

本格的な維持管理時代に向けた技術

横山 功一

現在は維持管理の時代と言われるように、インフラストラクチャの維持管理の重要性が益々増してきている。それに合わせて、必要になる技術も設計、施工、維持管理を統合した考えで捉えるようになってきている。インフラストラクチャの代表的な道路橋を対象にして考えると、耐久性に係わる将来予測技術が必要になり、また維持管理段階では構造物の現況を把握しマネジメントに繋げることが重要になる。

キーワード：マネジメント、ライフサイクルコスト、性能規定型設計、モニタリング

1. はじめに

現在は維持管理の時代と言われるように、インフラストラクチャの維持管理の重要性が益々増してきている。それに合わせて、必要になる技術も設計、施工、維持管理を統合した考えで捉えるようになってきている。ここではインフラストラクチャの代表的な道路橋を対象にして、本格的な維持管理時代に向けた設計、施工、維持管理のトータルマネジメントの必要性を踏まえ、これらに関連する将来予測技術やモニタリング技術について考えてみたい。

設計においては、想定する期間で構造物に不具合が生じないように照査がなされ、それに沿って施工がなされているはずであるが、それなのになぜ維持管理段階では多くの変状が見出されるのであろうか？

図-1は、寿命特性曲線と呼ばれ、機械などが製作された後の故障率の特性を模式的に描いたものである。この図はその形状からバスタブ曲線とも呼ばれ、故障率の性格の違いから時間帯が3区分されている。すなわち、製作初期は故障率が高いがすぐに低減し、あるなだらかな期間を経て故障率が増加する時期を迎え、最終的には廃棄・更新を迎える。初期故障（initial failure）は、設計や施工上の欠陥もしくは使用環境上の不適合により、製作後の比較的早い段階で生じる故障である。次の偶発故障（random failure）は、同じように製作された部材・部品などが偶発的（ランダム）に故障するもので、その故障の比率は同一割合で発生するような故障である。最後の摩耗故障（wear out failure）とは、疲労・劣化・摩耗などにより時間とともに（経年的に）故障率が増加するような故障で、こ

の故障は事前の点検・検査や監視により予知できる。

維持管理の考え方も、このような故障の特性に応じて特徴づけられる。つまり、初期故障のように予測が難しく予防することが難しい場合は、早い段階でその原因を突き止めて改善することになる。すなわち、予防保全（preventive maintenance）ではなく、事後保全（break down maintenance）となる。また、試運転段階で、本格運用と同じような負荷を加えることにより、早期に故障を見いだすことができよう。偶発故障も、予防保全が難しいので事後保全が基本的な対応となる。これに対して、摩耗故障は予測・予知できることから、予防保全が有効になる。

インフラストラクチャの維持管理も同じような考えとなるが、構造物が個別に建設され、長寿命であること、様々な環境条件、使用状況となることが特徴であろう。

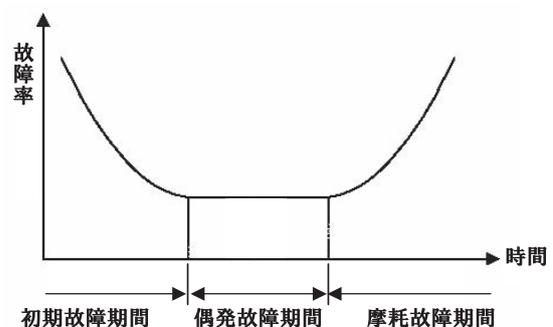


図-1 寿命特性曲線

2. 設計, 施工, 維持管理のトータルマネジメント

社会資本のマネジメントを考える時には、計画・設計段階において施工ならびに維持管理レベルを想定しなければならないし、維持管理においては設計の考え方・施工状況を踏まえて対応していかなければならない。すなわち、ライフスパンにわたった取り扱いを考えなければならない。最近では、構造物や施設の性能を前面に出して、設計、施工、維持管理を考えていくようになってきているが、この考え方を徹底させると、ライフスパンにわたってトータルとしての維持管理が可能になる。

