

老朽RC橋の健全度診断と余寿命推定への J-BMS RC版の適用と検証

宮本文穂 (山口大学名誉教授) 高橋 順 (デンカ㈱先進技術研究所)
江本久雄 (㈱構造物クリニック) 鈴木 晃 (国土交通省中国地方整備局)

Performance Evaluation and Remaining Life Prediction of an Existing RC Bridge by J-BMS

Ayaho MIYAMOTO(Professor Emeritus), Jun TAKAHASHI(Denki Kagaku Kogyo K.K.),
Hisao EMOTO(Kouzoubutsu Clinic Co., Ltd.), Akira SUZUKI(Chugoku Regional Development Bureau,
Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)

Abstract: This paper describes the methods of performance evaluation and remaining life prediction for an aged reinforced concrete (RC) T-girder bridge via visual inspection data. The Bridge Management System (J-BMS) that was previously developed by the authors, and which is capable of forecasting the deterioration process of existing bridge members, was applied to evaluate the safety indices (soundness score) and re-maining life of the target bridge based on these test results. Using these methods, the remaining life of an aged RC-T girder bridge(SK-bridge) can be quantitatively estimated by applying the bridge rating expert (BREX) system, which is a subsystem of the J-BMS RC version that incorporates with the field inspection data. In this study, visual inspection was carried out on the aged bridge(SK-bridge) by professional visual inspectors, during which all variations of the inspection results were evaluated using a five-step question-naire. As a result, it was found that the soundness score (safety index) and remaining life predictions were influenced by the learning (supervised) data selection. Additionally, the predicted remaining lives were verified through concrete core tests extracted from main girders and deck slabs, and cross-section cutting-off girder tests.

Key Words : RC bridge, aged bridge, visual inspection, J-BMS, BREX system, performance evaluation, remaining life prediction, concrete core test, carbonation, cross-section, chloride ion

1. はじめに

橋梁など社会基盤構造物の長寿命化を目指した合理的な維持管理業務のためには、様々な性能照査結果をもとに健全度診断および余寿命推定をして、必要に応じて適切な対策を立案することが重要となる。著者らは、長年にわたり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)の開発、実用化を進めてきている^{1~3)}。J-BMSは、主としてコンクリート橋を対象とした診断システムであり、RC橋を対象とするJ-BMS RC版と、PC橋を対象とするJ-BMS PC版⁴⁾がある。J-BMSは、①対象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)、②橋梁の劣化診断を行う性能評価システム(BREX)、③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)の各サブシステムから構成される。図-1は、J-BMSの全体構成と各種機能の関連を図示したものである。

上述のようなJ-BMSの実用性を高め、実際の維持管理

業務で運用するためには可能な限り多くの実橋梁に適用して繰り返し検証する必要がある。本研究では、撤去が予定されている橋齢72年の老朽橋に関する近接目視点検データをRC-BREX 2000に入力して診断結果を出力し、これを専門技術者による学習用教師データによってシステムに学習させ、学習前後の診断結果の変化などを詳細に検討する。これとともに、入力方法、点検者や学習方法による差異を明確にし、改良点を整理することによってJ-BMSの実用性を明らかにするものである。さらに、J-BMS RC版からの出力結果の検証を目的に、橋梁各部位から採取したコンクリートコア試験および解体・撤去時の主桁切断面を利用した中性化試験などによる客観的な評価を試みたものである。すなわち、コンクリートコア試験結果に基づいて、①主たる劣化機構の特定、②劣化状態をもとにした余寿命推定、③撤去時に切出した主桁切断面の劣化度調査との対比による評価結果の信頼性などに関する検討結果を述べる。

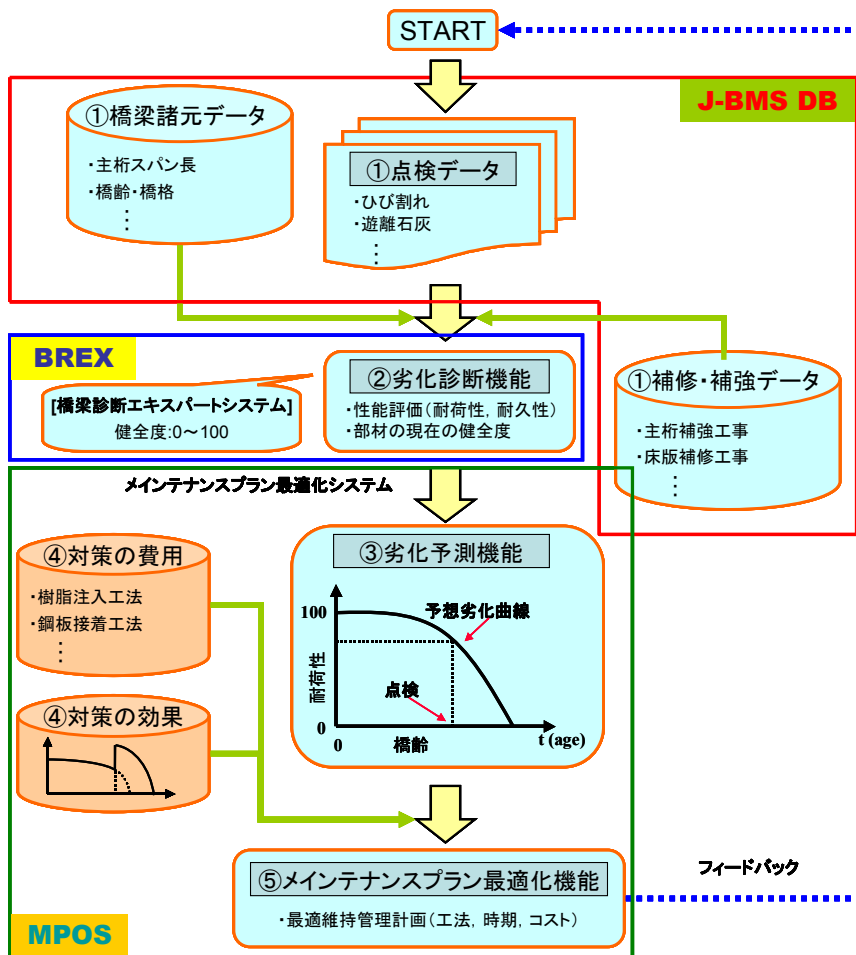


図-1 J-BMS の全体構成と各種機能の関連

2. J-BMS RC版の構成と各機能の概要

上述のように、J-BMS RC 版は既存 RC 橋の合理的な維持管理業務の支援を目的として開発され、J-BMS DB'09、RC-BREXおよびMPOS という3つのサブシステムから構成される。これら3つのサブシステムの運用の流れを図-2に示す。

図-2に示すように、J-BMS RC 版は、①J-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書は「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、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、という運用形態となっている。

(1) J-BMS DB' 09

J-BMS DB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。なお、「09」の表示は、改訂年がわかるように西暦2009年改訂の簡略表記である。

