

# PC 橋のヘルスマニタリングとマネジメントシステム

宮本 文穂\*

## 1. PC 構造物の健康診断と診断学の必要性

日本は、都市高速道路網など社会基盤を支える施設や構造物（橋梁、トンネル、ダムなど）を含む社会資本ストックの質・量が高度に発達した国の一つになってきた。そのため、欧米諸国と同様に今後はこれら社会資本ストックの性能（機能）を可能な限り長持ちさせるとともに、環境とも調和させながらその高齢化に対処していく必要がある。これを一般的に維持管理業務といい、PC 橋を始めとする各種構造物を健康診断（評価・判定）して治療（補修・補強計画）する医者の役目を果たす高度な最新情報処理技術を身につけた専門技術者の育成（診断学）が必要になると同時に、維持管理業務には、膨大な知識と豊富な経験が必要となることから、専門技術者を支援する、また専門技術者の知識や経験を継承していく世界標準を目指したコンピュータシステムの開発が必要不可欠となっていると考える。さらに、PC 構造物などは、他分野の製品と比べて大規模で耐用年数も 100 年以上と長期間が期待される場合が多く、しかも腐食、疲労、中性化、アルカリ骨材反応など劣化機構は多様となる。そのため、可能な限り早期に劣化、変状を検出して必要な維持管理業務を行うため、人間でいえば在宅医療にあたるヘルスマニタリングが必要となると考えられる。

本稿では、これまで各種構造物を造る技術者と比べるとどちらかという地味な分野であった維持管理の分野に、ライフサイクルコスト(LCC)やマネジメントの概念、分析手法を取り入れ、土木工学の枠組みを越えた情報、システム、電気、機械工学などの広範囲な学術領域の有機的な結集のもとに、情報ネットワークによるデータベースシステム、マルチメディアバーチャリアリティ技術、インテリジェントモニタリング技術、人工生命や人工知能技術などの最新情報処理技術を援用して、環境との調和を考慮に入れた図 - 1 に示すような戦略的なストックマネジメント（統合型ライフサイクルマネジメントシステム）を行う構想を紹

介するとともに、PC 橋に関する独自のマネジメントシステムの開発例<sup>2), 3)</sup> を具体的に紹介するものとする。

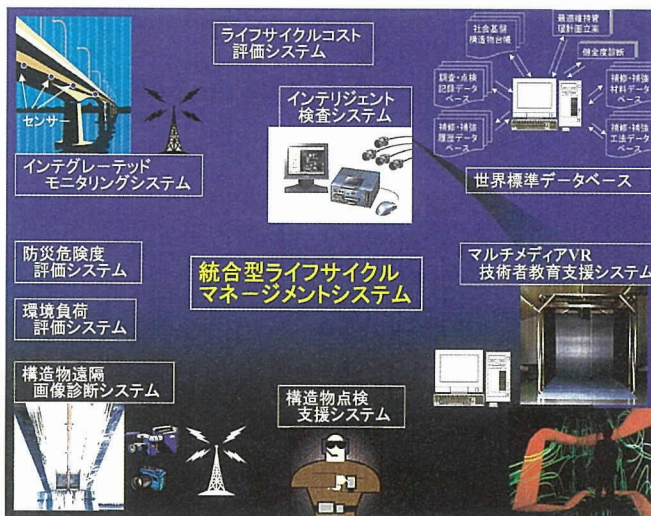


図 - 1 統合型ライフサイクルマネジメントシステム構築に必要な要素技術

## 2. IT を活用した PC 橋のヘルスマニタリングと診断

PC 橋などの PC 構造は、RC 構造に比べて、部材断面にプレストレスを導入することによって、予想される外力による不利な応力を打ち消して部材全断面を有効に利用できる大変合理的なものである。すなわち、一般には、予想不可能な外力は別にして予想範囲内にある外力のあらゆる組み合わせに対して、どのコンクリート部材断面内においてもコンクリートの弱点である引張応力を表面にひび割れが発生しない範囲に納めることによって将来の維持管理業務を最小限にとどめる構造の実現が可能なものとする。したがって、このような概念に基づく PC 構造には、基本的にコンクリート表面にひび割れなどの損傷が見られるような場合には、すでに部材の耐久性能が失われているとの考え方もできる。しかし、実際の PC 構造にはあらゆる部位にプレストレスを導入するのは不可能であり、たとえば、場所打ち間詰め部目地、床版橋軸方向、PC 鋼材定着部などには導入し難い場合が多く、RC 構造となる部位も存在する。