(1) 設計段階

道路橋の技術基準である道路橋示方書¹⁾は、平成14年に従来の仕様規定型から性能規定型の規定へと設計法が改訂された。これは、コスト縮減等に資する新しい知見の導入促進等を目的としている。基準の中では、橋梁全体に要求される性能を明確に規定しており、その中に設計の基本理念として、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならないとしている。ここで特に注意しておきたい点は、構造物の耐久性に対する重要性の認識から新たに規定された耐久性に関する事項については、時間の概念が必要となり、設計上の目標期間として100年が目安に設定された。このためには、今後100年を見据えた耐久性に係わる情報が必要となる。

道路橋示方書は設計の技術基準ではあるが、設計の基本理念をベースにすると、施工に対する品質確保も維持管理のレベルも関連が生じてくるのであり、それぞれがバラバラでは理念を達成することが出来ない。すなわち、施工段階での品質管理あるいは維持管理実務は構造物の性能を実現させるという観点が必要になるわけであり、性能規定型設計法をベースにした時には従来の施工時の品質管理あるいは維持管理の技術が見直されなければならない。この点ははっきりと認識することが重要だと感じられる。

(2) 施工段階

このような動きを施工に反映させた一つの事例として、米国における舗装に関する技術基準の動きに性能発注基準 Performance-Related Specifications (PRS) の考えがある²⁾。従来から舗装工事に対しては品質を保証するスペックが主流であったが、PRSはその改

良版と言える。すなわち、管理者の目標としては出来上がった舗装の品質が重要なのではなく、最終的には性能が重要となる。発注者は、性能に応じて工事代金を支払うのが合理的となる。これを可能にするためには、公正で、効果的でなければならないので、

①工事の品質の測定方法

②品質結果と工事代金調整との結びつけ

が重要になり、このためにPRSの要素として

①変状 (distress) の種類/問題となる変状の特定

②変状に影響する品質特性

③品質特性の測定方法

が必要となる。そのために、PRSでは、図-2に示すような性能の経年的変化、変状の発生確率、そして維持管理のレベルに応じた費用に基づくライフサイクルコスト (LCC) の予測モデルを必要としている。これを用いることにより、表-1に示すような設計段階と工事段階におけるLCCの違いから、それらの差額を工事代金調整額として算定できる。これにより、LCCを最少にするという目標が道路管理者だけでなく工事業者の目標になり、効果が上がることが期待される。

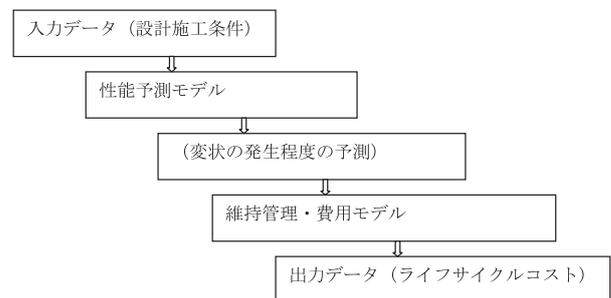


図-2 予測モデル

表-1 予測項目

	設計段階	工事段階
入力データ	設計・施工条件 (変数)	実測された品質値
出力データ	設計計算上の構造物のLCC	建設された構造物のLCC

(3) 維持管理段階

工事が竣工すると維持管理段階に入ることになるが、ここで重要なことは設計・工事からの情報の引継である。特に竣工検査は初期性能テストと位置づけられるものであり、そこで得られた情報・数値は維持管理における初期値として重要になる。また、初期段階では初期故障 (建設・補修工事後初めて検知される故障) が考えられる。この原因は主として設計施工に付随する不具合が考えられ、竣工時検査により性能を照

査し、問題箇所は手直しをすることになる。

日々の維持管理において最も基本的なものは、定常的な施設の運用に際して構造物の状況を把握することから始まる。道路パトロールや線路の検査は、予測・予知が難しい異状（初期故障や偶発故障）の予兆を検知することを目的とした点検であり、現在日常点検として行われているものである。このような点検はその性質から、頻度を高く行う必要があり、その作業内容は、例えば軽微な異状を損傷の予兆と捉えることができ、異状が進展した際にその影響度を正しく予測評価できて、被害を食い止めることができる判断に係わるものであることから、経験を積んだ専門員が行うのが適当な仕事となる。