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の構成と各機能間の流れを示す⁵⁾。

a) 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」、

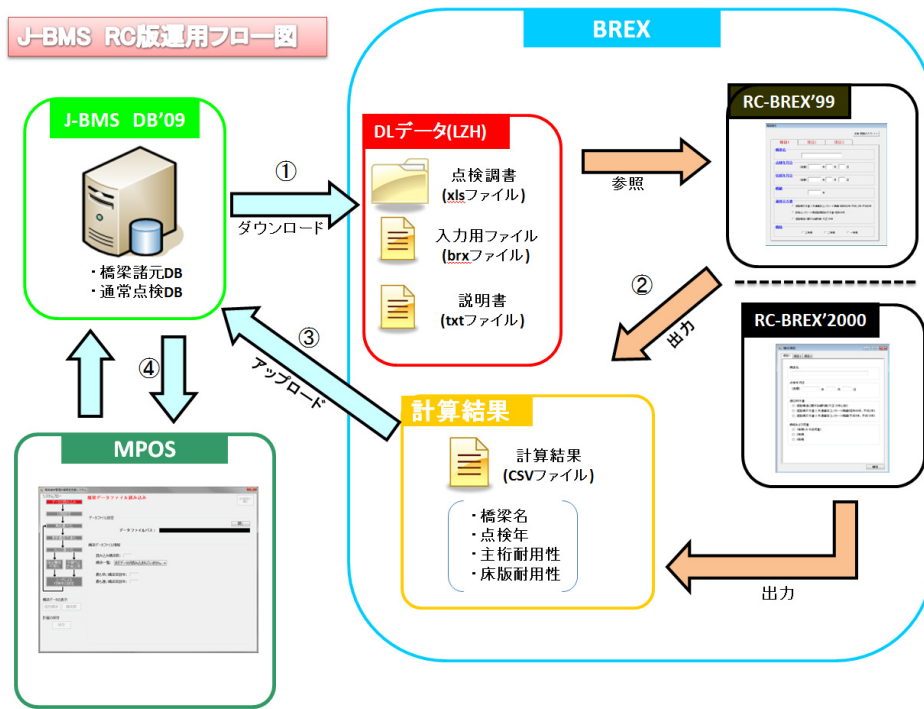


図-2 J-BMS RC版の運用フロー図

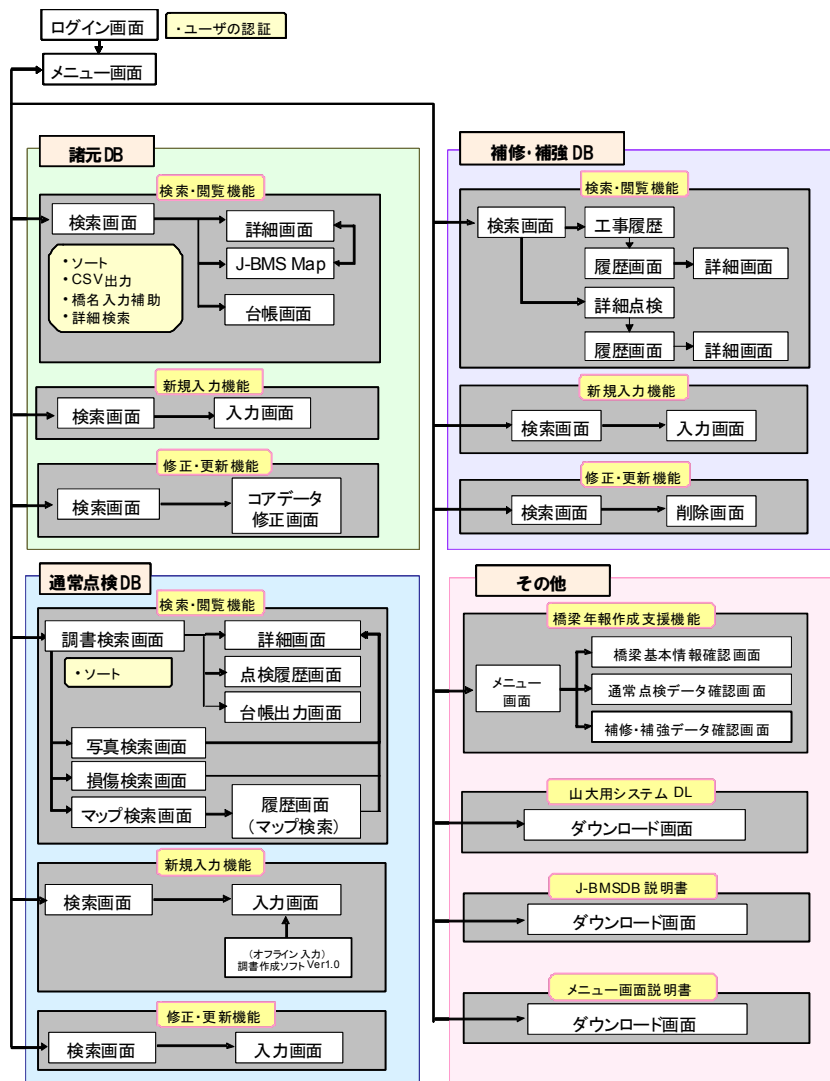


図-3 J-BMS DB'09の構成図

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。

b) 通常点検DB

橋梁点検車などの機材を用いた近接目視点検によって、合計32項目に関する上部工および下部工の点検を行い、「損傷なしあるいは軽微な損傷」、「損傷が発生している」、「損傷が著しい」の3段階で判定を行うとともに、それぞれの損傷ごとに写真撮影する。また、各点検項目に対し損傷判定を行った後に、部位・部材ごとに4段階で対策区分の判定を行い、所見を記入する。このようなデータから成る通常点検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。

c) 補修、補強関連DB

既存橋梁の補修・補強の際に得られる各種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。ここでは、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。

(2) RC-BREX®

前述図-2で示したように、J-BMS RC版の特徴として、対象橋梁の性能評価システムである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。この2種類のRC-BREXについて、「曲げひび割れ」を例にして性能評価の流れを説明する。RC-BREX' 99内の評価の最終ゴールである「耐荷性」や「耐久性」に至る評価過程を階層構造で表現したものの一例を図-4に示す。ここでは、あらかじめ特徴的な曲げひび割れを列挙しておき、該当するパターンでの曲げひび割れが発生していれば、図-4中の下位項目となっている「ひび割れの状況」や「最大ひび割れ幅」の項目を調査する方法を採用している。このため、点検自体は比較的簡易なものと考えられる。しかしながら、「ひび割れの状況」のように数量やひび割れの程度を扱う項目には、選択形式の回答項目として“かなり”や“少し”など定性的で曖昧なものも含まれており、点検者による感覚の差異がシステム評価結果のばらつきという点が問題となる。これに対して、RC-BREX' 2000では、特徴的なひび割れのみを扱うのではなく、主桁、床版それぞれ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7項目について定量的に調査し、性能評価システムに入力する点検データとすることにより、点検者の個人的判断が可能な限り入らないように工夫している。また、発生している全ての変状について点検データとして残しておく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つの性能評価システムは、それぞれ長所および短所を有しているため、2つの性能評価システムをユーザ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、効率的な維持管理に反映することができると考える。それぞれの用途としては、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が利用するもの、一方、RC-BREX' 2000は専門技術者または地方自治体などの技術職員が詳細な点検を行うために利用することが考えられる。以降では、定量的な点検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結果を示す。

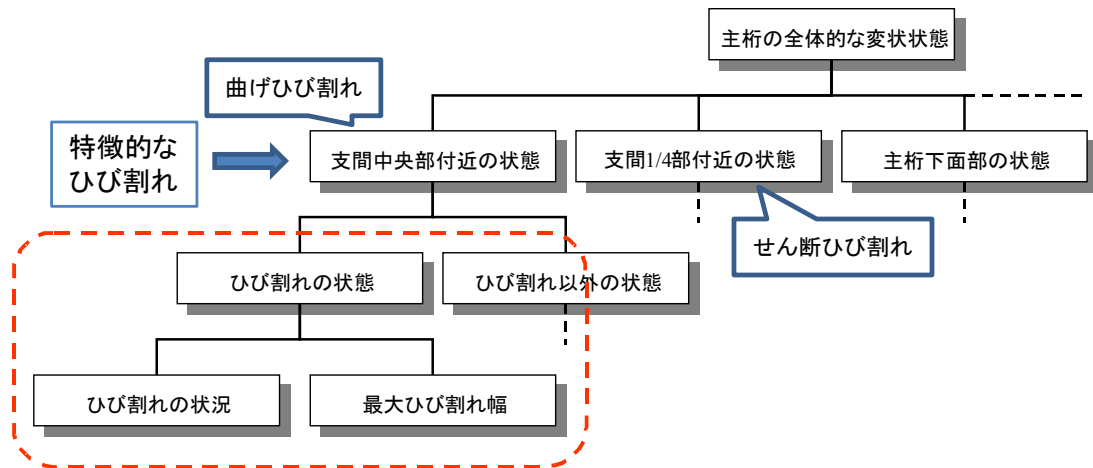


図-4 BREX 内の階層構造による性能評価過程(階層構造)の例

(3) MPOS

橋梁維持管理計画策定支援システム(MPOS)は、橋梁管理機関が既存橋梁群を効率的に維持管理するために開発されたものであり、前述J-BMS DB'09内の諸元データと通常点検データを用いることで維持管理計画の立案を行い、対策工法選定を支援するものである。

a) 劣化予測

RC-BREX' 2000によって求められる主桁および床版それぞれの耐荷性および耐久性評価結果から、橋梁部材の現在の健全度は把握できるが将来の劣化進行は予測できない。ここでは、耐荷性および耐久性のそれぞれについての劣化の進行を、劣化予測曲線式を仮定することによって劣化予測を行った。劣化予測曲線式には、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各種実験データから⁷⁾、耐荷性の劣化予測曲線式はおおよそ時間 t の4次関数に近い曲線となったことから、耐荷性の劣化予測曲線式を時間 t の4次関数と仮定した。一方、耐久性に関しては、耐荷力などの橋梁の性能や機能などの経年変化に対する抵抗性と定義されていることから、耐荷性(曲線)の微係数(次数が1つ少ない)であると考え、耐久性の劣化予測曲線を時間 t の3次関数と仮定した⁸⁾。図-5に劣化予測曲線設定のための初期設定画面の例を示す。

b) 寿命最大化機能

前述の初期設定として入力される値と通常点検データをもとに、橋梁ごとに寿命が最大となる維持管理対策の組み合わせを決定する。この時点では、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、複数の部材に損傷が見られる場合には、最も寿命が短い部材を橋梁全体の寿命と仮定して、この年に全ての部材を対象とした更新を行うものとした。図-6に寿命最大化機能から出力された画面の例を示す。図-6は、寿命を最大化した後の劣化予測曲線が表示されている。ここで表示されている劣化予測曲線は、3回の対策を行った結果である。なお、設定できる最大対策回数は5回とした。また、この場合の更新費用の平準化処理では、更新工事の前倒しのみを考慮し、先送りは出来ないようにしている。

c) 更新費用平滑化機能

上述(2)で記述したように、これまでの処理は予算の裏付けを考慮していなかった。そのため、ある一定の時期に維持管理対策が集中してしまい、現実的でない維持管理計画案を提示してしまう可能性がある。このような問題を解決するために本機能では、更新費用の偏りをなくし平準化を行うこととした。

劣化曲線・対策の設定

主桁対策を実行 床版対策を実行

主桁 | 床版 | 下部工 | 鋼橋

初期設定 終了

主桁劣化予測式: $h(t)_G = b_G - a_G t^c$

主桁劣化予測式の設定

傾き係数 a の設定
 通常点検結果から設定 通常点検結果がない場合, 初期寿命 60 年から求める

健全度の初期値 b の設定
 100 $0 < b \leq 100$

劣化曲線の次数 c の設定
 1次式 2次式 3次式 4次式

主桁への対策効果の設定

区分	状態	対策工法	単価*1	健全面積率	対策上限 <input checked="" type="checkbox"/>	対策効果
V	材料劣化の程度 小	表面被覆	7.5	橋面積の 5.00 %	1 回	a: 直前の係数に 2 掛け
IV	材料劣化の程度 中	表面被覆+注入(20%)	17	橋面積の 10.0 %	1 回	
III	材料劣化の程度 大	断面+被覆+注入(20%)	31.5	橋面積の 20.0 %	1 回	b: 回復量に 0.9 掛け
II	耐荷力に影響 小	断面+被覆+注入(40%)	41	橋面積の 50.0 %	1 回	
I	耐荷力に影響 大	更新	640	橋面積の 100 %	1 回	a: 係数の初期値に戻る b: 初期健全度に戻る

