

遠隔モニタリングによる離島架橋の風速と振動数推定精度の検証

Verification of estimated accuracy of natural frequency affected by wind velocity by bridge remote monitoring

奥松俊博*, Jawaid Bashir Ahmad**, 岡林隆敏***, 下妻達也****

Toshihiro Okumatsu, Jawaid Bashir Ahmad, Takatoshi Okabayashi, Tatsuya Shimoizuma

* 博士 (工学), 長崎大学助教, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

** 工修, 長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*** 工博, 長崎大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

**** 長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

Fundamental study to diagnosis health condition of the bridge has been performed with the ambient vibration with structural identification theories. However, accuracy estimation of bridge dynamic characteristics may not be possible when the bridge is not well excited. Therefore, it is necessary to extract relatively high amplitude vibration data and evaluate the characteristics of the ambient vibration beforehand to apply structural health monitoring. This study pays attention to environmental factor against the accuracy of estimated dynamic characteristics such as wind velocity. Developed remote monitoring system with wind velocity trigger function were applied to the existing bridge and the estimation accuracy corresponding to the wind velocity was verified.

Key Words: health diagnosis, remote monitoring, ambient vibration, weather environment

キーワード: 健全度診断, 遠隔モニタリング, 常時微動, 気象環境

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くの橋梁が供用開始後 50 年を経過しようとし, 橋梁維持管理の重要性が増している. そのため健全度診断技術確立のための基盤づくりが様々な分野において行われている^{1~3)}. 常時微動による振動モニタリングは, 橋梁全体剛性の評価を行うための簡便な計測方法として注目されており, これまで構造同定の精度検証^{4~8)}と計測システムの確立の両面から基礎的研究が行われてきた.

システム同定理論に基づく方法では, 構造物の数値モデルの構成法と構造同定の算法の組み合わせにより, 振動特性の推定法を分類できる⁹⁾. システム同定理論による振動特性推定では, 離散化された状態方程式の係数行列により振動特性を推定する方法, あるいは状態方程式を可観測変換して誘導される ARMA モデルのパラメータより振動特性を推定する方法が用いられてきた¹⁰⁾. 著者らも, 各種の構造同定手法^{11~12)}を用いて, 数値解析と実験の両面からその評価を行ってきた. これらの手法を用いて, 室内実験により損傷発生時の固有振動数の変化

を高精度に検出できることを検証した¹³⁾.

道路橋モニタリングに基づいた振動特性同定および推移観測に関する研究も近年盛んに行われてきている^{14~15)}. 実橋梁モニタリングを行った代表的な事例として, 鶴見つばさ橋の振動実験および解析に対する動的特性同定法の提案¹⁶⁾, 明石海峡大橋の常時微動データを用いた RD 法による固有振動特性の推定¹⁷⁾, また白鳥大橋の常時微動データに基づく高精度のモード特性推定¹⁸⁾が挙げられる. これらの結果から得られた知見は, 振動モニタリングを行う上で有益な情報また健全度診断に適用していく上での課題等についても呈している.

理論的検証が進む一方で, 今後のインフラの維持管理に適応していくために, 業務の効率化を目的とした ICT を利用した研究開発が行われはじめている^{19~20)}. 移動体端末を利用した遠隔モニタリングの導入もそのひとつである²¹⁾.

このように, 常時微動による橋梁振動モニタリングは実用的なレベルに達していると考えられるが, その一方で, 橋梁が十分に励起されていない場合のデータを用いた場合, 振動特性の一定の推定精度を保つことができな

いという問題も確認されている²²⁾。橋梁維持管理技術として確立するためには、これらの対策を講じることが必要と考えられる。また、走行車両の影響²²⁾も無視できないため、事前の詳細な評価・検討が必要となる。

そこで本研究は、橋梁の常時微動に影響を及ぼすと考えられる橋梁周辺の気象環境、特に橋梁の振動を励起させる上で最も影響を与えと考えられる風速に着目し、振動特性の高精度推定を実現するための遠隔モニタリングシステムの開発を行った。橋梁周辺の局所的な気象環境とそれに対応した橋梁振動計測を行うため、開発したシステムを長崎県新上五島町に架設されている頭ヶ島大橋に適用した。得られた結果から、発生風速に対応した加速度および固有振動数の推定精度について検証する。

2. 振動遠隔モニタリングシステム

本システムは、計測者が直接現場に赴くことなく、風速に同期した加速度を取得するために、現場に設置したサーバPCと管理事務所に設置したクライアントPCから構成されている。クライアントPCはサーバPCから送られてきた加速度データ、気象データ（風速、風向、温度、湿度）を受信して結果を表示する。図-1 にモニタリングシステムの概要を示す。

