

論文 目視点検結果を利用した J-BMS によるコンクリート橋の健康診断および余寿命推定における学習効果

江本 久雄^{*1}・高橋 順^{*2}・宮本 文徳^{*3}

要旨: 橋梁維持管理では、橋梁の健康状態を把握してメンテナンスを適切に行うことが重要である。橋梁の健康状態を把握するための一つの手法として、目視点検データを活用した健康診断および余寿命推定がある。著者らは、従来より目視点検データを活用した橋梁維持管理システムとして J-BMS の開発を行ってきた。本論文は、J-BMS の機能のうち橋梁の健康状態を把握する「橋梁劣化診断エキスパートシステム(Bridge Rating EXpert system : BREX)」による評価結果の信頼性向上において重要となる、教師データの選択とその学習効果について、さらに、その評価結果を用いた余寿命推定の結果からも学習効果を検討したものである。

キーワード: 既存橋梁, 目視点検, 健康診断, J-BMS, BREX, 教師データ, 余寿命推定, 学習

1. はじめに

近年、老朽化橋梁の急増傾向に対して、維持管理の面からの対策技術の開発が盛んに取り組まれている。通常、維持管理業務としては、点検マニュアルに基づいた定期的な目視点検によってひび割れや剥離といった損傷状態を記録している。これらの点検マニュアルに基づいた記録と有識者の意見などから橋梁の状態の評価を行っているのが現状と思われる。目視点検による損傷状態の把握や評価は、熟練技術者が点検するがゆえに劣化要因や環境条件など様々な要因を組み合わせた結果となり、非常に価値がある。しかしながら、専門技術者といえども経験や技術レベルに差があり、損傷状態の把握や評価にばらつきが生じることは十分に考えられる。そして、専門技術者に対して損傷指摘などの目視点検の講習会を行うと、点検のばらつきの低減ができるという報告もある^{1),2),3),4)}。

一方、橋梁の状態の評価に関しては、専門技術者の知識(例えば、構造と損傷の関係や環境条件など)によるところが大きいと考えられる。そのため、専門技術者ごとに評価の度合いが異なる可能性もある。この場合、長年にわたり構造物を継続的に管理する上では、対策の優先順位付け、あるいは架け替えに際しての一般市民への説明責任などの面で支障が生じることも考えられる。このような理由から一定の基準に基づいて評価を行うことができるシステムによる評価は重要であり、それを実現する手段の一つとして J-BMS の一機能である「橋梁劣化診断エキスパートシステム (Bridge Rating EXpert system : BREX)^{5),6),7)}」の開発が行われてきた。

BREX システムでの評価は、専門技術者の知識を抽出することで行なわれる。専門技術者の知識は複合的に複

雑に構成されているものの、ひとつずつの要因を丹念に紐解くと If - Then ルールとなり階層構造として表現することができる。BREX システムにおいては、この階層構造に基づいて損傷状態を評価し、環境条件や使用条件などを複合的に評価して結果を導く操作が行われる。さらに、BREX システムでは、この階層構造に対して、教師データを入力することで学習を行う。教師データとは、BREX システムの階層構造で評価する変状や環境条件などを考慮して評価を行うためのデータで、専門技術者がアンケート形式で評価をおこなったデータを指す。BREX システムでは教師データによりシステムが「学習」を行うことで、専門技術者に近い基準、しかも一定の基準で橋梁の健康状態を評価することができる。これに関しては、BREX システムによる評価がどの程度専門技術者の評価結果に近いかといった視点で両者の比較検討を行った研究⁷⁾も報告されている。

本研究では、BREX 評価の学習効果に着目し、専門家の点検データを基にしたシステムの「学習」が教師データの評価結果に対する影響を検討したものである。具体的には、BREX 評価に対してどのように影響するか、また、専門家の目視点検のばらつき低減の効果、つまり、点検結果の評価のばらつきの低減が教師データによる学習効果としてどの程度 BREX の評価結果に影響するか、といった検討を行った。これらの検討には点検前の講習によるばらつき低減といった点検者の学習効果も含まれる。さらに、BREX 評価における余寿命推定を行い、BREX 評価の学習効果を余寿命推定の面からも検討した。本報告では、このような教師データによる学習効果について多角的に検討した結果を述べる。

*1 (有)ミツワ電器 情報システム開発室 室長 博(工) (正会員)

