

都市インフラに関する構造ヘルスマモニタリングの現状と展望—展望論文—

Review on Structural Health Monitoring for Infrastructure

呉 智深*・許 斌**・原田隆郎***
Zhishen WU, Bin XU and Takao HARADA

*工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

**博(工) 科学技術振興研究員 茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

***博(工) 茨城大学助手 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

Structural Health Monitoring (SHM) has been one of the most particular concerns of the civil engineering community worldwide, especially in North America, EU and some Asia countries such as Japan, China and Korea etc.. The essence of SHM can be considered to involve measurement, inspection, and assessment of in-service structures on a continuous basis with minimum labor requirement. Therefore, the challenging problems we are facing are effective sensing, reliable data gathering, rational data interpretation, correct decision making and accepted cost. In this paper, the basic concept, the needs, and the composition of SHM and basic flowchart for implementing a SHM program for infrastructure, and the international activities are illustrated and presented first. Then the current-status on developing the element technologies such as sensing technology, data communication and information technologies and modeling feature selection and diagnosis technologies are briefly reviewed. Furthermore, the future research directions of R&D, and design code and standardization for SHM are also discussed.

Key Words: Structural health monitoring, damage detection, infrastructure, maintenance, statistical approach, fiber optic sensor, smart material sensing, remote sensing, smart system, signal processing, damage characterization, real-time monitoring, diagnostic methods, system integration, sensing technologies, data communication, hazard mitigation

1. 前書き

近年、構造物の実時間的な健全性の監視を目指した「構造ヘルスマモニタリング (Structural Health Monitoring, SHM と略す)」に関する関心が高まっている。SHM の基本的な考えは、スマートなセンシングや解析評価技術により、構造物の健全性を常時ないしは自動的にモニターしようとする点にある。都市インフラ構造物の保守管理は、定期点検と何らかの問題がありそうな時に検査診断を実施するというやり方を取ってきた。そのため、各種点検手法や非破壊検査技術が盛んに開発されてはきたが、やはり従来の保守管理手法の限界が露出されつつあり、構造物の点検検査から監視への変更が求められるようになってきている。一方、従来からひずみ計などの電氣的なセンサや AE 法などの非破壊検査技術によるモニタリングなどが多く見られるが、大型都市インフラ構造物を常時監視するためには膨大なセンサ数が必要であることや、その耐久性や信頼性および維持管理費用などの問題点が山積している。

これに対して、近年、各種インテリジェントマテリアルを用いたセンシング技術や情報科学を活用した構造ヘルスマモニタリングシステムの開発が国内外で盛んに行われるようになってきている。海外の状況を見ると、例えばアメリカ NSF は、NASA や ARPA のような宇宙および軍事用研究機関の推進により展開されてきたスマートセンシング技術を、土木インフラの構造ヘルスマモニタリングに応用する研究開発を積極的に推進している。欧州共同体は OSTIC (Optical

Sensing Technologies for Intelligent Composites) 巨大プロジェクトにより得られた成果を土木構造物へ応用する研究を進めているとともに、EU initiative を目指すための SHM プログラムも設立している。カナダでは、1995 年より 200 人以上の研究者や開発者の参加によるカナダ ISIS・COE ネットワークにより、光ファイバなどの先進センシング技術を活用した高度な土木建築構造物の創出に関する研究活動を推進してきている。また、最近では中国自然科学基金会による関連の大型プロジェクトも推進されている。一方、日本においても幾つかの大型プロジェクトが展開されていることや最近の学会論文発表などの状況から見て、かなりの勢いで研究活動が活発化しており、都市インフラの維持管理・危機管理・施工管理における実用的な事例も幾つか挙げられている。

また、このような研究開発の推進と展開を睨んだ研究開発センターの設立も活発になっており、世界中でおよそ 100 以上の組織が実質的な運営を開始している。さらに、SHM というテーマは 80 年代の後半から各種関連の国際会議に取り込まれるようになってきており、最近では SHM を会議全体ないしはセッションのテーマとした国際ワークショップやシンポジウムの開催が、アメリカ、カナダ、欧州などの国や地域で行われてきた^{1)~12)}。日本においても関連するワークショップの開催と同時に、来る 11 月に土木学会、日本学術振興会の共催により第一回構造ヘルスマモニタリングおよびインテリジェントインフラストラクチャに関する国際会議が予定されており、土木学会や建築学会および日本学術振興会における

関連の研究委員会によって研究調査活動を推進している。

本文では、構造ヘルスマモニタリングの概念説明や今までに行われてきた研究開発の成果と問題点を中心に紹介し、今後の展望について論じる。なお、推進されている各種のプロジェクトや国際会議の詳細などに関しては、参考文献などを参照されたい^{1)~15)}。

2. 構造ヘルスマモニタリングの概念説明

SHM は構造システムの保守検査と維持管理に関する新しい概念として提唱されているように考えられる。未だにはっきりとした定義はなされていないようであり、つい最近の国際集会でも議論となっていたが、結局は SHM 研究開発の出発点と目指している理想像に関する多少の違いに他ならず、根本的には違わないように思う。なお、各種非破壊検査技術自身を構造ヘルスマモニタリング技術と等しく考えるのは別の問題であり、後述のように両者の考え方が目指すものが異なっている。

2.1 SHM の研究動機と目指しているもの

(1) 知的構造システムにおける構造ヘルスマモニタリング

構造システムあるいはその材料や構造部材を知能化しようとする、いわゆる知的材料や知的構造の概念については、大よそ 20 年前から、航空宇宙、機械電気および土木建築などの各分野で関心が持たれている。一般に、材料や構造システムの知能化とは、生物が有する自己増殖性、自己修復性、自己診断性、自己学習性、あるいは環境適合性などの機能を材料や構造に採り入れることと言われるが、人間の五官、種々の筋肉そして脳に対応させて考えると、センシング、アクチュエーション、プロセッシングのような 3 要素を材料や構造に付与するとのことである。さらに、人間の骨格に対応するホスト材料・構造自身に対しても、種々の材料の複合化により高度な力学性能を目指すとともに、その自己診断性と自己修復性を発見することが材料・構造システムの知能化における重要な内容となっている。従って、感知機能によって実時間的な健全性を監視し、損傷や劣化を同時に検出することができ、常時この進展を監視することが可能になれば SHM と呼ぶことができる。つまり、SHM は知的構造物におけるセンシングとプロセッシングの統合を目指しているものである。

(2) 構造物の検査診断技術の高度化としての SHM

近年、構造物のストックが増大し、経験豊富な点検員の確保が難しくなっている。その上、診断・評価の複雑性、突発災害の多発、および維持管理費用の急増などの問題が深刻化し、構造物の維持管理、危機管理および施工管理業務における点検・検査・診断技術の効率化・自動化が求められている。また、増大する構造物のストックに対して、構造物の現在の状態がどうか、余寿命がどの位あるのかを定量的に把握し、最適な維持管理計画を立案するこ

とも要求されるようになっている。これらの問題を解決するための SHM への期待は大きく、現在、活発な研究が行われている。勿論、上記の各種問題は構造物の知能化に関する研究開発の背景になっているとも言えるが、このような観点から推進している SHM の関連研究がより現実的になり、仮に実時間的な構造物の損傷や劣化の検知ができなくても、点検検査の自動化や省力化をもたらしることができれば、構造物の診断、事故の予知や予防には極めて有効な策となり、これらは総合的に SHM と言うことになる。SHM が上記の知能構造物の観点から展開してきていることと比べると、少なからず構造ヘルスマモニタリングに関する思惑の違いが存在している。これによって議論が分かれるケースもあるが、根本的な違いはないように思われる。

2.2 構造ヘルスマモニタリングの定義

ここでは、上記の二つの観点を考慮しながら SHM の定義を行ってみたい。なお、SHM においては、構造物の損傷を「構造材料性状、構造上の幾何的な性状、構造上の境界条件または構造部材間の接合や連結の変化による構造変化である」とまず定義する。従って、構造システムにおける二つ以上の異なった状態の比較がないと損傷は無意味になってしまう。

SHM のエッセンスは、やはり人力の関与を極力避け、構造システムのセンシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価を、自動的かつ連続的なベースにて実現しようとする思想である。スマートなデバイスなどにより、センシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価などを実時間的に行うことが構造ヘルスマモニタリングの理想的なシナリオとなる。従って、構造物の健康状態と挙動を高周期的、連続的または能動的に監視できるシステムは構造ヘルスマモニタリングシステムと定義してよいが、何らかのモニタリング手法によって構造物の健康状況を監視できることが非常に大事なポイントであろう。幾つかの非破壊検査手法 (NDE) は SHM の枠組みになっていると考えられるが、両者間の区別を行う必要がある。伝統的な NDE 技術では構造物の力学性状を即時に計測したデータを用いて評価するのが殆どで、過去の履歴データ (人間に対する通常健康状態と病歴カルテ) は必要としない場合が多い。また、このような評価手法の精度は計測装置の分解能に大きく依存してしまう傾向がある。しかし、SHM 手法は今まで計測したデータの変化から構造物の健康状況を同定することになっている関係で、そのシステムの精度は各種センシングの感度と診断アルゴリズムに大きく依存される。

