

データの大規模化に対応した構造振動データレポジトリシステムの開発

A structural vibration data repository system for the era of 'big data'

北見工業大学社会環境工学科 ○正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学技術部 正会員 坪田豊 (Yutaka Tsubota)

1. はじめに

2007 年のミネアポリスの橋梁崩落事故や東日本大震災で老朽化した鹿行大橋が崩落した事故は、社会基盤施設の機能低下が人々の安全を脅かす現実の脅威であることを示した。特に人口減少と社会基盤施設の老朽化が同時に進行する地方部では、都市機能の集約化などの対策が喫緊の課題だが、それまでに維持管理が十分に行えないことによる道路閉鎖や通行規制による、国民生活の質の低下が懸念される。

このような構造物の劣化に対する状態把握すなわち点検は、現状では技術者の目視によるものが中心である。この点検は各道路管理者により策定された点検要領に基づいて行われるが、点検精度は技術者の技術水準によりばらつきが大きく、客観的で定量的な評価が十分に行われているとは言い難い。また、点検の実施自体も小規模自治体が管理する橋梁などでは橋梁長寿命化修繕計画策定のためによりやく初回の点検が実施されているような状況である¹⁾。

以上の背景に対し、次世代の構造健全度把握手法としてセンサーで構造物の振動や内部応力を把握して、損傷位置や程度を同定する構造ヘルスモニタリング (Structural Health Monitoring: SHM) に期待が持たれている。SHM は、工学の諸分野でセンサー技術、診断技術などの研究が進められており、社会基盤施設においてはその供用期間の長さや使用環境が厳しいことなどが課題であるものの、精力的に技術開発が進められている²⁾。このうち、センサー技術については、配線・設置やシステムの保守に費用や手間がかかる従来の有線センサーに対して、半導体基板上にセンサー素子、CPU、無線通信チップなどを集積したスマートセンサーが開発されている³⁾。スマートセンサーはセンサー素子自体が比較的安価なことに加え、端末上でアナログ信号をデジタル変換し、親機に無線でデータ送信することができる。このため配線やシグナルコンディショナが不要でシステム全体を安価に構成することができ、多チャンネル化も容易である。

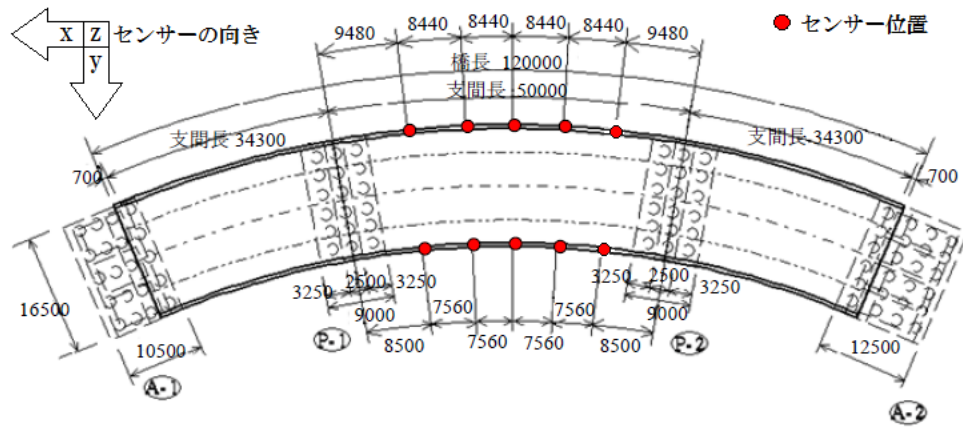
このようなスマートセンサーが土木構造物に多数設置されると、収集されるデータは膨大となりいわゆる「ビッグデータ」の範疇に入る。単一の橋梁でも 1 秒間で 100 点 (100Hz) 以上のデータを数十チャンネルで取得することになる。損傷同定に利用する場合、健全状態でも構造特性の日変動や季節変動があり、経年劣化の状況を把握するための測定データは膨大な量となる⁴⁾。現状では SHM に関する研究は単独の橋梁で収集されたデータに対して、固有振動数やモード形状の変化に起因する

各種の指標の変化を検出することが中心である。スマートセンシングが一般化して多くの橋梁でデータの蓄積が進むと、橋梁間のデータ比較も利用して新しい SHM 技術の進展が期待される。一方、これらの膨大なデータは、現状ではデータロガーやソフトウェアの仕様がメーカーや研究者によって統一されておらず、データそのものも研究室のハードディスクに死蔵されていることが多いと思われる。このような膨大なデータを多くの構造技術者が容易に貯蔵、利用することができれば、スマートセンシング技術そのものの普及が加速し、将来さらに有効な SHM 手法が開発された場合に適応的に適用できるなどの利点が多い。