2.1 システム構成機器

本システムを構成する主な計測機器は、温度、湿度、風速、風向を計測するための気象観測システム、橋梁桁部の鉛直方向の加速度を計測するための加速度計および加速度計用アンプ、またPCへの信号出力のためのコネクタブロックおよびA/D変換器である。加速度計については、低周波領域において高い測定精度を有するサーボ型加速度計を適用することが理想的であるが、本研究の計測対象となる橋梁が、気象環境の激しい渡海橋であることから、安価で機械的強度が高く、また耐環境性が良いといった特徴を有する圧電型トランスデューサを使用することとした。遠隔モニタリングのために、サーバおよびクライアントを結ぶための通信機器は、携帯電話サービスFOMA（NTT docomo）を用いた。使用した計測機器の諸元を表-1に示す。なお通信機器には、サーバ、クライアントとも通話型の携帯電話機であるSH901Is（SHARP）を用いた。計測環境が離島であることから、なお使用したPCは、サーバ用としてノート型PC（Compaq NX6310（日本HP））、クライアント用としてデスクトップ型PC（DC5100SFF（日本HP））を用いた。なお、本計測システムは、予めAC電源を使用することを前提として構成した。

2.2 計測用プログラムの開発

本システムの計測プログラムは、仮想計測器ソフトウ

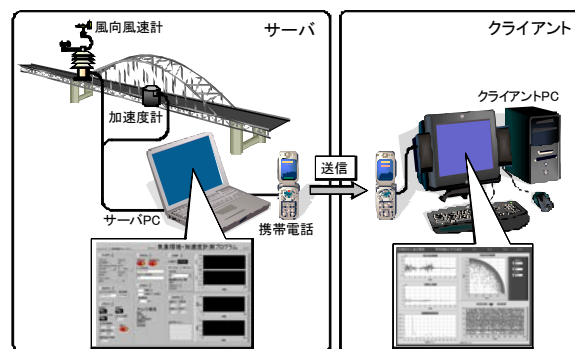


図-1 遠隔モニタリングシステムの概要

表-1 計測機器の諸元

機器	型式	仕様
可搬式小型 複合気象観測システム ／ウェザーミニ	WM-5201 (光進電気工業株)	【風向】 検出方式: 矢羽根-磁気 測定範囲: 全方位 起動風速: 2m/s 精度: $\pm 5^\circ$ 【風速】 3杯-磁気センサー 0~60m/s 2m/s $\pm 5\%$ 【温度】 検出方式: Pt-100Ω測温抵抗体 測定範囲: $-20 \sim +40^\circ\text{C}$ 精度: $\pm 0.5\%$ 【湿度】 静電容量式 0~100% $\pm 5\%$ 【総合】 出力: RS-232C 電源: DC9~30V
圧電型加速度 トランスデューサ (高感度型 電圧出力タイプ)	710 (TEAC)	感度: $300 \pm 20\%$ (mV/m/s ²) 補償温度範囲: $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 周波数応答: $0.02 \sim 200\text{Hz}$ ($\pm 3\text{dB}$) 共振周波数: 約0.7kHz 使用最大加速度: ± 5 (m/s ²) 耐衝撃性: 500 (m/s ²) (peak) 出力インピーダンス: 約300Ω 質量: 約380g / 外形寸法(mm): $\phi 50 \times 60\text{H}$
圧電型加速度 トランスデューサ用 アンプ	SA-611 (TEAC)	入力: $\pm 10\text{V}$ (最大) 定格出力: $\pm 1\text{V}$ (出力インピーダンス1Ω以下) 周波数特性: $0.2 \sim 30\text{kHz}: +0.5\text{dB} / -3\text{dB}$ (Range: H.M時) $0.2 \sim 10\text{kHz}: +0.5\text{dB} / -3\text{dB}$ (Range: L時) 減衰特性: LPF: 1kHz, 10kHz: $-12\text{dB} / \text{oct}$ HPF: 5Hz: $-6\text{dB} / \text{oct}$ 電源: 外部電源AC100V (内蔵乾電池対応) 質量: 440g
PCMCIA スロット用 マルチファンクション DAQ	DAQ Card-6062E (日本NI)	PCMCIA スロット用A/D変換器 分解能: 12bit アナログ入力ch数: 16 (最大) サンプリング: 500 kS / 秒 (最大) 接続ケーブル: SHC68-68EPM高性能シールドケーブル

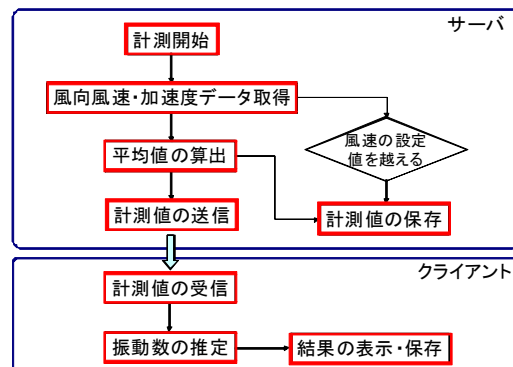


図-2 計測のフロー

エアLabVIEWを用いて作成した。計測プログラムはデータを計測して結果を送信するサーバプログラムと、サーバから送られてきたデータを受信して結果を表示するクライアントプログラムから構成される。これらの計測フローを図-2に示す。

