特集≫≫　橋梁

橋梁を対象としたセンシングシステムの考え方と適用事例

佐々木　栄　一

橋梁のメンテナンスにおいて，点検による状態把握が重要となっているが，加えて，近年，点検と点検の間の安全管理，挙動把握，異常検出などを目的とした様々なモニタリングシステムが提案され，現場適用が試みられている。

橋梁の状態を分析し，わかりやすく提示するには，計測する際にコンセプトや分析方法を考えた上でセンサ選定およびセンサの配置を決めることが大切であり，継続的な計測とその継続的データを用いた分析・蓄積である。また，構築されるシステムは，状態を検知する（“センシング”）システムでなければならない。ここでは，現在進めている橋梁を対象としたセンシングシステムの考え方を概説するとともに，適用事例を示す。

キーワード：橋梁，センシング，モニタリング

1. はじめに

我が国は，多くのインフラストックを有しており，橋梁を対象として考えた場合も，その数は 66 万橋を超えて存在している。これらの橋梁には，今後様々な損傷や劣化が顕在化すると予想され，定期的な点検を実施することが求められている。しかしながら，限られた人材や予算を考慮すると，メンテナンス戦略上，より効率的で効果的な点検・計測技術の開発および適用が重要であると考えられる。

近年，点検と点検の間の安全管理や効率的な点検作業へのフィードバックなどを目指して，様々なセンサやシステムを用いたモニタリングシステムが提案され，実際に現場での適用実験が進められている。これらのシステムでは，橋梁の挙動把握，異常検出のために，加速度等の計測を行っているが，なおも研究開発段階にあると言え，鋭意各所で検討が進められている。

これらのシステムにおいて重要であると考えられるのは，目的に応じたコンセプトや分析方法を考えた上で，センサ選定やセンサ配置を行う，システム設計の段階であり，計測するだけとならないようにすることである。しかしながら，一方で，未知の現象についての分析方法が確立されていない，また，現象は既知であっても分析方法が未確立である場合を考えると，予め検討したコンセプトでの計測・分析を実施するほか，データを継続的に取得し，未知の現象が生じた場合，原因究明や分析方法の検討に供するなど将来のより安全な管理に向けた研究への貢献も重要であると考えている。いずれにしてもシステムは，人の目では確認することが容易ではないものについて，計測データを基に分析し，可視化することにより，点検と機能補完することが求められることから，構築されるシステムは，橋梁の状態を検知する（“センシング”）システムでなければならない。

本稿では，現在，筆者らが進めている橋梁を対象としたセンシングシステムの考え方を概説するとともに，適用事例として，離島橋梁を対象として構築したセンシングシステムについて示す。

2. 橋梁を対象としたセンシングシステムの考え方

(1) センシングシステムの目的

橋梁を対象としたセンシングシステムは，様々な目的に応じて設計・適用されるべきものであるが，大きく分けて以下のような 3 つの目的があると考えられる。

①新設橋梁の設計条件の確認：新設橋梁の設計上重要なパラメータが実際に想定したレベルで確保できているかを確認する

②橋梁の状態監視：荷重や外乱に対する橋梁の応答や挙動から橋梁の状態を把握し継続的に監視する

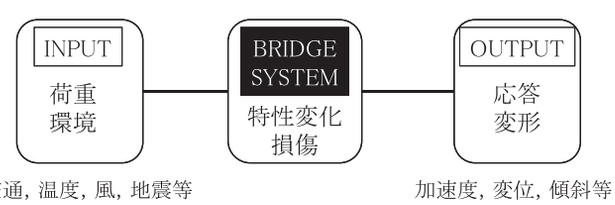
③橋梁の異常検知：限界状態への接近や地震・台風等の荷重での状態変化・異常発生を検出する

これらのうち①は②および③の目的で構築するシステムや分析方法に基づき行われることが想定される。すなわち，センシングシステムは，取得したデータを目的に応じてマルチパーパスに使用することができるものである。そのため，ここでは，②および③について主に述べることとして，後述の適用事例で①についても触れることとする。

