

論文 J-BMS RC 版による老朽橋梁の健康診断と余寿命推定

宮本 文穂*1・江本 久雄*2・高橋 順*3

要旨: 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 橋を対象とした J-BMS RC 版は、点検データなどを蓄積する J-BMS DB'09、橋梁の性能評価を行う RC-BREX および維持管理計画を行う MPOS という 3 つのサブシステムを有している¹⁾。J-BMS は学習機能を有したシステムとなっており、実用化には多方面からの検証が必要となる。本研究は、橋梁の架替えに伴って撤去される老朽橋を対象とした近接目視点検データに基づいて、J-BMS 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)により出力される診断結果の検証を行い、本システムの有用性を検討したものである。

キーワード: RC 橋, 近接目視点検, J-BMS, BREX システム, 健康診断, 余寿命推定, 老朽橋梁

1. はじめに

著者らは、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⁾²⁾。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 版がある³⁾。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: Maintenance Plan Optimization System)の各サブシステムから構成される。

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。

2. J-BMS RC 版の概要と運用フロー

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-1 に示す。図-1 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使用する、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。

2.1 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⁴⁾。

2.2 RC-BREX⁵⁾

前述図-1 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-2 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「曲げひび割れ」

*1 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻教授 工学博士 (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 電気化学工業株式会社 先進技術研究所主幹研究員 博士(工学) (正会員)