(1) サーバの機能

構成したサーバの主な機能は、a) 計測設定、b) 気象環境データ表示、c) 加速度および気象データの同期、d) 風速の閾値の判定と加速度データの抽出、e) データ保存、

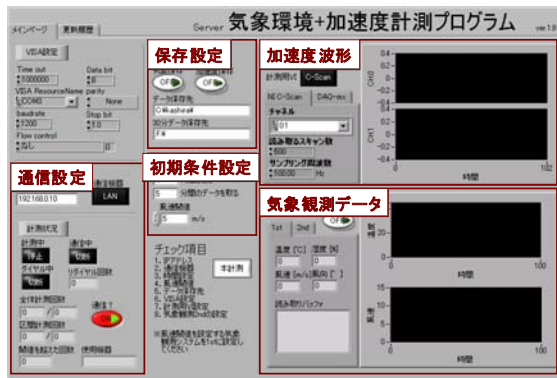
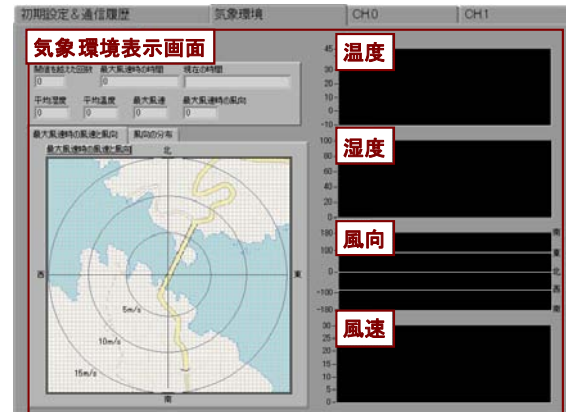


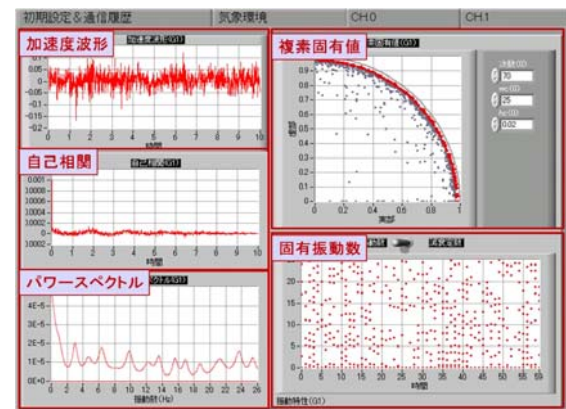
図-3 サーバPCのフロントパネル



a) 対象橋梁および初期設定値と通信履歴



b) 気象観測データおよび橋梁位置



c) 橋梁振動特性同定結果

図-4 クライアントPCのフロントパネル

f) ダイアルアップ接続, g) データ送信の7項目である。気象観測システムで検出された一連のデータおよびA/D変換器で12bit分解された橋梁桁鉛直方向の加速度信号は、それぞれシリアルポート、PCカード(PCMCMIAスロット)を経由してサーバPC(ノート型)へと入力される。ソフトウェア上で同期したこれらのデータは、統計処理された数値と併せてハードディスクへと保存される。ここで、気象観測システムからサーバPCへのデータ伝送間隔は、機器の最小値(1秒)を適用した。またデータ伝送にシリアル通信(有線)を採用しているため、データ転送品質の保証の観点から、両機器間のケーブル長は15mと制限されていることを付記する。

本研究では、風速と振動特性の関係を精査するために、一定間隔ごとに自動計測された風向、風速、温度、湿度等の気象環境データおよび、風速最大値を含む計測ブロックに対応する橋梁桁鉛直方向の加速度データを抽出して保存し、これをクライアントPCに送信するよう設定した。これらの抽出データは、サーバPCからクライアントPCへの自動ダイアルアップ接続により、予め指定されたIPアドレス(クライアントPC)へと送信される。一方、サーバPCのフロントパネルには、通信設定、風速閾値など設定値を入力する箇所を設けた。遠隔地からでもこれらの初期設定値を任意に変更可能とするため、両PCには予めPC Anywhere (Symantec)をインストールしている。図-3はサーバPCのフロントパネル(計測画面)を示したものである。

(2) クライアントの機能

クライアントPCの主な機能は、データ受信、振動特性を求めるための構造同定解析、気象環境データおよび解析結果の表示および保存である。サーバPCで指定したクライアントPCのポートを経由してデータを受信し、構造同定解析を経て、振動特性および気象情報の表示と保存を行う。これによりデータベースが自動構築される。図-4はクライアントPCのフロントパネルを示したものである。図-4a)は計測対象橋梁および初期設定値と通信履歴を、図-4b)は風速、風向、温度、湿度の時系列波形および当該橋梁の平面位置を、また図-4c)は、転送されてきた加速度データをもとに構造同定計算で求め