図-1 に示されるように、SHM システムはセンシング技術 (センサなど)、信号発生装置 (能動的センシング・診断システムの場合)、信号プロセッシング、健全性評価と判定 (同定解析アルゴリズムによる解析機能と診断機能)、システム統合の 5 大部分から構成されている。SHM システムでは、まず各種の適切なセンサによって構造物の状態 (歪み、変形、温度、

振動応答など)をセンシングまたはリモートセンシングする。しかしながら、それによって計測された生のデータは、環境影響やノイズ、不安定性の高い要素などが含まれている情報であって、直接に構造解析に用いることができない場合が多い。そこで、センサキャリブレーションや信号プレゼンテーション、データマイニングなどの信号プロセッシングにより、初めて評価・診断用データを生成し、そのデータを評価・診断モジュールへと引き渡すことによって、構造物の健全性を同定する。このように、有効なプロセッシング技術を適用することが、構造物の健全性を確実、正確、簡単に同定するための必要不可欠な事項である。また、能動的なセンシングの場合は、この間に信号発生装置が加わり、各種外力信号を自動発生させて、構造物の状態を能動的にセンシングする。そして、これらの各フェーズを SHM システムとして統合化するため、ユーザインターフェイスの構築、判定結果等の表示の可視化、システム全体のスマート化などが必要となる。

3. 構造ヘルスモニタリング技術の選定と設計手順

SHM は、各種構造システムの危機管理、維持管理、施工管理の3大分野において活用されるとともに、その発展が大いに期待されている。また、ホットスポットやグローバルモニタリング、静的や動的モニタリング、短期や長期モニタリング、受動や能動モニタリングなどのような各種レベルの手法が考えられ、それぞれに研究開発が行われている。図-2 は構造ヘルスモニタリング技術の選定と構築に関する基本フローを示したものである。以下では、SHM を実施するために考えなければならない項目について述べる。

3.1 モニタリング事項の検討と設定

SHM の目的に応じて、具体的にどのような構造成能指標を持って構造システムの健康状態を判断するかについて検討する。そして、それによりモニタリング事項を設定する。また、モニタリング期間もここで検討することになる。結果的にホットスポットがグローバルか、短期か長期かの様々

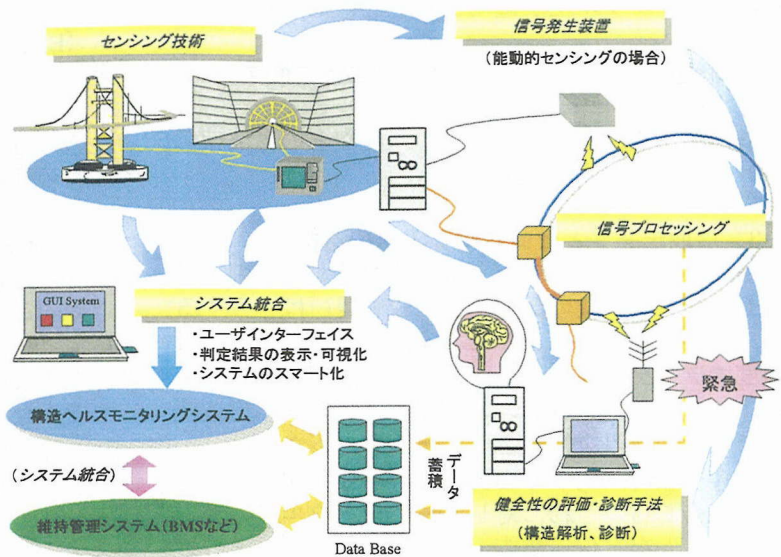


図-1 SHM システムの構成

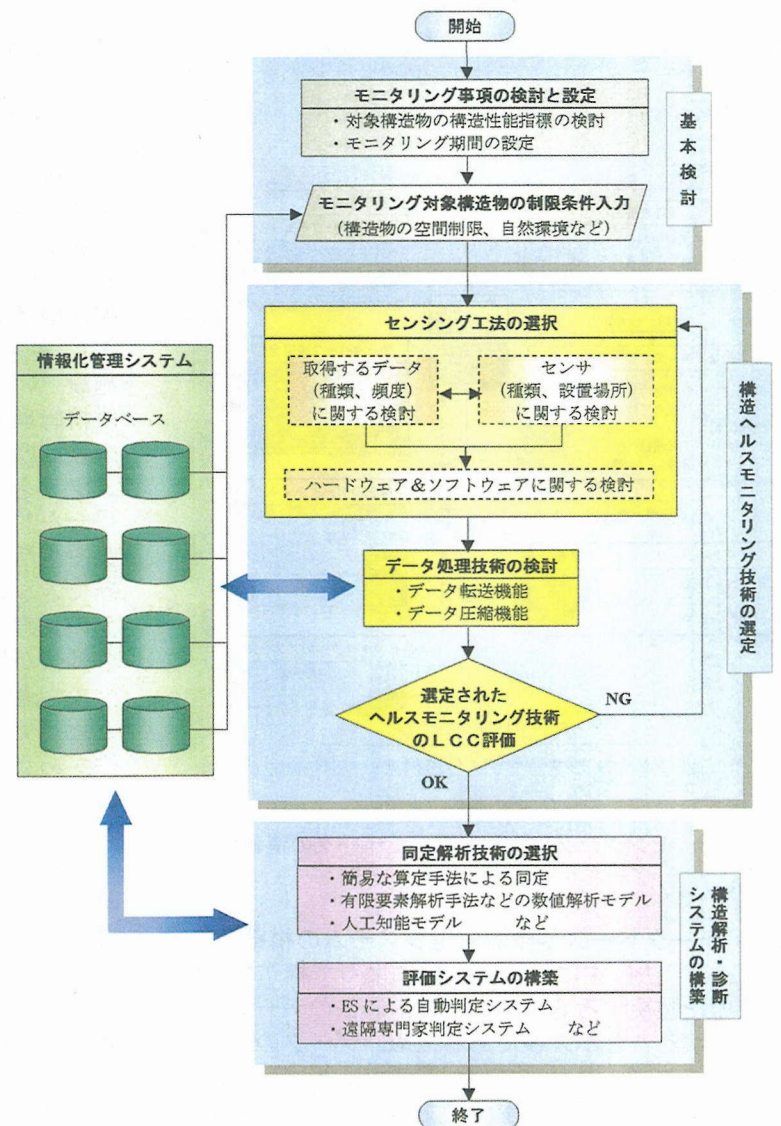


図-2 SHM 技術の構築に関する基本フロー

なモニタリング手法が適用されることになる。

3.2 構造モニタリングシステムの設置に関する制限条件

構造物の空間制限条件と温・湿度などの自然環境条件をよく検討する必要がある。

3.3 採取データとセンシング工法の選択

まず、どのようなデータを採取するか、どのようなセンサをどの位の数で、また設置場所はどうか、などを検討することになる。また、どのような頻度でデータを集計するかを検討も重要である。当然、センシングシステムの中では、短い間隔で連続にデータの取得を行う必要があるものもあれば、かなり大きな時間間隔や必要な時のみ作動すれば十分なものもある。これに対して、ハードウェアのデータ取得・保存・伝送機能・異常警告と、データの処理を行うソフトウェアを設計する必要もある。また、ローカルか遠隔、受動か能動などのデータ計測・通信手段も選択する必要がある。一方、これらの検討を行うために、LCCに関する検討が同時に行われることになる。なお、LCC 検討を行う時、構造物の重要度やモニタリング手法の便宜性などの要因も考慮される。

