

研究報告

センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について



的場 純一

JICE 理事



畠中 真一

前技術・調達政策グループ
上席主任研究員



藤野 陽三

東京大学
大学院工学系研究科
社会基盤学専攻 教授



阿部 雅人

株式会社ビーエムシー
主幹研究員

研究の背景と目的

我が国では、1950年代の高度成長期以来、社会資本ストックと産業資本ストックが急速に拡大してきた。現在、これらの構造物の多くが建設後40～50年を経過するにあたり、経年劣化対策に関心が寄せられるようになっていく。老朽化した構造物は更新することも考えられるが、特に注目されているのが延命化に関する技術である。対象となる構造物の種類や件数が多いことから、構造物ごとの劣化状況を把握し、メンテナンスに着手する優先順位を付けなければならない状況にある。その判定には、構造物を点検・評価する必要があるが、現在の構造物の点検技術に関しては、基本的に目視であるため目に見えない損傷を検知できないが、それ以外にも次のような問題点が指摘できるとされている。

第一には、マニュアル化された点検手法では、想定された劣化しか発見できない可能性が高いという問題点である。想定された劣化とは基準通りに設計され、適切に製作・施工された構造物が示す劣化形態であるが、例えば2007年のミネソタでの落橋事故のように、設計段階に瑕疵があった場合には想定しない劣化性状をきたすため、点検の中で劣化や危険性の兆候を発見することは困難であるものと考えられる。

また、第二点目としては、経験豊富な点検技術者として期待されている人材が、いわゆる団塊の世代に重なっているため、2010年代以降順次第一線から去ることが予想されるという問題である。知識と経験をいかに若い世代に継承してゆくかという問題が積み残されている。

インフラモニタリングが点検と異なる点は、モニタリングでは正常に供用されている時の構造物の挙動（振動・変位・温度・傾斜・ひずみ・音・水分量・ひび割れ等の何らかの物理量）を事前に把握しておき、常時監視を継続する中から異常を感知し、補修が必要な時期を推定したり、最終的には部材の大きな変形や破壊する前兆を捉える事を目的としている点である。モニタリング技術によって、『点検では発見しきれない構造物の劣化をも見つけ出す』ことが期待される。

構造物の高齢化が進む中、構造物の点検を進める事は急務の課題であるが、全ての作業を人力で行うにはコストや点検技術の面で困難である。そのため、センサを活用した点検技術を並行して導入しつつ診断の自動化も検討する必要があると考える。本稿では、インフラモニタリング技術の開発に必要なデータの蓄積にあたり、これから実施すべき課題を検討している。

なお本稿は、東京大学の藤野教授と株式会社BMCの阿部主幹研究員と共同で実施したJICE自主研究の成果の一部を取りまとめたものである。

定期点検の現状

道路法（昭和27年）では「道路の維持又は修繕（第42条）」について、「道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、政令で定める」としている。しかしながら、様々な気象条件・交通条件・地形条件下にある全ての道路を、ある一定の基準値で管理することの困難さ等から、この政令は現在に至っても未制定のままとなっ

ている。(社)土木学会が地方公共団体の橋梁点検の現状について調査を行った資料¹⁾によれば、政令指定都市では8割以上で行われているが、都道府県や中規模都市では、一部実施しているところを含めても全体の半数程度に留まっている。さらに、小規模都市の半数以上では、殆ど実施されていない状況であった。

一方、実務的に道路を管理している機関(国土交通省、NEXCO、首都高速道路(株)等)では、点検規模や点検間隔、記録方法等について独自に点検をルール化している。

また、(財)海洋架橋・橋梁調査会²⁾や(社)日本橋梁建設協会から提供されている資料では、架設年代別の劣化特性や、構造形式別の着目点など、細部に関する着目点や構造全体の異常を把握する手法について解説が加えられている。(図-1, 2)

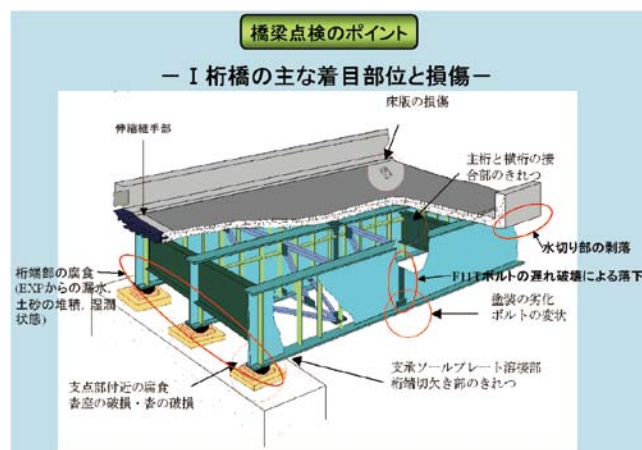


図-1 形式別の着目点の例 ((社)日本橋梁建設協会)