られた橋梁振動特性の表示結果である。

以上のように、風速および加速度データの自動取得を実現するために、移動体通信による遠隔モニタリングシステムを構築した。最大風速に対応した加速度データの保存と、遠隔地のクライアントPCへのデータ自動転送を行うことで、時々刻々と変化する現場の気象環境および橋梁加速度データの取得とそれに伴う振動特性の推定、さらにデータベースを自動生成する効率的なシステムとして確立した。本システムは、今後重要となる橋梁維持管理のためのモニタリングシステムとしても機能するものと考えられる。



図一5 頭ヶ島大橋の架設位置

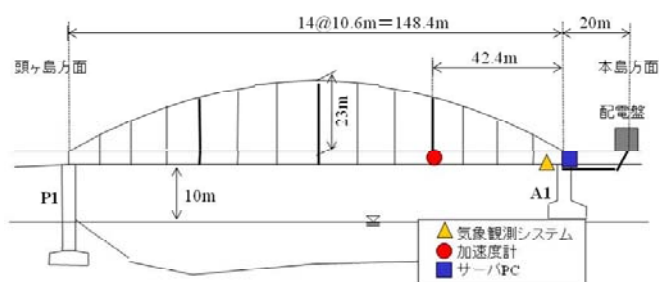


a) 橋梁側面

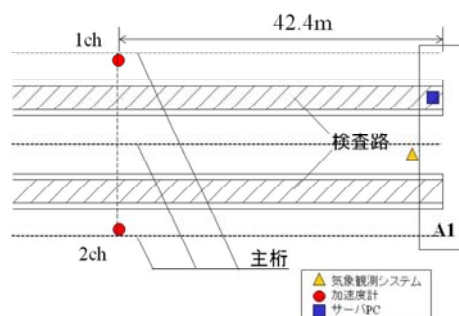


b) 橋梁正面

図一6 頭ヶ島大橋の外観



a) 側面図



b) 平面図

図一7 計測機器設置概略

3. 頭ヶ島大橋における計測

風速に対応した発生加速度および固有振動数の推定精度について検証するため、開発したシステムを長崎県新上五島町に架設されている頭ヶ島大橋に適用し、橋梁周辺の気象環境と橋梁の加速度の計測を行った。以下に、本システムによる実橋梁適用実験の詳細について記す。

3.1 対象橋梁

対象橋梁である頭ヶ島大橋（長崎県新上五島市）は、頭ヶ島と仲通島を結ぶ全長 300 メートル、最大支間約 150m のローゼ桁（3 主桁）道路橋である。これまで同橋梁は上五島空港の開港に合わせて 1981 年に架設され、上五島の空の玄関口と使用されてきたが、現在、同空港は閉鎖され、それとともに車両通行自体は減少している。橋梁は完成から約 27 年が経過しており、潮風などの影響で橋梁桁下空間全体に渡り、錆の発生が随所に確認されている。一方で、離島架橋特有の地形的特色から、海峡を通過する風による橋梁への影響は、他の橋梁と比較しても大きいと言える。実際に長崎県では、風速 25m/s 以上の強風時には通行規制を行っている。図一5に頭ヶ島大橋の架設位置を、図一6に頭ヶ島大橋の外観を示す。

3.2 遠隔モニタリングの実施

(1) 計測設定値の詳細

頭ヶ島大橋の桁鉛直方向の加速度および気象環境を測定するために、当該橋梁に各種センサとサーバ PC を

設置し、平成 19 年 8 月下旬から平成 19 年 11 月下旬までの約 3 ヶ月間、継続的に計測および遠隔モニタリングを行った。モニタリング拠点は対象橋梁から約 80km の距離にある長崎大学（長崎市）とし、ここにクライアント PC を設置した。基本的な計測の流れについては上述したとおりであるが、ここではサーバ PC および関連機器の設置状況、また具体的な計測状況について示す。

気象観測システムから得た風速、風向、湿度、温度の気象データおよび、その時刻に対応した加速度の一連のデータ 5 分間分を 1 ブロックとして、サーバ PC のデータバッファに記録する。ここで、気象観測による平均風速の算出方法は 10 分間平均値が一般的であるが、本システムでは携帯電話により気象データおよび加速度データを転送する必要があるため、コスト面を考慮して、このような措置とした。この計測ルーチンを連続的に実施すると同時に、平均風速を指標とした転送データの抽出を行う。クライアント PC へのデータ転送は 4 時間に 1 回（6 回／日）実施することとし、当該時間内の最大風速を示した一連のブロックデータを転送対象とした。この処理により、励起された常時微動データの抽出が可能となり、その結果として、振動特性の推定精度が比較的良好になると考えられる。クライアント PC へのデータ送信の際、通信状況等の悪化によりネットワークを確立できない場合も考えられるため、そのときの風速値をトリガとしたサーバ PC 内へのデータバックアップ機能も付加した。なお、気象観測システムのデータサンプリングレートは 1Hz、桁鉛直方向の常時微動サンプリングレ