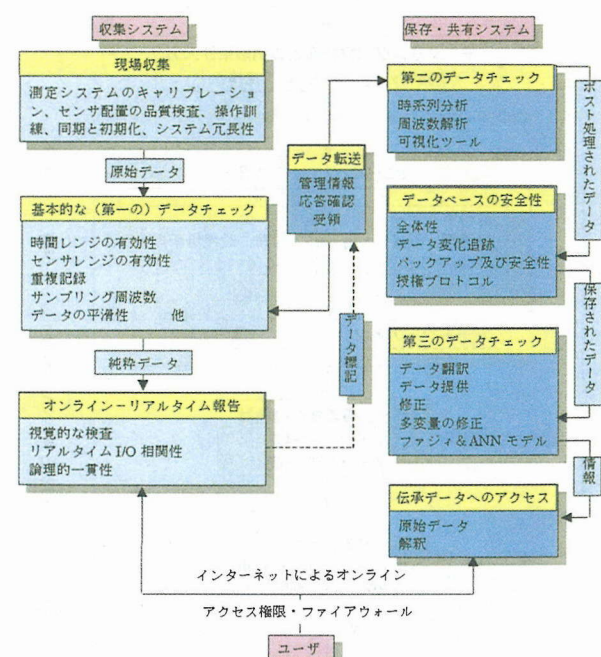


図-3 センシングにより得られたデータの情報化アーキテクチャのイメージ図¹⁷⁾

3.4 データベースや情報管理システムの構築

SHM 手法は主にデータ変化によって構造物の健康状態を監視するものことで、過去のデータ履歴を保存することが大事であるため、データの圧縮などを通じたデータベース化が必要である。また、取得したデータの活用も重要である。これについては、図-3 に示すように、センシングにより得られたデータの情報システム化構造が Aktan ら¹⁷⁾によってうま

く纏められている。例えば、橋梁の維持管理システム (BMS) などの情報化管理システムを構築した場合、このようなシステムのデータベースに、ヘルスマニタリングシステムで得られたデータをうまく取り込めるようにすることが非常に有意義であるように思われる。

3.5 構造解析・診断システムの構築

まず、各種解析技術の選定を行い、構造特性の特定や同定を行う。これに関しては、なるべく簡単な算定手法を用いるのが望ましいが、必要に応じて、有限要素解析手法などの数値解析モデルや人工知能モデルなどの適用が必要とされる場合もあろう。また、算定は非線形になる可能性もある。次に、このような同定解析手法により得られた結果に関する評価システムの構築を行うことになる。このようなシステムにおいては、自動判定や専門家判定などのツールによって構成することが一般的であるが、その他に精査手法の適用の必要性があるかどうか問われるケースもあろう。

4. 構造ヘルスマニタリングのニーズとコストベネフィットに関する認識

上記の SHM の紹介では、その背景と必要性について少し触れたが、ここではそのニーズとコストベネフィットをさらに説明する。

先進国のみならず数多くの国々においては、都市を構成する各種の建築物や鉄道・道路などの交通・輸送構造物（橋梁、高架、トンネル、海洋構造物など）、電力・ガス・水道・通信などのライフライン施設という膨大な都市インフラを有しており、その維持管理や防災管理に関するいろいろな意味での未経験問題が生じている。例えば、これらの膨大なインフラを一定期間、稼働停止にしなければならない場合を想定すると、それが短期間であっても社会活動や生活に多大な影響を及ぼすことから、容易に更新できない状態にある。また、これらの都市インフラの長寿命化が実現できないならば、数多くの国々の社会が持続発展できない状態に陥ってしまうと言っても過言ではないだろう。日本の事情は他の国々と比べ更に特別であり、より深刻な問題となる可能性がある。総延長 735km の東北・上越新幹線では、72%の線路が高架橋や一般橋の上に敷設されており、23%の線路がトンネルの中にある。日本の事情を知っている海外の技術者も驚く数字である。その上、日本では都市インフラ構造物の多くは戦後から高度経済成長期にかけて集中的に建設されており、耐用年数を迎える時期が集中的に来ることになる。例えば、多くの橋が架けられている時期が 1975 年を中心とした年代であるため、橋梁の耐用年数を 50 年と考えると、これらの橋梁はおおよそ 20 年後、一斉に耐用年数を迎えることになる。また、30 年後は全橋梁ストックの半分以上（約 10 万橋）は「老年」構造物になる。これに関して、カナダで 30 年前に建設された

橋梁は、現在、全体の40%となっている。21世紀は維持管理の時代であることを真剣に捉えることが必要であろう^{18)~21)}。

このような背景のもと、都市インフラ構造物の使用状況や健康状態および余寿命を適切に検査・評価・診断し、適切な補修補強計画を構築することが求められている。これに対して、上記で既に触れたように従来の点検・検査・診断手法による問題が深刻になり、その自動化、省力化、効率化、高性能化、大幅なコスト削減といった要求が現実になっている。例えば、ニューヨークのBrooklyn橋では、本格的な目視検査を行うのに3ヶ月の期間を要するとともに、100万ドル以上の費用がかかるとの報告があり、伝統的な点検検査業務は既に非現実なものとなっている²²⁾。また、このような既存構造物に対しては、手当てを施した後の補修補強効果の保証としてヘルスマonitoringの付与が要求されているケースも多くなっている。さらに、近年の大震災の教訓によれば、大地震や台風や洪水などの災害時には、こうした都市インフラに対して直ちに被災度を判定し、立入・通行・運行の可否を決定する発災時即応システムの構築が必要とされている。一方、これからの新設構造物については耐久性や機能性が優れた構造物を建設することが必要であるが、人間の健康管理に対する自覚と自己調整能力、健康検査と診断のような常時ヘルスマonitoring機能を予め付与することにより、構造物の長寿命化を実現することも重要になっている。そのような中、未経験構造物の設計建設が益々増えており、SHMに対する期待も大きくなっている。また、仕様規定型設計思想から性能照査型設計思想に変更されつつある今日、性能保証用のヘルスマonitoringシステムに対するニーズが湧き上がっていくように思われる。以上に述べてきたように、今後、①構造システムの安全性や信頼性の向上、②長寿命化、③突発災害や異変の回避、④ライフサイクルコスト(LCC)低減、⑤未知ファクタの考慮などを実現していくのに、伝統的な点検・検査・診断手法によって展開するよりもSHM手法によって展開していくことが強く求められている。

今までの議論を踏まえると、土木建築分野においても、構造ヘルスマonitoringのニーズやアドヴァンテージが強く認識されつつあるように思われる。一方、持続可能な社会の実現が要求されている今日においては、コスト削減は社会市場命令となっている。しかしながら、SHMのコストベネフィットに関する検討や究明はまだ不十分であり、今後、SHMによるLCC低減の具現化などに関する研究が期待されている。

図-4はSHMによる構造物の超長寿命化とLCCの最小化を示したものである。構造物の要求性能を満足させるために実施されてきた従来の補修補強は、伝統的な点検・検査・診断をベースにしており、LCCに占める補修補強費の割合は非常に高いものであった。一方、SHMではセンシング技術を利用して劣化の予兆を検知することから、構造物の損傷が重度と

ならないうちにそれらを発見できる。このことから、SHMには構造物の性能が著しく低下した手遅れな状態にならないような抑止効果があるとともに、構造物の損傷が重度とされないうちに補修補強を実施したり、構造物の自己修復機能を利用したりして、構造物の長寿命化を実現できる。つまり、長寿命化によるコストパフォーマンス的な観点から見ると、SHMシステムでは、構造物への自己修復機能の付加費用やセンサの維持・運転費などのコスト増はあるものの、ライフサイクル期間における補修補強費が抑えられるとともに、長寿命化の実現により社会基盤全般の管理という観点からの負担は大きく減少し、従来に比べると累積LCCは低く抑えられると考えられる。

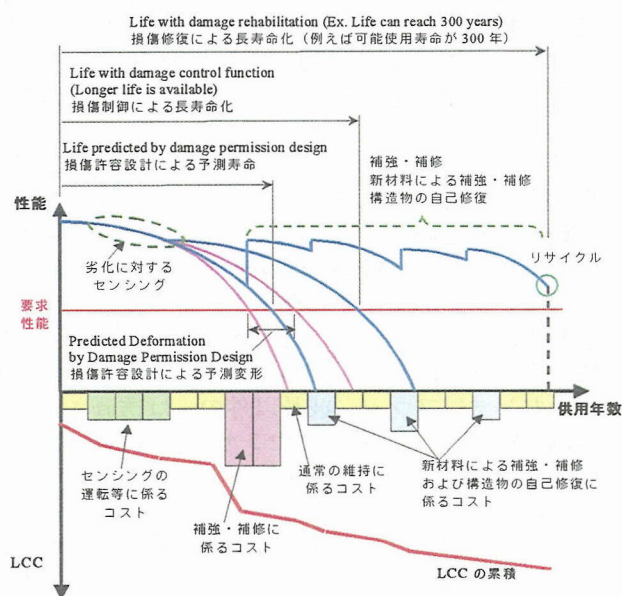


図-4 SHMによる構造物の長寿命化とLCCの最小化

5. 構造ヘルスマonitoringを支える要素技術の開発動向

5.1 各種センシング技術とそれに関するモニタリングシステム

(1) 各種光ファイバセンシング技術とその応用

光ファイバをセンサとして用いる契機は、1970年代における光通信の光ファイバ技術の著しい進展にある。光ファイバセンサは従来のセンサに比べて電気の影響を受けないため、ノイズに強い、軽量である、幾何学的な柔軟性があるなどの特長がある。光ファイバでは、構造物のひずみ・変位、温度や湿度、振動周波数・動的ひずみプロファイル、ひび割れの発生・塑性ひずみ・破壊、静的・動的荷重などの物理的諸量、およびPHのような化学的諸量などの計測が可能になっている。センサの種類として、ポイントセンサ、ロングゲージセンサ、および分布センサ(マルチプルポイントセンサも含む)の3種類で分類される場合もある(図-5)。

