RC橋維持管理支援システム(J-BMS RC版)の開発と実橋への適用

宮本 文穂¹・浅野 寛元²・江本 久雄³・勝島 龍郎⁴

¹フェロー会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: miya818@yamaguchi-u.ac.jp

²学生会員 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: asano@ube-ic.co.jp

³正会員 山口大学大学院助教 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: emoto@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 阪神高速技術株式会社 (〒550-0005 大阪府大阪市西区1-4-1オリックス本町ビル)
E-mail: tatsuro-katsushima@hex-eng.co.jp

著者らが開発してきた「橋梁維持管理支援システム(J-BMS)」のうちRC橋梁を対象としたJ-BMS RC版は、点検データを蓄積するJ-BMS DB'09、橋梁の性能評価をするRC-BREXおよび維持管理計画立案支援を行うMPOSという3つのサブシステムを有している。さらに、RC-BREXは、定性的なRC-BREX'99と定量的なRC-BREX'2000の2種類を有している。既存のJ-BMS RC版はJ-BMS PC版¹⁾と同様に各サブシステムの連携が取られていなかったため、各サブシステムを一つのシステムとして統合化を図った。本研究では、橋梁の架け替えに伴い撤去される橋梁を用いて詳細な点検を行い、そのデータをサブシステムのひとつである「橋梁劣化診断エキスパートシステム」(RC-BREX'2000)に入力し、その診断結果から本システムの有用性を検証した。

Key Words : Japanese bridge management system (J-BMS), reinforced concrete bridge, bridge rating expert system (BREX), removed bridge

1. はじめに

わが国ではこれまで、高度経済成長とともに多数の社会基盤構造物が建設されており、人々の生活や経済活動など、人間社会の発展を支えている。これら社会基盤構造物の数は年々増加し、今日に至るまで継続的な投資がなされ、膨大かつ複雑なネットワークをなすストックが形成されてきた。これらの膨大な数の社会基盤構造物を社会資本として効率的に運営するためには、その状態を的確に分析、正しく評価し、適切な対策を実施する診断技術の整備が必要である。橋梁においても同様の傾向にある。これまで橋梁の寿命は、一般的には50年程度と考えられてきた²⁾。現在、平成14年3月に改訂された「道路橋示方書・同解説」³⁾からは、所要の性能が確保できる設計上の目標期間として100年を目安にされている。既設橋梁において寿命と考えられている建設後50年以上経過した橋長15m以上の橋梁の割合は、平成22

年度には約8%であるのに対し、20年後の平成42年には約53%と急増する⁴⁾。

このような状況から、今後維持管理費の増大が見込まれるが、財源が有限なことから、合理的かつ効率的な維持管理を行わなければならない。維持管理費の不足により、適切な維持管理が行われない事態となれば、事故や災害等を引き起こし、人々の生活に影響を与える可能性が懸念される。2012年12月、山梨県内の中央自動車道で発生した笹子トンネル天井板の落下事故は、天井板吊り構造部の老朽化より引き起こされ、維持管理方法について注目を浴びた。このような社会基盤構造物の老朽化問題について、国民がどの程度認知しているかという国民意識調査では、「聞いたことがあるが、よく知らない」が36.7%、「知らなかった」が33.5%と、約7割の回答者が十分な認識をしていなかった結果となった⁴⁾。既存の社会資本を適切に維持管理していくには、「予防保全的管理」を図り長寿命化させることが重要である。しかし、

少子高齢化による人口減少も見据える必要があり、今後予防保全により長寿命化しても周辺住民が使用しない事態が起こり、投資が無駄になる場合も出てくる。社会資本として効率的に運営するためには、その状態を的確に分析、正しく評価し、適切な対策を実施する診断技術の整備が必要である。

地方公共団体の一つである山口県では、2013年3月現在、総計3,176橋(2m以上の全橋梁)の道路橋を管理している⁹⁾。このうち、建設後50年以上経過している老朽化橋梁は全体の約30%であり、高度経済成長期に建設された建設後30~49年経過した橋梁が全体の約38%を占めている。そのため、20年後にはこれらの橋梁の老朽化が急速に進展し、老朽化橋梁の割合が67%へと急速に進展することになる。山口県も国と同様に、橋梁の劣化が著しくなった後に修繕を実施する事後保全的な維持管理を行っていたが、今後もこれを継続した場合、大規模補修や橋梁の架け替えが一時期に集中することとなり、限られた予算の中で適切に管理できなくなる恐れがある。そのため山口県においても、計画的かつ予防保全的な修繕対策を実施することにより、橋梁の維持管理費用の平準化・縮減を図ることを目的として、橋梁長寿命化修繕計画を策定している。

このような背景のなか、維持管理業務の合理化や効率化を支援するシステムとして橋梁維持管理支援システム(BMS: Bridge Management System)の実用化が強く求められている⁹⁾。BMSとは、橋梁の維持管理に関わる行為である「調査・点検」、「評価・診断」、「計画・対策(補修・補強・架け替え)」を、品質・経済性・安全性・機能性などの観点から、橋梁管理者が適切に実行するための支援システムである。BMSには現状把握・計画立案・実行・評価・現状把握といったマネジメントサイクルを反映したものが望まれている⁸⁾。

国土技術政策総合研究所⁹⁾や阪神高速道路株式会社¹⁰⁾、北海道などの自治体、建設コンサルタントなどがBMSを研究開発もしくは運用しており、筆者らも主としてコンクリート橋の橋梁維持管理業務の効率化を支援する橋梁維持管理支援システム(J-BMS: Japanese-Bridge Management System)の研究・開発を進めてきている¹¹⁾。J-BMSは橋梁の諸元データや点検データなどを効率的に管理する橋梁維持管理データベースシステム(J-BMS DB'09: J-BMS Data Base system'09)¹²⁾、橋梁の劣化診断を行う性能評価システム(BREX: Bridge Rating Expert System)、最適維持管理計画の立案を行うメンテナンスプラン最適化システム(MPOS: Maintenance Plan Optimization System)の各サブシステムから構成される。

今後、J-BMSを実用化させるには多方面からの検証が必要である。本研究は、橋梁の維持管理フローにおいて「評価・診断」に該当する性能評価システムのBREXを

主対象として検証を行った。その方法としては、複数の実橋梁点検データをBREXに入力、学習させ、その診断結果を詳細に整理するとともに、入力方法、点検者や学習方法による差異を明確にし、改良点や問題点を整理することによってJ-BMSの有用性を示すこととした。

2. J-BMSの変遷

J-BMSの変遷として、各年代における開発の変遷概要を記述する。

(1) 1980年代後半^{13),14)}

橋梁の老朽化や劣化が社会問題化しつつある中、比較的調査事例の多いRC床版橋の診断と評価に関する基礎的研究がされた。

(2) 1990年代^{15)~21)}

1990年代に入ると、今後、橋梁の老朽化が重大な社会問題となることが叫ばれはじめた。

そのような中、J-BMSは1998年に開発された。開発当初はRC橋のみを対象とするシステムであった。RC橋は高度経済成長期に急速に普及したPC橋よりも古い橋梁が多いことから、RC橋版が先行して開発されたからである。その後の研究により、RC橋版に様々な改良や機能も追加されて、RC橋版をにPC橋版の開発が進められていった。

(3) 2000年代から現在^{22)~30)}

1990年代後半からのパソコンの急速な発達に伴い、2000年代に入ると、システムの互換性がなくなり使用できない事態となった。このことから、当時主流となっていたWindowsとの互換性のあるシステムへの再開発が必要となった。その際、橋梁の性能を評価する機能や対策を選定する機能などのサブシステムが単体で開発されたことから、機能間での連結が失われてしまった。

2000年代の中盤以降、各サブシステムの連携が図られ、実用化へ向け実橋梁での検証が行われていった。RC橋に関しては老朽化した撤去橋梁を用い現地調査および検証を行っている。また同時期に、山口県橋梁通常点検業務支援システムの開発がされた。PC橋版については、2012年に実橋での検証を行いその有用性を検証した¹⁾。

(4) J-BMSの構成

研究・開発を進めてきたJ-BMSの構成図を図-1に示す。図-1には、[1]橋齢・橋格などの諸元データとひび割れなどの点検データを抽出する(J-BMS DB'09)、[2]抽出したデータをもとに対象橋梁の性能評価や健全度診断を行う(BREX)、[3]診断結果から予想劣化曲線を利用し対象橋

図-1 J-BMS 構成図

梁の劣化予測を行う(MPOS)、[4]劣化予測結果から対策の費用やその効果を検証する(MPOS)、[5]検証結果から最適な対策時期およびコストを提案し最適維持管理計画の立案を行う(MPOS)、という橋梁の維持管理における一連の流れに対応したJ-BMS各機能の構成を示している。

3. J-BMS RC版の運用フロー

前述のとおり、J-BMS RC 版は RC 橋梁の合理的な維持管理を目的として開発され、J-BMS DB'09、RC-BREX および MPOS という三つのサブシステムから構成される。これら三つのサブシステムの運用フローを図-2 に示す。