a) 加速度計(1ch)



b) 加速度計(2ch)



c) サーバ PC および関連機器



d) 気象観測システム



e) 携帯電話用外部アンテナ

図-8 各種計測機器設置状況



図-9 クライアント PC

ートは 100Hz とした。両データの時間的な同期はソフトウェア上でやっている。

(2) 計測装置の設置状況

頭ヶ島大橋への計測機器の設置は図-7 に示すとおり、全て橋梁桁下部とした。各計測機器の設置状況を図-8 に示す。加速度計は図-7 a)の側面図に示すとおり、A1 橋台から 42.4m の距離にある橋長 1/4 点とし、図-7 b)の平面図に示すように、外側両主桁の内側部に 2ch 分設置した。図-8 a),b) に加速度計の設置状況を示す。サーバ PC および通信機器類はポリプロピレン製の容器にまとめて収納し、図-8 c) のように、検査路端部 (A1 橋台側) に固定設置した。

気象観測システムの設置位置についても、上述のとおり桁下部 (A1 橋台上部手摺部) とした。同システムの設置状況を図-8 d) に示す。本来、風速測定において障害要素のない桁上空間に設置すべきところであるが、当該箇所を設置した理由は、機器接続上の制約 (シリアル通信によるケーブル長の限界) によるものである。但し、桁下部においても風の吹き通し状況が良好であったこと、現地より北東に 1.5km ほどの距離にあるアメダス (上五島航空気象観測所) の観測データ (風速) と比較したところ、両者の間に大きな差異が認められなかったことから、本計測上の設置の妥当性を認識している。

各装置の電源については、長崎県上五島土木事務所の協力を得て、A1 橋台上部より約 20m の距離にある配電盤より供給した。携帯電話による遠隔モニタリングにつ

いては従来、通信コストや中継アンテナの密度を考慮して PHS を利用してきた経緯があるが、本計測の対象が、離島架橋であることから、比較的人口密度の低い地域でも比較的広範囲な通信網を整備している携帯電話サービス FOMA を用いることとした。しかし、実際は計測環境において、受信感度の低下が認められたため、外部アンテナ (FOMA w821-10, サガ電子工業) を導入し通信環境の改善を図った。外部アンテナの設置位置は図-8 e) に示すように A1 橋台の北西側とした。

図-9 はクライアント PC およびデータ受信用の携帯電話の設置状況を示したものである。

4. 計測結果

前章に示したとおり、本島側支承部付近にノート PC と風向風速計、本島側支承部から 42.4m の地点に加速度計をそれぞれ設置し、2007 年 8 月 30 日から 11 月 31 日の約 3 ヶ月間に渡り継続的に計測を行った。5 分間を 1 ブロックとする計測を繰り返し、平均風速が最大となった区間の常時微動データを 4 時間に 1 度、モニタリング拠点 (長崎大学) に設置したクライアント PC に送信するという手順で行った。

計測期間中に得られた結果をもとに、風速による加速度応答の変動および固有振動数の推定精度に与える影響について検証する。

4.1 風速と加速度応答との関係

本研究は、風速レベルが振動特性推定精度に及ぼす影響を精査することを目的としたものであるが、ここではまず風速レベルと加速度応答との関係について整理する。橋梁支間 1/4 地点に対称に設置した 2 つの加速度計で検知した一連の加速度応答記録と、風速レベルの間の相関について確認する。

それぞれの加速度計で検知した加速度応答記録を風速の大きさごとに分類して示したものが図-10 である。それぞれの平均風速は 5 分間平均値において、2.24m/sec、4.6m/sec、10.69m/sec である。風速レベルが大きくなるとともに、両加速度計で得た加速度応答記録は大きくなる傾向にあることがわかり、10.69m/sec においては 100gal 程度の加速度が生じている。なおこれらの選択したデータブロックは波形形状から走行車両の影響が少ないと思われるものを抽出している。図-11 は、9 月 1 日から 9 月 30 日までの期間得られた両観測点の全データをもとに、風速と加速度との相関を示したものである。ここに、縦軸は各計測ブロック（5 分間）における加速度データの絶対値を平均化したものであり、横軸は各ブロックの風速の平均値である。図中の直線はプロットされた全データを線形近似したものである。風速が大きくなるにつれて加速度も大きくなっていることが確認できるが、その一方で全体的なばらつきも確認できる。走行車両や様々な外乱によるノイズの影響も含まれていると考えられる。

4.2 風速と振動特性推定結果との関係

風速の強弱を指標とした橋桁の振動レベルおよび振動特性推定精度について検証するために、ここでは 3 つタイプの加速度応答記録を抽出して示す。前節において両加速度計で得られた振動レベルが同等であることを確認できたので、以下に示す加速度データは 1ch のセンサから得られたものを示すことにする。図-12 上部の波形は、5 分間平均風速がそれぞれ 1.2m/sec、3.3m/sec および 6.5m/sec のときの加速度応答記録 1 ブロック分（5 分間分）である。なお、前節に同じく、加速度応答波形の特性を目視確認した上で、走行車両の影響が少ないと考えられるデータを抽出している。