*2 電気化学工業 (株) 中央研究所 主幹研究員 博(工) (正会員)

*3 山口大学教授 大学院理工学研究科環境共生系専攻 工博 (正会員)

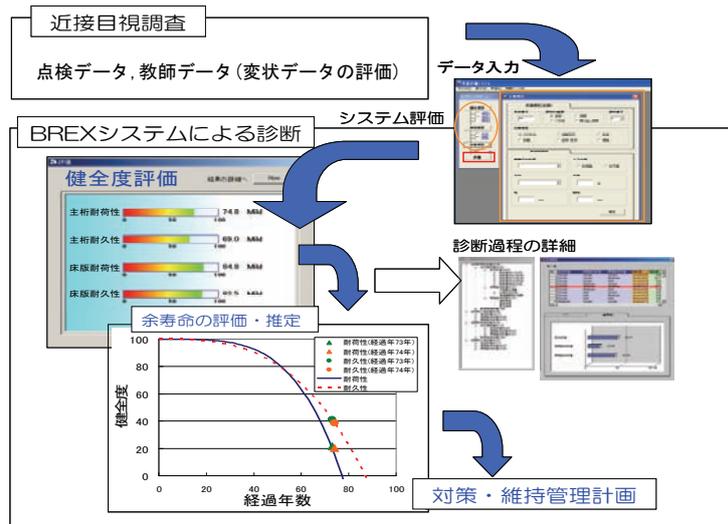


図-1 BREX システムの位置づけと維持管理計画策定までの流れ

2. BREX システムを利用した維持管理の課題

2.1 BREX システムの位置づけ

橋梁維持管理の大きな流れとしては、「目視点検」→「評価」→「補修対策・計画」となる。このうち、「評価」にあたる部分が「BREX」システムとなる。この位置づけを図-1に示す。図-1中の「近接目視調査」により「システム診断(BREXシステムによる診断)」に必要な変状データとその評価を作成する。それらのデータを用いてBREXシステムによる耐荷性および耐久性それぞれの基準で100点満点の健全度を出力する。その健全度を用いて予想劣化曲線により余寿命を出力するシステムである。

2.2 BREX システムによる評価の課題

(1) BREX システムの学習の有無による評価への影響

図-1に示すようにBREXシステムの入力データとしては、目視点検データとともに学習データとなる「アンケートによる変状データの評価」データがある。このデータを用いて学習を行うため、学習を行った場合とそうでない場合のシステム評価に与える影響について、どの程度健全度診断に影響するのかを検討した。

(2) BREX システム評価における教師データの選択

BREXシステムの評価では、教師データの選択により評価結果に影響を及ぼす可能性が挙げられる。そこで、教師データに関して、ばらつきの低減を目標に導入したバーチャルリアリティを活用した点検前講習³⁾の前後で作成した教師データを用いて学習し、評価を行った。ここで、点検前講習を行ったデータは、目視点検結果及び評価結果のばらつきが、低減されたデータである。

3. BREX システム

3.1 概要

BREXシステムは、橋梁管理者および専門技術者が橋

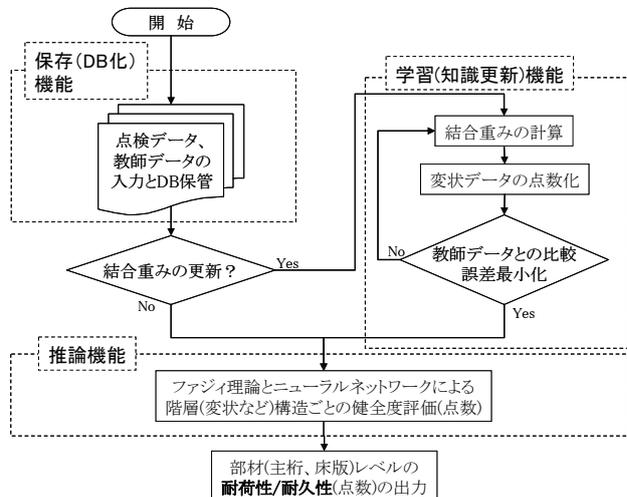


図-2 BREX 内の処理手順の概要

梁の総合的な劣化診断を行う際に、それを支援するシステムである。BREXシステムの処理手順は、図-2に示すように諸元データ(使用条件、環境条件など)と点検データ(目視点検結果)を入力する。評価対象は1スパン、主桁と床版である。その出力は、橋梁点検時の性能を部材ごとに評価した「耐荷性」および「耐久性」のレベルである。