図-2では、[1]J-BMS DB'09からRC-BREXに必要となるデータを橋梁諸元DBと通常点検DBから抽出した後にダウンロードする。ダウンロードされたデータの内、xlsファイルである点検調査は「主桁点検」と「床版点検」の項目を参照しながら入力するために利用し、brxファイルは「橋梁諸元」と「調査・点検」の項目を自動入力

するために利用する。[2]入力したデータをもとに算出されたRC-BREXの診断データをCSVファイルとして出力する。出力されるデータは橋梁名の他にRC-BREXの性能評価結果である「主桁耐荷性」や「床版耐久性」などといったデータとなる。これら橋梁の現有性能を健全度として、0.0～100.0点の定量的な尺度で評価している。[3]計算データが記載されたCSVファイルをJ-BMS DB'09へアップロードする。[4]アップロードしたデータをMPOSで利用する。という利用の流れを示している。

4. J-BMS DB'09

J-BMS DB'09とは、J-BMS内で橋梁の各種データを効率的に管理する機能を有するサブシステムである³⁾。本サブシステムは、山口大学、山口県庁および山口県建設技術センターとの官学共同研究（平成18年度から平成20年度：山口県橋梁維持管理支援システムの開発と実用化）において精力的に開発が進められてきた。最終的な開発（改訂）年がわかるように西暦2009年の簡略表記であ

図-2 J-BMS RC版の運用フロー図

る'09を表示している¹²⁾。

J-BMS DB'09は、ユーザ認証のための「ログイン画面」、サポート機能へアクセスするための「メニュー画面」に加え、「橋梁諸元DB」や「通常点検DB」、「補修・補強DB」、「その他(橋梁年報作成支援機能)」と、それらに付随する入力機能・検索機能・修正機能・出力機能により構成される。図-3にJ-BMS DB'09の構成と各機能への流れを示す。なお、橋梁諸元DBおよび通常点検DBは、山口県が策定した「橋梁データの整備方針(案)³²⁾」および「橋梁通常点検マニュアル(案)³³⁾」に準拠したデータ項目の蓄積を目的として設計・開発された。また、補修・補強DBは、橋梁の補修・補強工事履歴、工事に即して行われる詳細点検の結果を格納しており、診断結果にもとづいた補修・補強計画立案に利用することを目的に開発された。橋梁の維持管理フローにおいては、「点検・調査」に該当する。

(1) 橋梁諸元DB

橋長や架設年といった既存橋梁の諸元データは、主に紙ベースやxlsファイルで保管されてきた。これらデータ量は膨大であり、目的に応じて必要とするデータを素早く抽出することが困難であった。そこで、これらデー

図-3 J-BMS DB'09 構成図

タを一元管理し、目的に応じて利用できる橋梁諸元DBが開発された。橋梁諸元DBは、諸元データを検索・閲覧する「諸元データ検索機能」と新規架設橋梁、規格に変更が発生したときに利用する「諸元データ入力機能」、データに誤りがあった場合や架け替えなどにより不要となった諸元データを削除する「諸元データ削除機能」およびDB内のデータをExcelへ出力する「諸元データ出力機能」を有している。

これら機能の内、「諸元データ入力機能」と「諸元データ出力機能」にはそれぞれ問題が存在した。まず「諸元データ入力機能」では、紙台帳からの入力しか想定されておらず、Excelなどの電子データからデータを入力する場合は、直接アップロードをすることができなかった。そこで電子データとの対応をとるための「諸元データアップロード機能」が実装された。「アップロード」ボタンをクリックすることで電子データを自動入力することができる。次に「諸元データ出力機能」では、橋梁台帳の仕様変更されたにも関わらず、古い仕様の台帳を出力してしまうというバグが存在したのでこれも修正した。これらにより橋梁諸元DBはより実運用に適したDBに改良された。

(2) 通常点検DB

山口県における通常点検は、「山口県 橋梁点検要領(案)³⁴⁾」に準じて実施される。山口県が管理する2.0m以上の橋梁を対象とし、安全で円滑な交通の確保、沿道や第三者への被害防止および橋梁の適切な維持管理のために必要な情報を得ることを目的とした目視点検である。また、通常点検により、損傷状況の把握、対策区分の判定および点検結果の記録を行い、今後の維持管理の基礎資料を蓄積する。点検項目は、上部工と下部工あわせて32項目あり、「損傷なし、軽微な損傷」、「損傷が発生している」、「損傷が著しい」の3段階で判定を行い、損傷ごとに写真を撮影する。また、各点検項目に対し損傷判定を行った後に、部位・部材区分ごとに4段階で対策区分の判定を行い、さらに所見を記入する。

通常点検DBは橋梁諸元DBと同様に、「通常点検データ検索機能」、「通常点検データ入力機能」および「通常点検データ出力機能」を有している。このDBについては運用において、特に問題が発生しなかったため、機能改良は行わなかった。現在(2013年度末時点)、山口県にて運用されているデータ検索画面例を図-4に示す。

(3) 補修、補強関連DB

既存橋梁の補修・補強の際には、橋梁の状態をよりよく知り、適用工法などの決定を行うために反撥硬度測定やはつり試験といった詳細調査を行う。これらデータと補修・補強工事施工結果データの蓄積は、橋梁劣化予測

図-4 通常点検検索画面例

図-5 BREX 内の評価過程例

や劣化要因の特定、補修補強工事の効果確認などに利用出来る貴重なデータとなる。現状では、前述した通常点検データや諸元データと比較して利用頻度が高いデータとは言えないが、将来より正確な橋梁診断結果にもとづいた補修補強計画立案に利用されていくことが予測出来る。

しかし、山口県ではこれらデータが各土木建築事務所単位で管理されていることや、紙台帳で保管されているなど利活用するには難しい管理体制であった。そこでこれらデータを一元管理するための補修・補強関連DBを開発した。本DBは格納データ検索のための「補修・補強関連データ検索機能」、補修・補強関連DBへのデータ登録をWeb上のフォームより行うための「補修・補強関連データ入力機能」をそれぞれ有している。しかし橋梁諸元DBと同様に、電子データからの入力が想定されていないことや、DBに登録されたデータを電子データとして出力する機能が存在しないなどの問題点があった。そこで電子データ自動入力のための「補修・補強関連データアップロード機能」と、格納データをExcelファイルとして出力するための「補修・補強関連データ出力機能」を新たに実装し、機能改良を図った。

5. RC-BREX

(1) RC-BREXの概要

図-2に示しているようにJ-BMS RC版の特徴として、性能評価システムであるRC-BREXが2種類存在する。名称はそれぞれRC-BREX'99とRC-BREX'2000である³⁵⁾。この2種類のRC-BREXについて、ひび割れを例にして説明する。RC-BREX'99の耐荷性や耐久性の評価過程例を図-5に示す。支間中央付近に発生しやすい曲げひび割れや支間1/4に発生しやすいせん断ひび割れなどあらかじめ特徴的なひび割れのパターンを列挙しておき、該当するパターンのひび割れが発生していれば、図-5の点線で囲まれた部分のように、下位階層の「ひび割れ状況」や「ひび割れ幅」の項目を調査する方法をRC-BREX'99は採用している。このため、点検自体は比較的簡易であると考えられる。しかしながら、「ひび割れ状況」のようにひび割れ発生状況としてひび割れの本数を扱う項目には、選択形式の回答項目として“かなり多く発生している”や“わずかに発生している”など定性的で曖昧なものであり、点検者による感覚の差異がシステム評価へのばらつきという問題となることが危惧される。これに対して、RC-BREX'2000は、特徴的なひび割れのみを扱うのではなく、主桁、床版に発生している変状すべてについて、桁番号、橋軸方向位置、上下位置、方向などの7つの項目について調査し、評価システムの点検データとして扱うことにより、点検者による曖昧な判断が行われないようにしている。また、発生している全ての変状についてデータを残すことが可能であるため、今後の点検時に有用なデータとして扱えるという利点も挙げられる。このように2つの評価システムは、それぞれ長所および短所を有しているため、2つの評価システムをユーザーが選択可能な状態にしておくことで、用途にあった利用ができ、効率的な維持管理が行えると考えられる。用途としては、RC-BREX'99は点検の優先順位をつけるための簡易的な点検を行うために専門技術者または地方自治体などの技術職員が利用するものであり、RC-BREX'2000は専門技術者が詳細な点検を行うために利用するものである。本研究では、定量的なデータを入力するシステムであるRC-BREX'2000を用いて検証を行った。

(2) シグモイド関数

図-5でも示したように、下位層から上位層に沿って順に評価結果を受け渡すことで最上位の評価が可能となっている。これらデータには、定性データと定量データの両方が存在するので、そこから推論を行うために式(1a)のシグモイド関数を利用する。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\omega x + \theta)}} \quad (1a)$$