図より、風速 1.2m/sec の時の加速度応答は 10gal 程度であることがわかる。これに対し、風速 3.3m/sec の時は 25gal 程度と 2 倍程度の加速度が発生している。さらに、風速 6.5m/sec の時は 50gal 強と、風速 1.2m/sec の時の加速度応答と比較して 5 倍程度の加速度が発生している。このように、風速が強くなるほど、橋桁は大きく振動する様子が確認できる。

次に、それぞれの加速度データを用いて、ERA/DC 法^{23~24)}により振動数推定を行った結果を図-12 の下部に

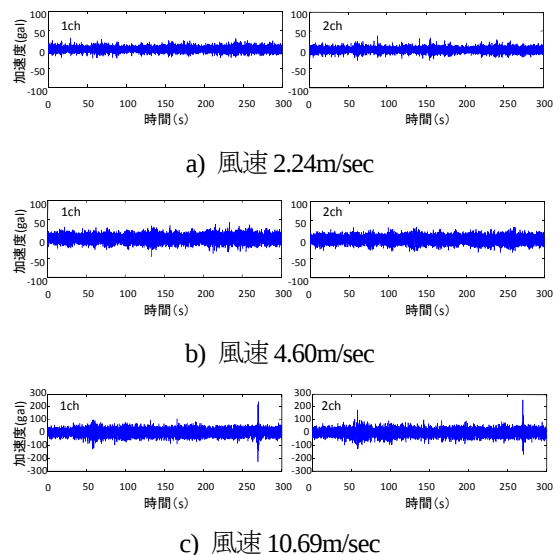


図-10 風速の違いによる加速度応答記録

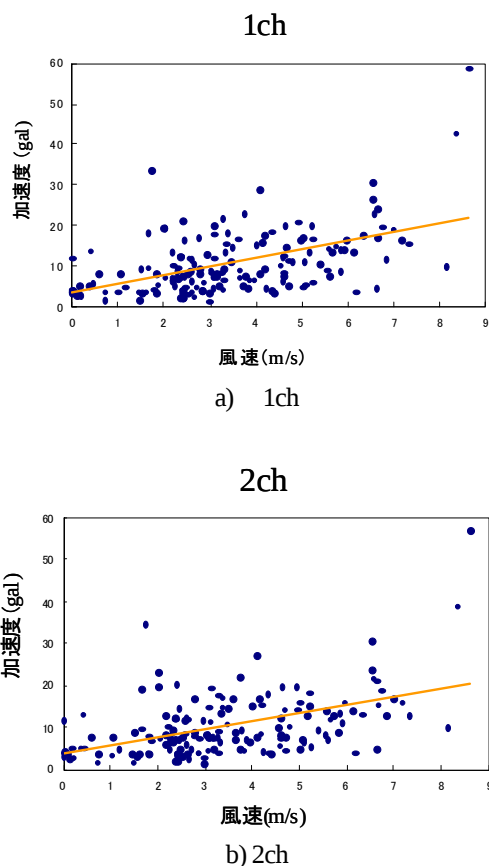


図-11 風速と加速度の相関 (9/1-9/30)

示す。図より、風速 1.2m/sec のとき、つまり橋梁振動が励起されにくい場合は、固有振動数の推定軌跡は現れているが、低次から高次まで全体的にばらつきが見られ、それぞれの境界が不明確となった。この結果から、振動数を精度よく推定することは困難であるといえる。

3 例の中で、中間的なレベルを示す風速 3.3m/sec の場合は、風速 1.2m/sec の振動数推定結果に対し、固有振動数の存在が明瞭になっていることがわかる。その改善効果は高次に比べ低次において効果的であるといえる。