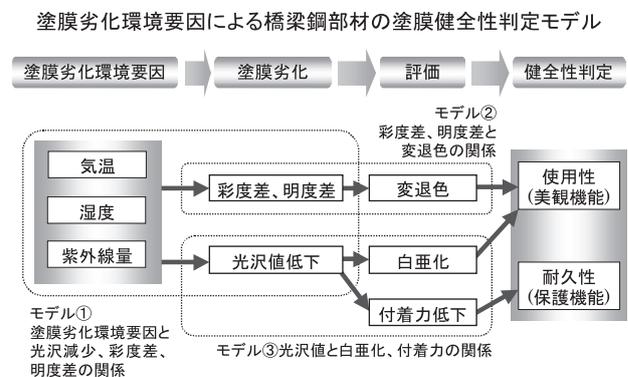
設計段階で触れたように、社会基盤構造物の計画設計の基本構想に基づいて維持管理が実施されなければならない。すなわち、設計段階で想定した劣化損傷過程に対応するような維持管理がなされなければならない。すなわち、設計法に損傷許容設計³⁾を採用したならば、部分的な損傷が生じるのは許容するが、大きな故障に至らないように運用中に行われる定期点検や検査、あるいは地震後の特別検査などで損傷を検出し、修理により元の性能へ復旧させようとするものであるから、必要なインターバルで点検を行うこととなる。また台風や地震などの異常時に、必要と思われる場合には緊急点検を行い、構造物の状況を確認しなければならない。定期点検の間隔は、必ずしも固定的に考えるべきではなく、想定する劣化・損傷の特性に応じて変更することも現実的な選択となろう。また一方、経年作用（鋼部材の腐食や疲労）は、損傷の種類・メカニズムがはっきりしていて、劣化過程の予測が可能であり、監視により状態の変化を把握し、適切な時期に適切な対応策を講じることとなる。経年作用に対しては、建設当初からの変化を比較することにより異状を検知しようとする場合には、一定期間毎に同じ要領に基づいた点検を行うのが適当である。この場合、点検結果は過去のデータと比較して将来の損傷の進行予測などに活用され維持管理の最適化が図られる。劣化対応点検はある時間間隔を持った点検であり、マニュアルに従って作業することが可能である。

3. 将来予測モデル

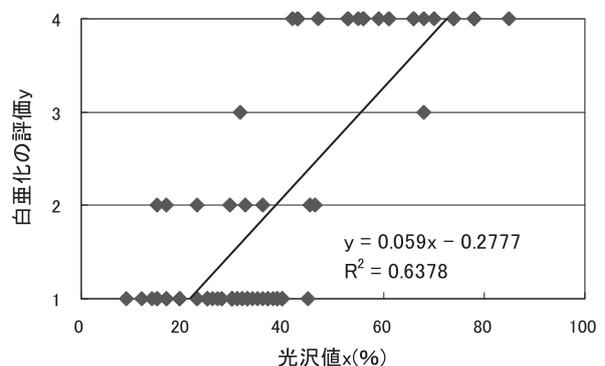
効果的な維持管理を進めるためには、設計段階を含めて将来を見通した対応が必要になり、その際にはいろいろな方策の経済性比較が行われる。すなわち、ライフスパンを見通したライフサイクルコストによる経

済性の比較であり、さまざまな環境条件・使用条件における構造物の状態変化や維持管理対策の有効性の経年劣化などの情報が必要になる。鋼部材の腐食を考えると、設計段階ではある種類の塗装材料をある環境条件下である構造物に使用した場合に、①長期間にわたる劣化状況の推定が出来なければならず、同時に②経済性の検討のためにはこれらの劣化状況の費用的情報が必要になる。図—3 (a) は塗膜劣化に関する環境要因を基に塗膜健全度を判定するモデルを示しているが、モデルを構成する光沢値と白亜化の関係を見ただけでも図—3 (b) に示すように長期間にわたる劣化状況の複雑さが改めて実感される。

LCCには、将来発生する費用を予測・計上する。その場合、最も一般的に行われるのは、現在までの経験や知識により得られるトレンドを将来へ外挿することであり、現在までの知識情報である程度予測できるものもある。ただし、そこでの一番の問題は、現在までのトレンドが将来にわたって変わらないと考えることであり現実的でない。それというのも、現在の維持管理方法では改善すべき課題があるからこそ各種方策の有効性をLCCによって検討するわけであるから、現在までとは同じことにはならないものも必然的に含まれる。例えば、材料劣化の進行は施設の周辺環境や