ここで、 ω はシグモイド関数の傾きであり、 θ はシグモイド関数のx軸方向への移動量となる。シグモイド関数は定性データの項目分必要となるが、グラフの形はすべて単調増加型か単調減少型、釣鐘型の三つに分類される。それぞれの重み W や閾値を決定するための計算式を、式(1b)、式(1c)および式(1d)にそれぞれ示す²¹⁾。そして、それらの計算式により決定される3種類のメンバーシップ関数の形状についてその例を図-6～図-8に示す。

(a) 単調減少型の場合 (図-6)

$$\begin{cases} W = -h/A \\ \theta = hB/A \\ x_2 = B - A, \mu(x_2) = 1.0 \\ x_3 = B + A, \mu(x_3) = 0.0 \\ x_2, x_3 \in X \end{cases} \quad (1b)$$

(b) 単調増加型の場合 (図-7)

$$\begin{cases} W = h/A \\ \theta = -hB/A \\ x_1 = B - A, \mu(x_1) = 0.0 \\ x_2 = B + A, \mu(x_2) = 1.0 \\ x_1, x_2 \in X \end{cases} \quad (1c)$$

(c) 釣鐘型の場合 (図-8)

$$\begin{cases} W_1 = h/A \\ W_2 = h/C \\ \theta_1 = -h(B - A)/A \\ \theta_2 = -h(B + C)/C \\ x_1 = B - 2A, \mu(x_1) = 0.0 \\ x_2 = B, \mu(x_2) = 1.0 \\ x_3 = B + 2C, \mu(x_3) = 0.0 \\ x_1, x_2, x_3 \in X, x_1 < x_3 \end{cases} \quad (1d)$$

(3) ニューラルネットの形状

RC-BREXでは、(2)で行われた結果を元に、適合度や健全度を用いて最終的な性能評価を行う²¹⁾。ここで、式(1a)内で用いられる $\omega(=W)$ や θ は、健全度の値は定数である。故に計算の際には初期値が存在し、性能評価結果もその初期値に大きく影響する。そこで、熟練した技術者から得られた診断結果を教師データとすることで、これら値データの学習による更新を行う。図-9には、A～E層からなる意味付けニューラルネットワークを示す^{36,37)}。本研究では、メンバーシップ関数値を計算する際、メンバーシップ関数値そのものを用いるのではなく、入力に対する各集合の相対量（適合度：0～100%）を用いる。

図-6 メンバシップ関数 (単調減少型)

図-7 メンバシップ関数 (単調増加型)

図-8 メンバシップ関数 (釣鐘型)

図-9 意味付けニューラルネットワークの構成

つまり、従来の主観的なファジィ理論を用いた計算方法²⁰⁾から客観的な確率論を用いた計算方法へと変更を行った。これにより、従来の方法では、説明が困難であったD層におけるルール²⁰⁾の適合度の規格化の処理を省略することが可能となり、D層では、 Π 演算 (共通事象) の

図-10 評価過程説明機能の画面例

図-11 学習結果説明機能の画面例

計算のみとなる。つまり、本研究による評価の流れは、以下のようになる：[1]入力に従ってA-B-C層（入力が選択式の場合はC層のみ）により各集合の適合度を計算する。[2] C-D層の結合規則に従って各ルールの適合度（共通事象）を Π 演算により計算する。[3]評価結果として、各ルールの後件部の値と適合度の重み付け平均を行う。

(4) 説明機能

説明機能とは、システム結果（評価過程・学習結果）に対する信憑性を向上させるための機能である。なお、BREXでは、以下の2つの説明機能を有している。

a) 評価過程説明機能

評価過程説明機能とは、どのようにして評価結果に至ったのかを説明する機能であり、本システムの特徴であるアカウントビリティの遂行の役割を担っている。なお、評価過程説明時には、使用した評価プロセス、ルール、入力データおよび本研究によって新たに提案した項目の重要度を確認することが可能である。図-10に評価過程説明機能の画面例を示す。

図-12 予想劣化曲線イメージ図

b) 学習結果説明機能

学習結果説明機能とは、どのように学習したかを説明する機能であり、知識の更新をするか否かを判断する際のユーザーの判断をサポートする機能である。なお、本システムでは、判断材料として誤差の推移および学習前後の知識による評価結果の相違を確認することが可能である。図-11に学習結果説明機能の画面例を示す。

6. 橋梁維持管理計画策定支援システム

橋梁維持管理計画策定支援システム(MPOS)は、山口県が管理する橋梁群を効率的に維持管理するために開発された³⁹⁾。諸元データと主桁および床版の健全度が記録されたデータをJ-BMS DB'09から読み込み、MPOSに入力することで維持管理計画の立案を行い、意思決定の支援を行う。

(1) 劣化予測

橋梁部材の現有の健全度は、RC-BREXによって求められる主桁や床版の耐荷性および耐久性から把握できるが、将来の劣化進行程度は予測できない。そこで、耐荷性および耐久性のそれぞれについて、劣化の進行を曲線で表現した「予想劣化曲線」を考えることにより予測した¹⁷⁾²⁰⁾。その方法として、コンクリート構造物がたどる劣化過程を時間軸で表すことを考えた。縦軸には、コンクリート構造物の性能を表す指標である耐荷性および耐久性をとり、横軸には時間をとる。描かれる劣化過程のパターンとしては次の3パターンが考えられる。

- [1] 性能が時間とともに線形的に下がっていく場合
 - [2] 初期段階で性能が急激に下がる場合
 - [3] ある時点から性能が急激に下がる場合
- これら模式的に図示すると図-12のようになる。

ここで、図-12の[1]および[2]の曲線を見てみると、[1]は時間とともに性能が一定の割合で劣化する仮定を表しており、[2]は供用開始直後に性能が急激に下がり、あるところまで下がるとその後はあまり下がらなくなる仮定を表している。これら2つの劣化曲線は、実構造物の

図-13 予想劣化曲線イメージ図

図-14 初期設定画面例

劣化現象と異なっていると考えた。一方、[3]は対象とする劣化機構を比較的合理的に表す曲線、すなわち、先に材料が低下し、次いで耐荷性が低下するという劣化過程をよく表しているものと考え、以下、この曲線を予想劣化曲線として採用した。

過去に行われた実橋梁を用いた主桁および床版に関する実験データ³⁹⁾⁴⁰⁾などから、耐荷性の予想劣化曲線は、おおよそ4次関数に近い形のカーブを描くことから、4次関数と仮定した。一方、耐久性に関しては、耐荷性の経年変化に対する抵抗性と定義されていることから⁴¹⁾、耐荷性の微分係数（次数が1つ少ない）であると考え、耐久性の予想劣化曲線を3次関数と仮定した。それぞれの予想劣化曲線式を式(2a)、(2b)に示す。

$$S_L = f(t) = b_L - a_L t^4 \quad (2a)$$

$$S_D = g(t) = b_D - a_D t^3 \quad (2b)$$

なお、 S_L は耐荷性の健全度、 S_D は耐久性の健全度、 t は橋齢、 a_L 、 b_L 、 a_D 、 b_D は定数である。供用開始時の b_L 、

図-15 MPOSの更新費用平滑化後画面例

b_D の値を100とし、点検時の耐荷性と耐久性の健全度を用いて a_L 、 a_D の値を算出する。後に示す表-2の評価点数のランク表を設定している。ただし、表-2は耐久性に関する評価点数のランク表であり、耐荷性に関しても同様の評価点数配分のランク表となっている。橋梁の経年劣化によって健全度が37.5未満となったとき、補修・補強が必要不可欠となる状態にあり注視しなければならないので、37.5を管理レベルとして、予想劣化曲線の求め方をイメージした図を図-13に、劣化予測を行う画面を図-14に示す。

(2) 寿命最大化機能

寿命最大化機能は、初期設定で入力した値とJ-BMS DB'09から読み込んだ橋梁群のデータをもとに、橋梁ごとに寿命が最大となる保全対策（補修など）の組み合わせを決定する。この時、制約条件として決められた対策範囲を超えない範囲で計算が行われるが、それに予算は含まれない。また、最も寿命が短い部材を橋梁全体の寿命として、寿命となった年に全ての部材を対象として更新を行う。図-15に寿命最大化された結果例を示す。同図では、寿命を最大化した後の予想劣化曲線が表示されている。ここで表示されている予想劣化曲線は3回の対策を行ったものである。なお、設定できる対策回数は最大で5回である。

(3) 更新費用平滑化機能

更新費用平滑化機能では、橋梁群の更新費用について、各橋梁それぞれの更新時期を寿命最大化機能で最大化した寿命から更新時期を前倒しして、更新費用の偏りをなくすために平滑化を行う目的で、各橋梁の供用可能年数を決定する。なお、このときに行われる平滑化は、寿命最大化機能において各橋梁の寿命は最大限に延長されているために、更新時期を後年にずらすことはできず前倒しするのみとなる。