(2) センシングシステムのコンセプト

センシングシステムでは，橋梁に加速度計等のセンサを設置して，橋梁の特性変化や損傷等の状態変化監視・異常検知を行うことが目的となるが，加速度等の応答は，アウトプット（Output）であり，橋梁システム（Bridge System）を分析するためのデータである（**図―1**）。また，橋梁は温度や交通荷重等の使用環境（インプット, Input）の影響を受けることから，これらの応答への影響を考慮することが重要となる。センシングシステムのいわゆるメインターゲットは，橋梁システムの変化にあると言えるが，これは直接計測することが困難であると考えられることから，センシングシステムでは，インプットおよびアウトプットを計測し，その計測データを評価に用いるべく適切に処理し（このプロセスを,「データ化」と呼んでいる），橋梁の挙動を整理して，インプットとアウトプットの相関，アウトプットの時系列的な変化等を「特性カルテ」として蓄積する。道路橋などはそれぞれ異なる構造諸元を有していることから，それぞれの橋梁の個性をバックデータとして蓄積し，現在の動きが異常であるか，健全な動きとして有り得るものなのかを判断する基準とする必要があり，このような「特性カルテ」の整備が橋梁を対象としたセンシングシステムのキーとなると考えられる。

なお，交通荷重を分析する際に用いられる Bridge Weigh-in-Motion は，現在も注目される手法となっている。基準となる荷重に対する応答をものさしとして, 応答から荷重を推定する手法であるが, ここでは, 橋梁システムをものさし（影響線など）で表現して，応答からそのものさしを用いてインプットである車両重量を推定するものであるから，アウトプット－橋梁システム－インプットと逆にたどっている手法であるとも考えられる。橋梁システムの変化を捉えることがセンシングにおいて重要であることと，その変化により推定結果もずれが生じると考えられることから，定期的なキャリブレーションで橋梁システム変化を追うとともに，車両重量推定結果の精度確保を図る必要があると考える。



図―1 橋梁を対象としたセンシングシステムのコンセプト

(3) 分析方法とシステム設計

センシングシステムにおいては，インプットに関する情報と，アウトプットデータをともに取得することが重要である。インプットに関する情報については，温度，湿度，交通荷重，風向・風速，地震波等をデータとして取得する。腐食環境について情報が必要である場合は，ACM センサなどの腐食環境センサの適用も有効である。アウトプットデータとしては, 加速度, 速度, 変位, 傾斜などをセンサで取得することとなる。取得したインプットに関する情報とアウトプットデータから，それぞれの特徴をデータベース化するとともに，橋梁システムにおける変化の有無を分析する。

データをどのように分析するのかは，今後も分析方法の高度化とともに改善されていくものであり，イノベーティブな研究対象となっている。現状においては, これまで開発された分析方法を用いて, ①インプット（使用環境）の評価，②アウトプット（応答）の評価，③橋梁システムの評価についてシステム設計し，センサ設置位置などを決定している。①では，温度，湿度などの情報から腐食環境を評価することで使用環境を定量的に把握することとなる。②では，加速度などの大きさなどのほか，変位の分析などが行われる。加速度データからの変位分析は，橋梁を対象とした場合，振動数が低い成分が重要な成分で容易には実施できないため, 現在も分析手法の開発が進められている。

センシングシステムにおいては，③橋梁システムの評価が最重要課題である。橋梁システムには, 上部工, 支承部，下部工がシステム要素としてあり，どの部位のどのような損傷をするかが分析方法の決定においては重要である。振動数や減衰等の振動特性も橋梁システムの特性を表す量とされ，振動数や減衰等を分析するために，ERA などの手法を選定するとともに，センサ位置を決定する。また，現在では，インプットとアウトプットの情報を用いることで，グローバルな損傷，例えば，支承部の不具合等を分析するエネルギーベースの方法が構築されるなど，研究開発が進められ