共通設定

足場架設単価 *1 : 9.6 状態区分全体での対策回数: 5 *1: 単価(千円/m²)

図-5 劣化予測曲線設定のための初期設定画面の例

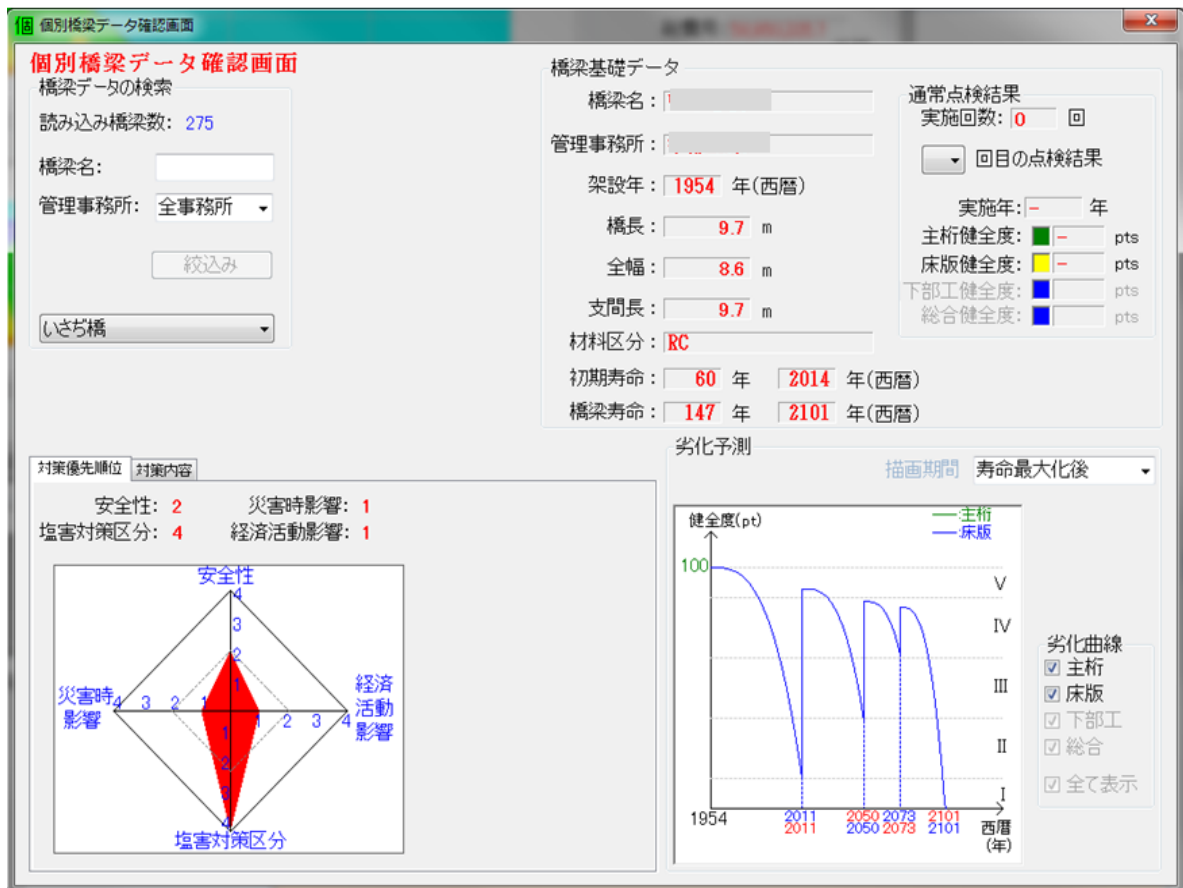


図-6 MPOS の寿命最大化機能からの出力画面の例 (更新費用平滑化後)

3. 撤去橋梁の概要と現地調査

ここでは、既存橋の架替えに伴って撤去されるRC-T桁橋を用いて、データ収集のための詳細な近接目視点検を行い、RCBREX' 2000 (以下、BREXとする)の診断結果をまとめ、種々の観点から本システムの検証を行う。

(1) 撤去橋梁の概要

調査対象とした既存橋梁は、山口県と広島県の県境に架かる「SK橋」であり、老朽化のため撤去され架替えられるものである。SK橋は、昭和17年(1942年)架設の橋長168.3 m、全復員11.0 m、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 年間で撤去された。表-1に撤去橋梁(SK橋)の諸元、および図-7にSK橋の撤去前の形状・寸法をそれぞれ示す。

(2) 現地調査の概要

対象橋梁に対する現地調査では、近接目視点検を採用した。近接目視点検は、解体・撤去工事の際に橋梁上部工の桁下面に設置される作業足場を利用して実施した。点検箇所は、図-7に併記したようにスパン1およびスパン3の2スパン分である。近接目視

点検に参加したのは、建設コンサルタント会社などで橋梁の設計業務あるいは点検を含む維持管理業務に携わって10年以上の専門家8名である。近接目視点検は、日時を変えて2回実施した。すなわち、1回目は事前の簡易な打ち合わせのみで、各専門家個人個人で自由に目視点検、変状図記入をしてもらい、2回目は1回目の点検結果の比較を踏まえて、点検実施前に全員で前回点検経験を基にした意見交換(以下、ヒアリングと呼ぶ)を行い、次回目視点検についての取り決めを確認し合った上で実施した。

表-1 撤去橋梁の諸元

橋梁名	一般国道2号 SK橋
橋長	L = 168.29 m
幅員	W = 11.0 m(2車線+歩道) W = 2.5 m(歩道)
上部構造	ゲルバー-RCT桁橋
下部構造	橋台: 2基 橋脚: ラーメン橋脚(RC): 7基
基礎構造	橋台: 松杭 橋脚: オープンケーソン
架設年次	1941年(昭和16年)
交通量(H22)	28,281台/日

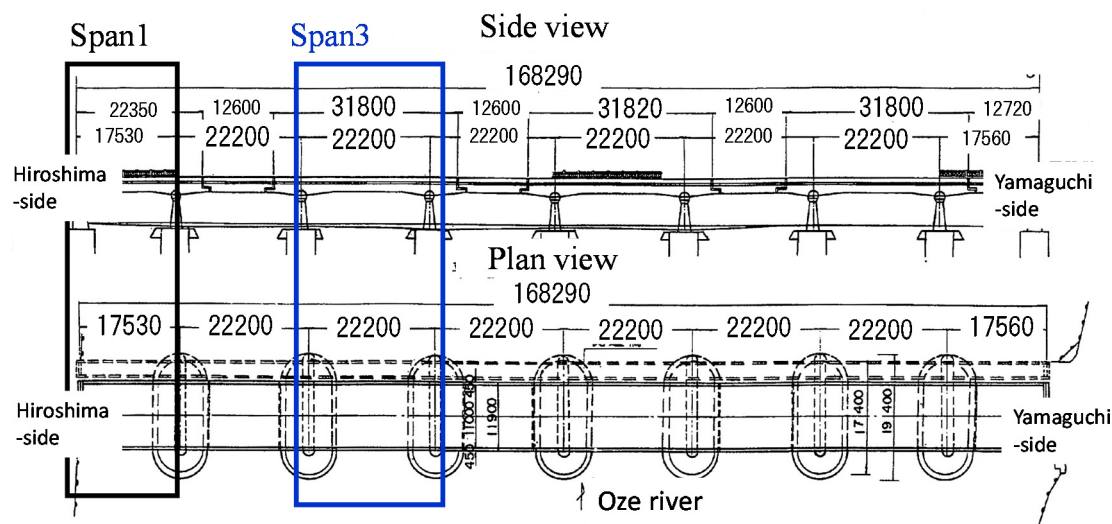


図-7 対象橋梁(SK橋)の側面図および平面図(撤去前)と調査区間

a) 近接目視点検の流れと内容

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」⁹⁾に準じて、8名の点検の専門家によって実施した。その内容は、①変状図の作成、②変状記録一覧表の作成、③各変状の健全度評価である。①では、目視点検スパンの橋梁展開図に発生している変状を記録し、変状図を仕上げる。②では、目視点検後、①での変状図をもとに変状記録一覧表を作成し、そのデータをBREXに入力する。③では、近接目視点検結果に基づき「主桁の耐荷性および耐久性」、「床版の耐荷性および耐久性」をそれぞれアンケート形式にて5段階評価してもらった。表-2にBREX内での評価点数とランクの対応を示す。

b) ヒアリングによる点検結果のばらつき改善

対象橋梁現地での近接目視点検は、点検の専門家といえども経験年数や自身の判断基準の差異などによって、点検結果や評価にばらつきがあることが報告されている¹⁰⁾。このような近接目視点検結果のば

らつきを可能な限り低減させるためのツールとして、著者らが開発を進めている「バーチャルリアリティ(VR)を利用した橋梁目視点検支援システム」¹⁰⁾を活用した。ここでは、このシステムや各自の変状図を利用したヒアリングを実施することで、専門家間の目視点検結果へのばらつきを低減できるか検討した。ばらつきを判断するために、近接目視点検により得られた変状図一覧をもとに、専門家(点検者)ごとの変状の指摘箇所を、一例として、スパン3内の主桁1のひび割れの場合について、ヒアリング前後で図-8のように比較した。これより、図-8中に示す計算式によって点検者間の点検結果の一致度を算出した¹⁰⁾。その結果を、ヒアリング前後で主桁ごとにまとめて示したものが表-3である。ここで、計算式で得られる数値(一致度)が大きいほど点検結果のばらつきが少ないことを示している。表-3から、ほぼ全ての主桁においてヒアリング前後で一致度が大きくなっていることがわかる。これより、ヒアリングの実施は近接目視点検結果の質の向上に非常に有効であることが明らかとなる。