表-1 撤去橋梁諸元

橋梁名	旧KT大橋	旧SK橋
路線名	一般国道190号	一般国道2号
交差施設	河川(二級河川厚東川)	河川(一級河川小瀬川)
建設年月	1935年8月(昭和10年)	1942年3月(昭和17年)
橋長	364.11m	168.29m
幅員	11.68m	11.00m
径間数	28径間	8径間
主桁構造形式	RC-T桁橋	RCゲルバーT桁橋
主桁本数	5本	5本
床版構造形式	RC床版	RC床版
大型車交通量	1500台/24h	6900台/24h
供用終了年	1998年(橋齢63年)	2012年(橋齢70年)
現地調査年	2009年(橋齢74年)	2012年(橋齢70年)

写真-1 旧 KT 橋撤去前写真

写真-2 旧 SK 橋撤去前写真

7. RC-BREX'2000の検証

本章では、橋梁の架け替えに伴い取り壊されるRC橋を用いて、データ収集のための詳細な点検を行い、RC-BREX'2000（以下、BREXとする）の診断結果をまとめ、診断評価別にBREXの検証を行った。

(1) 点検調査の目的

検証対象橋梁は、一般国道に架けられていた橋梁であることから、自動車交通量の増加や車両の大型化により、

図-16 旧KT橋点検調査箇所

図-17 旧SK橋点検調査箇所

図-18 変状図の一例 (一部拡大)

今日では設計当初に考慮された設計活荷重以上の活荷重を上部工が受けていた。幾度かの補修工事等を経て、橋梁の老朽化や機能面の問題が主要な理由で解体撤去され新橋が架設されることになった。

現地点検調査は、その取り壊しに際して、今後増えることが予想される老朽化した橋梁の架け替えを含む維持管理業務に活かせるような知見を得ることを目的に実施

表-2 評価点数のランク表

Unsafe : $0.0 \leq p < 12.5$ (点)

交通の安全確保等の為に、早急に何らかの対策が必要である。特に、0.0点は供用すべきでない状態(管理限界)である。

Severe Deterioration : $12.5 \leq p < 37.5$ (点)

補修が必要不可欠になる状態である。詳細点検の必要がある。

Moderate Deterioration : $37.5 \leq p < 62.5$ (点)

劣化が見られ、定期点検の時期を早める必要がある。今後の追跡調査が必要である。

Mild Deterioration : $62.5 \leq p < 87.5$ (点)

劣化が見られ、その程度を記録する必要があるが、特に補修を考慮すべき状態ではない。

Safe : $87.5 \leq p \leq 100.0$ (点)

わずかに劣化しているが、健全な状態である。特に100.0点は全く問題のない状態である。

したものである。

(2) 検証対象撤去橋梁の概要と現地調査

a) 撤去橋梁の概要

検討対象とした撤去橋梁は、山口県内の一般国道に架かっていた「旧KT橋」と「旧SK橋」の2橋である。旧KT橋は1935年(昭和10年)架設の橋長364.11m、全幅員11.68m、28径間を有する鉄筋コンクリート単純T桁橋であり、2003年度から6カ年かけて撤去された。また、旧SK橋は1942年(昭和17年)架設の橋長168.29m、全幅員11.00m、8径間を有する単純ゲルバー式鉄筋コンクリートT桁橋であり、2011年度から2カ年かけて撤去された。

表-1に橋梁諸元を、写真-1に旧KT橋、写真-2に旧SK橋の撤去前の全体写真を示す。

b) 点検調査概要と診断フロー

点検調査箇所は、図-16と図-17に示すように各橋梁とも解体・撤去作業に支障のない2スパンずつとし、可能な限り同一の専門技術者(以下、専門家)6~8名によって実施した。なお、現地調査年が、旧KTは2009年で旧SK橋は2012年と異なるため、両橋梁を点検調査した専門家も異なる専門家たちである。その専門家は、民間コンサルタント会社などに勤務して、橋梁の設計もしくは点検を含む維持管理業務に10年以上携わっている方を主としている。

近接目視点検は「J-BMSのための点検マニュアルとその利用⁴²⁾」(以下、J-BMS点検マニュアルと表す)に準拠して実施した。点検の内容としては、[1]変状図の作成、[2]変状記録一覧表の作成、[3]主部材の健全度評価である。[1]は、点検スパンの展開図に発生している変状を記録し、変状図を現地で作図する。その際、各変状の大きさや長さなども記録している。図-18に変状図の一例を示す。[2]は、[1]の変状図をもとに表-3に示すような変状記録一覧表を作成する。その一覧表になったデータをBREXに入力する。[3]は、近接目視点検の結果であ

表-3 変状記録一覧表の例

橋梁名	SK橋		点検種別	近接目視	点検年月日	2012年11月20日		経路番号		1	点検者所属・氏名	B				* 1-5 (Unsafe - Safe)			
変状番号	桁・床版番号	部材種別	点検項目	横軸方向位置	上下位置	方向	本数(本)	巾(mm)	間隔(mm)	面積(mm ²)	深さ	鉄筋の種類	鉄筋の変状種類	補強工種別	補強の変状種類	主桁発生各変状耐荷性	主桁発生各変状耐久性	床版発生各変状耐荷性	床版発生各変状耐久性
1	Hc0101	床版	剥離	-	-	-	-	-	-	200×100	鉄筋位置	-	-	-	-	-	-	5	4
2	Hc0101	床版	鉄筋	-	-	-	-	-	-	-	-	主鉄筋	鉄筋露出	-	-	-	-	5	4
3	Hc0101	床版	剥離	-	-	-	-	-	-	600×200	鉄筋位置	-	-	-	-	-	-	5	4
4	Hc0101	床版	鉄筋	-	-	-	-	-	-	-	-	主鉄筋	鉄筋露出	-	-	-	-	5	4
5	Hc0101	床版	剥離	-	-	-	-	-	-	200×200	鉄筋位置	-	-	-	-	-	-	5	4
6	Hc0101	床版	鉄筋	-	-	-	-	-	-	-	-	主鉄筋	鉄筋露出	-	-	-	-	5	4
7	Mc0101	主桁	ひび割れ	端支点部	桁側面	鉛直	1	0.2	0	-	-	-	-	-	-	5	4	-	-
8	Mc0101	主桁	ひび割れ	支間1/4	桁側面	水平 横軸方向	1	0.3	0	-	-	-	-	-	-	4	3	-	-
9	Mc0101	主桁	剥離	支間1/4	桁側面	-	-	-	-	700×50	鉄筋位置	-	-	-	-	4	3	-	-
10	Mc0101	主桁	鉄筋	支間1/4	桁側面	-	-	-	-	-	-	スチールウェブ・配筋鉄	鉄筋露出	-	-	4	3	-	-
11	Mc0101	主桁	豆板・空洞	支間中央	桁側面	-	-	-	-	900×150	-	-	-	-	-	5	4	-	-
12	Mc0101	主桁	ひび割れ	支間1/4	桁下面	水平 横軸方向	2	0.5	200	-	-	-	-	-	-	4	2	-	-
13	Mc0101	主桁	剥離	中間支点部	桁下面	-	-	-	-	500×50	鉄筋位置	-	-	-	-	4	3	-	-
14	Mc0101	主桁	鉄筋	中間支点部	桁下面	-	-	-	-	-	-	主鉄筋	鉄筋露出	-	-	4	3	-	-
15	Dc0101	床版	剥離	-	-	-	-	-	-	50×100	鉄筋位置	-	-	-	-	-	-	4	4

表-4 アンケート評価例(桁ごとの評価例)

桁番号	Unsafe	Mo-De	Safe
Mc0101		○	
Mc0201			○
Mc0301			○
Mc0401			○
Mc0501		○	

表-5 旧SK橋 専門家(点検者)の経歴一覧表

専門家 (点検スパン)	点検業務の 経験年数	業種	構造物	業務内容
A (スパン1・3)	23	施工業者	コンクリート構造物	補修・補強施工
B (スパン1・3)	18	コンサル	鋼・コンクリート構造物	補修・補強、維持管理、構造解析
C (スパン1・3)	10	施工業者	コンクリート構造物	補修・補強施工
D (スパン1・3)	10	施工業者	コンクリート構造物	補修・補強施工
E (スパン1・3)	5	施工業者	コンクリート構造物	補修・補強施工
F (スパン1・3)	32	コンサル	鋼・コンクリート構造物	補修・補強設計
G (スパン1・3)	5	コンサル	鋼・コンクリート構造物	構造解析
H1 (スパン1)	1	コンサル	鋼・コンクリート構造物	構造解析
H2 (スパン3)	35	コンサル	鋼・コンクリート構造物	維持管理、構造解析

《耐荷性評価》

(定義)

力学的要因(荷重など)に対して、主桁の耐荷力がどの程度低下したか、その状態を表し、補強の必要性を判定する項目。

(判断項目)

劣化度評価、耐荷特性評価

(判断基準)

Unsafe:

交通の安全確保等のために、早急に何らかの対策が必要であり、供用すべきでない状態である。

Severe Deterioration (Se-De):

補強が必要不可欠になる状態であり、詳細点検を行う必要がある。

Moderate Deterioration (Mo-De):

劣化が見られ、定期点検の時期を早める必要があり、今後の追跡調査も行う必要がある。

Mild Deterioration (Mi-De):

劣化が見られ、その程度を記録するべき必要はあるが、特に補強を考慮すべき状態ではない。

Safe:

わずかに劣化しているが、健全な状態である。

回答記入欄

	Unsafe	Se-De	Mo-De	Mi-De	Safe
チェック欄		○			

図-19 アンケート評価例(主桁耐荷性評価例)

る[2]にもとに、専門家がJ-BMS点検マニュアル附属のアンケートに沿って「主桁の耐荷性、耐久性」と「床版の耐荷性、耐久性」それぞれの評価を行う(以下、アンケート評価と表す)。アンケートはBREXの評価過程に対応しており、各評価において判断基準が明記されており、その判断基準に従い専門家が5段階で評価を行う。このアンケート評価は、BREXの推論検証のための教師(学習)データとなる。表-3の右側4列に示すように各変状の耐荷性や耐久性評価を行い、各変状で評価された結果をもとに表-4に示すような桁ごとの評価を行う。床版の場合も主桁と横桁で囲まれた各パネルごとに評価を行う。

最終的に図-19に示すような耐荷性を評価する。ここで、図-19は主桁の耐荷性を評価したした記入例であり、主桁の耐久性や床版の耐荷性、耐久性も同様の方法で評価する。このアンケート評価を学習用のデータとしてBREXに学習させ、その評価結果を「学習後の評価」としている。BREXに学習させる時には、表-2の各ランクの最低点を入力する。図-20には、今まで記述した近接目視点検から診断に至るまでの流れを示す。

c) 専門家の経歴

先述したとおり、点検調査は6~8名の専門家により実

図-20 橋梁の診断フロー

施してもらった。その内訳としては、旧KT橋では6名、旧SK橋では8名の専門家である。代表して旧SK橋の点検調査における経歴を簡単にまとめたものを表-5に示す。表-5をみると点検業務の経験年数、業種はさまざまである。点検業務の経験年数、業種などに違いがあれば、点検結果にも違いが生じるのではないかとと思われる。

(3) BREXによる健全度評価

a) 初期知識による評価と分析

点検調査により得られた点検データを BREX に入力

し、最初に出力された結果を初期知識による評価としている。つまり、初期知識とは、橋梁諸元などの諸条件や変状データをもとに BREX が最初に評価する結果であり、このときの BREX はデフォルトの状態である。図-21には旧 KT 橋、図-22には旧 SK 橋の各点検調査スパンの専門家別変状個数と BREX による主桁、床版それぞれの耐荷性、耐久性の評価結果を示す。旧 SK 橋の専門家 H に関しては、表-5に示すように H1 と H2 と 2 名の専門家がいます。これは、点検調査時、点検時間の関係上、スパン 1 を専門家 H1 が点検調査し、スパン 3 を専

門家 H2 が点検調査を行ったため、この専門家 H2 に関する評価結果は参考値としている。

各橋梁の専門家別変状個数について注目すると、専門家により変状個数にばらつきが生じている。これは、限られた時間の中で点検調査であったため、点検経験の豊富な方とそうでない方、また、専門家の業種によっても変状の認識が異なっているのではないかとと思われる。旧 SK 橋を例にしてみると、補修・補強施工を業務とされている専門家は比較的変状個数が少ないように思われる。変状図を確認したところ、補修・補強施工を業務とされている専門家では、同じ変状がいくつか集中しているとまとめて図化しているように見受けられた。これは、補修工事において小さい変状を一つひとつ補修すると作業性が悪くなるため、ある程度の大きさで修復し作業性の向上を図るためだと思われる。これに対して、コンサルタントなどで点検業務をされている専門家は、すべての変状を記録するので変状数が多い結果となるように思われる。

BREXの評価結果に注目すると、全てのグラフにおいて、主桁、床版ともに耐荷性の項目に関しては30点程と低い評価となった。これは竣工から74年（旧KT橋）と70年（旧SK橋）を経た老朽化橋梁で設計基準も古く、

国道190号線や2号線上に位置してきたことから、自動車交通量の増加や大型車両の増加により、耐荷性能が低下したと考えられるため、妥当な出力結果であるといえる。また、耐久性の項目に注目すると、主桁、床版ともに60～70点の評価となっている。これは、ある程度の補修がなされていたことが、耐荷性に比べ高い評価となった要因と考えられる。したがって、初期知識によるBREXの評価結果は妥当であるといえる。

しかし、変状個数と評価結果の関係性に注目すると、変状個数の差があるにもかかわらず評価結果には差がほぼ生じていないことがわかる。これは、BREXが単に変状の個数だけで評価しているのではなく、各変状の状態をもとに判断しているといえる。その一方で、入力した変状データに大差があるにもかかわらず、評価結果にあまり差が生じないことは矛盾が残る。そこで、各変状について主観による評価をして頂いたアンケート評価を学習用データとして用い、評価システムの機能である知識更新機能により知識の更新を行い、その学習後の知識を用いて、初期知識による評価結果との比較をした。

b) 学習前後による評価と分析

ここではアンケート評価を専門家別に学習させ、その学習前後の評価結果を比較した。アンケート評価とは、

表-6 旧KT橋における学習前後の評価結果比較

専門家			A	B	C	D	E	F
スパンA								
主桁	耐荷性	学習前	30.88	30.29	29.11	32.65	32.65	29.12
		学習後	30.09	26.33	29.93	26.81	34.63	35.17
	耐久性	学習前	61.77	60.58	58.22	65.30	65.30	58.23
		学習後	41.68	62.46	55.99	44.86	44.05	48.42
床版	耐荷性	学習前	33.44	33.83	33.99	35.02	33.83	33.44
		学習後	27.52	46.61	51.82	45.49	39.16	44.66
	耐久性	学習前	66.87	67.65	67.97	70.04	67.65	66.87
		学習後	51.08	74.36	83.85	54.39	52.19	55.06
専門家			A	B	C	D	E	F
スパンB								
主桁	耐荷性	学習前	27.94	30.88	29.11	30.88	29.11	29.12
		学習後	27.94	27.85	32.61	30.13	29.42	28.93
	耐久性	学習前	55.87	61.77	58.22	61.77	58.22	58.23
		学習後	42.57	54.71	37.41	42.51	45.27	42.51
床版	耐荷性	学習前	33.83	33.63	33.47	34.78	33.63	33.23
		学習後	36.47	38.35	44.45	32.12	33.24	36.15
	耐久性	学習前	67.65	67.25	66.93	69.56	67.25	66.46
		学習後	42.50	62.36	55.12	53.85	53.96	55.13

表-7 旧SK橋における学習前後の評価結果比較

専門家			スパン1							
			A	B	C	D	E	F	G	H
主桁	耐荷性	学習前	29.11	30.88	29.11	29.11	30.29	27.93	27.93	29.12
		学習後	40.73	46.69	16.77	21.60	16.12	31.64	27.64	28.41
	耐久性	学習前	58.22	61.77	58.22	58.22	60.58	55.86	55.86	58.23
		学習後	44.65	39.82	55.87	37.04	44.87	43.69	37.49	39.88
床版	耐荷性	学習前	30.86	32.29	32.65	31.88	32.65	31.10	32.29	32.73
		学習後	40.94	51.79	43.05	27.31	35.62	50.91	37.33	42.44
	耐久性	学習前	61.72	64.58	65.30	63.77	65.30	62.20	64.59	65.46
		学習後	52.79	57.62	50.24	44.04	57.00	59.86	45.91	48.10
専門家			スパン3							
			A	B	C	D	E	F	G	H
主桁	耐荷性	学習前	31.47	29.11	31.47	26.75	31.47	29.10	26.75	31.47
		学習後	32.21	23.79	29.83	28.30	25.40	30.64	19.15	20.92
	耐久性	学習前	62.93	58.22	62.93	53.50	62.93	58.22	53.50	62.93
		学習後	49.74	45.32	47.22	38.22	42.51	46.00	41.06	41.06
床版	耐荷性	学習前	30.96	30.27	30.96	32.46	30.84	31.30	31.55	31.55
		学習後	34.28	39.63	31.32	30.46	44.43	38.96	18.59	20.01
	耐久性	学習前	61.92	60.50	61.92	64.93	61.96	62.61	63.11	63.11
		学習後	49.42	44.59	40.76	41.89	45.84	52.78	34.67	41.42

先述したようにBREXの評価と同様の項目に関して、ひび割れなどの個別の変状評価や桁、床版ごとの評価を各専門家が5段階評価したものである。これを学習用教師データとしてBREXに学習させ、その評価結果を学習後の評価としている。例えば専門家AであればA自身のアンケート評価を学習させて評価を出している。