上記のようなデータ管理に関する必要性については、地震工学分野では米国の NEES プロジェクト⁵⁾や、防災科学技術研究所の E-defense⁶⁾ですでに認識され、データ管理手法の検討が行われているが、橋梁振動モニタリングの分野ではまだ十分な検討は行われていないように見受けられる。そこで、本研究では橋梁振動データの SHM への適用や、近い将来のセンシングデータの増大に対応して、構造技術者にとっても取り扱いが容易なデータレポジトリ (貯蔵) システムを構築することを目的としている。具体的には、Linux サーバ上にデータベースとデータ入力、検索システムを構築し、スマートセンサーを用いて実施した振動測定実験データの貯蔵を開始したため、その内容を報告する。

2. スマートセンサーによる振動計測と取得データ

ここではまず、スマートセンサーを用いた振動実験の例を紹介する⁷⁾。実験対象橋梁は北見市内に位置する 3 径間連続 PC 橋である。本橋では 2001 年の竣工時に 9ch の有線型加速度センサーを用いて振動実験を実施している。この橋梁に対してスマートセンサーを用いた振動測定実験を 2013 年 2 月と 7 月に実施した。使用したスマートセンサーは MEMSIC 社の Imote2 で、加速度センサー部分はイリノイ大学で開発された SHM-H センサーボードを用いている。SHM-H は半導体型加速度計を用いており、水平 2 方向、鉛直 1 方向の測定が可能である。特に鉛直方向には約 0.014gal/LSB の高感度加速度計を用いており、本橋のようなコンクリート系橋梁でも交通振動や常時微動の計測が可能である。このスマートセンサー 10 基を図-1 のように主径間上に配置して交通振動を測定した。振動測定実験の結果は参考文献 7) で報告しているが、橋梁の固有振動数の季節変動が数%程度あることが明らかになった。今後、振動データを用いて SHM を行うためには、健全状態でも継続的なデータの

図-1 実験対象橋梁（平面図）とセンサー配置⁷⁾

蓄積が必要であることがわかる。なお、実験は2月と7月で各1日ずつ行った。1回の測定はサンプリング周波数280Hzで60秒間のデータを収録し、1日で約11～12回の測定を行った。10基のセンサーがそれぞれ3chのデータを取得するため、全チャンネル数は30chとなり、1日では約330～360ch分の測定が行われた。

このような振動測定実験では、センサーから出力される加速度データが最も重要な情報であるが、これを工学的に意味のある情報とするためには、測定のサンプリング周波数やセンサーの設置位置などの情報も一体として記録しておくことが不可欠である。振動測定実験で主に記録される項目を表-1にまとめる。従来はこれらのデータは、別々に記録されることが多かったため、適切な管理やまとめを行わなければ容易に散逸してしまう。本研究では振動データのみならず、関係するデータも一括してデータレポジトリに貯蔵することを意図している。

3. データレポジトリの構築

3.1 データレポジトリの各要素

図-2は、本研究で開発したデータレポジトリシステムの全体概要である。橋梁振動実験に関するデータを統合的に貯蔵するデータベース本体を中心に、データ入力部分とデータ検索部分によってデータベースを操作する。本研究ではデータベースはMySQLを用いている。データ入力とデータ検索はwebサーバ用スクリプト言語PHPによって動的なwebページを生成させて操作を行う。なお、MySQLについては、MySQLサーバをwebページから操作できるツールphpMyAdminがフリーソフトウェアライセンスで提供されている。本システムでこれを利用することも可能だが、操作には一定のデータベースに関する知識が必要なため、本研究では振動データの入力に特化したシステムを開発した。

データベースではデータ入力的一方、登録したデータを有効に使えることが極めて重要である。一般的な振動測定では、複数チャンネルからなる1回の測定データから構造物の振動特性を求め、必要に応じて複数回の測定の平均化処理などを行うが、本研究では、データベースに登録された情報をどの要素からでも検索・抽出できるようなシステムの開発を目指している。