図—3 (a) 塗膜劣化健全度判定モデル



図—3 (b) 光沢値と白亜化の評価の関係

使用環境により異なるため、過去の実績に基づき予測することが一番の早道であるが、新たに新しい材料や技術が開発され現在のものに置き換えられるような場合には将来の維持管理方法は当然変化してくる。この他にも、当初予測と異なる利用状況による相違（使用環境の変化）などが挙げられる。

そのため、コスト算出において必要となる使用材料および部品の劣化曲線や耐用年数は、その根拠は従来の経験的な数値を利用している状況にあることを理解して用いる必要がある。また限界をカバーするために、環境情報をセンサにより測定し維持管理に役立てていくとする技術開発が進められている。

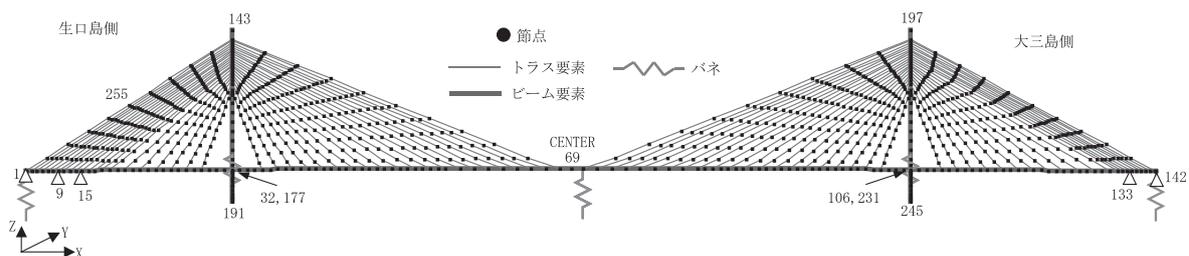
4. 構造ヘルスマニタリング

維持管理で重要になるのは、構造物の劣化や損傷の状況把握であり、これらは構造物全体の中の局所的な情報である。通常、維持管理では点検により目視で確認が行われるが、労力・時間がかかること、記録に残すのが困難、近接するために足場・点検車を必要とするなど改善点が多い。これらに対しては、点検ロボットの利用が考えられるが、根本的な解決には至っていない。

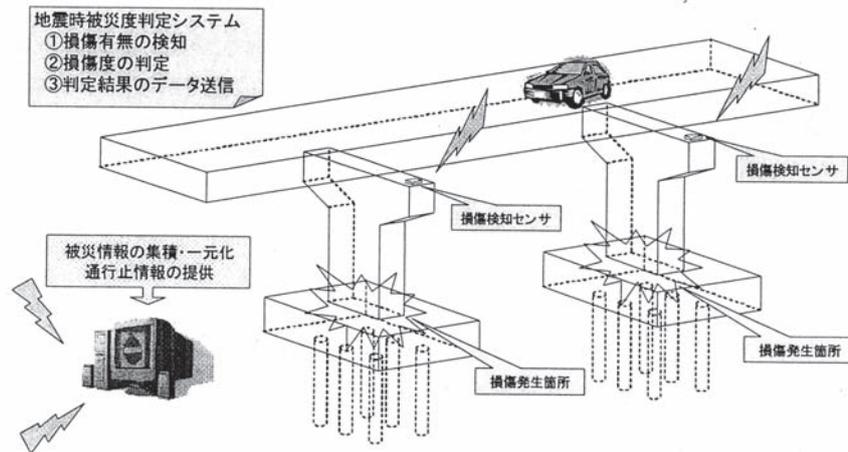
そのような中で、構造物にセンサをとりつけて、構造物の状況を観測し維持管理に役立てようとする構造ヘルスマニタリングに係わる研究が多数進められている。本州四国連絡橋をはじめとする長大橋や新形式の橋梁などでは、耐風・耐震設計を中心としたその設計法の妥当性の検証、あるいは設計において考えた挙動が実構造物でも実際に起こるかどうかを検証することを主目的にして、動態観測システムがとりつけられ貴重なデータが得られてきた。ただし、このシステムが維持管理段階での構造物の健全度を把握することを目的にしたものではないことから、現段階でのこれらのシステムの維持管理への活用は限定的といってもよい。従って本格的な維持管理の時代における構造ヘルスマニタリングシステムが必要になる。