橋面での観察 (抜粋)

橋面上で全体的な異常がないかを観察する。普段目にしない部位での変形が橋面に現れていることがある。

- ・全体的な通り、縦断におかしいところがないか、高欄や地覆で確認する。路面の滞水位置でも観察できる。
- ・通行車輛による異常音、振動、たわみがないか？
- ・舗装に変状が出ていないか。

図-2 留意点の例 ((財)海洋架橋・橋梁調査会)

現行のマニュアル中での、基本的な点検方法としては「目視点検」が中心であり、その他には「走行車両内での車上感覚」「コンクリートの打音検査」が挙げられている。このように、検査員の主観的判断を伴う手法が採用されている。客観的な評価方法としては、局所的な検証を行う際に必要に応じて「コンクリートのひび割れ幅・長さの測定」

「赤外線サーモグラフィによるコンクリート剥離の計測」「電磁誘導法によるかぶり深さの測定」「塩化物イオン濃度測定」等を行うこととされている。

これらの検査器具を使用する点検方法は、何らかの不具合箇所を局所的に検証し、状況を把握するといった目的には有効であるが、おおよそ健全であろうという前提の下で構造物全体を概観して不具合箇所を検知するような点検には、不向きな面が多分にあると考えられる。器具を使用する点検においても、ある程度のまとまった範囲を一度に点検できる手法に期待が寄せられていると推察される。例えば、赤外線サーモグラフィによる非破壊検査などは比較的好例であると言える。

モニタリングの現状

センサ技術の発達により、広範囲にわたる測定や低電力化、センサ自体の長寿命化や高精度化などが進み、様々な物理量を安定して計測できるようになっている。そこで、これらの技術をモニタリングに導入する研究が、各方面で行われている。

ストックマネジメントの観点からは、社会インフラの大部分を占める中小規模の構造物モニタリングが重要であると考えられる。そのため、モニタリング研究において対象となるモデル構造物も建設件数の多い中小規模のI桁橋梁のような身近な構造物となるケースが多い。このようなモデル構造物に対して、ひずみゲージ・変位計・加速度計・温度計などのセンサ群を配置し、集中的に計測データの取得を行って動的特性の同定や健全度評価を行うなどの数々の試みがなされている。

モニタリングの現状として、実用に供されている例を図-3に示す。(a)は橋梁の支承部分に設置された破断センサであり、落橋などにより支承部に過大な変形が発生した場合に破断を感知し警報を発するものである。(b)は洗掘による橋脚の傾斜を感知するセンサであり、傾斜量が規定値を超えた場合に警報を発する。(c)は光ファイバーを利用した斜面監視センサであり、崖崩れの初期段階の変位を感知し管理者へ警告を発するものである。これ以外にも、斜面からの路面への落石を感知するモニタリングなども実用化されている。これらのモニタリングはいずれも、対象構造物に変形や損傷が発生したことを感知するもので



(a) 破断センサ



(b) 洗掘検知用傾斜計



(c) 斜面監視センサ



(c) 斜面監視センサ

図ー3 実用に供されているモニタリング技術の例

ある。すなわち、突発的な一次災害の発生を感知し供用をストップさせることにより、二次災害、とりわけ人的被害を防止することを目的としている。この意味において、点検を補完し、対象構造物自体の損傷を事前に予測するインフラモニタリングの実現には至っていないと言える。

センサを使ってモニタリングというのは世界的な流れであることは間違いがなく、極めてホットなテーマであり、国際会議やワークショップが毎年のように開かれ、航空、機械、プラントなどの分野を含めた構造ヘルスマニタリングの百科事典^③も刊行されている。ヨーロッパではECベースのプロジェクトSMACOが2000年初めからスタートし、現在はIRISというプロジェクトが進行中である。これらのプロジェクトでは、廃棄される橋梁を使って、部材の切断など構造物の損傷レベルと動特性との関係などを入念に調べている。