上記のシステムはLinuxサーバ上に構築しており、今後必要なセキュリティ対策を施して公開する予定である。

表-1 振動計測において主に記録されるデータ

分類	項目
測定対象	対象構造物の名称、場所
	構造形式（一般図など）
振動データ	測定値
	単位（gal, mm など）
	サンプリング周波数
	測定時間
センサー	センサーの機種、型番
	製造番号
	校正係数
	設置位置、方向
その他の機器	使用した機器
	機器の設定内容
加振条件	加振方法（自由振動、常時微動など）
	加振位置（位置、時間、方向など）
測定時の情報	測定日時
	測定者
	天候、気温や部材温度など

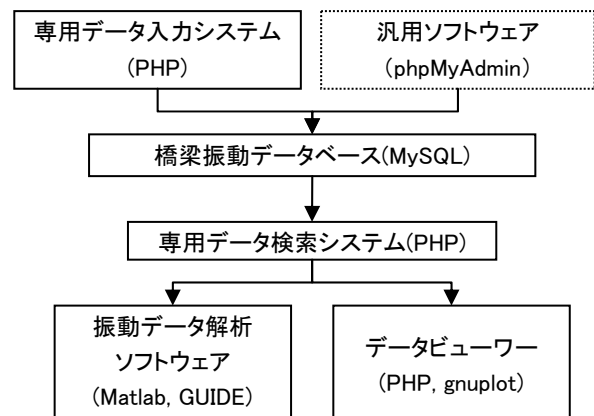


図-2 橋梁振動データレポジトリシステム

3.2 データモデル

本研究ではデータベースとして一般的なリレーショナルデータベースを用いる。リレーショナルデータベースでは関連の深いデータをいくつかの表（テーブル）にまとめ、表と表を関連付けることでデータ全体の集合を構築する。それぞれの表にはユニークな値を持つ項目があ