一つのアプローチは、多くのセンサを構造物に配置して構造物の静的あるいは動的挙動を捉え、その情報を処理して維持管理に役立つ情報を抽出しようというものであり、構造同定（structural identification）技術が活用される⁴⁾。その場合、ネックになっているのが実用的な劣化や損傷情報の抽出法であろう。利用できる構造物の応答レベルが小さく計測精度が低くなる。また、実務として対象となる損傷や変状は軽微なものであり、それにより構造物の固有振動数や振動モードに大きな差が生じることはないと考えられ、損傷検知精度が問題になる。多々羅大橋（図—4）を対象とした予備的な損傷解析では、橋桁に極端な損傷を仮定し、桁の曲げ剛性を10～30%低下させたケースで解析したところ、桁の曲げ振動の固有振動数の変化はたかだか0.1～0.3%にとどまった。これに加えて、多々羅大橋のような長大斜張橋では、ケーブルの連成により固有振動数が多数現れて精度良く固有振動数を特定できないという問題もあり⁵⁾、困難さが増すことになる。もう一つのネックは、どのような損傷を対象にしているのかと言うことであり、一般的に社会基盤構造物の寿命が長く、安全度が高く設定されているので、センサや計測システムの寿命の方が短く、また損傷の生起頻度が低いと誤った情報ばかりが伝達されることになり、維持管理技術者から見ると信頼性が低いシステムとなってしまう。

これとは別の一つのアプローチは、対象とする損傷・劣化を限定し、それを検知しようとするものである。損傷を特定して対応策をとることは非常に重要であり、地震、強風、あるいは自動車・船舶などの衝突といった異常時が考えられる。その場合には、想定される損傷シナリオを立て、それが検知できるようなセンサの種類と配置を考えればよい。そうすることで、目的を限定した有効なシステムができあがり、維持管理に役に立つ情報が得られることになろう。このようなアプローチの事例が、地震時の橋梁損傷検知システムの開発であり、図—5に土木研究所の研究概要が示されている⁶⁾。橋梁の地震時損傷としては、橋脚基



図—4 多々羅大橋のモデル



図一五 地震時の橋梁損傷検知システムの開発 (独土木研究所)⁶⁾

部の損傷を対象にし、橋脚天端に設置したセンサにより応答を測定し損傷を判定し、情報を伝達する機能を有する。損傷判定手法としては、橋梁を1質点系にモデル化して固有周期の変化を捉えるものや応答波形の詳細解析等が考えられる。

また長期劣化を対象にするモニタリングの場合には環境状況の測定が対象となる。

いずれにしても、維持管理における位置づけをはっきりさせてモニタリングシステムを考えることが重要であり、最新のIT技術を活用した様々な活用が考えられる⁷⁾。

5. おわりに

構造物の長期性能を考えた維持管理には、設計段階からのトータルとしてのマネジメントが必要になる。インフラストラクチャの寿命は長いので、維持管理段階での教訓を設計へフィードバックするのでは時間的に間に合わない。従って、どのような維持管理をするのかを明確にした設計が必要になり、一方構造物が完成した後の維持管理では現実の状況に応じて将来を予測し、その結果により具体的な方策を設定していくことになり、そのための維持管理マネジメントシステムが有効であろう。この動きはアセットマネジメントと

して具体化されてきており、関連した技術開発が望まれる。

JICMA

《参考文献》

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，p.7，2002
- 2) Performance-Related Specifications (PRS)：FHWA Publication No.FHWA-SA-97-098
- 3) (社)建築研究振興協会：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト，技報堂出版，2000.8.10
- 4) S. W. Doebling, et al.：Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory, May 1996
- 5) 山口宏樹，藤原享，山口和範，松本泰尚，堤和彦：多々羅大橋に見る長大斜張橋のケーブル振動連成とその減衰性能への影響，土木学会論文集 No. 766，2004.7
- 6) 小林寛，運上茂樹：道路橋の地震時被災度判定システムに関する基礎的研究，リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム，(社)土木学会，pp161-164，2004.6
- 7) 圓幸史朗，他：スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発，日本地震工学会論文集，第7巻，第6号，pp17-30，2007年

【筆者紹介】

横山 功一 (よこやま こういち)
茨城大学
工学部 都市システム工学科
教授