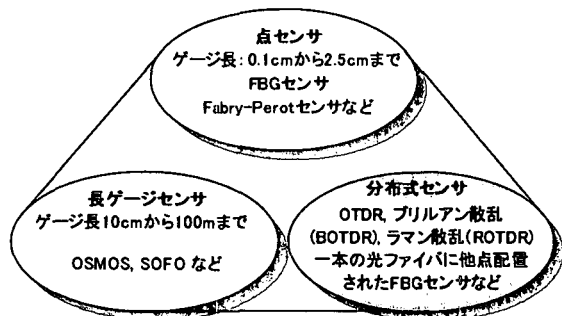


図-5 光センシング手法の分類

光ファイバによる検知原理には、このファイバを伝播する光の偏光、干渉、後方散乱などの現象、あるいはファイバの破損などによる伝播する光が変化する現象が利用されている。これらの現象により構造物の損傷やひずみを検出・計測する光ファイバセンサは分光型、位相型(偏光型、干渉計型など)、および光損失計測型の3種類のセンシング方法が考えられる。

分光型センサはセンサ部の間隔および屈折率の変化に応じて反射する波長のシフトからひずみや変形を検出するもので、代表的なものとしてブラッグ格子型光ファイバ(FBG)センサがある。これは伝統的なセンサであるひずみゲージのようなポイントセンサであり、ゲージ長は2~20mmと短い、高精度で動的な計測までが実現できる。なお、ブラッグ格子センサはブラッグ波長以外の光は透過させるため、透過した光を利用してセンサを直列に接続した、いわゆる多重化したマルチプルポイントセンサ(分布センサ)を構成することも可能になっている。多重化できる個数は、入射する光の帯域とセンサの計測範囲(波長変化範囲)に依存し、実用的なレベルは10前後のオーダーである。位相センサはセンシング目的の広範囲な光学現象をカバーしており、その中の干渉型センサによるひずみ計測は、光路差のある2つの可干渉拘束を重ね合わせるときに起きる干渉の移動からひずみを求める方法であり、高い感度を持つ。ただし、設置が煩雑であるなどの問題点がある。各種干渉型センサも原則としてポイントセンサの範疇に入るものが多い。一方、単一モードファイバの干渉計(Low Coherence Interferometry)の計測原理に基づき、10cm~100m程度までのゲージ長を有するロングゲージセンサ(Long Gage Sensors)の開発も注目されている(FOX-TEK社とSMARTEC社)が、現状では静的な計測しかできていない。光損失計測型は光ファイバ経路の任意箇所の曲げやたわみによる光強度損失量の計測から構造物の変形部分を検出する手法である。代表的なものとしてOTDR(Optical Time Domain Reflectometer)やCoherent OTDRがあり、敷設が容易で、一本の光ファイバケーブルで連続的に計測可能なことから分布計測に向いているが、位相法や分光法と比較すると感度が低く、距離分解能もかなり長くなっている。OTDRは一応分布型と考えられるが、変状箇所において光損失が増大し、光ファイバ中を伝播する光量

が減衰するので、変状箇所遠の測定が困難、あるいは不能になってしまう可能性がある。これに対して、より先進的なセンシング手法として、OTDRと後方散乱光の分光技術を併用した技術が日本や欧州、カナダにおいて開発されている^{23),24)}。まず、ラマン散乱を利用したOTDR(ROTDR)は温度分布計測手法として開発されている。ブリルアン散乱分光技術とOTDR技術を用いたBOTDRでは、光ファイバの長さ方向に発生したひずみ分布計測が可能になっている。これらはいわゆる空間的に連続計測となっており、本格的な分布センサと考えられるが、現行のBOTDR技術では、その最短の距離分解能は1mになっている。即ち、あるサンプル点のひずみ計測結果は、この点から1m以遠の範囲内におけるひずみ分布の総合的な結果になる。

構造物のSHMの実現については光ファイバセンシングに期待するところが大きい。そのため、土木工学における光センシングの研究開発もかなり盛んに行われるようになってきている。適用に関する初期段階の研究開発は参考文献において詳細に紹介されているので^{23)~27)}、ここでは、最近の研究動向を中心に紹介する。

分光型光センサであるFBGのようなポイントセンサは最も歴史の長い光センシング手法である。RC構造部材の内部鉄筋や炭素繊維ロッドの表面に貼り付けることによるひずみ計測、内部への埋め込みによるFRP外ケーブルのひずみ計測、桁や床版のひずみや変位、交通荷重の計測など様々な分野において用いられている。カナダでは、ISISの推進によるものであるが、およそ30橋の実橋に対してFBGセンサの適用を行っている。一例として、カルガリーのBeddington Trail橋のガラス繊維FRPケーブルは、埋め込まれたFBGセンサによって遠隔モニタリングされている²⁸⁾。このFBGセンサとその他の温度センサの設置により、橋梁の建設時及び供用時橋梁挙動を遠隔的にモニタリングしようということが目的である。また、Taylor Bridgeに設置されたFBGセンシングシステムでは、電話回線を通じてマニトバの大学にあるモニタリング・ステーションへ接続するといった遠隔モニタリングが実施されている²⁹⁾。スイスでは、Storchenbrücke橋における炭素繊維FRPケーブルのひずみモニタリングを行うためにFBGセンサシステムを実装した²⁹⁾。日本では、12階の鉄骨建物に対してFBGによるヘルスモニタリングシステムを応用した例がある³⁰⁾。この例では、地震時エネルギーを吸収するため、鉄骨建物が低降伏点鋼製パネルで作られた複数のパネル・ダンパーを装備していた関係で、その挙動をモニタリングするためにFBGセンサによる変位計測及び温度センサによる温度計測を実施したものである。一方、FBGセンサに基づいた振動計測も最近試みられている。例えば、Feng³¹⁾による電気-光学加速度計に関する研究、清水建設と東京測振および慶應義塾大学との共同開発によるFBG式加速度計に関する研究などがある³²⁾。インフラ構造物で発生するひび割れなどのよう

な局所・集中的なひずみや変形は、その発生位置も様々である可能性がある。このようなローカル変形に対応できるロングゲージ（マクロ）センサ、そして同時に構造物の空間分布の計測を目指したマルチプルポイントセンシングやロングセンシングの検討も行われている。アメリカでは、補強された Woodrow Wilson 橋の RC 構造部材に対して、FBG センサによる分布センシングシステムを構築し、その性能をモニタリングしている³³⁾。Baldwin らは、埋め込みによる FBG マルチプルポイントセンサとそれによるヘルスモニタリングシステムの有効性を実証するため、長さ 60ft、直径 2ft のマリン用 FRP 杭を用いて現場実験を実施している³⁴⁾。Chen らは、コンクリート構造物の亀裂をモニタリングするために静的 FBG ロングゲージセンサを開発した³⁵⁾。また、Schulz らは、動的 FBG ロングゲージセンサの研究を行っている³⁶⁾。さらに、呉らは FBG ロングゲージセンサについて研究し、測定した動的でマクロなひずみ応答により構造物のパラメータを同定するアルゴリズムを提案した³⁷⁾。FBG 動的計測や動的ロングゲージセンシングはマクロ的な動的負荷応答に対するノイズが少なく、通常の加速度計よりデータの信頼性が高いことから大いに期待されている。また、FBG センサは構造物の化学的変化や音声など様々な現象も感知することができるので、今後、このような利用方法に関する研究開発も行われるように思われる。

位相型光センシングの代表としては、伝統的な Fabry-Perot 干渉計の原理によるセンサが多々あり、マルチモードファイバを利用するものが多い。これは、ファイバの曲げ、ケーブルの長さ、光源のゆらぎなどによる光量の変化に対してほとんど影響を受けず、温度などの自己補償性能により整形されることも可能である。例えば、Choquet らによる研究³⁸⁾では静的計測と動的計測が可能であり、1000Hz で 8 点まで同時に多点計測が可能なものも存在している。但し、活用方法に関する検討がまだ行われておらず、これはマルチモードファイバを使用することによる問題の一つであろう。これに対して、単一モードファイバの干渉計（low coherence interferometry）の計測原理に基づいたロングゲージセンサの開発はかなり活発に行われている。Tennyson らは FOX-TEK 社で開発されたロングゲージセンシングシステムを用いて複合橋桁やパイプラインの遠隔モニタリングを行い、既に 8～10 年分のデータ蓄積がある³⁹⁾。また、日本や欧州においては、SMARTEC 社により開発されたロングゲージセンシングについて様々な適用が行われている⁴⁰⁾。一方、Ansari らは Michelson 干渉計の原理によるロングゲージセンサおよびその並列化による分布式センシングの研究も行っている⁴¹⁾。なお、現在のところ、このようなロングゲージセンサはまだ静的計測のみとなっている。