表-2 評価点数とランクの対応

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。

4. BREXによる性能評価および余寿命推定

前述の近接目視点検結果を利用した対象(撤去)橋梁の性能評価および余寿命推定までの流れを体系的に示したものが図-9である。ここでは、図-9の流れに従った診断結果を述べる。

(1) 初期知識による性能評価

近接目視点検結果を BREX に入力して、最初に出力される結果を初期知識による性能評価という。すなわち、初期知識とは、橋梁諸元などの諸条件や変状データをも

8 (8)

点検者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A																															
B																															
C																															
D																															
E																															
F																															
G																															
H																															

1回目 (ヒアリング前)

点検者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A																															
B																															
C																															
D																															
E																															
F																															
G																															
H																															

2回目 (ヒアリング後)

計算式

$$Q = \left(\frac{\sum (P \times N)}{\sum N} \right) / P_0$$

P: 同じところを指摘した人数
N: 指摘した人数が同じ場合の回数
P₀: 点検者の総数

図-8 ヒアリング前後 (1回目と2回目) のひび割れ変状指摘箇所のばらつき

表-3 ヒアリング前後の一致度計算結果の比較

		主桁1	主桁2	主桁3	主桁4	主桁5
スパン1	ヒアリング会前	53	25	56	31	47
	ヒアリング会后	54	45	60	45	54
スパン3	ヒアリング会前	48	42	52	53	68
	ヒアリング会后	66	52	66	68	61

とに BREX が最初に評価する結果であり、このときの BREX はデフォルト状態となっている。

図-10 に、SK 橋のスパン 1 およびスパン 3 での専門家別の総変状個数と BREX による主桁および床版それぞれの性能(耐荷性, 耐久性)の評価結果を示す。図-10 より、専門家により近接目視点検での総変状個数にばらつきが生じている。これは、限られた時間内での近接目視点検であったため、点検経験の豊富な方とそうでない方、また、専門家の所属する業種によっても変状認識に差異があるものと考えられる。

図-10 内のシステムによる性能評価結果に注目すると、主桁、床版ともに耐荷性の項目に関しては約 30 点と低い評価となった。これは竣工から 72 年を経た老朽化橋梁で設計基準も古く、しかも主要幹線道路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、妥当な結果を出力しているといえる。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事実が、耐荷性能に比べて高い評価となった要因と考えられる。したがって、初期知識によるシステムの性能評価結果は妥当であるといえる。

しかし、図-10 内の総変状個数と性能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関わらず性能評価結果にはほとんど差が生じていないことがわかる。これは本システムが単に変状の総個数だけで評価しているのではなく、各変状の程度に基づいて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きな差異があるにも関わらず、性能評価結果にあまり差が生じないことには矛盾が残る。そこで、各変状について主観による性能評価をして頂いたアンケート結果を学習用データとして用い、性能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、学習後の知識を用いて初期知識による性能評価結果との比較をした。

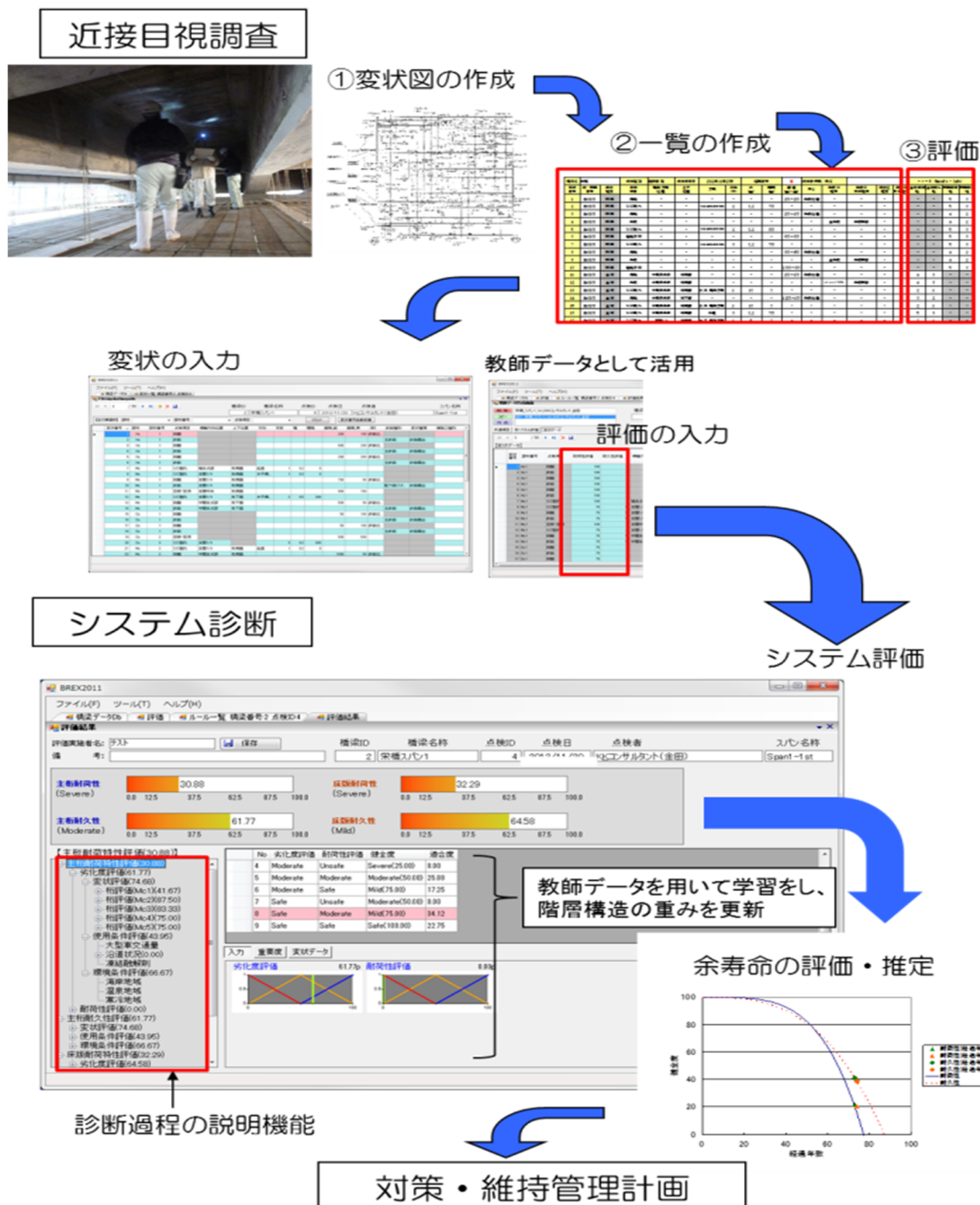


図-9 近接目視点検結果を利用した対象橋梁の診断フロー

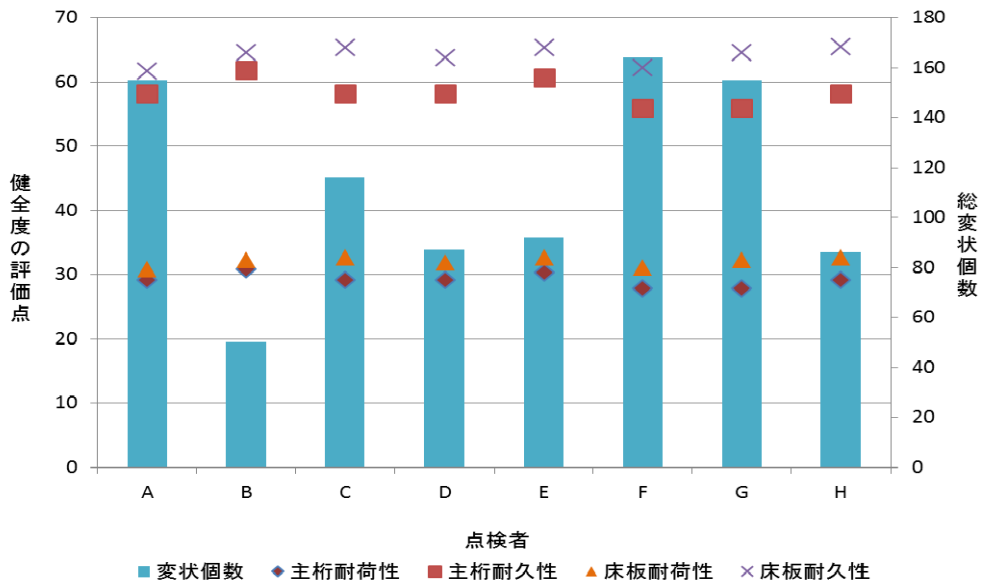
(2) 学習前後の性能評価比較

ここでは専門家によるアンケート結果を専門家別に学習させ、学習前後の性能評価結果を比較することによりその効果を検討した。アンケート結果とは、前述のようにBREXでの性能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主桁、床板ごとの性能評価を各専門家が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システムに学習させ、その評価結果を学習後の性能評価としている。