ている。研究開発による高度化でセンサ位置の決定方法等がより合理的なものとなるものと考えられる。いずれにしても，どのような現状を捉えたいのかを決めることで，それを捉える方法を選定するという考え方でシステム設計を行う。

また，システム設計においては，何を捉えるかを考えた上で，できるかぎりコストを抑えることが重要であるとともに，現場への実装を考えた場合には，電源問題の解決も不可欠である。現在では，ワイアレスシステムによる設置費用の低減，省電力化したセンサの適用，環境発電利用による電源確保などの方法で画期的なセンシングシステムの構築が進められている。次章で，具体的な事例として，現在のセンシングシステムの構築事例を説明する。

3. 適用事例 ―沖縄離島橋梁を対象としたワイアレスシステムによる継続的センシング―

(1) システム構築の目的と課題

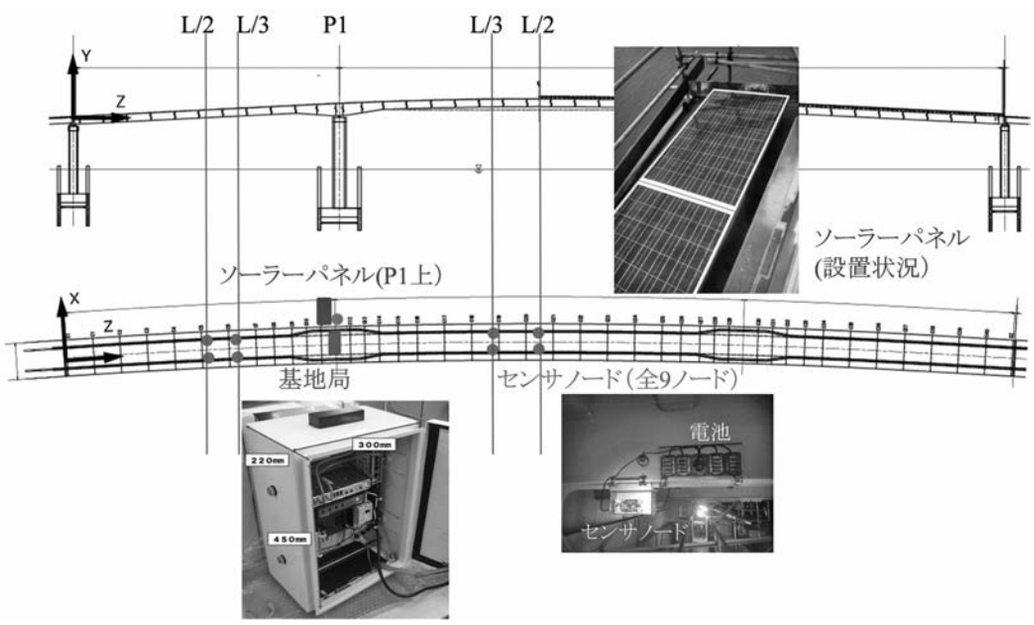
沖縄県離島を結ぶ橋梁は，台風等の強風に見舞われる可能性があり，最大風速 80 m/sec を超える風が予想される場所に建設されている橋梁もある。これらの離島橋梁の強風時挙動および振動特性について情報を取得することは管理上有意義である。そこで筆者らは，強風時など人がアクセスできない状況下でも遠隔地からシステム制御しデータ取得可能なセンシングシステムを開発し，台風時も含め長期間のデータを取得，さらに，振動特性等の分析を可能とする仕組みの構築を試みた。このシステムでは強風時の橋梁挙動および振動特性の把握，腐食環境の把握という目的があり，加速度等のアウトプットデータのほか，温度，湿度，ACM センサの腐食電流値などを計測することとし，インプットとアウトプット，振動特性分析による橋梁システム評価を機能として設定した。加速度のデータから，支承の異常などを分析するなどマルチパーパスな利用方法にも展開できるよう配慮したものである。