主桁、床版それぞれの初期知識と学習後の評価結果一覧を表-6と表-7に示し、表中の「学習前」は初期知識の評価結果を表している。表-6は旧KT橋、表-7は旧SK橋の評価結果一覧である。

表-6と表-7を見ると主桁、床版の耐久性の値に関しては、多くの専門家が学習後の方が低くなっている。これは主観による評価が概ねUnsafe～Moderate-Deteriorationであり、専門家とはいえ撤去橋梁ということで無意識のうちに全体的な評価を低く見積もった可能性もある。さらに各ランクの最低点の0, 12.5, 37.5点を入力することか

図-23 耐久性診断フロー（主桁）

ら、初期知識による評価よりも低くなったことを表している。旧KT橋のスパンAに関しては、専門家BとCの2名の学習後の評価が高くなっている。これは、専門家BとCの学習用データが全体的にMild Deterioration～Safeの安全側に評価されていたことから、学習時この評価に影響され学習後の評価が高くなったと思われる。また、その高評価された耐久性評価下層には、図-23に示すように「環境条件評価」があり、この評価点が他の専門家に比べ高くなっているのも大きな要因の一つであると考えら

表-8 旧KT橋における全標本学習法による評価結果比較

スパンA			初期知識 (平均値)	評価ランク	アンケート 結果 (平均値)	評価ランク	全標本 学習法 (平均値)	評価ランク	学習後 (平均値)	評価ランク
主桁	耐荷性	耐荷性評価	30.78	S-D	29.17	S-D	33.49	S-D	30.49	S-D
		劣化度評価	61.57	Mo-D	25.00	S-D	42.85	Mo-D	45.80	Mo-D
		耐荷特性評価	0.00	U	31.25	S-D	19.27	S-D	14.82	S-D
	耐久性	耐久性評価	61.57	Mo-D	16.67	S-D	36.14	S-D	49.58	Mo-D
		変状評価	74.08	Mi-D	25.00	S-D	68.84	Mi-D	73.34	Mi-D
		使用条件評価	43.95	Mo-D	37.50	Mo-D	37.50	Mo-D	43.17	Mo-D
		環境条件評価	66.67	Mi-D	20.83	S-D	33.34	S-D	38.77	Mo-D
床版	耐荷性	耐荷性評価	33.93	S-D	54.17	Mo-D	51.35	Mo-D	42.54	Mo-D
		劣化度評価	67.84	Mi-D	45.83	Mo-D	72.03	Mi-D	64.42	Mi-D
		耐荷特性評価	0.00	U	47.92	Mo-D	19.66	S-D	14.80	S-D
	耐久性	耐久性評価	67.84	Mi-D	41.67	Mo-D	55.34	Mo-D	61.82	Mo-D
		変状評価	92.91	S	41.67	Mo-D	90.04	S	92.63	S
		使用条件評価	43.95	Mo-D	41.67	Mo-D	37.50	Mo-D	44.57	Mo-D
		環境条件評価	66.67	Mi-D	35.42	S-D	37.48	S-D	48.30	Mo-D

表-9 旧SK橋における全標本学習法による評価結果比較

スパン1			初期知識 (平均値)	評価	アンケート 結果 (平均値)	評価	全標本 学習法	評価	学習後 (平均値)	評価
主桁	耐荷性	耐荷性評価	29.19	S-D	23.44	S-D	24.62	S-D	28.75	S-D
		劣化度評価	58.37	Mo-D	26.56	S-D	35.06	S-D	47.41	Mo-D
		耐荷特性評価	0.00	U	23.44	S-D	19.15	S-D	10.38	U
	耐久性	耐久性評価	58.37	Mo-D	20.31	S-D	32.12	S-D	43.18	Mo-D
		変状評価	64.49	Mi-D	20.31	S-D	54.34	Mo-D	59.69	Mo-D
		使用条件評価	43.95	Mo-D	23.44	S-D	14.36	S-D	37.91	Mo-D
		環境条件評価	66.67	Mi-D	17.19	S-D	33.94	S-D	34.96	S-D
床版	耐荷性	耐荷性評価	32.06	S-D	54.69	Mo-D	52.96	Mo-D	41.14	Mo-D
		劣化度評価	64.12	Mi-D	60.94	Mo-D	60.98	Mo-D	57.57	Mo-D
		耐荷特性評価	0.00	U	37.50	Mo-D	19.85	S-D	12.81	S-D
	耐久性	耐久性評価	64.12	Mi-D	48.78	Mo-D	55.61	Mo-D	51.40	Mo-D
		変状評価	81.73	Mi-D	53.13	Mo-D	70.25	Mi-D	74.23	Mi-D
		使用条件評価	43.95	Mo-D	20.31	S-D	12.69	S-D	34.83	S-D
		環境条件評価	66.67	Mi-D	23.44	S-D	33.93	S-D	35.87	S-D

れる。環境条件評価は橋梁の立地条件を評価する項目で、判断項目として塩害や凍害、化学的浸食の影響を受けやすい海岸や凍害、温泉地域があげられている。旧KT橋は海岸から1km程度と塩害影響を受ける場所に立地している。このような場所に立地している橋梁なので、塩害の影響を受け易い。よって、立地条件として性能低下が考えられるような環境にあるので、評価点は低くなるはずである。しかし、床版にはさほど変状がなかったことから、専門家BとCは塩害の影響をほとんど受けてないので立地条件としても問題ないと判断し高評価になっていると思われる。

一方で、床版耐荷性の値に注目すると、学習後の評価が高くなっている。また、主桁耐荷性に関してみれば、高い場合も低い場合もある。つまり、学習をしていない初期知識による評価は専門家の知識を完全に抽出できていない結果であるといえ、この値だけで橋梁の性能評価をするのは十分ではない。

各専門家による学習後の評価は、主観による評価とBREXによる定量的な評価を併せ持った有用なデータであるといえる。しかし、各専門家によりアンケート評価

結果にばらつきがあるので、学習後の評価結果にかなりの差が生じている。専門家によるアンケート評価結果がほぼ同じであることが望ましいことではあるが、アンケート評価結果によって、BREXは多様な評価結果を出力できるシステムであることも確認できた。次項では、主観による専門家の知識を抽出した上で、各専門家間のばらつきが低減できる学習法があるかを検討した。

c) 全標本学習法を用いた評価と分析

前項までのBREXによる評価結果である初期知識による評価、アンケート評価、学習後の評価の3種類の平均点を、表-8と表-9に比較表として示す。表-8は旧KT橋のスパンA、表-9は旧SK橋のスパン1の評価を比較表にしたものである。学習方法は全標本学習法を用いた。全標本学習法とは、旧KT橋では専門家数6データ、旧SK橋では専門家数8データのアンケート評価を学習用データとして用いる方法である。これは今後、BREXが同一の橋梁の点検データ（アンケート評価）を蓄積していった場合に、どのような評価結果になるかということも想定し、その評価を確認したものでもある。

表-8と表-9を見ると、床版の耐荷性を除き、初期知識

図-24 旧KT橋 予想劣化曲線

図-25 旧SK橋 予想劣化曲線

による評価に比べアンケート評価の値が低い値を示している。これは前項b)でも記述したとおり、専門家の主観による評価は各ランクの最低点を入力する厳しい評価となるからである。床版の耐力性のアンケート評価が高かったのは、耐力特性評価の初期知識の値が低く、アンケート評価の値が高かったことが影響している。次に全標本学習後の評価結果に注目すると、学習することにより、ほぼ全ての項目がアンケート評価の値に近づいている。これは主観によるアンケート評価の学習により、BREXが専門家の知識を抽出し、健全度評価に良い影響を与えた結果といえる。全標本学習法と専門家のそれぞれの学習後の評価平均値を比べてみても、全標本学習法の評価値がアンケート評価の値に近い結果となっている。これからは主観によるアンケート評価の学習を重ねることで、BREXが専門家の知識を抽出していることがわかる。最後に全標本学習法の評価と初期知識の評価を比べると、主桁と床版とも耐力性に関しては10点以内の評価差しかない。しかし、主桁と床版の耐久性の評価は1ランク上もしくは同ランクでも平均で20点近い評価差がある。これは前述した耐久性評価の下層にある環境条件評価が影

響している。この環境条件評価を明確に表現することにより通常点検レベルの評価として用いるのであれば、初期知識の評価結果も活用できるものであるといえる。

今回の検証では、同一時期に複数人の専門家により得られた点検データを用い、専門家の知識を反映した評価システムが構築できているといえる。しかし、実業務にて本BREXを用いる場合には、点検調査時期が異なり、また橋梁は劣化していくので、一般的に考えればアンケート評価は悪い方に評価されていく傾向にあるはずである。また、少人数(2~3人)での点検調査が主であり、少人数のデータでも有用と考えるが、検証する必要がある。専門家による耐力性や耐久性の評価は最新の評価を用い、専門家によるひび割れ等の個々の変状評価を蓄積し、それらをBREXにより評価する評価システムへ再構築するなど、既設橋梁を用いて検証する必要もあると考える。