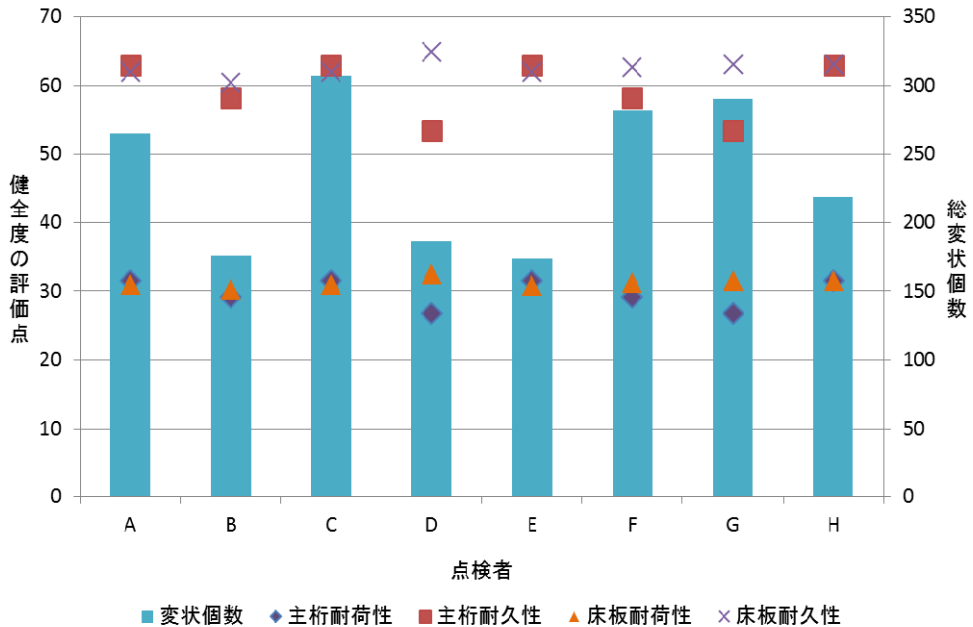
主桁および床版それぞれの初期知識による性能評価結果(学習前)と教師データによる学習後の性能評価結果を

両スパンで比較したものを表-4にまとめて示す。

表-4より、主桁および床版それぞれの耐久性評価値は、多くの専門家の学習後の評価値が低くなる傾向がある。これは専門家自身の主観による性能評価が、概ね表-2で定義したランクで「Unsafe~Moderate Deterioration」であることより、専門家といえども撤去橋梁ということが無意識のうちに全体的な性能評価を低く見積もった可能性が考えられる。一方、床版耐荷性の評価値に注目すると、学習後の性能評価が高くなっている。また、主桁耐荷性に関しては、高い場合も低い場合もある。すなわち、学習前の初期知識による性能評価は、専門家の知識を完全



(a) スパン1



(b) スパン3

図-10 SK橋における専門家ごとの総変状個数と性能評価結果

表-4 SK橋における学習前後の性能評価結果の比較一覧

スパン1			点検者							
			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
床板	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
スパン3			点検者							
			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
床板	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

に獲得できていない結果であると言え、この評価値のみで対象橋梁の性能評価をするのは十分ではないと言える。

各専門家による学習後の性能評価は、主観による評価とシステム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、学習後の性能評価結果にはかなりの差が生じている。そこで次項では、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方法の検討を行った。

(3) 全標本学習法を用いた性能評価

専門家8名の近接目視点検結果に基づく本システムによる性能評価結果の平均値を、初期知識による評価、アンケート結果、学習後の評価の3種類の性能評価でスパン1およびスパン3について比較したものを表-5に示す。ここでの学習方法としては、サンプルデータの全て(ここでは専門家の8名のデータ)を学習用教師データとして用いる、全標本学習法を適用した。また、SK橋スパン1の主桁および床

版における性能評価結果の平均値を、初期知識による性能評価、アンケート結果、学習後の性能評価の3種類について視覚的に比較したものを、一例として図-11に示す。

表-5より、床版の耐荷性を除き初期知識による性能評価結果に比べてアンケート結果の評価値が低い値を示している。これは、専門家の主観による性能評価が各ランクの最低点を入力する厳しい側の性能評価となるからである。なお、床版の耐荷性のアンケート結果が高かったのは、耐荷性能評価における初期知識の値が低く、アンケート結果の値が高かったことが影響していると考えられる。次に、全標本学習後の性能評価に注目すると、学習することにより、ほぼ全ての評価項目がアンケート結果の値に近づいていることがわかる。これは、主観によるアンケート結果の学習により、システムが専門家の知識を抽出し、性能(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

表-5 SK橋における全標本学習法による性能評価結果の比較一覧

		初期知識 (平均値)	ランク	教師データ の平均値	ランク	学習後の評価結果 (平均値)	ランク
スパン1							
主桁	耐荷性	29.19	S-D	23.44	S-D	28.43	S-D
	耐久性	58.37	Mo-D	20.31	S-D	43.99	Mo-D
床版	耐荷性	32.06	S-D	54.69	Mo-D	41.17	Mo-D
	耐久性	64.12	Mi-D	48.78	Mo-D	51.45	Mo-D
スパン3							
主桁	耐荷性	30.55	S-D	25.00	S-D	28.68	S-D
	耐久性	61.09	Mo-D	14.29	S-D	43.67	Mo-D
床版	耐荷性	32.10	S-D	41.07	Mo-D	36.76	S-D
	耐久性	64.19	Mi-D	19.64	S-D	47.77	Mo-D

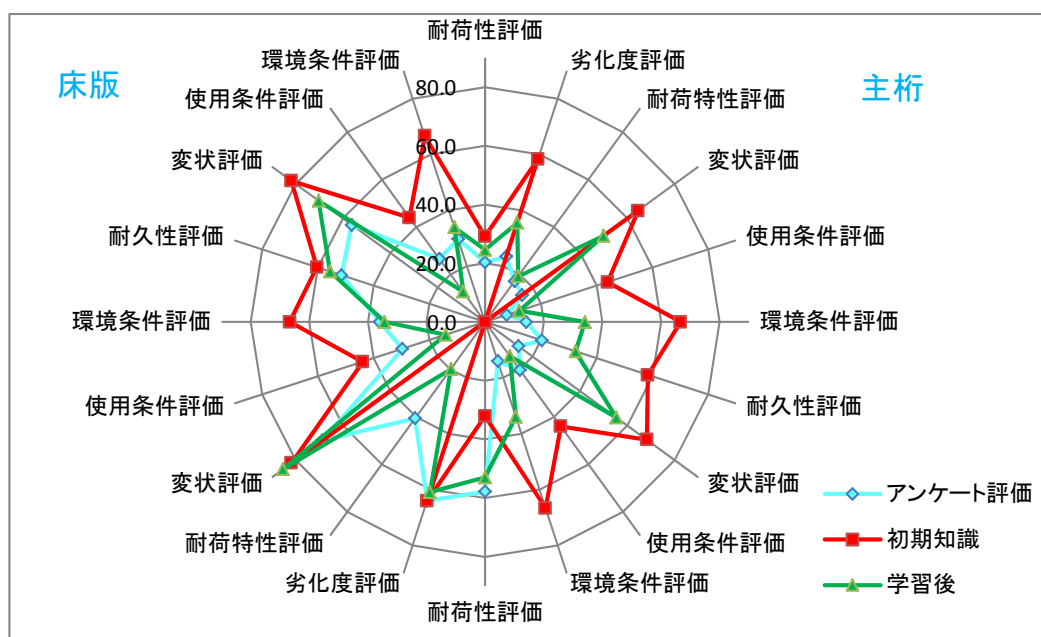


図-11 SK橋の主桁および床版の性能評価結果比較の視覚表示(スパン1)

の性能評価の平均値を比べてみても、全標本学習法の性能評価値がアンケート結果の評価値に近い結果となっている。これからも主観によるアンケート評価の学習を重ねることで、本システムが専門家の知識を抽出していることがわかり、専門家の知識を反映した性能評価システムであるといえる。

(4) 余寿命推定

BREXによる性能(耐荷性および耐久性の健全度)評価結果から、MPOS内の劣化予測曲線(式(1), (2))と管理限界(図-12参照; 劣化予想曲線が健全度=0 (管理限界)と交差する年数)を用いて余寿命を予測してみる。ここで、性能(耐荷性 S_L および耐久性 S_D)の予測劣化曲線式を前述2. (3)節で仮定したように橋齢 t の関数として以下のように表す:

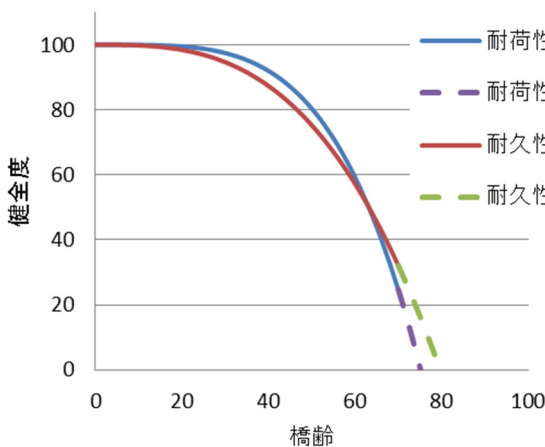
$$S_L = b_L - at^4 \tag{1}$$

$$S_D = b_D - at^3 \tag{2}$$

ここで、 S_L は耐荷性の健全度、 S_D は耐久性の健全度、 a 、 b_L 、 b_D は定数である。橋梁供用開始時の b_L 、 b_D の値を100とし、橋梁点検時の性能(耐荷性および耐久性)の健全度を用いて a 、 a_D の値を算出する。

一例として、前述表-5の全標本学習法による性能評価結果を式(1)および式(2)に代入すると、余寿命の推定結果は表-6のようになる。また、図-12(a), (b)に、余寿命推定の根拠となる主桁および床版それぞれの劣化予測曲線を示す。

BREXによる耐荷性および耐久性から推定される余寿命は、主桁および床版いずれも耐久性から推定される余寿命の方が長くなる傾向がみられる。これは、耐久性の劣化曲線が橋齢 t に関する3次関数であること、などが影響していると考えられる。