「耐荷性」とは、自動車荷重などの外力に対して、長期間にわたって、構造体の劣化を評価し、「耐久性」は建設直後より劣化外力に応じた材料劣化を評価する⁸⁾。BREXの評価部(図-2中の推論機能)は、専門家によるアンケート形式による評価(図-1,2中の教師データ)、つまり、専門家の知識を抽出し、ニューラルネットワークやファジィ推論を組合せて評価および学習を行っている。具体的には、専門家の点検データと変状を評価した教師データから、階層構造の重みを計算する。その評価は、100点満点の健全度として表し、ファジィ推論で用いるクリスプ変数の値である。

3.2 具体的な評価手順の例

ここでは、専門家の知識を階層的に表現した（以下、階層構造）「主桁耐久性」の評価方法と目視点検結果を入力とする変状評価方法について具体的な計算手順を述べる。図-3 に「主桁耐久性」評価の階層構造を、図-4 にその中の変状評価（図-3 中の赤文字）の階層構造の詳細をそれぞれに示す。目視点検結果の変状データは、図-4 に示すように個々の変状評価の階層（図-4 中の(4)）に入力される。また、図中の各階層の評価は、ニューラルネットワークにより計算を行う。さらに、「主桁の耐久性」の計算条件例を表-1 に示す。表-1 の「①変状」の「適合度(μ_i)」は、図-3 の「①変状」と図-4 の「①変状」の適合度を意味する。同様に表-1 の「②使用条件」の「適合度(μ_i)」は図-3 の「②使用条件」の適合度を意味する。

(1)主桁の耐久性評価方法

図-3 の主桁耐久性の健全度は、式(1)に示すように下位層である「変状」、「使用条件」、「環境条件」のルール適合度と重みの和を計算することで求める。ルールとは、「変状」、「使用条件」、「環境条件」の値の組合せで構成され、このルールにより計算される値が適合度となる。

$$y = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot w_i \quad (1)$$

ここで、 y ：健全度、 μ_i ：適合度、 w_i ：結合の重みである。例えば、表-1 に示す条件の場合、式(1)より

$$y = 35 \times 0.5 + 75 \times 0.2 + 50 \times 0.3 = 47.5(\text{点}) \quad (2)$$

となり、健全度は 47.5 点(表-2 中の Moderate)となる。

(2)変状および主桁の評価

計算手順は、変状および桁の評価ともに「主桁の耐久性評価方法 (1)項」の計算方法と同様である。図-4 に示すように変状の評価は、下位層である「主桁 1」、「主桁 2」、・・・、「主桁 n 」を入力層として、式(1)を用いて計算を行う。また、桁(主桁 n)の評価は、下位層である 6 種類の変状「ひび割れ」、「剥離」、「遊離石灰」、「豆板・空洞」、「鉄筋」、「補強」を入力層として、式(1)を用いて計算を行う。

(3)変状ごとの評価方法

各桁(主桁 n)は、図-4 に示すように 6 種類の変状ごとに総合的に評価を行う。ここでは、ひび割れを例にすると評価式は次のようになる。

$$y_c = 100 - N_{Unsafe} \times w_{Unsafe} - N_{Sever} \times w_{Sever} - N_{Moderate} \times w_{Moderate} - N_{Mild} \times w_{Mild} - N_{Safe} \times w_{Safe} \quad (3)$$