中国や韓国では、新設の大型長大橋梁が多い中で、数多くの様々なセンサを取り付けた橋梁が続々と現れている。新設橋梁であるため、特段の問題が起こるわけでもなく、そこから優位な情報が得られるに至っていない。

構造物の個体差

劣化や損傷を事前に予測する技術の開発のために、特定のいくつかの構造物を対象とした計測データの収集を行う研究が活発である。この手法における問題点の一つに、構造物の個体差の存在が挙げられる。同一設計の構造物であれば、設計上保証される強度や耐久性にはばらつきが生じる。また、完成後も建設された立地により、地盤の違いや荷重や日射・雨水などの環境もそれぞれに異なるため、長期的な劣化プロセスもそれぞれに異なると言える。

例えば、図ー4は平成7年兵庫県南部地震による橋脚被害の状況と、隣接した同一設計の橋脚の状況である。一方は、大きな被害を受けているのに対して、他方はほとんど無被害であることが分かる。また、図ー5は隣接した高架橋において、列車振動の応答速度を測定した結果であるが、両者の振動振幅は2倍近く異なっていることが分かる。このように、設計上は殆ど同一の構造物であり、問題なく供用されているものであっても、災害時の損傷や外力に対する応答は大きく異なっている事例が確認されている。

劣化診断技術を構造物のストックマネジメントに適用する場合、求められるアウトプットは維持管理の優先順位の決定である。これを判断するには、構造物の標準的な応答値の幅と、対象物の個体差を勘案した応答との比較により劣化の程度を推定することとなる。

医療分野では、人体の計測値については、長年にわたって蓄積されており、年齢・身長・体重・血圧・血液成分などの平均値や標準値および個人差（個体差）、また各種計測値と体の異常との相関性などを分析した結果が整理されている。このため医師は、初診の患者に対しても標準値から乖離した項目を発見することで病気の有無のみならず、病名や原因までも推定し診断を行い、治療をすることができる環境にある。



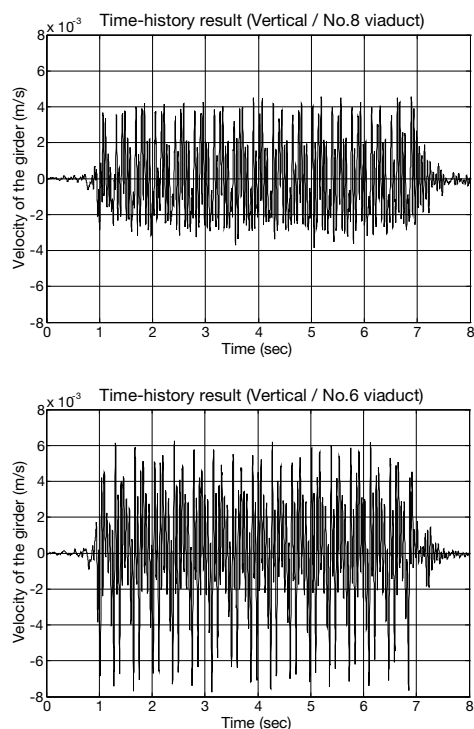
倒壊寸前



無被害

35mの距離に位置する同形式橋脚（道路橋）

図－4 兵庫県南部地震での被害



図－5 隣接同形式の高架橋での応答の差（鉄道）

構造物においても構造形式や規模、建設年度や供用年数毎に多数の測定結果を蓄積しておき、これらの蓄積の中から構造物の応答の標準値や許容範囲などを把握できるような仕組み作りが必要であると考ええる。

技術開発のアプローチ

インフラモニタリングの実現に向けた技術開発を進めるにあたり、大幅に不足しているのが、モニタリングに汎用性を持たせるための測定データの蓄積であることが分かった。そこで、計測データのデータベース化に関する問題点を整理するために、時間軸と空間軸（件数）の2つの軸で状況を描いたものを図－6に示す。将来像として目標となる点は、時間的にも空間的にも計測（あるいは劣化）データを豊富に蓄積した右上の方にあるとしている。この段階ではある程度経年した構造物をはじめ多くの構造物を対象に、経年的な異常をモニタリングしている状況である。これに対し、現状は左下から、特定の数件の測定結果を蓄積するために、右（点線）の方向へ検討を進めつつある状況である。その場合の研究方針は、少数のモデル構造物を対象とした計測や研究により常時モニタリングの技術を確立し、その後、汎用性を有する技術を開発して、多くの構造物へと普及していくという展開を目指していると考えられる。しかし、数々の構造形式へ適用性を検証するにあたっては、比較できるデータが不足している状況に直面することが予想されるため、早い段階から、数多くの計測値を収集してデータベースを構築すべきであることが分かる。