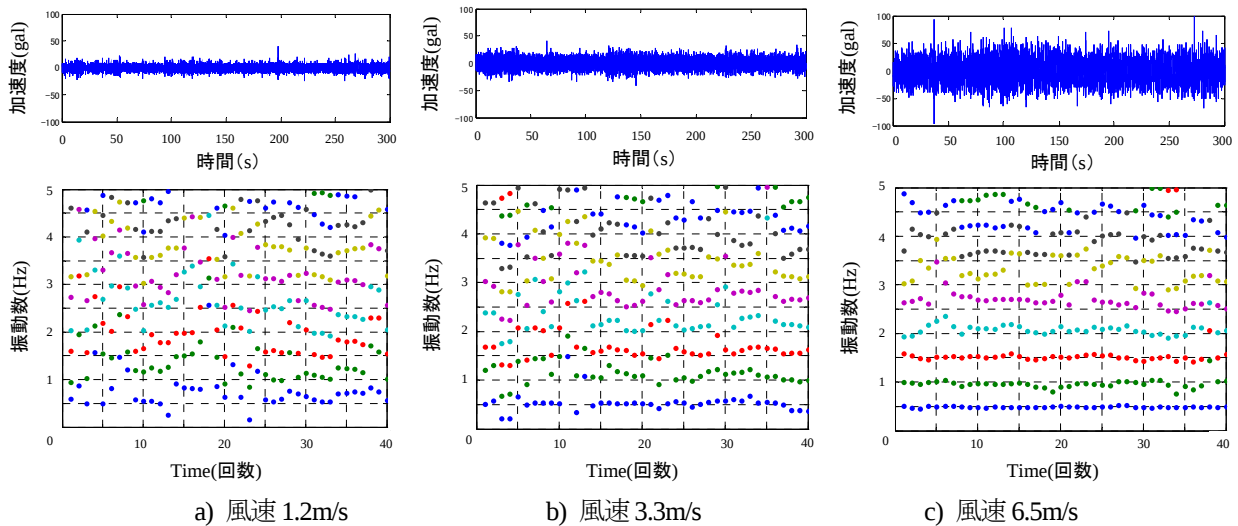


図-12 風速と加速度応答記録および振動数推定結果

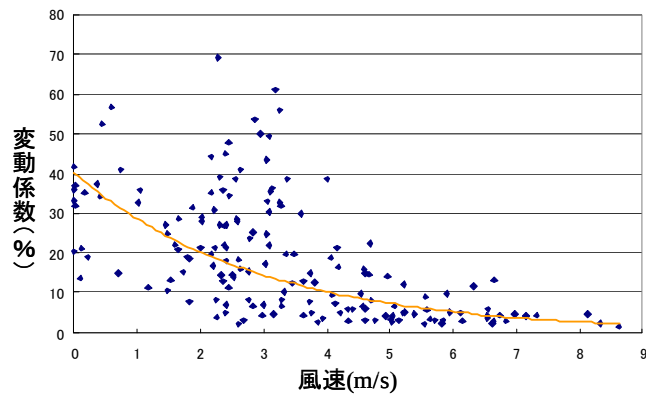


図-13 固有振動数（1Hz 付近）の変動係数と風速との関係

最も風速レベルの高い風速 6.5m/sec のときの推定結果より、全体的な固有振動数推定精度の向上を確認することができる。高次振動数において若干のばらつきが生じているが、特に低次振動数の推定精度の向上は著しい。強風により橋梁全体が大きく揺さられるため、低次モード振動が励起された結果と考えることができる。

以上の結果から、橋梁周辺の最大風速が大きい場合の常時微動データを用いることで、振動特性推定精度を向上につなげられることを確認した。

続いて、9月1日から9月30日までの1ヶ月間に計測された加速度データを用いて推定した固有振動数の変動係数の推移から、風速と振動数推定精度との関係について検討する。ここで、検討の対象とする振動数は、上記の結果をもとに、比較的良好な推定精度を示した、1Hz 付近の固有振動数とした。図-13は、風速に対する固有振動数の変動係数をプロットしたものである。縦軸が推定した振動数（1Hz 付近）の変動係数、横軸が風速を表す。図中の曲線は全データに対する回帰曲線である。

全体的に、風速が大きくなるとともに、変動係数が小さくなって行く様子がわかる。風速 3~4m/sec 程度までの比較的風速が弱い環境条件の場合は、変動係数が 60%程度と高くなり、固有振動数の推定が困難であることがわかる。図-12a)の振動数推定結果を見て分かるように、推定精度が低いため、隣接する振動モードを含めて数値処理されたことも影響していると考えられる。これに対し、風速 5m/sec を境に、変動係数が 15%程度まで急激に減少する傾向にあることから、振動数の推定精度が高くなることを確認することができる。

本橋において低次振動の振動特性推定精度を確保するためには、平均風速が 5m/sec を超える場合の常時微動データを採用することが望ましいことを確認することができた。この値は一般化されたものではないが、今後常時微動による振動モニタリングを行う際には、十分に励起された振動データを選定する必要があることを、本計測結果より呈することができた。

5. まとめ

本研究では、橋梁振動に影響を及ぼす要因の一つである風速と、橋梁の振動特性との関係を明らかにするため、風速に対応した振動遠隔モニタリングシステムの開発を行った。本研究をまとめると以下ようになる。

- (1) 橋梁振動が励起しているときの常時微動を適切に選択するために、橋梁周辺の気象環境（温度、湿度、風速、風向）を検知し、風速に対応した加速度データを記録する、振動モニタリングシステムの開発を行った。また、遠隔地での閲覧を可能とするための、携帯電話を用いた遠隔モニタリングシステムを開発した。
- (2) 開発したシステムを長崎県上五島町の頭ヶ島大橋に適用し、約 80km 隔てた長崎大学において、気象環境と橋梁振動の遠隔モニタリングを実施した。風速が高くなるにつれて、発生加速度も大きくなる傾向にあることを確認した。
- (3) ERA/DC 法に基づく構造同定手法により振動数の自動推定を行い、風速レベルが振動数推定精度に与える影響について検討した。その結果、平均風速が大きい時の加速度データを用いることで、振動数を精度良く推定できることが確認した。
- (4) 約 1 ヶ月間の計測データをもとに精査した結果、頭ヶ島大橋では、風速 5m/s 以上（5 分間平均値）の場合に振動数推定が精度よく行われることが分った。一方で、橋梁振動が十分に励起されていない場合、振動特性の推定が精度良く行われないことについても確認した。