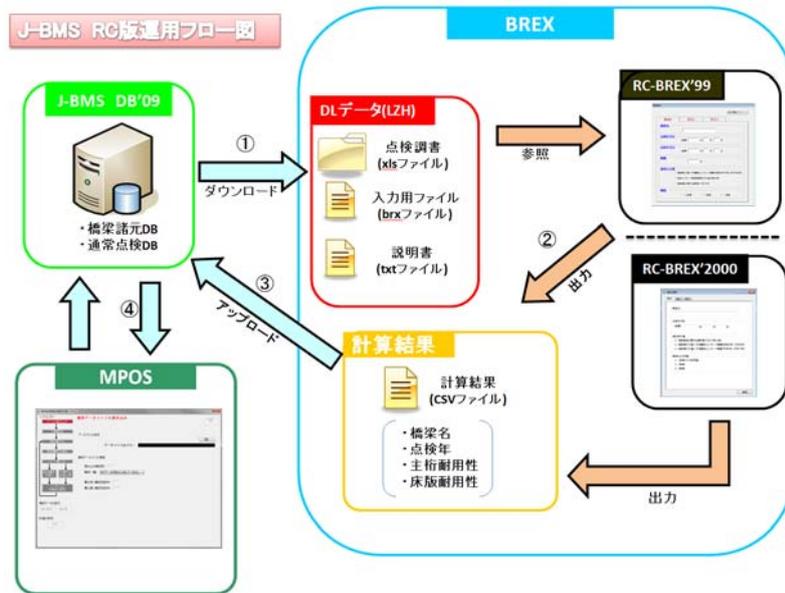


図-1 J-BMS RC 版の運用フロー図

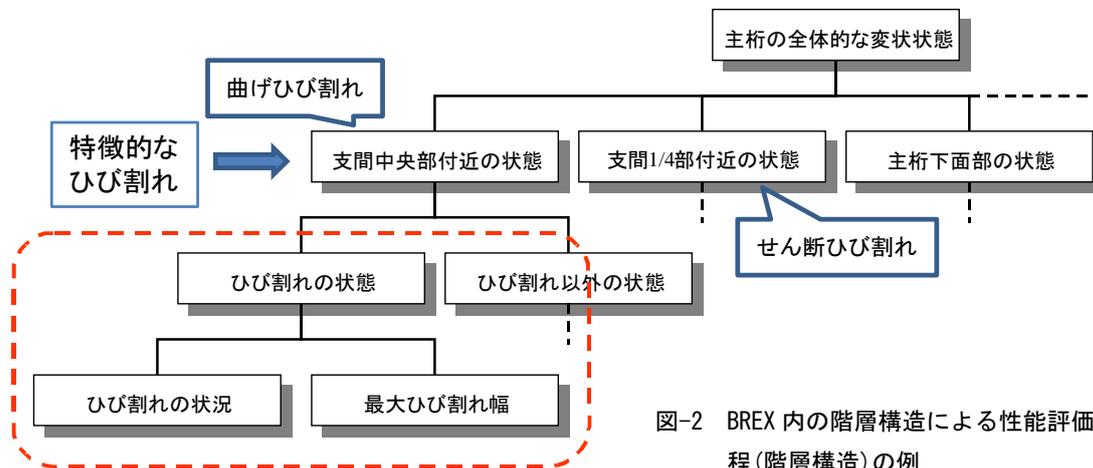


図-2 BREX 内の階層構造による性能評価過程(階層構造)の例

が発生していれば、図-2 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となると考えられる。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。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。本研究では、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。

2.3 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。

表-1 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。

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、RCBRES' 2000(以下、BRES 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。

3.1 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。

3.2 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、広島側から数えてスパン 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、各専門家各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。

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」⁶⁾ 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 BRES 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-1 に BRES 内での評価点数とランクの対応を示す。

4. BRES 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-3 である。ここでは、図-3 の流れに従った診断結果を述べる。

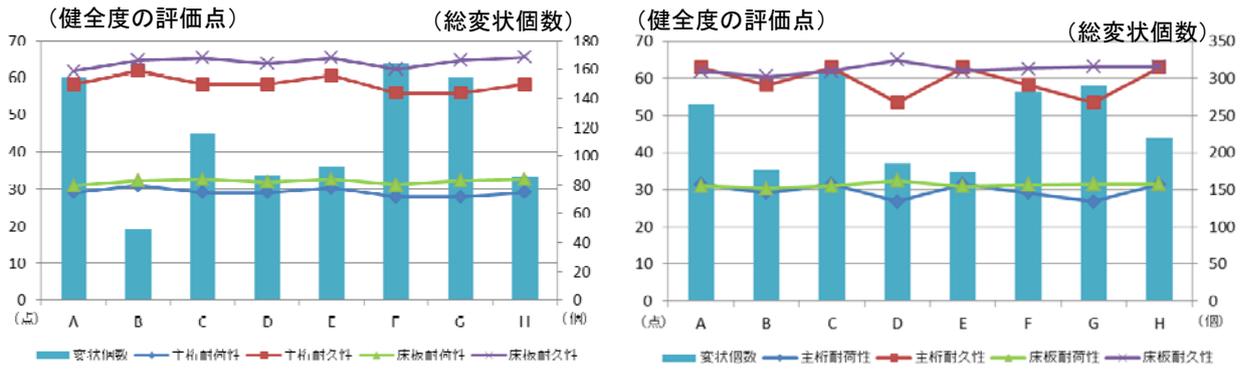
4.1 初期知識による性能評価(近接目視～システム診断)

近接目視点検結果を BRES 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、



図-3 近接目視点検結果を利用した対象橋梁の診断フロー

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 BRES が最初に評価する結果であり、このときの BRES はデフォルト状態となっている。図-4 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 BRES 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-4 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



(a) スパン1

(b) スパン3

図-4 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-2 SK橋における学習前後の性能評価結果の比較一覧

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

表-3 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(スパン1)

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 (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
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	

られる。図-4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-4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。

4.2 学習前後の性能評価比較(教師データを用いた学習)

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。

主桁および床板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-2にまとめて示す。表-2より、主桁および床板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-1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で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。

4.3 全標本学習法を用いた性能評価(教師データを用いた学習)

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について比較したものを一例として表-3に示す。こ

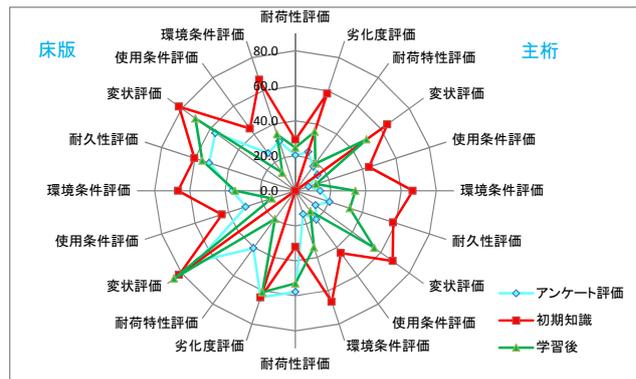


図-5 対象橋梁の主桁および床版の性能評価結果比較の視覚表示(スパン1)