そこで図－6における目標点への新たなアプローチ方法として、数多くの構造物を対象にセンサを使った計測を行い、構造形式や規模・経年ごとの平均値や標準値の把握を行う（現状から上へ進める）ことから始める手順を推進することも重要であると考えられる。

国の方針として、橋梁に関しては検査態勢が整備される背景があり、点検の一環として構造物の基本的な挙動について定量的な測定データを収集することも可能であると思われる。また、従来の研究では、常時監視に主眼があったため、センサを構造物に固定した計測方法が前提とされてきたが、点検の一環として構造物の挙動データを収集するには適していないと考えられる。そこで、機動性に優れ、かつ効率的に計測データを収集する方法として、例え

ば、コンパクトな計測装置や、車載型の計測装置の開発（移動計測システム）などの必要性も予想される。

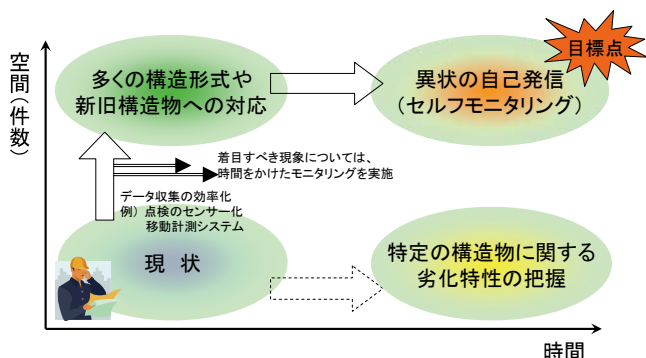


図-6 技術開発のアプローチ

データの蓄積が進むにつれて、数々の測定データの中から、標準値からの乖離の大きいものといった基準でスクリーニングを行うことが可能となる。何らかの不安要素が潜在している構造物をピックアップし、それらを対象に重点的なモニタリングを行うことにより、劣化に関する臨床的知見とノウハウの蓄積が進展するものと期待される。また、人力で行われている点検作業の中からセンサ化できる項目については自動化を図ることで、発見精度の向上と点検作業の軽減を目指す。このような試行の中から、モニタリングによる劣化の把握に関する技術を確立させてゆく方針で開発を進めることが望ましいと考えている。

インフラモニタリングに関するロードマップ

インフラモニタリングに関する技術開発は、構造物のマネジメントのあり方とも連携して進める必要があり、構造物の高齢化に伴う劣化被害の発生予測と共に技術開発の目標を定めることが肝要である。図-7にマネジメントの将来予測に伴うモニタリング技術開発のロードマップを作成した。

現状の技術水準や体制が未整備であることを踏まえ、2015年までに情報基盤や体制面の整備を進め、モニタリング技術の開発、診断技術及びその判断材料の蓄積を行う。2020年頃には統計ベースのマネジメントとそれを支援するモニタリング技術を確立し、主要な構造物に対しては、常時計測体制を整える。2030年には定量的なリスクベースのマネジメントに移行するロードマップとした。特に、個別構造物のリスク評価技術には未解決の問題が多いと考えられること、また、計測データのデータベース化が必須となることから、系統的かつ戦略的な研究開発が強く求められよう。

参考文献

- 1) (社)土木学会編：「アセットマネジメント導入への挑戦」、技報堂出版、2005.11
- 2) (財)海洋架橋・橋梁調査会：「道路橋マネジメント入門」、2004.8
- 3) Boller, C., Chang, F.-K. and Fujino, Y.(ed): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, vols.1-5, pp.1-2709, Wiley, 2009.

		現状	2015年 基盤整備	2020年 統計ベース	2030年～ 定量的マネジメント
目標・将来像	事故・リスク	インシデントの増加 →大事故懸念	事故に伴う被害の抑制		事故の未然防止
	劣化比率	不明	増加を抑制	減少に転ずる	10%以下に
体制整備	保全体制	事後的対応	点検に基づく 予防的対応	優先度評価による 効率的対応	リスク評価による B/C最大化
	技術基準	未整備	対策優先度	実性能の指標化	定量的リスク指標化
技術開発	保全技術	対処療法的	予防保全 長寿命化技術 劣化予測技術	性能保証型技術 リスク予測技術	リスク明示型技術

図-7 モニタリングに関するロードマップ