(2) 開発システムの概要

対象橋梁は，沖縄県にある離島架橋の 3 径間連続鋼箱桁橋であり，120 m-180 m-120 m のスパンを有している。この鋼橋梁の挙動をモニタリングするためのシステムを構築するため，システム構築に際しては，停電などで商用電源等の安定した電源が利用できない状況や長スパンの鋼箱桁内部での計測といったこれまでのシステムでは対応が困難であった課題に対して，920 MHz 帯のワイアレスセンサを開発・利用するなどにより対応した。具体的には，システム開発においては，電源の問題，コストの問題，通信距離の問題，アクセルの問題などの課題があったが，以下のような対応により解決を図った。

①電源の問題への対応：無電源供給環境に対応するため，センサノードは電池のみとし，基地局は充電池をソーラーパネルで充電する仕組みとした

②コストの問題への対応：設置コストを抑えるため，ワイアレスシステムとし，さらに，センサ数を制限することとした。より多くの振動モード情



図―２　開発したワイアレスセンシングシステムのシステム構成

報取得することを考え，P1 橋脚の両側スパン（側径間および中央径間）のそれぞれ半分の範囲を計測範囲とし，計測位置を各スパンの中央点および3分の1径間の点とした（**図―2**）。その際，ねじれの動きが取得できるよう，各断面で2つずつセンサノードを設置した。また，P1 橋脚の上に1つのセンサノードを置き，計9つのセンサノードで対応することとした。なお，計測時間をより長く確保するため，この9つのセンサノードと基地局のセットを同じ設置位置に2セット設け，計測した

③通信距離の問題への対応：より長い通信距離を確保するため，最大 1,000 m 程度までの通信が可能とされる 920MHz 帯を利用した新しいワイアレスシステムを開発し，適用することとした

④アクセスの問題への対応：FOMA 回線を利用し，インターネットにより基地局にログインすることで，全国どこからでも設定変更およびデータ取得ができる仕組みとした

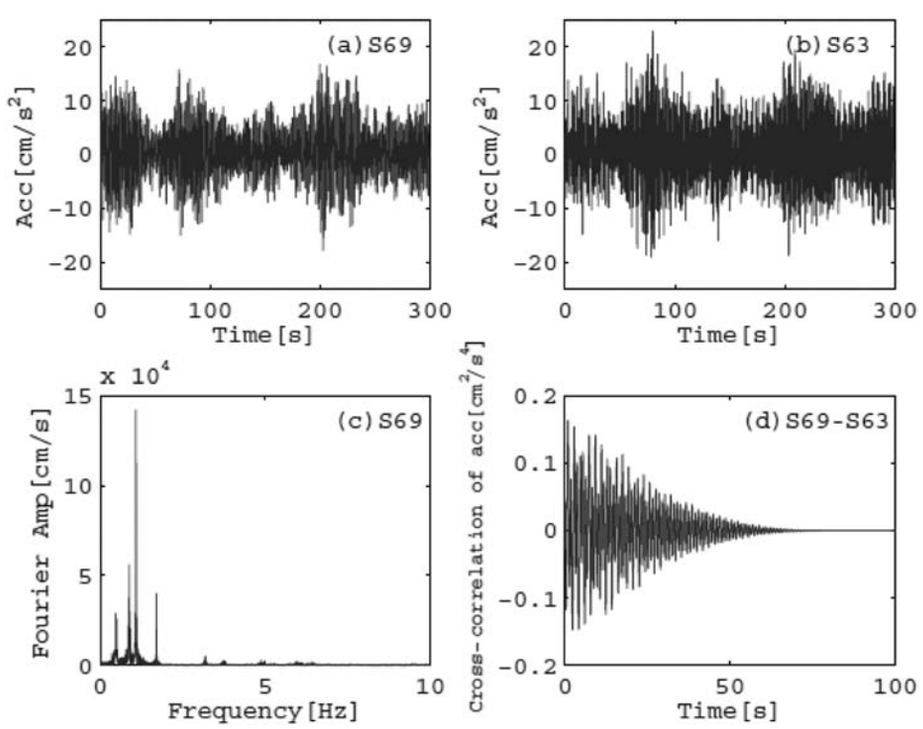
開発したシステムは，ワイアレスセンサで，設定条件管理およびデータ収集を行う「基地局」およびデータを取得する「センサノード」で構成されている。センサノードは，加速度，温度，湿度，ACM センサやピエゾセンサの微弱電流を計測できるようになっており，GPS 電波により同期されている。計測する期間は，1年間以上と設定した。