光損失計測型の代表的なセンシング技術としては、OTDR による分布センシングの研究開発が多く行われている。また、欧州で実績の挙がっている OSMOS

（Optical Strand Monitoring System）技術もある。但し、位相法や分光法と比較すると感度が低く、長い距離分解能となっている。また、分布計測に関しては変形個所において光損失が増大し、このため光ファイバ中を伝播する光量が減衰するので、変形以遠の計測が困難、あるいは不能になってしまう可能性がある。これに対して、Ansari らは coherent OTDR による分布センシングシステムを開発し、コンクリート構造物のひび割れなどの分布計測を検討してきた⁴¹⁾。ドイツでは、ヘッセにある Eder ダムの安定性を増加させるために、岩盤補強用ケーブルの長期変形の評価用として OTDR 計測が採用されている⁴²⁾。分布計測が本格的に実現できたのは、やはり OTDR 技術と後方散乱光の分光技術を併用した ROTDR と BOTDR である。BOTDR による温度分布計測は、マスコンクリートの温度管理や LNG タンク低版コンクリートの施工管理施工に応用されている⁴³⁾。BOTDR に関しては、それに関する理論的な検討を積極的に推進した日本とカナダの研究者がいた関係で、両国において BOTDR によるモニタリング手法の研究が盛んに行われている。その研究範囲としては、土や斜面の安定性をモニタリングすることから、トンネル、そして各種のコンクリートや鋼製構造物の分布計測まで、かなりの広範囲となっている^{44)～46)}。日本では最高距離分解能 1m を有する安藤電気の計測器が既に製品化されている。カナダの Bao らが距離分解能や精度を向上させるための研究を精力的に推し進めている^{47),48)}。

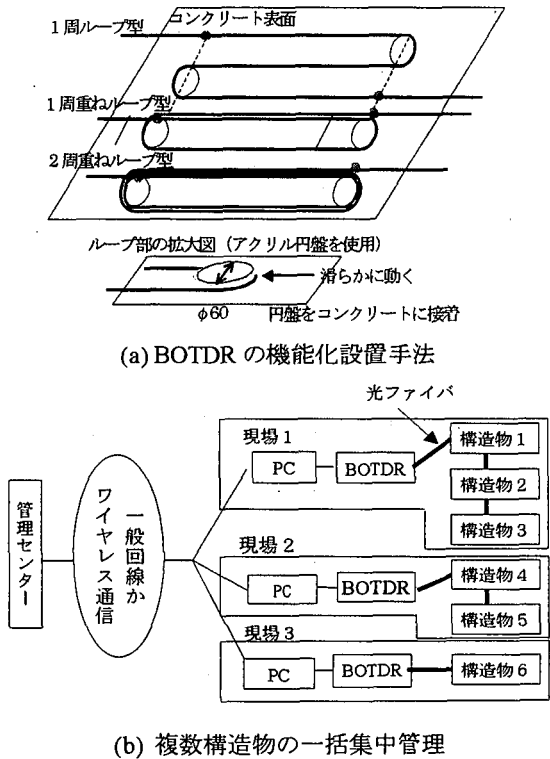


図-6 BOTDR によるヘルスモニタリング

呉らと石井らは BOTDR センシングの引張・圧縮ひずみに対する検出性状、ゲージ長の変化による影

響などの基礎的な検討を踏まえて、コンクリートのひずみ分布、ひび割れ幅などの局所変位、補強材の剥離や損傷などのモニタリング手法を提案してきた^{49),50)}。図-6(a)に示されるように、計測精度の向上を図りながらゲージ長の変化可能なセンシング設置方法を提案した⁵⁰⁾。このことから、適切なセンシング手法の検討により、懸念している精度と不安定さの問題はかなり改善できるように思われ、そうでないと BOTDR 技術の応用に様々な問題が生じる可能性がある。なお、日本において、FRP 緊張接着工法により補強された高速道路橋梁桁の補強効果（緊張力の維持、FRP 接着状況およびコンクリートひび割れなど）などのヘルスマニタリングを行うために、実橋における BOTDR の設置も実施されている。また、NATM (New Austrian Tunneling Method) により建設されたコンクリートトンネルの支持効果を監視するために、清水建設と NTT の共同開発により BOTDR によるヘルスマニタリングシステムが構築されている^{51),52)}。今後、BOTDR に関する基本的な計測原理と設置手法を更に究明するとともに、図-6(b)のように複数の構造物を一括集中管理できるシステムの構築が可能になる。

各光ファイバセンシングは湿度・電磁気などの影響はほとんど受けないが、温度変化を伴う環境下での使用は、その影響の考慮が肝心である。そして、モニタリング用として常時設置されているセンサの耐疲労性状に関する検討も必要であろう。

(2) 複合材やスマート材によるセンシング技術とその応用

a) 実応力のモニタリング用 EM センサ

EM (elasto-magnetic) センサは線材などの実応力を測定するために開発された斬新な方法である⁵³⁾。組立てが簡単で、施工性がよいといった特徴を有し、SHM システムの実現が可能である。愛知県の第2東名高速道路橋の一つにはケーブルのプレストレスと実応力の測定に8つの EM センサが適用されている⁵⁴⁾。酒井らは、上和江橋のケーブルの実力を直接測定するとともに、このようなシステムの適用可能性を検討した⁵⁵⁾。黒川らは、EM センサによる PC 梁の長期応力モニタリング方法を検討した⁵⁶⁾。

b) 圧電素子 (PZT 材料) によるセンシング技術

PZT センサは機電や複合材料分野に多く検討されており、土木分野でも検査技術の目的で研究された例もある⁵⁷⁾。但し、電気抵抗歪ゲージと同様に点センサであるので、土木構造物の性状にうまく合わないこともあり、実用化されるものは稀な状態である。これに関して、阿部らは PZT フィルム/ホスト連成構造モデルを作り、対話式のモデル、スペクトルの分析装置と一緒に組立て、電気的なインピーダンスおよび機械的な波伝達の基本特性を検討し、応力を識別するモニタリング手法を開発した⁵⁸⁾。

c) 炭素繊維を用いた複合材材料のセンシング

炭素繊維を用いた複合材材料のセンシング手法に関する研究は、炭素繊維積層板の損傷メカニズムに

関して非常に多くの研究がなされている。近年、炭素繊維は土木分野においても補修補強材や新型複合構造物として認知され、応用されるようになっていく。このような背景のもと、炭素繊維の導電性を活用し、炭素繊維補強材の信頼性を高めるため、更に付加価値としての自己診断性能およびセンサとしての可能性を見いだすために活発な研究が行われている。武藤らは、損傷に伴う炭素繊維束の電気抵抗変化による破壊検知に関する研究を実施し、ガラス繊維 FRP に炭素繊維を混入することで、その電気抵抗が過去に受けた最大ひずみと相関を持つことを利用したセンサを開発した⁵⁹⁾。奥原らは、ETDR (電気的な時間領域反射率測定) 技術との併用により、CFRP と GFRP を含んでいる多層複合構造の損傷の位置を 20mm 以内の精度で特定できることを確認している⁶⁰⁾。一方、呉らは、電気抵抗の変化の感度を向上させるため、各種高弾性炭素繊維をハイブリッドさせた自己診断機能を有する炭素繊維 FRP 補強材やハイブリッド炭素繊維センサの開発を行っている。炭素繊維センシング手法は、構造物の自己診断やモニタリング用センサとして大いに期待できるものと思われるが、センサ機能としての反復利用の可能性や評価手法の確立など、更なる研究開発が必要であると思われる^{61),62)}。

d) 最大値記憶ひずみ・変位センサ (ピーク・センサ)

東京計測は橋のモニタリングでの利用を目途とし、引張ひずみの測定に適用できる IPG010 と引張と圧縮の両方を計測できる SMG032 の2種類のピーク・センサを開発している。これにより、地震または台風のような被害を受けた構造物に発生した最大ひずみや変形などの情報を記録し、構造物の損傷状況を把握することができるようになる。実橋への適用例も既にある⁶³⁾。高比良らは、細線の弾性座屈を利用し、センサが一方向のみの完全塑性特性を持っている構造ヘルスマニタリングのための損傷インデックスセンサを開発した。ピークひずみ、ピーク加速度、吸収されたエネルギーおよび蓄積された塑性変形のような典型的な損傷インデックスをモニタリングできるように、必要に応じてワイヤレスで読むこともできるように開発した⁶⁴⁾。さらに、歪履歴によって磁化する特性を利用した TRIP 鋼センサ、マルテンサイト相変態に起因する形状記憶効果を持つ合金を利用したセンシングも研究されている⁶⁵⁾。