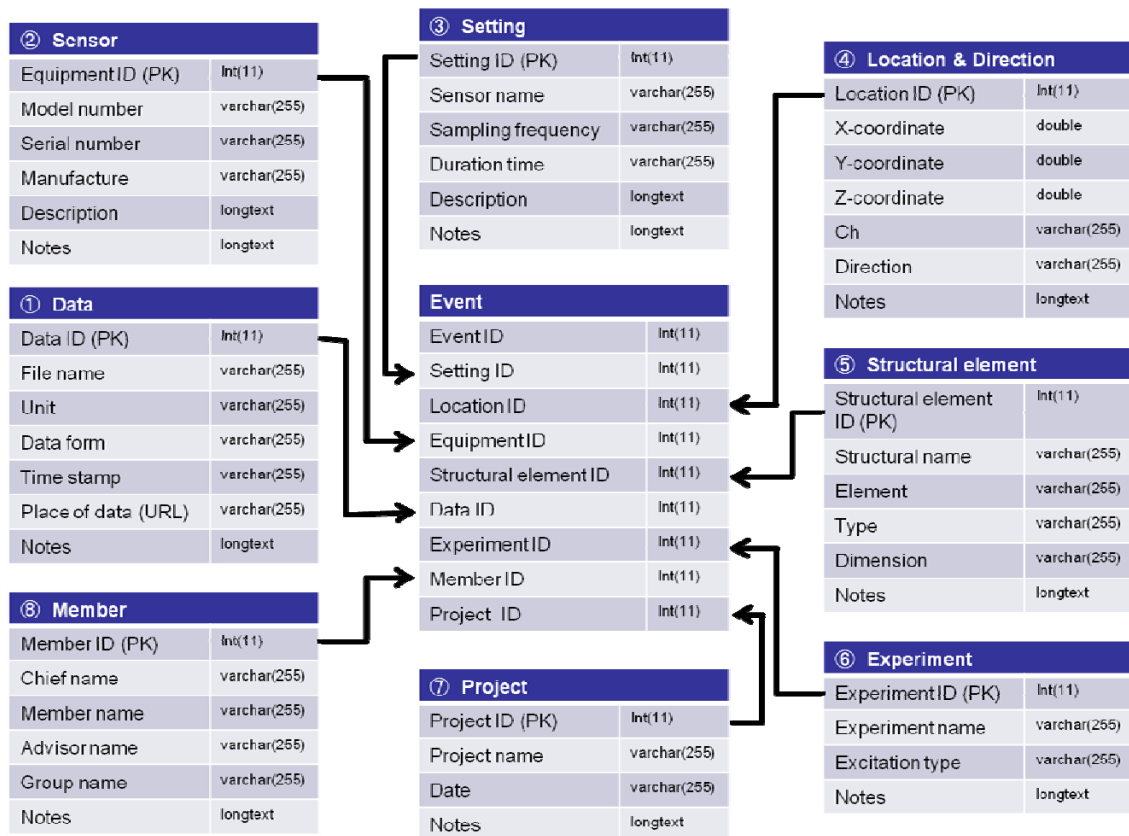


図-3 橋梁振動用データモデル

り、これを主キー（PK）と呼ぶが一般には ID 番号を与えることが多い。

収集したデータを保存しやすく、検索しやすくするにはこの表と表の関連付けを効果的に行うことが必要であり、この関連付けを定義したものをデータモデルと呼ぶ。構造工学分野におけるデータモデルとして著名なものは、NEES プロジェクトで採用された NEES Reference Data Model⁵⁾や、E-Defense のためのデータモデルとして提案された EDgrid データモデル⁶⁾がある。これらはいずれも大規模な実験プロジェクトのために開発されたものであり、本研究では EDgrid データモデルを参考としながら、図-3 のようなより簡素なデータモデルを作成した。

図-3 では、周辺に 8 つの表が配置されている。それぞれの表は、①測定した各チャンネルの時刻歴データの情報、②使用したセンサーの情報、③サンプリング周波数や計測時間の設定、④センサーの設置位置と方向、⑤センサーを設置した構造部材の情報、⑥入力外力の情報、⑦実験に関する記録、⑧実験者や組織、から構成されている。それぞれの表に記録される情報には ID が割り振られ、この ID のみを集めた表が中央のイベントテーブルとなる。中央にイベントテーブルを配置して、周辺の表はイベントテーブルとだけ関連付けられるため、データ間の関係が単純化される。この形式のデータモデルは、表の関連を表す線がイベントテーブルから周囲に放射状に広がるため、スタースキーマ型と呼ばれている。

3.3 データ入力

データ入力では、まず取得した振動データファイルと収録時刻を指定する。取り扱い可能なデータファイルは、

図-4は、データ入力画面の一部を示しています。画面の上部には「multipart/form-data(upload)」と表示されています。中央には「Input file name」のラベルがあり、その下に「参照」ボタンと「Upload」ボタンがあります。下部には「Add data table」ボタンがあります。

Data ID(Event ID)	File name	Unit	Data form	Time stamp	Place
9000638	DataOut10_X_id9000638.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1
9000639	DataOut10_Y_id9000639.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1
9000640	DataOut10_Z_id9000640.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1
9000641	DataOut16_X_id9000641.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1
9000642	DataOut16_Y_id9000642.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1
9000643	DataOut16_Z_id9000643.txt	gal	txt	2013-9-26 12-18	http://150.97.1

図-4 データ入力画面（一部）

現状では著者らの研究室で用いているスマートセンサー用計測ソフトウェアのデータ形式に対応しているほか、測定チャンネルのデータを列方向に整列させたテキストファイルを読み込むことができます。これ以外でもテキスト形式のデータであれば、PHP スクリプトの改造で比較的容易に対応させることが可能である。図-4 にデータ入力画面の例を示す。

本研究では測定した振動データをサーバのデータ保存用領域にアップロードし、そのアップロードした場所の情報（URL）をデータベースに登録する。測定値そのものはデータベースには含まれないため、データベース自体の容量はそれほど大きくはならない。

データファイルを指定したら、①のデータテーブルに

含まれる各項目の情報と、②～⑧の各表に設定されている PK を入力する。すなわち、図-3 における、①のデータテーブルと中央のイベントテーブルの情報を入力することになる。この情報入力にはチャンネルごとに行う必要がある。図-3 の⑦や⑧の実験者や実験日の情報などは、その日に取得されたデータであれば全てのデータで同じものになる。1 回分の測定データからモード形状を算出するような場合には、各チャンネルのデータに全ての情報を関連付ける必要はないと考えられる。しかしながら、ある観測点に着目して経時的な変化を解析したり、故障が疑われるセンサーの過去のデータを確認したりする場合には、このようにチャンネルごとに独立して情報を関連付けておけば将来の検索が容易になる。すなわち、貯蔵したデータを実験後すぐに解析して振動特性を求めるだけでなく、将来の必要性に基づいて多様なデータの活用ができるのである。なお、このデータ入力時には②～⑧の表はあらかじめ完成されていて、また各表の対応する主キーを知っておく必要があるが、データ入力の際に表の参照やデータの追加が可能である。