(a) 主桁の劣化予測曲線

5. コンクリートコアおよび主桁断面試験による劣化評価に基づく検証

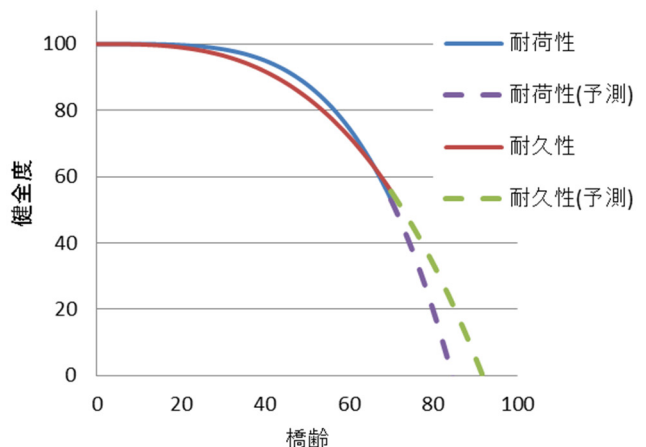
本章では、前章までに述べた劣化診断を行う性能評価システム(BREX)から得られる出力の検証を行った結果について述べる。BREXは目視点検データをもとに性能を評価するエキスパートシステムである。BREXの入力となる目視点検データは、外観から内部の劣化を点検者が予想した結果を含むこともあり、点検者の経験や知識に左右されることが考えられる。そこで、点検した橋梁からコンクリートコアを採取して内部劣化状態を調べることで客観的に劣化状態を評価し、BREXの出力結果との比較を行った。すなわち、コンクリートコア試験という実測調査により内部劣化を評価し、その結果との対応でBREX評価の妥当性を検証しようというものである。また、スパン全体にわたり主桁断面の観察によるスパン全体にわたる劣化状態の調査も行った。ここで得られた情報はコンクリートコア試験による評価の信頼性を向上させることに活用できると考えられる。

(1) 検証の考え方

本検討では、コンクリートコア試験により検証するBREXの出力として耐久性の推定余寿命(年)を考える。コンクリート構造物における余寿命推定の方法として、構造計算の結果による許容応力度での評価、鉄筋残存率

表-6 SK橋の性能評価結果と余寿命推定結果(年)

	耐荷性		耐久性	
	健全度	余寿命	健全度	余寿命
主桁	24.6	5	32.5	10
床版	53.0	15	55.6	22



(b) 床版の劣化予測曲線

図-12 SK橋各部材の劣化予測曲線

での評価, 限界状態設計法での評価などから行う方法が考えられるが, 本研究ではコンクリートコア試験での劣化評価を主とする耐久性の観点から余寿命を考える. 劣化としては塩害や中性化を対象とし, 余寿命は寿命を仮定する鉄筋累積腐食量に至るまでの時間で考える¹¹⁾. 鉄筋腐食量を評価対象としたのは, RC構造物では補強鉄筋が腐食することにより耐荷力が低下することを想定した劣化進展モデル(潜伏期→進展期→加速期→劣化期)として耐久性が評価されているためである¹²⁾. また, 塩害劣化を対象とした著者らの既往の研究によれば, 寿命判定のための鉄筋累積腐食量 Q_{cr} を設定して行う余寿命推定は, BREXの管理限界値(健全度0点)までを推定する余寿命との整合性が認められる結果が得られている^{11), 13)}. このときの余寿命推定に用いた鉄筋累積腐食量 Q_{cr} は $75\text{mg}/\text{cm}^2$ で, 本検証でも余寿命推定に用いる Q_{cr} として $75\text{mg}/\text{cm}^2$ を用いた. このようなことから, 本検証の目的は, Q_{cr} を用いた余寿命推定手法によるBREXの検証例の追加, 劣化要因が異なる場合の検証結果の確認になる. 検証の信頼性という観点からは, 局所的なコンクリートコア試験の実測データがスパン全体の評価値に対してどの程度の対応があるのか, また鉄筋累積腐食量を算出する鉄筋位置をどこに設定するかといったことが重要なパラメータになる. すなわち, スパン全体の評価であるBREXの結果をコンクリートコア試験により検証する際の信頼性につながると考えられる. そこで本研究では, 橋梁撤去時に126面におよぶ主桁切断断面の観察を行うことによりスパン全体の状態の把握を試みた^{14), 15)}. これによりスパン全体にわたる鉄筋位置と主桁切断断面の劣化状況(中性化深さ)の情報が得られるので, コンクリートコア試験による余寿命推定結果の信頼性を確認することができると考えられる.

(2) コンクリートコア試験による実測評価

a) 評価方法¹⁶⁾

コンクリートコア試験の対象橋梁は, 前述3章に示すSK橋(Span 1およびSpan 3)で, 試験項目は耐久性評価にかかわる中性化深さと塩化物イオン濃度とした. 試験体コアの採取は各主桁から2~3本とし, 横桁で分割された領域を目安に橋軸方向で偏らない採取とした. Span 3での採取位置を図-13に一例として示す. 図-13には中性化深さ, 塩化物イオン濃度を調べるために採取したそれぞれのコア位置を示す. そして, 主桁, 床版から採取したコア数を表-7にまとめて示す. 試験項目とした中性化深さと塩化物イオン濃度は, 表-7に併記したJISの試験法に準拠して分析した.

b) 劣化要因の特定

対象橋梁であるSK橋から採取したコンクリートコア(表-7)により劣化要因の特定を試みる. 図-14に各コア

における鉄筋位置での塩化物イオン濃度と中性化残りの分布を示す. また, 図中に塩化物イオンの影響限界指標(塩化物イオン濃度の鉄筋腐食限界量: 例えば $1.2\text{kg}/\text{m}^3$)と中性化の影響限界指標(中性化残り: 例えば, 10mm)を併記した. 影響限界指標として記載した補助破線により, 図-14に示す各コアの劣化状態は4つの領域に分類して考えることができる. すなわち, 中性化の影響が主となる領域(N-C), 塩化物イオンの影響が主となる領域(C-N), 中性化および塩化物イオンがともに影響する複合劣化領域(C-C), 中性化の影響も塩化物イオンの影響も小さい領域(N-N)である. 図-14より, SK橋のコア試験の結果はほとんどが領域N-Cに含まれ, いくつかは領域C-Cにあることがわかる. したがって, SK橋Span 3の劣化要因は中性化が主で, Span 1は, 中性化と塩化物イオンの影響がみられる複合劣化であると特定できる.

(3) 主桁断面観察による実測評価

a) 評価方法

SK橋の主桁撤去時には, Span 1で49箇所, Span 3で67箇所切断されブロック化された. 一例として, Span 3の主桁の切断(分割)位置を前載図-13に示す. スパン端部のブロックでは両面, その他のブロックは片側の切断面を観察対象とした. したがって, 観察面はSpan 1は54面, Span 3は72面となる. 観察前に, 切断ブロックの観察面

表-7 コア採取数と断面観察数

SK橋 (72年)		中性化深さ	塩化物イオン濃度	断面観察
Span 1	主桁	15	11	49
	床版	6	6	—
Span 3	主桁	20	12	67
	床版	6	6	—
試験方法		JIS A 1152	JIS A 1154	JIS A 1152

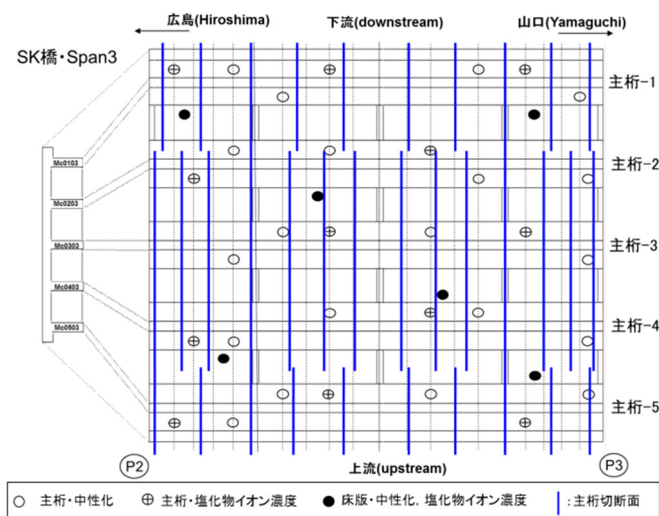
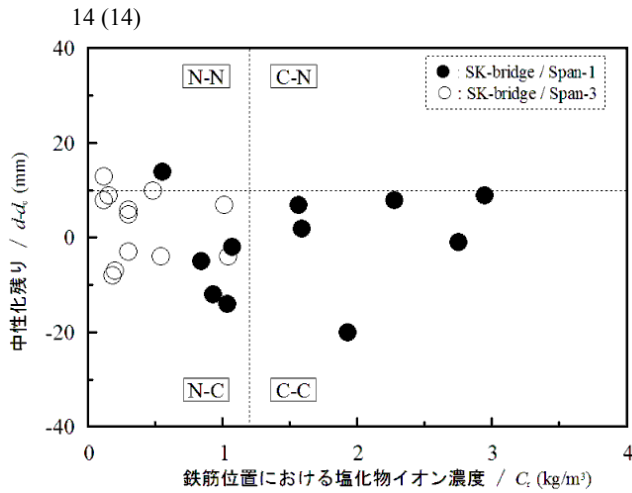


図-13 コア採取位置と主桁切断位置(Span 3の例)



N-N : 劣化因子の影響が小さい領域
 N-C : 中性化の影響が主となる領域
 C-N : 塩化物イオンの影響が主となる領域
 C-C : 中性化と塩化物イオンの影響がある領域

図-14 劣化要因の分類

を切断時の残差物が残らないようにサンダー処理と表面清掃をした。その後、切断面のひび割れの観察とかぶり厚さの計測、そして断面全体の中性化試験を行った^{14), 15)}。主桁断面の中性化試験は、清掃した切断面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、コア深さ方向の赤紫色に抵触した部分までをノギスにより測定した。このときの主桁切断面の一部を図-15に示す。中性化深さは主桁両側面あたり10測点以上の計測を行い、図-15に併記するようなマッピング図も作成した。

b) 主桁断面におけるかぶりと中性化深さの評価

図-15に示すような主桁切断面の観察でかぶり厚さを調べた。SK橋のSpan 1とSpan 3におけるかぶり厚さの測定結果を図-16に示す。図-16は、計測結果が正規分布に従うと仮定して示したものである。各スパンでのかぶり厚さの平均値は、Span 1で54mm、Span 3で50mmであった。Span 1におけるかぶり厚さの95%信頼性区間は51~57mm、Span 3の場合は48~52mmであった。

