽電池による充電によって電圧が回復していることがわかる。また，約30時間の常時測定期間の電圧低下はわずかであった。

図9は，11月下旬から12月上旬の電圧値の経時変化

を示す。この期間では電圧低下に伴いシステムが休眠モードに2回移行したことがわかる。その都度，充電されたことでシステムは自動復帰しており，バッテリー電圧の低下に伴う休眠モードへの移行と再起動の機能が有効に動作することを確認した。しかしながら一方で，充電時の電圧値の最高値が10月上旬の頃の値に比べて2~3Vほど低下している。これは日照時間の減少，太陽電池パネルの設置仰角と太陽光の入射角度の不一致による発電効率の低下および鉛蓄電池の劣化が原因と考えられる。

今回の現地試験では，約半年間バッテリーを交換することはなく，太陽電池とバッテリーの併用によりバッテリーの交換周期を延伸できることが確認できた。

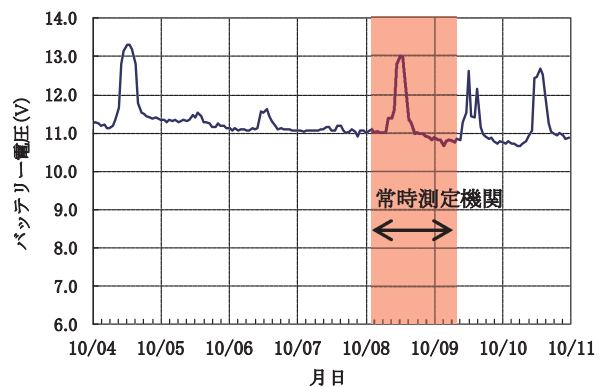


図8 バッテリー電圧の経時変化（10月）

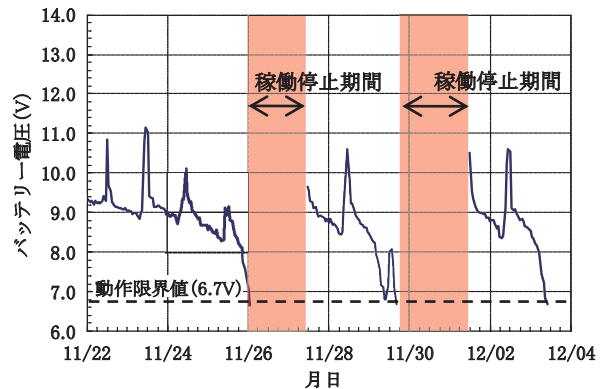


図9 バッテリー電圧の経時変化（11月）

5.2.3 遠隔地からのシステム制御機能の確認

現地試験中に台風に伴う増水が見込まれたため，遠隔地から次のような測定モードの変更を行った。60分ごとの「隔測モード」から，一旦30分ごとにインターバルを短くした後，「常測モード」に変更した。常測モードでの測定を約30時間行った後，水位の低下を確認したので60分ごとの「隔測モード」に変更した。モードが変更されて動作していることを確認した。

また，現地試験期間中，3カ所の遠隔地でそれぞれ改良型評価システムの制御と評価結果の監視を行い，いずれも問題なく機能することを確認した。

5.2.4 増水時における橋脚基礎の健全性評価結果

現地試験実施期間内の10月8日11時~10月9日1時

特集：防災技術

までの間で、約4m水位が上昇する事例が観測された。なお、この水位は列車の運転を規制する水位には達していない。ここで微動から橋脚の固有振動数を特定する方法は、2.1および2.2で述べた方法を採用し、微動のFFT処理で得られたスペクトル波形に対して衝撃振動試験で求めた固有振動数6.4Hzの±10%の範囲(5.76~7.04Hz)で最も卓越した振動数とすることとした³⁾。このときFFTのデータ解析時間長は60秒であり10秒ごとに卓越振動数を特定し、この卓越振動数の5分間(30個)の平均を微動から求めた固有振動数とした²⁾。図10に固有振動数特定の手順の概略図を示す。図11は、微動から求めた橋脚の固有振動数と近傍の水位観測点(国土交通省のテレメータ)の水位の時系列変化との関係を示したものである。これによれば微動から求めた橋脚の固有振動数は約6.0~6.5Hz内で変動するものの、おおむね安定して特定できることが確認できた。