(4) 余寿命予測

a) BREXによる余寿命予測

BREXによる健全度評価から、MPOSの予想劣化曲線

表-10 予想劣化曲線式による余寿命

		耐荷性		耐久性		橋齢 (年)
		健全度	余寿命(年)	健全度	余寿命(年)	
旧KT橋	主桁	33.49	6	36.14	10	74
	床版	51.35	12	55.34	19	
旧SK橋	主桁	24.62	5	32.12	9	70
	床版	52.96	14	55.61	21	

表-11 余寿命の比較表

		採取コアによる 余寿命評価 (年)	BREXによる 余寿命評価 (年)		橋齢 (年)
			耐荷性	耐久性	
旧KT橋	主桁	12	6	10	74
旧SK橋	主桁	7	5	9	70

式である式(2a), 式(2b)と旧KT橋と旧SK橋の両橋梁の「耐荷性評価値」, 「耐久性評価値」である健全度を用いて余寿命(図-13に示すように, 点検時から予想劣化曲線が健全度=0と交わる年数)が何年であるか予測する。例えば, 表-8と表-9の全標本学習法の健全度を式(2a), 式(2b)に代入すると, 両橋梁の余寿命の値は表-10のようになる。また, 図-24には旧KT橋, 図-25には旧SK橋のそれぞれの主桁および床版の予想劣化曲線を示す。

BREXによる耐荷性および耐久性から推定される余寿命は, 両橋梁とも主桁, 床版いずれも耐久性から予測される余寿命の方が長くなる傾向がみられる。これは, 耐久性から予測される劣化曲線が橋齢(g)に関する3次関数であることから, 式(2b)から求まる a_0 値が式(2a)から求まる a_1 値よりも大きくなることからである。また, 表-6～表-9からもBREXによる耐久性の評価結果(健全度)が耐荷性の評価結果(健全度)より大きい値を示す傾向にあることも影響していると思われる。

b) コア調査による余寿命予測

実測による客観的情報の取得や橋梁内部の劣化情報の取得, 実測値にもとづいた将来予測を行うことを目的に, 旧KT橋と旧SK橋からコンクリートコアを採取した。これらの情報がBREXによる余寿命評価の信頼性向上につながると考え, 採取したコンクリートコアを用いて, 塩化物イオン濃度計測などの試験を行い, 余寿命の予測を行っている⁴³⁾⁴⁵⁾。コンクリートコア調査による余寿命推定において, 旧KT橋, 旧SK橋とも海岸近くに架設されていた橋梁であることから, 劣化因子が塩化物イオンである場合を対象として, 「主桁」から採取したコンクリートコアの劣化状況をもとにした推定をした。その余寿命の推定手法としては, (A)鉄筋腐食の進行モデルに着目して潜伏期から算出する簡易的な方法, (B)寿命を仮定する鉄筋累積腐食量に着目して設定量に至るまでの余寿命を算出する方法, (C)鉄筋腐食による鉄筋質量減少率に着目して付着性や耐荷性の低下を推定して判定を行う手法の3つの方法である。旧KT橋の既往の研究²⁴⁾⁴³⁾に

よると, 手法(B)の鉄筋累積腐食量($75\text{mg}/\text{cm}^2$ と推定)において余寿命を仮定すると, BREXの耐久性健全度による余寿命予測に近似する結果より, 旧SK橋においても同様の手法で余寿命予測を行った⁴⁴⁾。

表-11には採取コアによる余寿命評価とBREXによる余寿命評価の比較表を示す。ここで, 採取コアによる余寿命評価は鉄筋累積鉄筋量を $75\text{mg}/\text{cm}^2$ と推定した場合の余寿命であり, BREXによる余寿命評価は全標本学習法の健全度による余寿命である。表-11より, BREXによる余寿命評価結果とコンクリートコア試験を用いて定量的に検証した余寿命評価結果の差が, 2年程度とほぼ同様の余寿命を予測する結果となった。この結果より, BREXによる余寿命評価はある程度信頼できる評価であることが裏付けられた。ただし, 耐荷性健全度による余寿命予測については, 今後検討を行う必要がある。

c) 余寿命予測評価

予定供用年数を100年とし, 点検調査時時点で健全度を100にする補強・補修を行い約30～40年「延命」させるよりも, Life Cycle Costを比較し, 架け替えた方が経済的であると管理者が判断したと想定すれば, 今回算出された予想劣化曲線から余寿命算定も十分に活用できるものといえる。

両橋梁とも撤去前までに幾度かの補修・補強が施されているが, それらが架設後何年経過して施されたか情報を得ることができなかったため, 便宜上, 無対策として予想劣化曲線を描いている。ただし, 補修・補強が施されていても点検調査時点の健全度評価結果には影響がないので, 補修・補強を考慮した予想劣化曲線で余寿命を求めた場合には今回の結果より, 短い余寿命が算出されたと考える。

最後に, 架け替えは上部工変状状態等のみで判断されたのではなく, 下部工や河川, 交通量などの社会情勢により総合的に架け替えが経済的であると判断されている。

8. まとめ

本研究では, J-BMS RC版を実用化させるため, 架け替えに伴い撤去される橋梁を用いて点検データを収集し, 定量的な劣化診断システムであるRC-BREX'2000に収集した点検データを入力して, その診断結果をもとにRC-BREX'2000の有用性を検証した。

本章では, 本研究で得られた成果と今後より有効に利用するために必要となるであろう課題をまとめた。

(1) 研究成果

[1] 橋梁維持管理支援システムとして研究・開発が行われてきたJ-BMSの変遷についてとりまとめた。

BREXは定量的なデータが得られる詳細点検に適し,

専門家の評価をBREX内の学習機能によって性能評価できるシステムである。

- [2] 専門家の業種によって変状の認識が異なっていると思われる結果を得た。補修・補強施工を業務とされている専門家は確認した変状が比較的少なく、これに対して、コンサルタントなどで点検業務とされている専門家は確認した変状が多かった。これは、発生している変状を管理者に報告する専門家とその結果をもとに補修時に作業性の向上を図ろうとする専門家とで“見る目”が異なっていると考ええる。
- [3] 上述[2]にも関連するが、各専門家にて変状個数の差があるにも関わらず評価結果には差がほとんど生じていない。これは、BREXが単に変状の個数だけで評価しているのではなく、各変状の状態をもとに判断しているといえる。
- [4] 専門家別に学習させた評価は、主観による評価とBREXによる定量的な評価を併せ持った有用なデータである。
- [5] 全標本学習後の評価結果はアンケート評価の値に近い結果となっており、主観によるアンケート評価の学習を重ねることで、BREXが専門家の知識を反映していることが確認できた。
- [6] 多少の改良点は必要であるが、初期知識の評価結果も十分に活用できるものであるといえる。
- [7] BREXによる余寿命予測の結果をコア試験により定量的に検証した結果、BREXによる余寿命予測はある程度信頼できる評価であることが裏付けられた。
- [8] J-BMSの各サブシステムの連結を行ったことで、RC橋の一連の維持管理業務の効率化が図れるようになった。

(2) 今後の課題

- [1] 経験豊富な専門家が利用することを想定しているRC-BERX'2000であるため、PC-BREX等に備わっている利用者を補助するWhat機能とWhy機能¹⁾が装備されていない。誰でも利用しやすいシステムとするためにはこのような補助機能を装備する必要があると思われる。
- [2] 専門家個人の知識や経験、現在の業種などの差異により点検データやアンケート評価結果に“ばらつき”が生じていた。このばらつき解消として、点検前に専門家間での変状確認に関する情報交換や点検練習用の橋梁3次元CGモデル⁴⁾などを活用することで専門家各人の変状の共通認識化を図ることが必要と考える。
- [3] 橋梁の変状状態によっては、多くの変状データをBREXに入力することになる。現状のBREXではシ

ステム上でデータを直接入力しているが、「.xlsx」や「.csv」などのファイルをインポートできるようにする必要がある。

- [4] 今回、特にアンケート評価の「環境条件評価」において、専門家間に評価の違いが生じていたので、アンケートの内容を細分化するなど再考する必要があると思われる。
- [5] 撤去橋梁ではなく、補強や補修が行われる橋梁の詳細点検データを用いるなどして、多くの点検データや教師データを収集しBREXの信頼性の向上を図る必要があると思われる。
- [6] MPOSでは保全対策回数を5回としているため、軽微な劣化を早期に修繕する予防保全には適応しきれない場合もあるとのことで、保全対策回数を増やすなど今以上の予防保全にも対応出来る機能追加も必要であると考ええる。