上述の諸点を考慮すると、PC 橋の場合には、日常および定期点検をとおして劣化・損傷が顕在化した後に維持管理業務に移る、RC 構造でこれまで一般的であった「事後保全」より、たとえば、PC 鋼材などの構造上の主要部材に対して何らかのセンサーを設置して、その挙動の時系列変化



\* Ayaho MIYAMOTO

山口大学工学部  
 知能情報システム工学科 教授

を計測するヘルスマニタリングシステムによって維持管理業務に関する意志決定を行う「予防保全」が一般化すると考えられる。これは、今や世界的な流れとなってきた性能照査設計の概念とも一部合致するものである。

図 - 2 は、前述図 - 1 に示した PC 構造物を含む各種構造

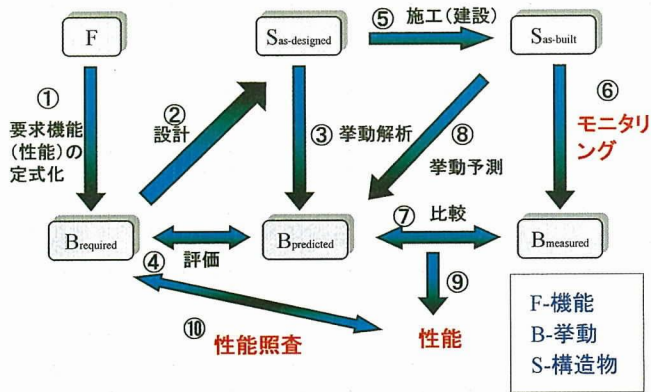


図 - 2 構造物維持管理業務におけるヘルスマニタリングの位置づけ

物の統合型ライフサイクルマネジメントシステム構築に必要な要素技術の一つであるリアルタイムモニタリングが可能な、インターネットなどの情報技術 (IT)、最新情報処理技術、ソフトコンピューティング技術などを組み合わせた「統合型ヘルスマニタリングシステム」の維持管理業務における位置づけ、役割を示したものである。すなわち、従来より行われてきている構造物の設計から施工 (建設) の流れ (①～⑤) にモニタリングを追加することによって (⑥～⑩)、設計、施工時のみならず供用中にも種々の性能が双方向で照査可能な流れを示したものである<sup>4)</sup>。図中には、3つのレベルの挙動【 $B_{required}$ ; 要求挙動 (性能),  $B_{predicted}$ ; 予測挙動 (性能),  $B_{measured}$ ; 計測挙動 (性能)】間の相互関係が示されている (図中の S は構造物を表す)。これより、従来の設計の流れでは、まず発注機関から出される構造物に対する要求機能 (性能) を定式化し (①)、これより得られる構造的な情報を総合して設計を行い (②)、解析モデルを通して挙動予測を行うことになる (③)。この予測結果をもって要求される性能を確認 (評価) した後 (④) 実際の施工 (建設) に移り (⑤)、供用が開始される。このような性能確認の結果、不満足であれば②または③に戻って再検討 (設計) が行われることになる。この流れは、建設後の維持管理の観点から見ると一方通行となっていることがわかる。これに対して、図 - 2 中の⑥～⑩に示すモニタリングの流れを追加することによって第3の挙動 ( $B_{measured}$ ; 計測挙動 (性能)) が計測でき、設計時における解析モデルの改良や