表-6 SK橋の性能評価結果と余寿命推定結果(年)

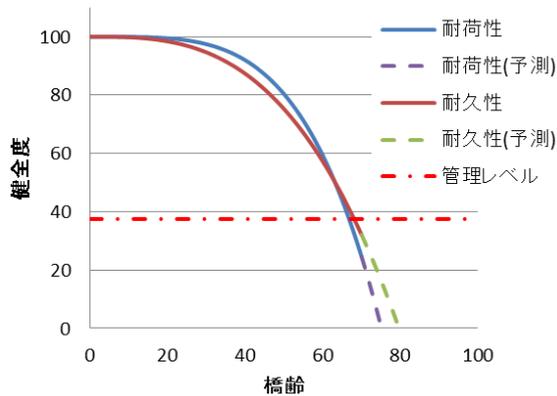
	耐荷性		耐久性	
	健全度	余寿命	健全度	余寿命
主桁	24.6	5	32.5	10
床版	53.0	15	55.6	22

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-5に示す。

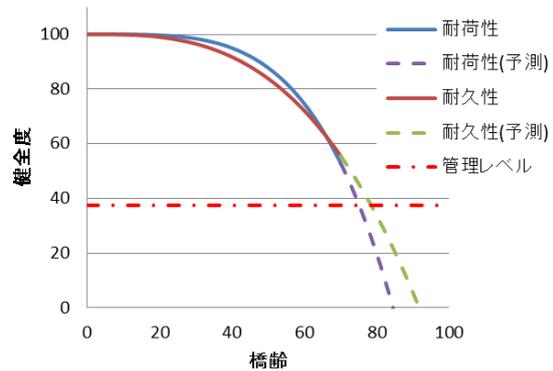
表-3より、床版の耐荷性を除き初期知識による性能評価結果に比べてアンケート結果の評価値が低い値を示している。これは、専門家の主観による性能評価が各ランクの最低点を入力する厳しい側の性能評価となるからである。なお、床版の耐荷性のアンケート結果が高かったのは、耐荷性能評価における初期知識の値が低く、アンケート結果の値が高かったことが影響していると考えられる。次に、全標本学習後の性能評価に注目すると、学習することにより、ほぼ全ての評価項目がアンケート結果の値に近づいていることがわかる。これは、主観によるアンケート結果の学習により、システムが専門家の知識を抽出し、性能(健全度)評価に良い影響を与えた結果といえる。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。

4.4 余寿命推定(余寿命の評価・推定)

BREXによる性能(健全度)評価結果から、MPOS内の



(a) 主桁の劣化予測曲線



(b) 床版の劣化予測曲線

図-6 SK橋各部材の劣化予測曲線

劣化予測曲線(式(1),(2))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)の予測劣化曲線を橋齢 t の関数として以下のように表す:

$$S_L = b_L - a_L t^4 \quad (1)$$

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

ここで、 S_L は耐荷性の健全度、 S_D は耐久性の健全度、 a_L 、 b_L 、 a_D 、 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_L 、 a_D の値を算出する。

一例として、前述表-3 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-4 のようになる。また、図-6(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(劣化曲線が管理レベル(表-1 の Severe Deterioration (12.5~37.5 点)の 37.5 点)と交わる年数)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。

5. 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、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) 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分かった。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。

(3) BREX による対象(老朽)橋梁の余寿命予測結果は、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。

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) H. Emoto, J. Takahashi, R. Widyawati, A. Miyamoto: Performance Evaluation and Remaining Life Prediction of an Aged Bridge by J-BMS, *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd., 95, pp.65-74, 2014.
- 2) A. Miyamoto: A Bridge Management System (J-BMS) in Japan, *The Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing (CC2013)*, pp.1-32, 2013.
- 3) A. Miyamoto, T. Katsushima, 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, Vol.2, pp.1-9, 2013.
- 4) 宮本文徳, 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.
- 5) H. Emoto, J. Takahashi, 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.
- 6) 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.