(3) 開発したシステムによる計測，分析結果の例

本システムによる計測は平成 25 年 8 月から開始し，継続的にデータ取得を行っている。計測中，複数の台風が近傍を通過し停電が発生する状況に至った。そのうち，平成 25 年では台風 23 号が最も接近した経路を通過し，最大 40 m/sec 程度の強風が記録された。開発したシステムは台風時にも問題なく稼働しており，その際に，計測されたデータの例を**図―3** に示す。筆者らは，この際に取得したデータから，台風時の橋梁の挙動を分析するために，ERA 法等の解析方法を適用し

表―1 振動数の分析結果例

Mode	Frequency[Hz]
1	0.4891
2	0.8875
3	1.0888
4	1.7184
5	2.7422
6	3.1902
7	3.7589
8	4.8837
9	5.9630
10	6.1457
11	7.5361



図―3 台風襲来時の計測データの例（S63 および S69 は側径間 L/2 点でのセンサ番号）
（(a)，(b) 計測データ，(c) フーリエ変換結果，(d) NExT により得られた減衰波形）

データ分析を行った。その際，減衰振動波形を取得するために，NExT（Natural Excitation Technique）を利用した。分析の結果得られた振動数を**表―1**に示す。

4. おわりに

橋梁を対象としたセンシングの分野では，データ分析手法の開発が鋭意行われており，画期的な方法が提案されつつある。これまで得られなかった情報が得られるようになるなど，多くのイノベーションを生み出すことのできるフィールドであると考えられる。まだ，多くの課題を抱えているが，人の目では見えない情報を，客観的に集約できるシステムは将来の橋梁メンテナンスで有益なものとなると期待される。点検との補完的な役割を担うべく，コストや分析技術の面でより実用的なレベルへ向けて今後の更なる高度化を図りたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

1）国土交通省：道路構造物の適切な管理のための基準類のあり方と調査の背景，第1回道路メンテナンス技術小委員会資料，2013.
2）国土交通省社会資本メンテナンス戦略小委員会資料，2014.
3）国土交通省社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料，2014.
4）Juan, J.N., Pappa, R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Control and Dynamics,Vol.8, No.5, pp620-627, 1985.
5）長山智則，阿部雅人，藤野陽三，池田憲二；常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解，土木学会論文集，No.745/I-65, pp155-169, 2003

［筆者紹介］
佐々木　栄一（ささき　えいいち）
東京工業大学大学院
理工学研究科　土木工学専攻
准教授

橋梁架設工事の積算　――平成 27 年度版――

■改訂内容
1. 鋼橋編
・送出し設備における説明文章，写真の追加
・少数I桁橋の足場工及び防護工の一部改定
・プレキャストPC床版工，場所打ちPC床版工の一部改定

2. PC橋編
・門構移動装置の新規掲載
・ポストテンション桁製作工他，各工種の適用範囲の明確化
・横組工　地覆・高欄施工足場の記載
・緩衝ゴム設置工　新規掲載　ほか

■B5判／本編1,201頁（カラー写真入り）
別冊197頁　セット
■定価
非会員：9,720円（本体9,000円）
会　員：8,262円（本体7,650円）

※別冊のみの販売はいたしません。
※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせて頂きます。
※送料は会員・非会員とも
沖縄県以外600円
沖縄県　610円（但し県内に限る）
■発刊　平成27年5月21日

一般社団法人　日本建設機械施工協会
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）
Tel. 03 (3433) 1501　Fax. 03 (3432) 0289　http://www.jcmanet.or.jp