要求性能の再確認および長期照査に利用することが可能となる。

他方、維持管理業務の効率的な遂行には、これまで主として新設構造物のために築いてきた膨大な量の要素技術の集約化と維持管理に関する知識、経験の総合化が必要不可欠となる。そのため、前述図 - 1 に示している世界標準化を念頭に置いた、維持管理業務のための技術や知識の伝承あるいは次世代技術者への総合的研究教育、トレーニングなどを継続して行う体制を確立する必要がある。すなわち、多様な社会資本ストックのライフサイクルマネジメントにおいては、たとえば PC 橋のような社会基盤施設の維持管理の場合、適切な診断を行い (診断原)、最適な維持管理計画を環境との調和を考慮しながら立案する必要がある。このような知識、経験の共有化においては、長い年月を経て社会基盤施設の損傷、劣化が進展する現象の時間軸を縮め、臨場感ある仮想体験を行うため、画像処理技術と高度なマルチメディアバーチャルリアリティ技術を応用して「時空を超越した技術・知識の伝承システム」の開発が必要不可欠となる。図 - 3 は、そのイメージを図示したものであり、PC 橋に発生するさまざまな損傷状態を擬似的に体験したり、維持管理の専門家が、環境条件や発生している損傷をもとに、どこを見て、どのように診断しているのかの思考プロセスを臨場感をもって仮想的に体験することが可能なほぼ全世界を結ぶマルチメディアバーチャルリアリティシステムである。



図 - 3 マルチメディアバーチャルリアリティ技術を利用した維持管理技術、知識伝承システムの例

### 3. PC 橋を対象としたマネジメントシステムの開発例<sup>3)</sup>

PC 橋の健康診断は、2. で述べたように、その構造特性より基本的にはヘルスマニタリングを併用した予防保全が一般的となると考えられるが、RC 構造の部位も混在するため、橋梁全体としての維持管理業務には事後保全の実施

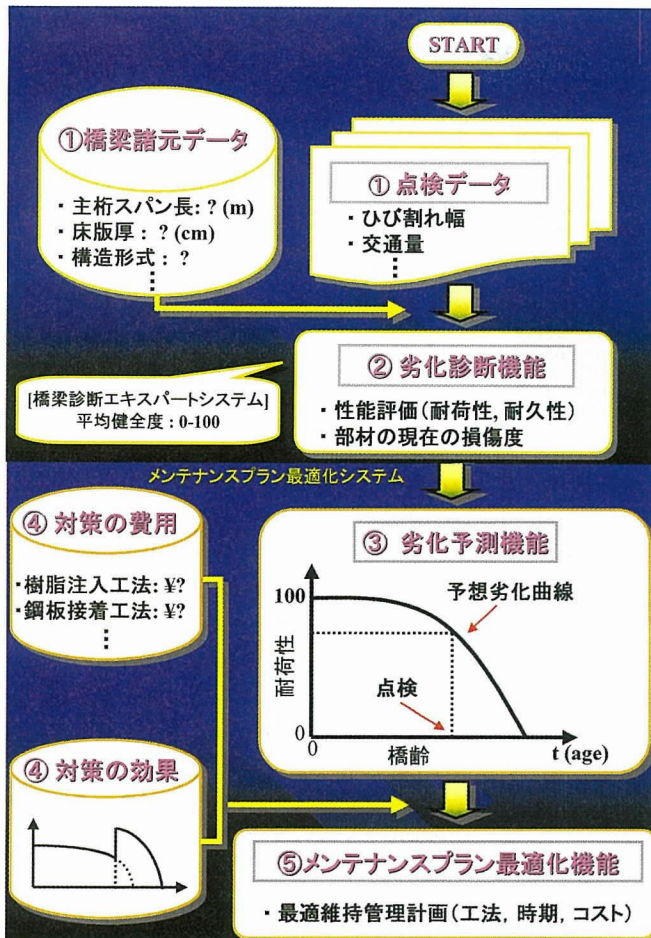


図 - 4 J-BMS によるコンクリート橋マネジメントシステムの流れ

を併用することも必要となる。ここでは、著者らが開発している、主として RC 橋を対象とする橋梁マネジメントシステム (J-BMS) 内の一つの機能として付加している PC 橋を対象とする劣化診断システム (PC 橋版 BREX) について具体的に紹介してみる。