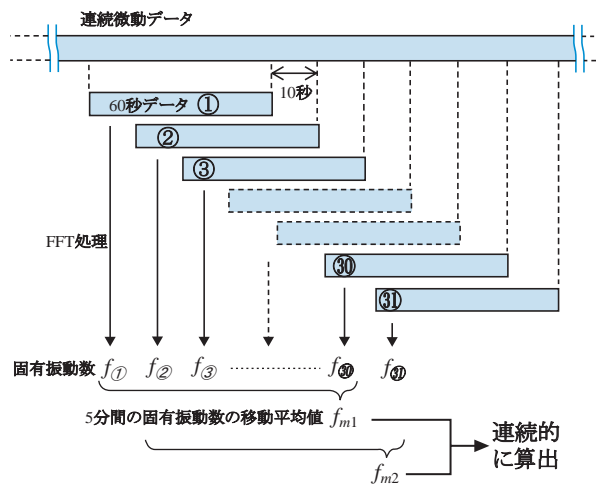


図10 固有振動数特定の手順概要図

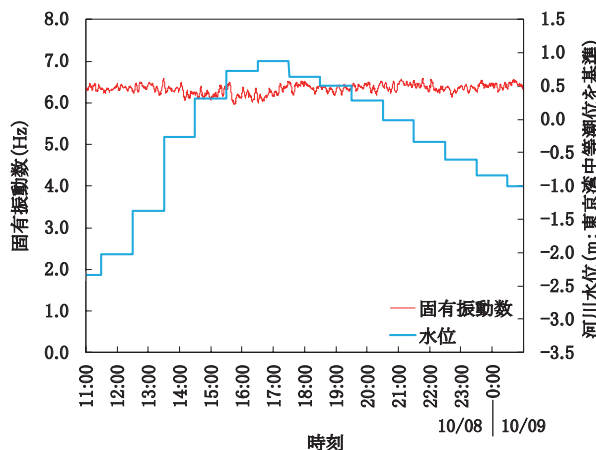


図11 微動から推定した橋脚の固有振動数と水位の経時変化

5.3 システムの課題

今回の現地試験の当初にシステムが自動的に起動しなくなる障害が発生した。原因は、列車通過時の電磁的な

ノイズの影響により、処理装置内の制御用タイマー(ICチップ)が異常を起こしたことによるものと推定された。これは、処理装置の筐体が電波雑音に対してEMC(電磁的な不干渉性および耐性)を十分有していなかったことが原因と考えられた。そこで、処理装置の筐体全体を金属製の網で覆い、さらにアースを取ることで電磁的なノイズから保護するための措置を講じた。この措置を行った後は同様の障害は発生していない。このことから実用化に際してはEMCのガイドラインに沿った仕様を満足する必要がある。

6. まとめ

- (1) 河川増水時における橋脚基礎の健全性を橋脚の微動に着目して評価する手法の適用条件について検討するとともに、遠隔地からの制御と監視が可能となるように評価システムを改良し、システムの稼働試験を行った。
- (2) 今回の現地試験では、バッテリーと公称最大出力24Wの太陽電池パネルを併用することで、約半年間バッテリーを交換することなく稼働することを確認した。一方、日照時間が短くなると発電効率が低下するため、実用化の際には、公称出力40Wクラス以上のソーラーパネルを2枚以上用いることが望ましいことが分かった。
- (3) 遠隔地からのシステムの制御と評価結果の監視では、測定条件の変更を遠隔地から数回行い、いずれも遠隔操作により指示通りの変更が行われた。また、評価結果の遠隔地からの監視も支障なく行えた。
- (4) 現地稼働試験で得られた増水時における微動データから橋脚の固有振動数を算出したところ、6.0~6.5Hz内で変動するものの、おおむね安定して特定できることが確認できた。
- (5) ヘルスモニタリングシステムの実用化に際しては、EMC(電磁的な不干渉性および耐性)のガイドラインに沿った仕様を満足する必要がある。

文献

- 1) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 淵脇晃, 杉山友康: 微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.31-36, 2007.1
- 2) 佐溝昌彦, 渡邊諭, 淵脇晃, 杉山友康, 岡田勝也: 河川増水時における鉄道橋脚の固有振動数の特定方法の提案, 土木学会論文集, Vol.66, No.4, pp.524-535, 2010.10
- 3) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 輿水聡, 杉山友康: 増水時における橋脚基礎の洗掘に対するリアルタイム健全性評価システム, 第44回地盤工学会研究発表会, pp.1703-1704, 2009.7