常時微動は車両走行にも影響されるため、今後において、さらに詳細な常時微動抽出方法を検討する必要があると考えられる。また、今後においては、多点計測の実施により、より高次の振動数の推定精度評価を行い、部材の損傷検知につなげていきたい。

謝辞

頭ヶ島大橋の計測に際し、長崎県上五島土木事務所および長崎土木事務所の関係各位には多大なるご協力を賜りました。石橋直樹氏（当時大学院生：現三井共同建設コンサルタント株式会社勤務）には、計測および解析に尽力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

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研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000。
- 3) Pines, D. and Aktan, A. E.: Status of structural health

monitoring of long-span bridges in the United States, Proceedings of Structural Engineering and Materials, Vol.4, pp. 372-380, 2002.

- 4) 阿部雅人，藤野陽三，長山智則，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例，土木学会論文集，No.689/I-57, pp.261-274, 2001。
- 5) ZHANG, J. and SATO, T.: Non-linear hysteretic structural identification by utilizing on-line support vector regression, 土木学会論文集, Vol.62/No.2, pp.312-322, 2006。
- 6) Huang, C. S. and Lin, H. L.: Model identification of structures from ambient vibration, free vibration, and seismic response data via a subspace approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.30, pp.1857-1878, 2001。
- 7) 丸山収，相沢旬，星谷勝：ARMA モデルによる既存構造物の動特性の同定，土木学会論文集，No.416/I-13, pp.439-447, 1990。
- 8) 岡林隆敏，山森和博，讃岐康博，田村太郎：近接固有値を有する構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.633/I-49, pp.93-102, 1999。
- 9) Ghanem, R. and Shinozuka, M.: Structural-system identification I: theory, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.121, No.2, pp.225-264, 1995。
- 10) 千葉利晃：多次元非定常ARMAモデルの同定とスペクトル解析，土木学会論文集，No.338, pp.11-19, 1983。
- 11) 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。
- 12) 奥松俊博，岡林隆敏，房前慎一，舩原祐樹，大岩根健吾：2 段階推定法による橋梁振動特性の高精度自動推定，構造工学論文集，Vol.52A, pp.227-236, 2006。
- 13) 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。
- 14) Peeters, B. and De Roeck, G.: One-year monitoring of the Z24-Bridge: Environmental effects versus damage events, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.30, pp.149-171, 2001。
- 15) Catbas, F. N. and Aktan, A.E.: Condition and damage assessment: Issues and some promising indices, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128(8), pp.1026-1036, 2002。
- 16) 山口宏樹，高野晴夫，小笠原政文，下里哲弘，加藤真志，岡田 淳：鶴見つばさ橋の振動実験による動的特性の同定，土木学会論文集，No.543/I-36, pp.247-258, 1996。
- 17) 勝地 弘，宮田利雄，山田 均，秦 健作，楠原栄樹：常時微動データによる明石海峡大橋の固有振動特性，構造工学論文集，Vol.50A, pp.637-646, 2004。

- 18) Nagayama, T., Abe, M., Fujino, Y., and Ikeda, K.: Structural identification of a nonproportionally damped system and its application to a full-scale suspension bridge, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 131(10), pp.1536-1545, 2005.
- 19) Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M. E. and Kurata, N.: Smart sensing technology: opportunities and challenges, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.11, pp.349-368, 2004.
- 20) Lynch, J. P., Sundararajan, A., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Kenny, T. and Carryer, E.: Embedment of structural monitoring algorithms in a wireless sensing unit, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.15, No.3, pp.285-297, 2003.
- 21) 岡林隆敏, 糸永洋次郎, 木場俊郎, 奥松俊博: 携帯電話インターネット機能による遠隔振動モニタリングシステムの開発, *構造工学論文集*, Vol.49A, pp.299-307, 2003.
- 22) Jawaid, B. A., Okabayashi, T., Ali, M. R., and Okumatsu, T.: Automated dynamic characteristics estimation of highway bridge under ambient vibration by block companion form realization, *Journal of Structural Engineering, JSCE*, Vol.54A, pp. 189-198, 2008.
- 23) Juang, J. N. and Pappa, R. S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of Guidance, Control and Dynamics* Vol.8(5), pp.620-627, 1985.
- 24) Juang, J. N., Cooper, J. E. and Wright, J. P.: An eigensystem realization algorithm using data correlations (ERA/DC) for modal parameter identification, *Control-Theory and Advanced Technology*, Vol.4(1), pp.5-14, 1988.

(2008 年 9 月 18 日受付)