J-BMS によるライフサイクルコストを考慮した最適維持管理計画策定までの流れを図 - 4 に示す<sup>2)</sup>。J-BMS では、維持管理業務の基本フロー (点検 → 診断 → 対策) に従って、まず、既存橋梁の目視点検程度の点検と一部詳細点検に分類される点検を組み合わせを行い、それを「データベース」に格納する。そして、「データベース」とのリンクによって検索された対象橋梁に関する点検データと橋梁諸元データを入力して、「橋梁診断エキスパートシステム」を起動し (劣化診断機能)、診断対象部材である主桁および床版について、その耐荷性、耐久性を 100 点満点の健全度で表すことによって、対象橋梁の診断・評価を行う。次に、「劣化診断機能」で得られた健全度をもとに「劣化予測機能」によって今後の劣化予測を行い、対象部材の今後の劣化進行を視覚的に確認する。最後に、「劣化予測機能」から出力された劣化

進行状況から、それぞれの対策工法の効果および必要な費用を組み合わせることで、今後の最適維持管理計画 (工法選択、時期、ライフサイクルコストなど) を導出する。本システムは、主として既存コンクリート橋を対象としており、その健全度診断ならびに診断結果に基づく補修・補強工法の選定のみならず、限られた予算内で最大の効果を得るための最適維持管理計画の作成が合理的かつ効率的に実施可能な統合型マネジメントシステムで、ニューロ・ファジィ・エキスパートシステム、遺伝的アルゴリズム (GA) あるいは免疫アルゴリズム (IA) などの最新情報処理技術を利用してシステム構築を行っている<sup>2)</sup>。

ここでは、既存 PC 橋の一例として、山口県内の 8 径間単純 PC ポストテンション T 桁橋である "KS 橋スパン 8" に関する点検データを入力して推論される最終診断結果などを示してみる。図 - 5 は、主桁および床版に関する本システムへの入力画面の一部を示したものである。すなわち、橋梁諸元、各種点検から得られた橋梁全体についての調査、点検結果、また床版および主桁についてのひび割れ状況など、数十項目についての入力を行う。PC 橋固有の点検データとしては、橋軸方向 PC 鋼材定着部での変状、シース付近での変状や横方向 PC 鋼材定着部の変状など PC 鋼材への影響を考慮した点検結果を入力する項目が設けられている (図 - 5 参照)。このような点検結果に関する入力には主観的に定められた三者択一の選択肢を含むものもあり、該当するものをクリックして選ぶことができるようにしている。図 - 6 は、PC 橋用に構築された診断プロセスの結合計算に従って推論された最終診断結果の視覚的な画面表示を示したものである。すなわち、診断対象橋梁の主桁および床版について、その耐荷性、耐久性、耐用性を 100 点満点の健全度で表している。このように主桁および床版の総合判定結果を視覚的に画面表示することができる。PC 橋においてはとくに、PC 鋼材について、その劣化状況を把握することがもっとも重要視されることから、画面にはその劣化状況を表すために PC 鋼材定着部の損傷およびシースに沿った損傷評価の推論結果も示している。