次に、コンクリートコア試験で得られた主桁の中性化深さと断面試験による中性化深さを比較する。全ての切断面の中性化深さの平均値は65mm、全てのコア試験の中性化深さの平均値は54mmと、コア試験に比べ切断面の中性化深さは約20%大きい結果となった¹⁴⁾。ここでは、コンクリートコア試験の中性化深さ(X_1)と、採取コアを含む切断ブロックの切断面での中性化深さ(X_2)を比較する。その結果を図-17に示す。また、図-17には $X_2 = X_1$ と $X_2 = 1.2 \cdot X_1$ の補助線を併記した。図-17より、 X_1 と X_2 の関係は、 $X_2 = X_1$ より $X_2 = 1.2 \cdot X_1$ に近い傾向を示している。しかし、相関係数0.53といったばらつきの中での比較なので、コンクリートコア試験で得られる中性化深さはスパン全体の平均値、あるいはその20%程度小さい値の範囲

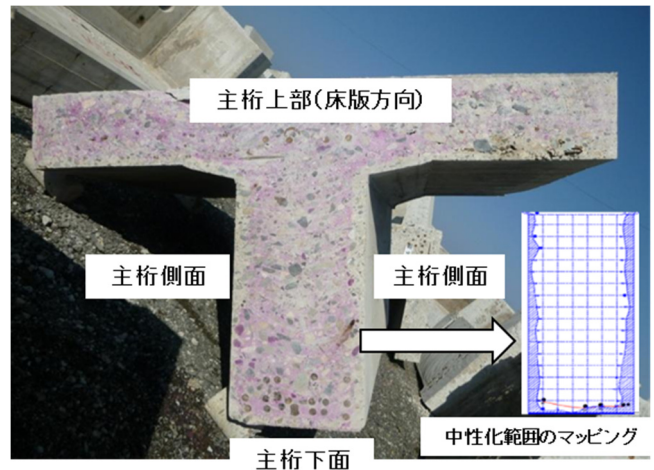


図-15 主桁切断面の中性化試験と結果表示例

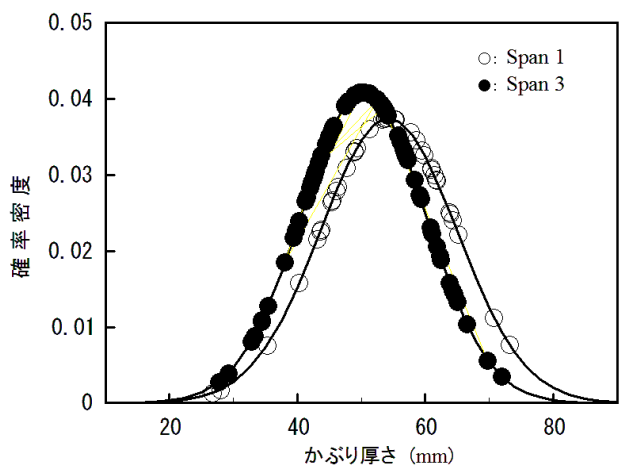


図-16 主桁切断断面観察によるかぶり厚さの分布

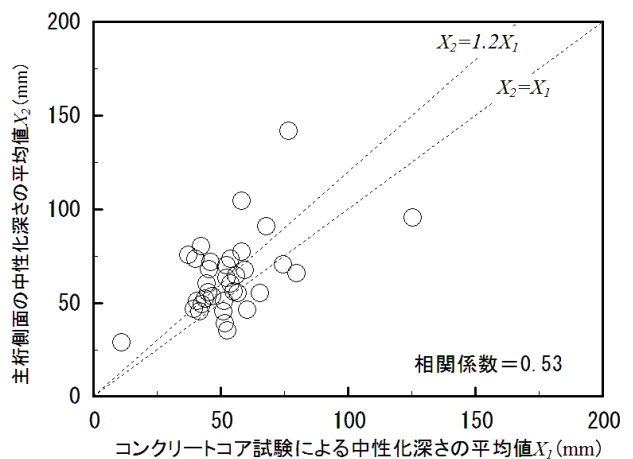


図-17 コア試験と切断断面試験の中性化深さの比較

とすることが妥当と考えられる。

(4) 実測評価にもとづく余寿命推定による検証

a) コンクリートコア試験による余寿命推定方法^{11), 13)}

前述(3)b)の結果から、今回の対象橋梁であるSK橋の主たる劣化要因は中性化であった。そこで、本研究では

中性化の影響を考慮した余寿命推定フローとして図-18を考える。また、図-18の実測データになるコンクリートコア試験の結果については、採取したコンクリートコアが近傍領域の平均的な内部劣化状態を示すものとして考える。以下、コンクリートコア試験および主桁断面観察といった実測試験に基づく余寿命推定の流れと使用する関係式について述べる。

中性化による劣化は、鉄筋を腐食させる因子(水分や塩化物イオンなど)の劣化進行に影響する環境を提供するものと考え、中性化範囲の進行を考慮した鉄筋累積腐食量の算出により評価する。中性化深さの経時的な推定は、 \sqrt{t} 則に従い、中性化速度係数 A がある時間 t における中性化深さ $d(t)$ (ここではコア試験時 $t=72$ 年の中性化深さ)を用いて次式から求める。

$$A = \frac{d(t)}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

ここで、実測値から中性化速度係数 A を求めることができれば、式(3)の関係式を用いて、ある時間 t における中性化深さ $d(t)$ を求めることができる。

中性化による鉄筋の累積腐食量 $Q(t)$ の算出では、時間 t における中性化残り $C = d_0 - d(t)$ が10mmより大きい場合と小さい場合で異なる実験式を用いる^{13), 18)}。すなわち、中性化残り C が10mmより大きい場合は中性化の影響が小さい場合で式(4)を用いる。一方、中性化残り C が

10mm以下の場合には中性化の影響が大きい場合で式(5)を用いる。

$$V(t) = 1.32(CI(t) - 1.2) \times k \quad (4)$$

$$V(t) = (0.840W - 0.145C(t) + 1.32CI(t) + 0.0293W \cdot C(t) - 0.0917C(t) \cdot CI(t) + 0.658CI(t) \cdot W - 2.52) \times k \quad (5)$$

ここで、 $V(t)$ (mg/cm²/年)は鉄筋腐食速度、 $CI(t)$ (kg/m³)は鉄筋位置での塩化物イオン濃度、 $C(t)$ (mm)は中性化残り、 W (%)はコンクリートの表面含水率である。ここで本検討の W は暴露試験の結果を参考に4%と設定した^{13), 19)}。また、 k は環境温度 tmp (°C)の補正式で、次式とする。

$$k = 1 + 0.0381 \times (tmp - 20) \quad (6)$$

また、鉄筋位置での塩化物イオン濃度 $CI(t)$ は、式(7)により求めることができる。

$$C(x, t) = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{(D \cdot t)}} \right]\right) + C_i(x, 0) \quad (7)$$

ここで、 $C(x, t)$ は時間 t における深さ x での塩化物イオン濃度、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン濃度、 D は塩化物イオンの見かけの拡散係数、 $C_i(x, 0)$ はコンクリート中の初期塩分量である。式(7)の C_0 、 D 、 $C_i(x, 0)$ は、コンクリートコア試験の結果から算出する。

これより鉄筋腐食速度 $V(t)$ が求まるので、式(8)から累

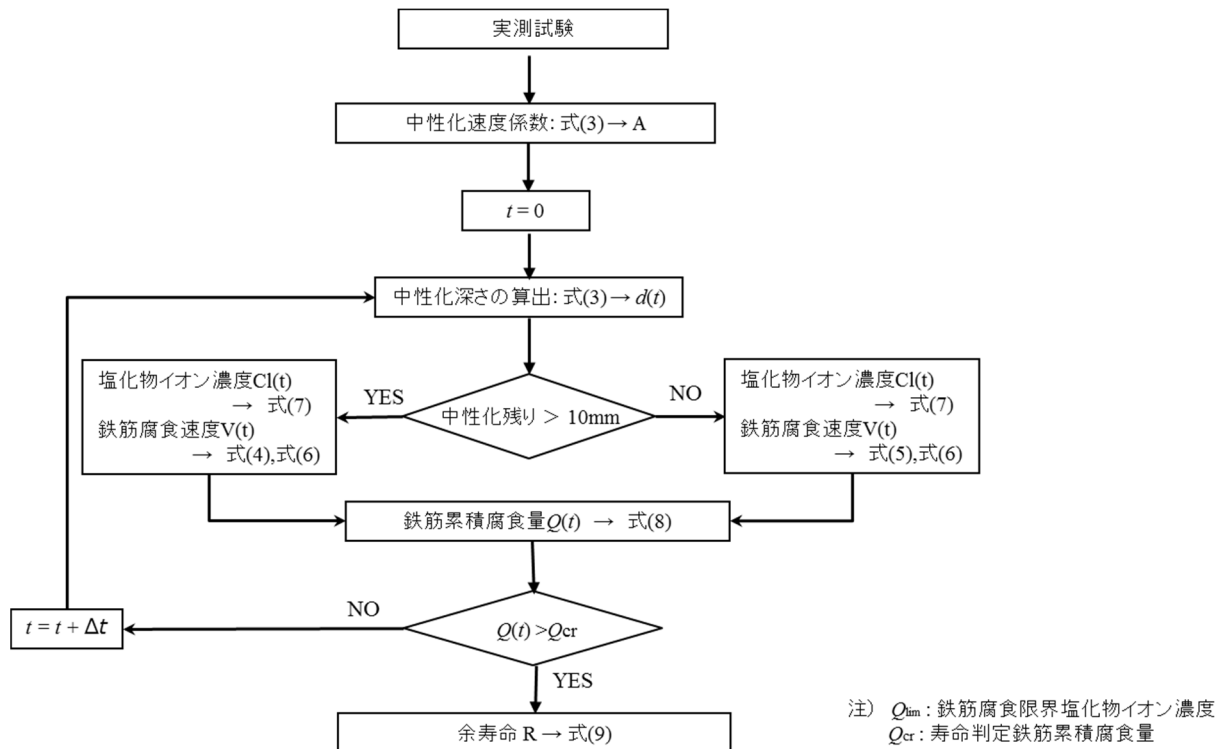


図-18 実測試験データを基にした余寿命推定のフロー

積鉄筋腐食量 $Q(t)$ が求まる。時間 t での累積鉄筋腐食量 $Q(t)$ は $V(t)$ の積分値として次式で求めることができる。

$$Q(t) = \int_0^t V(t) dt \approx \frac{dt}{4} V\left(t_1 + \frac{dt}{2}\right) + \sum_{t=t_1+dt}^{t=X} \left(\frac{dt}{2} \left(V\left(t - \frac{dt}{2}\right) + V\left(t + \frac{dt}{2}\right) \right) \right) \quad (8)$$