(3) その他のセンシング技術とその応用

近年、既存コンクリート構造物のひび割れの発生や進展などの変状をより早く検知するための AE 技術が盛んに研究されている。大津らは、圧縮実験を通して、AE 速度解析によりコンクリート構造物のひび割れの発生を精度よく検知できることを報告している⁶⁶⁾。小林らは、塩化物による鉄筋コンクリート梁の腐食損傷と極性化抵抗の関係を明確にし、極性化抵抗方法による鉄筋の腐食損失の監視手法を開発している⁶⁷⁾。また、コンクリート床版やトンネルのひび割れ分布の変状検査、鋼板橋の定期点検を自動的に実施するために、CCD カメラユニットを搭載

した検査ロボットの開発が日本においても色々行われてきている。さらに、実時間的なヘルスマニタリングが可能となるように、写真・画像測量法も検討され始めている。

なお、昔から各種非破壊検査技術として開発されてきた AE 法、放射線法、超音波法、電気磁気法などは、SHM を実現するための一定の役割はあるように思われるが、常時設置に向かないという点から、全体の SHM システムにおける局所的な精査手法になる。

5.2 遠隔モニタリングとデータ通信技術

一般電話回線やインターネット・サーバによるリモートセンシングとデータ通信に関する研究開発が盛んに行われている。例えば、清水建設はウェブサーバに基づいた構造物施工管理用モニタリング・システムを開発した⁶⁸⁾。HTTP プロトコルを利用したサーバにより顧客のパソコンとの通信を行うが、工事現場で得られたデータを NFS という単純なプロトコルを介してサーバに伝送する。すべてのデータはモニタリング・サーバに自動的に格納され、現状と過去の状況が動的に生成され動表またはマップによって表示される。アクセス権を有する現場、設計およびコンサルの技術者らは、自分の PC を介して、格納されたどのようなデータにもアクセスできるようにしている。岡林らは、無線 LAN を備え、インターネット技術に基づいた佐敷橋の施工管理用遠隔モニタリングシステムを開発した⁶⁹⁾。

図-7 は、仮に BOTDR 光センシングを使用した場合の遠隔モニタリングシステムのイメージを示している。今後、このようなシステムは既存構造物の遠隔モニタリングシステムに実用されていくであろう。但し、リモートセンシングやデータ処理に関して、長距離のワイヤレス手法はまだ開発途上にある。

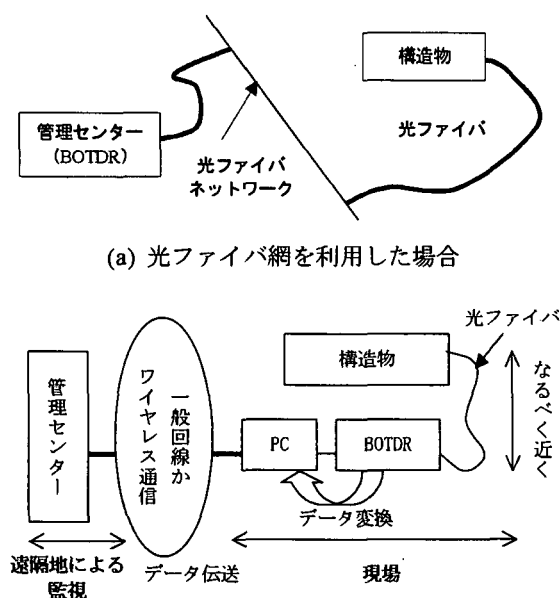


図-7 データ通信と遠隔モニタリングシステム

5.3 構造ヘルスマニタリングのための健全性診断技術 (アルゴリズム、構造性能指標)

構造物の健全性評価と診断を行うためには、それがヘルスマニタリングの「脳」の機能に相当するため、センシングデータと構造物の物理的な変化を関連付ける構造解析技術を開発することが重要となる。構造部材における特定の構造指標をモニタリングするケースでは、簡便な構造解析手法を利用すれば済む場合もあるが、現実的には非線形逆問題になるケースが多い。また、構造物の全体性状の変化をモニタリングする場合、様々な構造解析が必要となる場合がある。構造解析技術の発展に伴い、今まで各種モーダル解析法 (例えば、Resonant Frequencies の変化による方法、Modal Residual Vector に基づく損傷検出法、Mode Shape Curvature に基づく方法など) だけでなく、システム同定手法、有限要素逆解析手法、そして最近のニューラルネットワークや GA アルゴリズムによる手法も多く開発されている。しかし、これらは理想化された問題であったり、実験室環境レベルに関する実証しか行われていないものであったりする場合が多い。また、解析を実施するために、損傷前後の構造システムに関する各種基礎データが必要となっている関係で、現実的な問題に向かないところも大きい。今後、このような問題を検討しながら、センシングで得られたデータを具体的に意識し、これらのデータを具体的に利用する構造評価手法を開発することが期待されている。また、構造解析を行う視点から、センサの設置量と場所に関する最適化を行う研究も必要である。さらに、計算アルゴリズムの簡潔化と高速化に関する改良も必要であろう。Doebbling らは、振動情報に基づく損傷同定手法に関する文献調査を行った上で、①損傷構造物の非線形応答特性の有効利用、②センサの数と位置に関する最適設計手法の確立、③小さな損傷を敏感に抽出できる方法の開発、④損傷と環境要因により構造変化を見極める同定・識別手法、⑤非損傷から損傷までを見分ける統計的な手法の確立、⑥実用問題のベンチマークのような課題を提起している⁷⁰⁾。

一方、このような課題に関する研究も盛んに行われるようになりつつある。Schultze らは動的応答から抽出した特徴を踏まえ、非線形のモデルアップデートアプローチを提案した⁷¹⁾。Sohn らは構造損傷検出を行うためのベイズの確率論的アプローチを提案した⁷²⁾。Lloyd らは、プレストレスト・コンクリートの周波数の温度依存性に関して、ブートストラップ法による統計分析結果を報告している⁷³⁾。許らと呉らは、都市インフラ構造物の損傷同定における複雑さおよび不確実性の対処方法として、ニューラルネットワークを利用し、小規模地震動の地震応答などの動的な情報を直接利用した実時間的なパラメータの同定手法とヘルスマニタリング解析システムを提案した^{74)~76)}。提案した方法では、損傷の発生を見出すだけでなく、損傷の場所と損傷程度を定量的に評価することができる。また、考案された RRMS (Relative Root of Mean Square) の評価インデックス

に基づき、部分的な地震応答を用いた安芸灘斜張橋の地震後損傷評価を実施した⁷⁷⁾。

日本の長大橋のヘルスマonitoring技術は明石海峡大橋に反映されている。藤野らと中村らはGPSを利用して明石海峡大橋の変形モニタリングシステムを提案した。なお、詳細に関しては参考文献を参考されたい^{78),79)}。また、南北備讃瀬戸大橋、来島海峡大橋、因島大橋、多々羅大橋のような長大橋にも加速度計、歪みゲージ、変位計、レベル・センサ、風速計、温度センサ、重量センサを含む様々なセンサが装備され、健康モニタリングが実施されている。但し、このようなモニタリングシステムでは、構造システムの具体的な損傷を検出できるように設計されているものではないように思われる。最近、このような長大橋に対して、その定期点検を合理化・自動化するために、阿部らがレーザー・ドップラー振動計(LDV)を用いた遠隔計測の適用可能性を示している⁸⁰⁾。

また、阿部らは1997年に完成した720mの中央のスパンを持つ鋼箱大梁吊橋である白鳥吊橋に対して、常時微動を利用し、従来困難と思われる高次モード特性の高精度同定問題を研究し、損傷劣化の構造物を意識した非比例減衰系を取り扱える逆解析法の構築を行った^{81),82)}。

6. 実用化を目指すためのSHM技術の改善点

SHMの実用化に対しては、以下に示すA)からE)のような基本事項、即ち、A)精度と感度(Accuracy & Sensitivity)、B)ベネフィット(Benefit)、C)コンパクト(Compact)、D)耐久性(Durability)、E)簡便性(Easy)が求められている⁸³⁾。

これらを実現するため、まず、センシング技術の開発においては、構造システムの各種性能を評価できるデータが取得できることを意識することが大切である。そして、このようなセンサの分布配置手法の確立に関する研究も期待されている。これに関しては、今後、分布型センシングの開発が主流になると思われる。一方、BOTDR光センシングのような分布型センシング手法が有効であるが、構造システムの各種性能指標と有機的に関連付けられるセンサの空間配置方法の考え方が必要とされる。また、各種センシングシステムの耐久性に関する検討はこれからの大きな課題になる。