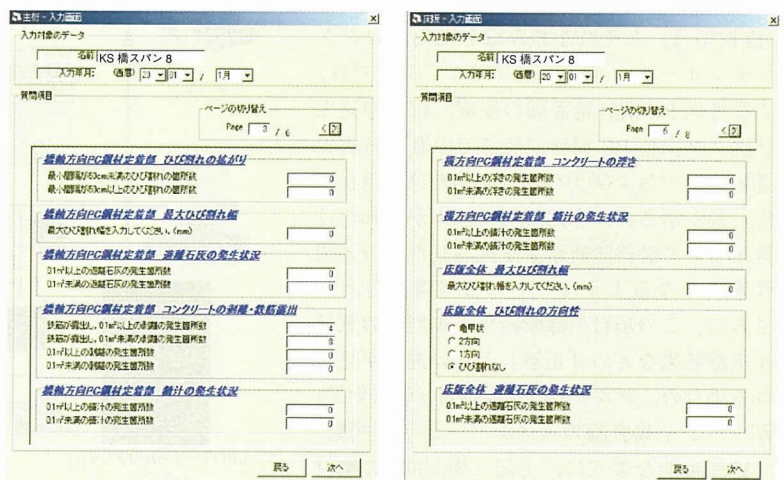


図 - 5 既存 PC 橋に関する主桁 (左) および床版 (右) についての点検結果入力画面の例

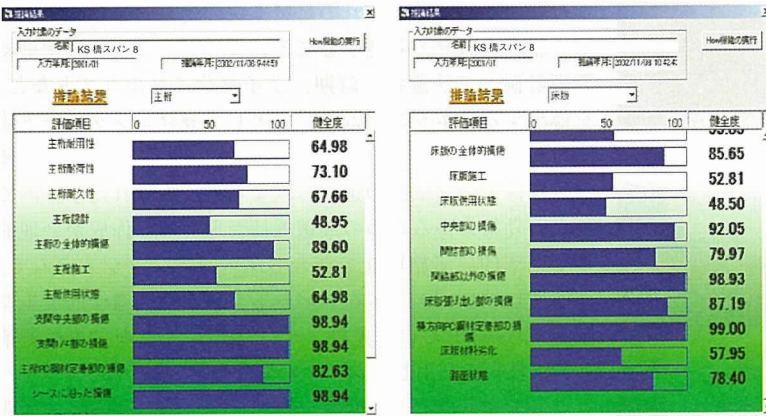


図-6 PC橋版BREXからの最終診断結果の出力画面例(主桁(左)および床版(右))

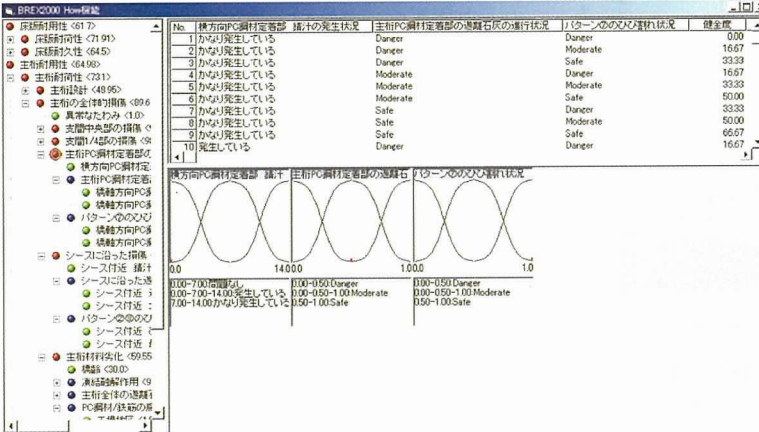


図-7 最終診断結果に対する確認および知識更新サポート画面例

なお、本診断機能には、システムからの診断結果の確認およびニューラルネットワークを利用した学習機能を付与しており、前出図-6中右上の「How機能の実行」ボタンをクリックすると図-7に一例を示すような画面に移る。ここでは、PC橋用に構築した診断プロセスの全体を示すとともに(画面左)、診断結果の確認を希望する項目(ここでは、主桁PC鋼材定着部の損傷)の診断プロセスの詳細(点検項目)とそれを組み合わせたプロダクションルール(if-thenルール)(ここでは、①横方向PC鋼材定着部の損傷、錆汁の発生状況、②主桁PC鋼材定着部での遊離石灰の進行状況、および③パターン⑦のひび割れ状況)群が示され、今回のルールがどれだけ適用されて最終診断結果を推論したかの確認が容易になるようにしている(画面右上)。さらに、この項目の診断結果が専門家の意見や実験結果などの「正解」と食い違いが見られる場合の、システムの知識更新(学習効果)がファジィ集合論の「メンバーシップ関数」で確認可能なように、上記「横方向PC鋼材定着部の損傷、錆汁の発生状況」「主桁PC鋼材定着部での遊離石灰の進行状況」「パター

ン⑦のひび割れ状況」それぞれについての現状でのメンバーシップ関数の形状が図示され(画面右下)、知識更新にあたっての専門技術者とシステム開発者の効果的なコミュニケーションのサポートを可能としている。