以上より、中性化残りに依存した各場合での累積鉄筋腐食量 $Q(t)$ が求まったことになる。ここで、 $Q(t)$ から余寿命(年)を推定するためには、寿命を判断する基準が必要となる。図-18の推定フローは判定する鉄筋腐食量 Q_{cr} に至ったかどうかにより寿命 t_{life} を算定しようとするもので、判定地 Q_{cr} には既往の研究で得られた $75\text{mg}/\text{cm}^2$ を用いる^{11),13)}。 $Q(t)$ が Q_{cr} に至っていない場合は、フローに示すように経過時間を Δt 進めて計算を行う。 $Q(t)$ が Q_{cr} に達した場合はその時の時間 t が寿命 t_{life} と判断され、供用期間 t_s に対する余寿命 R は次式で算出できる：

$$R = t_{life} - t_p \quad (9)$$

b) 余寿命の推定と検証

ここでは、SK橋でのコンクリートコア試験の結果をもとに、図-18のフローに従って余寿命推定を行った。用いたパラメータの値を表-8に示す。表-8では、主桁におけるかぶりは前節で得られた図-16の平均値とし、床版の場合もこれと同じ値を用いた。また、中性化深さ、塩化物イオンの拡散にかかわる係数は、主桁、床版ともに各スパンごとのコア試験から算出された係数の平均値として求めた。この算出値を用いて、SK橋の余寿命を推定した結果を表-8に併記する。また、検証するBREXからの推定結果は、耐久性に関する余寿命となるので、表-5の耐久性評価の「学習」による健全度評価結果を用い、式(2)により余寿命を算出した。その結果も表-8に併記する。

コンクリートコア試験による主桁の推定余寿命をみると、Span 1では1年、Span 3では15年と、スパンによってかなり異なり、特にSpan 1の余寿命が短いことがわかった。また、床版の推定余寿命についてみると、Span 1では17年、Span 3では14年と、ほぼ同じくらいの余寿命であることがわかった。

次に、これらの推定結果をBREXの推定余寿命と比較する。表-8で床版の結果をみると、Span 1, Span 3ともに推定余寿命の違いは2~3年となった。一方、主桁の結果をみると、Span 3は同じ結果になったが、Span 1では推定余寿命に差がみられた。この原因の理由のひとつとして、前節(2) b) で述べたようにSpan 1の劣化が中性化と塩害の複合劣化という複雑な劣化機構であると考えられる。すなわち、Span 1での推定結果の差はBREXの処理方法というよりも、BREXの処理データとなる目視点検データが複雑な劣化機構によるコンクリートの内部劣化をあまり反映していなかったとも考えられる。この点は、目視点検結果の質の向上を図ることも含めて、今後の課題と考えられる。

以上より、表-8に併記した推定余寿命の比較から、SK橋を例にとったBREXの余寿命推定結果は、コンクリートコア試験により検証されたと考える。また、これにより、既往の研究で行った主たる劣化要因が、塩害の場合¹¹⁾だけでなく、中性化の場合でも、鉄筋累積腐食量 Q_{cr} を $75\text{mg}/\text{cm}^2$ と設定すればコンクリートコアによる推定結果とBREXの推定結果が対応していることが明らかとなった。

6. 結論

本論文では、J-BMS RC版を実用化させるため、架替えに伴い撤去される老朽橋(SK橋)を対象として近接目視点検データを収集し、定量的な劣化診断

表-8 余寿命推定のためのパラメータと推定結果

SK橋	部位	橋齢 (年)	かぶり (mm)	コンクリートコア試験				推定余寿命(年)	
				中性化 深さ (mm)	表面塩化物イオン			コア試験 からの推定	BREX 耐久性
					表面濃度 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$	初期濃度 $C_i(\text{kg}/\text{m}^3)$	拡散係数 $D(\text{cm}^2/\text{s})$		
Span 1	主桁	72	54	55	1.72	0.30	0.57	1	15
	床版			49	1.18	0.22	0.63	17	19
Span 3	主桁		50	49	1.41	0.30	0.25	15	15
	床版			38	2.76	0.50	1.17	14	17

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。本研究で得られた主な成果を以下に示す：

- 1) J-BMS RC版の劣化診断機能の一つであるRC-BREX'2000にSK橋の近接目視点検データを入力して、種々の観点から診断結果に検討を加えた。その結果、専門家の知識をシステム内の学習機能によって性能評価結果に反映可能な実用的なシステムであるといえる。
- 2) 対象橋梁現地での近接目視点検から、各専門家が指摘した総変状箇所のみならず、ばらつきに関する検討を行った。その結果、点検実施前に行う専門家間でのヒアリング(変状確認に関する情報交換)がばらつき低減に有効となることが確認できた。
- 3) 本システム内の初期知識による性能評価だけでは対象橋梁の性能を精度よく評価するには十分ではないことが明らかとなった。そこで、全標本学習法を適用した結果、学習後の性能評価結果は専門家へのアンケート結果に近い値が出力されており、本システムが専門家の知識を反映した性能評価を実行できるようになることを確認できた。
- 4) BREXによる対象(老朽)橋梁の余寿命推定結果は、耐荷性および耐久性の観点から最短余寿命がそれぞれ5年および10年であった。これより、BREXによる推定余寿命は、対象橋梁における実際の架け替え判断と一致していることがわかった。
- 5) BREXで評価した対象橋梁について、コンクリートコア試験に基づく実測調査により余寿命推定することを試みた結果、BREXで出力された耐久性に関する推定余寿命とほぼ同じ余寿命値が得られた。これにより、塩害および中性化を対象とする劣化に対してBREXの余寿命推定が検証できた。
- 6) 以上のことから、本システムによる余寿命予測はある程度信頼できるもので、その有用性が裏付けられた。

謝辞：本研究の遂行において、老朽橋の現地点検調査の機会を与えていただいた国土交通省中国地方整備局の担当者の方々に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.

- 2) A. Miyamoto: A Bridge Management System (J-BMS) in Japan, The Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing (CC2013), pp.136, (USB: miyamoto. pdf, pp.1-32), 2013.9.
- 3) H. Emoto, J. Takahashi, R. Widyawati and A. Miyamoto: Performance Evaluation and Remaining Life Prediction of an Aged Bridge by J-BMS, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials(SCESCM2014), Yogyakarta, Indonesia, pp.1-9, Sept. 2014.
- 4) A. Miyamoto, T. Katsushima and H. Asano: Development of Practical Bridge Management System for Prestressed Concrete Bridges, Proceedings of the Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures(SMAR 2013), Istanbul Technical University(ITU), Vol.2, pp.1-9, 2013.9.
- 5) 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)～, 社会基盤マネジメントシリーズ No.11, The Research Center for Environmental Safety, Yamaguchi University, pp. 1-44, 2009.12.
- 6) H. Emoto, J. Takahashi and A. Miyamoto: Practical Application of Bridge Rating Expert System to an Aged Bridge, Proceedings of Science and Information(SAI) Conference 2014, IEEE, London U.K., pp. 1-8, 2014.8.
- 7) 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.
- 8) K. Kawamura, H. Nakamura and A. Miyamoto: Development of Concrete Bridge Rating Expert System(BREX) in Japan, Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems (Edited by Frangopol, D.M. and Furuta, H.), ASCE, Virginia, pp.161-178, 2001.
- 9) 山口県土木建築部, 山口大学工学部 : J-BMS のための点検マニュアルとその利用-定期点検, 結果検証, データベースシステム-, 2003年8月版, 2003.
- 10) 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.
- 11) 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, 第23巻, 第3号, pp.119-132, 2012.9.
- 12) コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会 (338委員会) 委員会報告書, (社) 土木学会, 2009.

- 13) 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大会論文集, Vol.36, No.2, 2014.
- 14) 高橋 順, 江本久雄, 宮本文穂 : 実橋梁における余寿命推定のための主桁断面観察, 九州支部第1回学術講演会, B-16, 2014.12.
- 15) Ratna Widyawati, Ayaho Miyamoto, Hisao Emoto and Jun Takahashi : Service Life Prediction of an Aged Bridge Based on Carbonation Tests of Cross-Section Cutting-Off Girders, 材料, 日本材料学会, Vol.64, No.10, pp. 1-8, 2015.10.
- 16) 小林一輔 : コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法, 森北出版, 2001.12.
- 17) コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会 (338委員会) 委員会報告書, (社) 土木学会, 2009.
- 18) 飯島 亨, 佐々木孝彦, 横田 優, 松島 学 : 塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp.11-16, 2004.10.
- 19) 古賀裕久, 渡辺博志 : 屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.641-646, 2006.7.

(平成28年 8月 9日受理)