リモートセンシングやデータ処理に関しては、長距離のワイヤレス手法はまだ開発途上にあり、さらに力を注いでいく必要がある。高速のデータ通信伝達に関しては、大容量のデータを処理するのに困難があるため、今後の情報科学の発展に期待するところもあるが、実用的な検討による改善方法の模索も必要であると思われる。

健全性の診断アルゴリズムに関しては、グローバルモニタリングに基づく損傷・劣化同定過程が非線形逆計算問題であること、よりロバストで精度の高い手法が期待されていることから、開発されてきた

各種同定手法の実用問題に関する検証と改良、および基準化を行っていく必要がある。また、ローカルモニタリングに基づいた各種センシング工法、または各種センシング技術の併用により得られた連続データと構造物の各種性能指標の関連性を解析する解析・評価手法やソフトウェアの検討と開発も必要である。なお、各種センシング技術に対する温度や凍結融解など環境要因を考慮することが今後の課題になる一方、構造物内部のクリープ、乾燥収縮、境界条件(ジョイント部の変化など)などの物理特性の変化もSHMシステムに取り込んでいく必要があるだろう。また、国内外で既に実構造物への適用を実施しているSHMシステムのデータやノウハウの蓄積を生かし、各種ヘルスマonitoring手法の実用化をより現実的な視点で検討していくことも大切なことと思われる。

その上、SHMシステムの活用を推進するためのガイドラインや基準類の整備も不可欠である。カナダISISでは、このような試みがすでに開始している⁸⁴⁾。各種センシング手法を標準化するとともに、ヘルスマonitoringシステム全体の設計基準を整備していくことが期待されている。さらに、SHM思想を導入した都市インフラ構造物の設計施工、維持管理および防災システムの設計指針の見直しに関する検討も必要であろう。

7. 後書き

本論文で述べたように、SHMに関する最近の研究開発活動が著しくなっており、既に大きな成果が蓄積されている。さらに、近年の各種ワークショップやシンポジウムにおける様々なセンシング技術、情報通信技術、データと情報管理技術、解析診断技術に関する研究開発成果から、SHMの現実性と潜在力は既に究明されつつある。今後、センシング技術やセンシングデータを用いた構造システムの損傷特定手法などの要素技術の高度化が期待されるとともに、評価技術モニタリングデータの高質化と情報化、およびこのようなデータを用いた情報管理システムの構築、そしてSHMに関する基準整備などが大きな挑戦課題になる。

その上で、伝統的な点検検査手法からの脱皮を目指し、都市インフラの維持管理や危機管理のためのSHM概念に関する社会認識がより強く喚起されていくことが大事であり、官民学の共同的努力が必要である。これに関してもLCCに関する定量的な議論や研究が期待される。

参考文献

- 1) Proceedings of 1st, 2nd, 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Fu-Kuo Chang, Editor, Stanford, CA, 1997, 1999, 2001
- 2) Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, Ansari F., Editor, Technomic, Lancaster, PA, May 1998
- 3) Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil

- Engineering Structures, A. Mafti, Editor, ISIS Canada, September 2002
- 4) Proceedings of Workshop on Structural Health Monitoring and Diagnostics of Bridge Infrastructure, University of California, Vistasp M. Karbhari and Charles Sikorsky, Editors, San Diego, March 7-8, 2003
 - 5) Proceedings of the 2000 SPIE 5th Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure, California, USA, March 5-9, 2000
 - 6) Proceedings of the 2001 SPIE 6th Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure, Conference 3994, California, USA, March, 2001
 - 7) Proceedings of the SPIE's 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California, USA, March, 2003
 - 8) Proceedings of the SPIE's 8th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, San Diego, California, USA, March, 2003
 - 9) Proceedings of the First European Workshop on Structural Health Monitoring 2002, Edited by Daniel L. Balagess
 - 10) Proceedings of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2001), June 25-27, Cardiff University, Wales, UK, 2001
 - 11) Proceedings of the First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS'02), Barcelona, Spain, July 14-17, 2002
 - 12) Proceedings of International Symposium on Condition-Based Maintenance for Highly Engineered Systems, Pisa, Italy, September 2000.
 - 13) ISIS- Canada (<http://www.isiscanada.com/highres.htm>)
 - 14) E-MOI The European Health Monitoring initiative supported by the European Commission
 - 15) 「知的材料・構造システム」産業科学技術研究開発, <http://www.nedo.go.jp/sangishitsu/project/pro09/pro09.html>
 - 16) Otani, S., Hiraishi, H., Midorikawa, M. and Teshigawara, M. Development of Smart Structure System," Proceedings of the 31th joint meeting US-Japan Panel on wind and seismic effects UJNR.
 - 17) Aktan, A. Emin, Catbas, F. Necati, Grimmelmsan, K., Pervizpour, M., Curtis J., Shen K.Z. and Qin X.L.: Health monitoring for effective management of infrastructure, Proceedings of SPIE Vol. 4696, pp.17-29, 2002
 - 18) Fujino, Y. and Abe, M.: Vibration-based structural health monitoring of civil infrastructures, Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures (SHMISIS), September, pp. 45-55, 2002
 - 19) Koh, H.M., Chang, S.P., Kim, S., K., Kim, C.Y. and Kim W.J.: Development and application of health monitoring system for bridges in Korea, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, 2002
 - 20) 松本高志, 石田哲也, 阿部雅人: メインテナンスの力学問題-展望論文-, 応用力学論文集, Vol.5, pp. 755-766, 2002年8月
 - 21) FHWA, Reliability of visual inspection, FHWA Report Nos. GHWA-RD-01-020 and FHWA-RD-01-021, 2001
 - 22) Yanev, B.: Past Experience and Future Needs for Bridge Monitoring in New York City, Present and Future in Health Monitoring, Schwesinger and Wittmann, Editors, Aedificatio Publishers, pp.93-108, 2000
 - 23) Ansari, F.: Theory and applications of integrated fiber optic sensors in structures, ASCE-EMD, SP, Intelligent Civil Engineering Materials and Structures, pp. 2-28, June 1997
 - 24) Ansari, F.: State-of-the-art in the applications of fiber optic sensors to cementitious composites, Cement and Concrete Composite, Vol. 19, No.1, pp. 3-19, 1997
 - 25) Tateda, M., and Horiguchi, T.: Advances in optical Time Domain Reflectometry, IEEE, Journal of Lightwave Technology, 7, pp. 510-512, 1999
 - 26) 松崎健太郎, 勝木 太, 矢島哲司: 光ファイバを用いたコンクリート構造物のひずみ管理に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.637-642, 2001
 - 27) 三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林裕介: 光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 VI 巻, 686 巻, 52 号, pp.31-40 2001 年 9 月
 - 28) Maaskant, R., Alavie, A.T., Measures, R.M.: A recent experience in bridge strain monitoring with fiber grating sensors, Proceedings of the International Workshop on Fiber Grating Sensors for Construction Materials and Bridges, pp. 129-135, 1998
 - 29) Sennhauser, U., Bronnimann, R., Mauron, P., and Nellen, M.: Reliability of optical fibers and Bragg sensors for bridge monitoring, Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, pp. 117-128, 1998
 - 30) Iwaki, H., Yamakawa, H., Shiba, K. and Mita, A.: Structural health monitoring system using FBG-based sensors for a damage tolerant building, Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 584-593, 2001
 - 31) Feng, M.Q: An electro-optical accelerometer and its field testing, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No.5, pp.513-519, 1998
 - 32) 三田彰, 長井望: 構造ヘルスマニタリング用の FBG 加速度センサの最適設計と寿命推定, 日本建築学会技術報告集, 第 14 号, pp.79-82, 2001
 - 33) http://www.isiscanada.com/completed/last/t2_last.htm
 - 34) Baldwin, C., Salter, T., Niemczuk, J., Chen, P. and Kiddy, J.: Structural monitoring of composite marine piles using multiplexed fiber Bragg sensors: In-field applications, Proceedings of SPIE Vol. 4696, pp.82-91, 2002
 - 35) Chen, Z., and Ansari, F.: Fiber optic acoustic emission sensor for large structures, Journal of Structural Control, Vol.7, No.1, pp.119-129, 2000
 - 36) Schulz, W. L., Conte, J. P. Udd, E. and Kunzler, M.: Real-time damage assessment of civil structures using fiber grating sensors and modal analysis, Proceedings of SPIE Vol. 4696, pp.228-237, 2002
 - 37) Wu, Z.S., Xu, B.: A Real-time Structural Parametric Identification System Based on Fiber Optic Sensing and Neural Network Algorithms, Smart NDE and Health Monitoring of Structural and Biological Systems, SPIE, 2-6 March 2003, San Diego, California, USA, 2003
 - 38) Choquet, P., Juneau, F., Bessett, J.: New generation of Febry-Perot Fiber Optic Sensors for monitoring of structures, Proceedings of the 7th Annual International Symposium on Smart Structures and materials, March, SPIE, Newport Beach, CA, 2000
 - 39) Tennyson, Rod. C.: Fiber optic sensing for civil infrastructure, Structural Health Monitoring and Diagnostics of Bridge Infrastructure, University of California, San Diego/California Department of Transportation, March 7-8, 2003
 - 40) Smartec 社ホームページ, <http://www.smartec.ch/>
 - 41) Ansari, F.: Fiber optic sensors and systems for structural health monitoring of infrastructures, 3-21, Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of innovative Civil Engineering Structures, 2002
 - 42) Habel, W.R., Feddersen, I., Fitschen, C.: Embedded quasi-distributed fiber-optic sensors for long-term monitoring of the grouting area off rock anchors in a large gravity dam, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Vol.10, No.4, pp. 330, 1999
 - 43) 虎谷和幸, 近藤 陸, 山川裕司, 三田 彰: 分布式光ファイバ温度センサを利用した地下式タンク底版コンクリートの施工管理, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 6 部, pp.50-51, 1997
 - 44) Horiguchi, T., Kurashima, T. and Tateda, M.: Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers, Photonics Technology letters, Vol. 1, pp. 107-108, 1989
 - 45) 倉嶋利雄, 佐藤昌志: 光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測, 土木学会誌 Vol.82, 18-20, 1997
 - 46) Kurashima, T., Horiguchi, T. and Tateda, M.: Optic Letter,