#### 4. おわりに

欧米先進国でも、近年PC橋などの社会基盤施設を含む社会資本ストックのライフサイクルマネジメントに関心が集まっている。たとえば、フィンランドを拠点とするヨーロッパ連合では「LIFETIME NetWork」という略称の組織を国家プロジェクトとして立ち上げつつあり<sup>5)</sup>、この他にアメリカを中心とするグループも独自の技術やノウハウを蓄え、2002年7月にスペインにて第1回「IABMAS」という略称の大規模な国際会議が開催されている<sup>6)</sup>。このように、社会資本ストックの整備された国々を中心に世界規模の同一目標の拠点形成が計画されつつあり、これらとの連携を密にしながら、当該分野で世界に先駆けた先進的マネジメントシステムを確立し、日本が世界をリードできる研究拠点を形成することが必要であると考えられる。PC橋などの各種構造物を対象としたヘルスマonitoringとITなどの次世代情報処理技術を組み合わせたデータベースシステムの共有化および統合型ライフサイクルマネジメントシステムの世界標準化のイメージを図示にしたものを図-8に示している。このような積極的な取り組みが進展し、維持管理業務の世界標準化の時代に向けたイニシアチブを日本が発揮できるようになると、PC橋を始めとする構造物維持管理の効率化につながるのみならず、技術的な魅力も

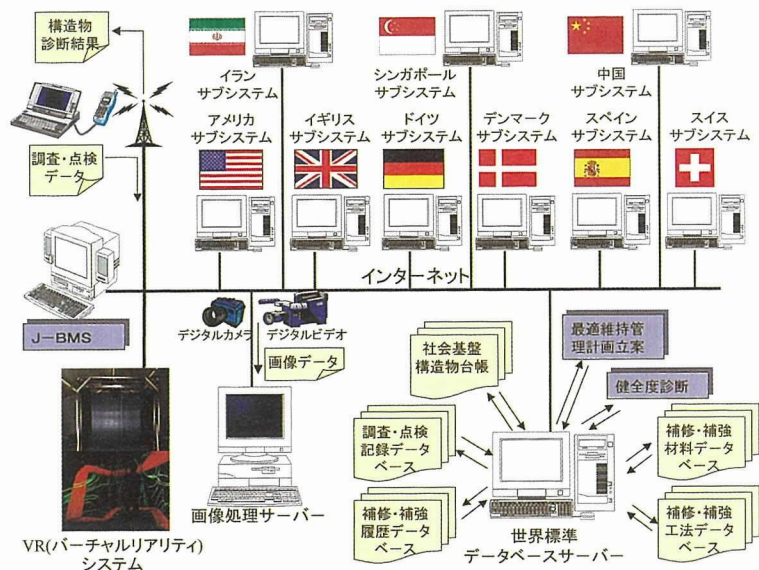


図-8 世界標準化を目指した統合型ライフサイクルマネジメントシステムのイメージ

大いに増大するものとする。

最後に、著者の知人である Dr. Klaus Brandes(BAM, Berlin) にお願ひして、堅実なイメージのあるドイツにおける PC 橋マネジメントの現状についての紹介をして頂いたので、次章も続けてお読み頂ければ幸いです。

#### 参考文献

- 1) たとえば, Miyamoto, A., & Frangopol, D. A. (Ed): Maintaining the Safety of Deteriorating Civil Infrastructures, Practical Maintenance Engineering Institute of Yamaguchi University, Yamaguchi, 2002.
- 2) Miyamoto, A.: A Practical Bridge Management System for Existing Concrete Bridges, Concrete Structures in the 21<sup>st</sup> Century, pp.111-120 (CD-ROM:C), fib2002 Osaka Congress, 2002.10.
- 3) 三輪宅弘: 評価型エキスパートシステム構築ツールの開発と PC 橋への適用, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2001.2.
- 4) Smith, I. F. C.: Increasing Knowledge of Structural Performance, Structural Engineering International (SEI), IABSE, Vol. 11, No. 3, pp. 191-195, Aug., 2001.
- 5) Technical Research Centre of Finland & VTT Building and Transport : Competitive and Sustainable Growth Programme, LIFETIME Thematic Network, 2001.10 (HP address: [https://www.rte.vtt.fi/QuickPlace/lifetime\\_public/Main.nsf](https://www.rte.vtt.fi/QuickPlace/lifetime_public/Main.nsf)).
- 6) Casas, J.R., Frangopol, D. A. & Nowak, A.S. (Ed): Bridge Maintenance, Safety and Management, International Center Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, 2002.

【2002年11月26日受付】