謝辞：本研究の実橋点検調査において、国土交通省中国地方整備局には実橋の提供・点検調査のための主援助を得たこと、ならびに、実橋解体業者、点検調査に参加していただいた建設コンサルタント会社、施工業者等の協力があつたことを記し、ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 宮本文穂, 浅野寛元, 勝島龍郎: PC 橋維持管理支援システム(J-BMS PC 版)の開発と実橋への適用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 68, No. 2, pp. 41-54, 2012.
- 2) 西川和廣: 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No. 501/I-29, pp. 1-10, 1994.10.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編)・同解説, 2002.3.
- 4) 国土交通省: 国土交通白書 2012.
- 5) 山口県土木建築部道路整備課: 山口県橋梁長寿命化修繕計画 (平成 26 年 3 月版), <http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cmsdata/6/d/c/6dc9557d208c28012e6cd5e066a4315e.pdf>
- 6) Thompson, P. D., Small, E. P., Johnson, M. and Marshall, A. R.: The PONTIS Bridge Management System, *Structural Engineering International, Journal of the IABSE*, Vol. 8, No. 4, pp. 303-308, 1998.
- 7) Yanev, B.: *Bridge Management*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- 8) 新都市社会技術融合創造研究会: インフラ資産評価・管理の最適化に関する研究プロジェクト, http://www.kkr.mlit.go.jp/road/shintoshikenkyukai/pdf/dat_a10_01.pdf
- 9) 玉越隆史, 大久保雅憲, 渡辺陽太: 道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム (BMS)—, 国総研資料, 第 523 号, 2009.3.
- 10) 坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司: 阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol. 17, pp. 63-70, 2008.
- 11) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management

- System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No. 588/VI-38, pp. 191-208, 1998.3.
- 12) 宮本文穂, 伊藤大恭, 一木秋浩: 橋梁維持管理データベースシステム(J-BMS DB)の開発〜J-BMS DB'09 (完成版)〜, 山口大学社会基盤マネジメントシリーズ No.11, 2009.12.
 - 13) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂: 道路橋 RC 床版の診断と評価に関する基礎的研究, 材料, 第 34 巻, 第 376 号, pp. 40-46, 1985.1.
 - 14) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 小笠勝: 構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第 380 号/I-7, pp.365-374, 1987.4.
 - 15) 宮本文穂, 森川英典, 古川正典: 知識更新機能を有するコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 543-556, 1992.3.
 - 16) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集, No. 510/VI-26, pp. 91-101, 1995.3.
 - 17) 宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人: Bridge Management System (BMS)の開発, 土木学会論文集, No. 560/VI-34, pp. 91-106, 1997.3.
 - 18) 小野正樹, 宮本文穂, 中村秀明, 山岡健一: BMS における補修・補強工法選定支援機能の構築, 土木情報システム論文集, Vol. 7, pp. 181-188, 1998.
 - 19) 神波修一郎, 上村勝利, 中村秀明, 宮本文穂: 橋梁維持管理のための戦略的橋梁データベースの開発, 土木情報システム論文集, Vol. 7, pp. 57-64, 1998.
 - 20) 宮本文穂, 中村秀明, 山岡健一, 河村圭: Bridge Management System (BMS)の実橋への適用に関する研究, 山口大学工学部研究報告, Vol. 49, No. 2, pp. 79-94, 1999.3.
 - 21) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明, 山本秀夫: 階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発, 土木学会論文集, No. 644/VI-46, pp. 67-86, 2000.3.
 - 22) 宮本文穂, 青木治道, 中村秀明, 河村圭: コンクリート橋診断エキスパートシステムにおける知識獲得手法の改良, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 1213-1218, 2001.
 - 23) 中村秀明, 鬼丸浩幸, 河村圭, 宮本文穂: Bridge Management System における劣化要因推定システムの推定精度向上, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1641-1646, 2002.
 - 24) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順: 旧厚東川大橋の果たした役割と撤去時健康診断〜現地調査結果の最終報告集〜, 山口大学社会基盤マネジメントシリーズ No. 15, 2011.3.
 - 25) 青木治道, 河村圭, 中村秀明, 宮本文穂: 評価型エキスパートシステム開発を目的とした評価プロセス作成手法の提案, 土木学会中国支部第 53 回研究発表会 (平成 13 年度), pp. 885-886, 2001.
 - 26) 宮本文穂, 横山博司, 中村秀明, 泉元昌彦: PC 橋診断エキスパートシステムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1685-1960, 2003.
 - 27) 石田純一, 森岡弘道, 河村圭, 宮本文穂: 橋梁通常点検結果を用いた劣化予測式の作成と橋梁補修優先順位の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1711-1716, 2008.
 - 28) 宮本文穂, 河村圭, 石田純一, 永田信人: 山口県橋梁維持管理データベースの開発, 日本コンクリート工学協会, pp. 275-284, 2006.12.
 - 29) 河村圭, 杉本真, 石田純一, 宮本文穂: 山口県橋梁通常点検業務支援システムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol. 16, pp. 185-194, 2007.
 - 30) 宮本文穂, 一木秋浩, 伊藤大恭, 長岡克典: 山口県橋梁長寿命化のための戦略的データベースの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol. 19, pp. 73-84, 2010.
 - 31) 宮本文穂, 中村秀明, 河村圭, 瓦谷晴信, 仁木京子, 永田信人, 杉本真, 高林尚弘, 石田純一: データベースを利用した橋梁ネットワークの維持管理計画策定システムの開発 (山口県橋梁維持管理データベース'06, 更新および長寿命化を考慮した橋梁維持管理計画策定支援システムの開発), 平成 17 年度共同研究報告書, 山口県・山口大学土木・建築系学科官学勉強会, pp. 87-96, 2006.8.
 - 32) 山口県土木建築部道路整備課: 橋梁データの整備方針(案), 山口県橋梁の維持管理基本方針策定検討 WG, 第 4 回 WG 資料 No.4-2, 2006.1.
 - 33) 山口県土木建築部道路整備課: 山口県橋梁通常点検マニュアル (案), 2005.10.
 - 34) 山口県土木建築部道路整備課: 山口県 橋梁点検要領 (案), 2013.3.
 - 35) 泉元昌彦, 宮本文穂, 中村秀明: アカウンタビリティを有する RC 橋梁性能評価システムの開発と知識更新方法の提案, 山口大学, 2004.3.
 - 36) 堀川慎一, 古橋武, 内川嘉樹: ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法, 日本ファジィ学会誌, Vol. 4, No. 5, pp. 906-928, 1992.
 - 37) 林勲, 古橋武: ファジィ・ニューラルネットワーク, 朝倉書店, 1996.5.
 - 38) 伊藤大恭: 鉄筋コンクリート橋のためのライフタイムマネジメントシステム (J-BMS RC 版) の開発と実用化, 山口大学大学院修士論文, 2011.3.
 - 39) 宮本文穂: 道路橋鉄筋コンクリート床版の力学的特性とその耐用性判定に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1984.9.
 - 40) 森川英典: 既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究, 神戸大学学位論文, 1994.8.
 - 41) 土木学会: コンクリート構造物の維持管理指針 (案), コンクリートライブラリー81, 1995.10.
 - 42) J-BMS のための点検マニュアルとその利用一定期点検, 結果検証, データベースシステム, 山口県土木建築部道路整備課, 山口大学工学部知能情報システム工学科システム設計工学研究室, 2003.8.
 - 43) 宮本文穂, 江本久雄, 高橋順, 平西邦裕: 現地調査に基づく撤去橋梁の健康診断と余寿命推定およびその検証法, コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 119-132, 2012.9.
 - 44) 高橋順, 江本久雄, Ratna Widyawati, 宮本文穂: コンクリートコア試験による老朽化橋梁の余寿命推定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 1339-1344, 2014.
 - 45) 内村俊二, 澤村修司, 宮本文穂: バーチャルリアリティを活用した橋梁目視点検支援システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1399-1404, 2010.

(2014. 10. 14 受付)

DEVELOPMENT AND PRACTICAL APPLICATIONS OF A LIFETIME MANAGEMENT SYSTEM FOR REINFORCED CONCRETE BRIDGES

Ayaho MIYAMOTO, Hiroyoshi ASANO, Hisao EMOTO and Tatsuro KATSUSHIMA

The authors have been developing a Bridge Management System (J-BMS RC and PC versions) integrated with the Concrete Bridge Rating Expert System (BREX) that is able to use to evaluate the serviceability of existing concrete bridges. J-BMS RC version consists of three subsystems; J-BMS DB'09 for accumulating bridges check data, RC-BREX for evaluating performance of reinforced concrete bridges and MPOS for support of planning of bridge maintenance. In addition, RC-BREX has two kinds of version; the qualitative RC-BREX'99 and quantitative RC-BREX'2000. The aim of this study is to develop a merging function of each subsystem for practical application of J-BMS RC version, because the current J-BMS RC version didn't integrate among functions due to independent development. Furthermore, from the results of applying the system to two aged bridges being demolished in Yamaguchi area, it will be able to help to establish the rational maintenance strategies for existing concrete bridges.