なお、前章の振動計測の例では、1 日分のデータをデータレポジトリに登録するのに約 2 時間を要した。

3.4 貯蔵したデータの検索と解析

以上の方法で保存したデータを有効に利用するためには、任意の条件でデータを取り出すことができるようにする必要がある。

本研究で構築したデータ検索システムでは、②～⑧の各表の ID に対して AND 検索や OR 検索を行ってデータを検索する。検索結果は一括してダウンロードできるが、ダウンロード前に内容を確認するために時刻歴波形を表示させることができる。本研究では PHP でデータベースやサーバ上のデータを操作しているが、データをグラフ表示するために、Linux サーバ上でも動作する画像描画ソフトウェアの gnuplot を用いた。

ダウンロードされるデータは測定チャンネルごとのテキストファイルであり、複数のデータがある場合は圧縮ファイルにまとめてダウンロードされる。テキストデータであるため、一般的なデータ解析用ソフトウェアでも容易にデータ解析を行うことができる。例えば著者らがこれまでに開発した振動データ解析ソフトウェア⁸⁾で利用することなどが可能である。

ところで、サーバ上に貯蔵されたデータをどのように解析するかは十分に検討を要する課題である。サーバ上で解析した結果を前述の gnuplot などで画像ファイルとして端末にダウンロードさせれば、研究室や事務所の PC のみならず、現場に持ちだしたタブレット端末やスマートフォンでも表示させることができるため、いわゆるクラウドコンピューティング環境として業務効率は向上すると考えられる。解析アルゴリズムに修正がある場合でもサーバ上のプログラムを修正するのみで対応できる。一方、データ解析のための計算量が大きくなる場合で、同時に複数のユーザがサーバにアクセスするような状況では処理が遅くなる恐れもある。また、本研究で用いているスクリプト言語 PHP では、高度な科学技術計算をするようなプログラムの作成は困難である。このよ

うな場合には、振動データを PC などの端末にダウンロードしてから処理を行った方がよいと考えられる。

4. おわりに

本研究では、構造物の振動モニタリング技術に関連して、収集されたデータの貯蔵と活用について考察し、実際にデータを貯蔵するデータレポジトリシステムを構築して運用した結果を報告した。

データベース構築などの情報技術は、FEM などの構造解析と比較して、構造技術者の取り組みがあまり進んでいない分野であると考えられるが、どのようなデータを保存し、どのように活用するかは構造技術者が主体的に関与すべき分野である。今後は、データ貯蔵システムを企画、利用する構造技術者と、実際に構築する情報技術者との役割分担や連携をどのように進めるかが重要な課題となる。

謝辞

本研究の一部は、鹿島学術振興財団 2012 年度研究助成によって実施されました。また、データレポジトリの構築に際しては、北見工業大学土木開発工学科に在籍した伊藤卓氏（室蘭市役所）、石原彰子氏（宮地エンジニアリング）の協力を得ました。実験データの入力に際しては、北見工業大学大学院社会環境工学専攻の岡本覚人氏、綿崎良祐氏、潘凱凱氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：地方公共団体管理橋梁の点検状況の推移，http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo4_3.pdf (2013 年 12 月 13 日閲覧)
- 2) Boller, C., Chang, F. and Fujino, Y. ed.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring Volume 1, A John Wiley and Sons, Ltd., 2009.
- 3) Nagayama, T. and Spencer B. F. Jr.: Structural Health Monitoring using Smart Sensors, NSEL Report #1, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2007.
- 4) Miyamori, Y., Tan, R., Oshima, T. and Kimura, M.: 3 Years Remote Vibration Monitoring of a Cable Stayed Bridge, ANCRiSST: The Fourth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, pp97-102, 2008
- 5) Peng, J. and Law, K.H.: A Brief Review of Data Models for NEESgrid, NEESgrid TR-2004-01, 2004.
- 6) 矢吹信喜, 吉田善博: EDgrid (E-Defense Grid) におけるデータモデルの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.111-118, 2006.
- 7) 綿崎良祐, 岡本覚人, 潘凱凱, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 三上修一: スマートセンサーを用いた実橋梁の固有振動特性同定と気温の影響, 土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集, 第 70 号, 2014 (投稿中).
- 8) 宮森保紀, 小幡卓司, 及川昭夫, 鈴木隆, 佐藤浩一, 米田健一, 安達一憲, 広岡勉: MATLAB を用いた振動計測・解析システムについて, 土木学会北海道支部平成 14 年度論文報告集, 第 59 号, pp.26-29, 2003.