- Vol.15, pp. 1038, 1990
- 47) Bao, X., DeMerchant, M., Brown, A., Bremner, T.: Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 19, No.11, 2001
 - 48) Bao, X., Dhiwayo, J., Heron, N., Webb, D.J., and Jackson D.A.: Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, pp. 1340-1348, 1995
 - 49) Wu, Z.S. and Xu, B.: Infrastructural Health Monitoring with BOTDR Optic Fibre Sensing Technique, First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures (SHM ISIS), 217-226, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2002
 - 50) 石井 毅, 吳智深, 堀内辰夫: 歪モニタリング用光ファイバセンサの測定長特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.643-648, 2001
 - 51) Shiba, K., Kumagai, H., Watanabe, K., Naruse, H. and Ohno, H.: Fiber optic distributed sensor for monitoring of concrete structures, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring: The Demands and Challenges*, pp. 459-468, 2001
 - 52) 若林成樹, 渡辺浩平, 熊谷仁志: 光ファイバセンサを用いたトンネル支保の計測, 土と基礎, Vol.50, No.6, pp. 16-18, 2002
 - 53) Kurokawa, S. et al.: Stress measurement of various cables by EM sensor, *Proceedings of JPCEA 10th Annual Conference*, pp. 101-106, 2001
 - 54) Sumitro, S., Jarosevic, A., and Wang, M.L.: Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement, *Proceedings of the first fib Congress 2002*, Session 15, pp. 79-86, 2002
 - 55) Sakai, H., Yasumori, H., Miyamoto, N. and Izumo, J.: Measurements of prestressing forces in large capacity external tendons using elastic-magnetic sensor in kamikazue viaduct, *Proceedings of the 1st fib Congress*, Session 15, pp. 19-20, 2002
 - 56) Kurokawa, S., Sumitro, S., Shimano, K. and Wang, M.L.: Long term stress monitoring on PC beam by using elasto-magnetic sensor, *Proceedings of the 1st fib Congress*, Session 15, pp. 53-54, 2002
 - 57) 谷順二, 古屋泰文, 江田弘, 森下信, 名取通弘, 樋口健: 知的複合材料と知的適応構造物, 養賢堂, 1996
 - 58) Abe, M., Park, G and Inman D.J.: Impedance-based monitoring of stress in thin structural members, 11th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Nagoya, 2000
 - 59) 武藤範雄, 柳田博明, 宮山勝, 中辻照幸, 杉田稔, 大塚靖: CFRP 複合材料の電気抵抗による破壊予知, 日本複合材料学会誌, 第18巻, 4号, pp.144-150, 1992
 - 60) 奥原芳樹, 山田達也, 松原秀彰, 柳田博明: 導電相を含むFRPの電気的特性と損傷検知機能, 第2回知的材料・構造システムシンポジウム講演会論文集, pp.59-62, 2000
 - 61) Wu, Z.S., Yang, C.Q., Takahashi, T. and Tobe Y.: Damage detection of hybrid CFRP reinforcements by DC measurement technique, ATEM'03, JSME-MMD, September, 2003(in press)
 - 62) 吳智深, 高橋貴藏: 光ファイバと複合繊維を用いた複合センサによる損傷検知, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1647-1652, 2002
 - 63) Sumitro, S., Tominaga, M. and Kato, Y.: Monitoring based maintenance for long span bridges, First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, Barcelona, 2002
 - 64) Takahira, S. and Mita, A.: Damage index sensors for structural health monitoring", *Proceedings of the 11th Earthquake Engineering Symposium*, pp. 1969-1974, 2002
 - 65) <http://www.krcnet.co.jp/technical/Peaksensor/peaksensor02.htm>
 - 66) Ohtsu, M., Watanabe, H. and Ichinose, M.: Damage mechanics for core concrete by AE rate process, *Proc. of the 1st fib Congress*, Session 15, pp. 29-30, 2002
 - 67) Kobayashi, K. and Miyagawa, T.: Estimation of steel bar corrosion in RC member based on polarization resistance, *Proc. of the 1st fib Congress*, Session 15, pp. 41-42, 2002
 - 68) 山本裕治, 三田 彰, 岡田敏一: イントラネットを利用した遠隔計測管理システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp. 417-418, 1998
 - 69) 岡林隆敏, 吉村徹, 河村進一, 細川雅史: 無線 LAN 及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
 - 70) Doebling, S. W., Farrar, C. R., and Prime, M. B.: A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, No. 2, pp. 91-105, 1998
 - 71) Schultze, J. F., Hemez, F. M., Doebling, S. W., and Butler, T. A.: A Novel Statistical Based Approach to non-linear Model updating using Response Features, SEM Annual Meeting, Portland, OR, June 4-6, 2001.
 - 72) Hoon Sohn and Kincho H. Law: A Bayesian Probabilistic Approach for Structure Damage Detection, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol. 26, pp. 1259-1281, 1997.
 - 73) Lloyd, G.M., Wang, M.L., Singh, V., Dixit, P.: A probabilistic analysis of the temperature dependent mode frequencies of a prestressed concrete bridge using a bootstrap statistic, *Proceedings of 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, University of Notre Dame, July 23-27, 2000
 - 74) Xu, B., Wu, Z.S. and Yokoyama, K.: A Localized Identification Method with Neural Networks and its Application to Structural Health Monitoring, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, 48A, pp. 419-427, 2002
 - 75) Wu, Z.S., Xu, B. and Yokoyama, K.: Decentralized parametric damage identification based on neural networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17, pp. 175-184, 2002
 - 76) Xu, B. and Wu, Z.S.: Neural-networks-based structural health monitoring strategy with dynamic responses, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring: The Demands and Challenges*, Stanford University, Stanford, CA, pp. 1418-1427, 2001
 - 77) Xu, B., Wu, Z.S. and Yokoyama, K.: Neural Networks Based Identification for the Akinada Suspension Bridge in Japan with Earthquake Responses, *The Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Exports*, Tianjin, China, pp. 474-482, 2002
 - 78) Fujino, Y., Murata, M., Okano, S. and Takeguchi, M.: Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge and displacement measurement using GPS, *Proceedings of SPIE Conference*, Newport Beach, California, 2001
 - 79) Nakamura, S.: GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements, *Journal of Structural Engineering*, 126(12), pp. 1413-1419, 2000
 - 80) Abe, M., Fijino, Y., Kajimura, T., Yanagihara, M. and Sato, M.: Monitoring of long span suspension bridge by ambient vibration measurement, *The Second International Conference on Structural Health Monitoring*, Stanford University, California, pp. 400-407, 1999
 - 81) Fujino, Y., Abe, M., Shibuya, H., Yanagihara, M. and Sato, M.: Monitoring of Hakucho bridge using ambient vibration, *Proceedings of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges*, HongKong, pp. 142-149, 2000
 - 82) Abe, M., Fijino, Y., Kajimura, T., Yanagihara, M. and Sato, M.: Monitoring of long span suspension bridge by ambient vibration measurement, *The Second International Conference on Structural Health Monitoring*, Stanford University, California, pp. 400-407, 1999
 - 83) Sumitro, S., Okamoto, T., Matsui, Y. and Fujii, K.: Long Span Bridge Health Monitoring System in Japan", *Proc. SPIE*, 4337-67, pp. 517-524, 2001
 - 84) "Guideline for Structural Health Monitoring", ISIS Canada Pub., University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, A. Mufti, Editor, 2001

(2003年4月18日受付)