ここで、 y_c ：ひび割れ(総合)、 N_{rank} ：各 rank に該当する変状の個数、 w_{rank} ：各 rank における重みである。健全

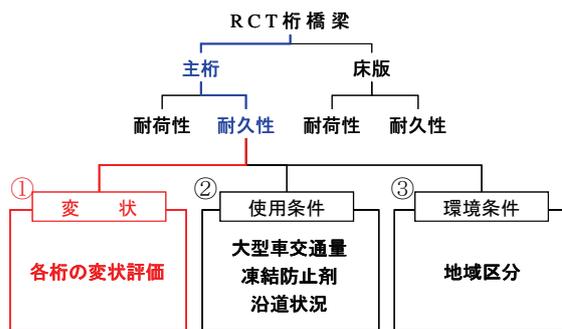


図-3 「主桁耐久性」評価の階層構造の抜粋

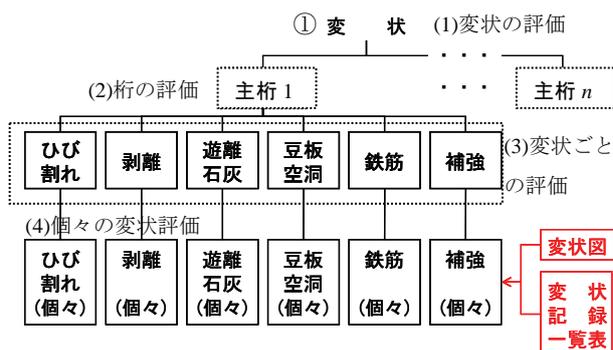


図-4 変状評価の階層構造

表-1 「主桁の耐久性」の計算条件例

	適合度(μ_i)	結合の重み(w_i)
①変状	35	0.5
②使用条件	75	0.2
③環境条件	50	0.3

表-2 健全度とランクの対応

評価結果	ランク(rank)
$0.0 \leq p < 12.5$	Unsafe
$12.5 \leq p < 37.5$	Severe (Deterioration)
$37.5 \leq p < 62.5$	Moderate (Deterioration)
$62.5 \leq p < 87.5$	Mild (Deterioration)
$87.5 \leq p \leq 100.0$	Safe

表-3 ひび割れ(総合)の計算条件例

i	重み(w_i)	該当数
Unsafe	50.0	1
Severe	20.0	0
Moderate	10.0	2
Mild	5.0	0
Safe	2.5	2

度とランク(言語表現)の対応を表-2 に示す。

例えば、表-3 に示す条件を用いた場合は式(3)より

$$y = 100 - 1 \times 50 - 0 \times 20 - 2 \times 10 - 0 \times 5 - 2 \times 2.5 = 25(\text{点}) \quad (4)$$

となる。つまり、個々のひび割れをまとめた健全度は 100 点満点で 25 点となる。

(4)個々の変状評価方法

個々の変状評価方法の一例として、ひび割れを取り上げる。ひび割れの入力項目は「本数(本)」、「幅(mm)」、「ひび割れの間隔(mm)」である。例 1 として、ひび割れ本数：1 本、ひび割れ幅：0.2mm とする。また、例 2 として、ひび割れ本数：1 本、ひび割れ幅：0.3mm とする。この

表-4 ひび割れのルール抜粋と計算例

NO	前件部(条件)			後件部	例 1		例 2	
	本数	幅	間隔	重み (w_i)	適合度 (μ_i)	$w_i \times \mu_i$	適合度 (μ_i)	$w_i \times \mu_i$
1	1本	小さい	—	0.5	50 (=1×50)	25	0 (=1×0)	0
2	1本	小さい	—	0.5	50 (=1×50)	25	0 (=1×0)	0
3	1本	大きい	—	0.4165	50 (=1×50)	20.83	50 (=1×50)	20.83
4	1本	大きい	—	0.4165	50 (=1×50)	20.83	50 (=1×50)	20.83
5	1本	かなり大きい	—	0.3335	0 (=1×0)	0	50 (=1×50)	16.68
6	1本	かなり大きい	—	0.3335	0 (=1×0)	0	50 (=1×50)	16.68

とき本数が1のため「間隔」は考慮しない。

まず、ひび割れ幅は、連続値であるため図-5 に示すメンバーシップ関数により連続値から離散値データへ変換する。図-5 からひび割れ幅0.2mmの属性「小さい」の適合度は50%、「大きい」は50%、「かなり大きい」が0%となる。ここで、図-5のメンバーシップ関数は、ひび割れ幅の一般的な基準をもとに、曖昧さを表現できるように仮定した。

次に、ひび割れのルールの適合度を計算する。表-4 にひび割れに関するルールの抜粋を示す。表-4 の例1に示すように前件部の項目の適合度の積(μ_i)を求め、さらに、後件部の重みとの積($w_i \times \mu_i$)を求める。ここで、表-4の「後件部の重み」は、システムの初期値を示しているが、この値は、あらかじめルールの項目を検討し、作成したものである。

最後に、健全度を計算する。各ルールの適合度と後件部の重み付け平均の和となる。例1の場合、(25 + 25 + 20.83 + 20.83 + 0 + 0) = 91.66点となる。また、例2の場合、(0 + 0 + 20.83 + 20.83 + 16.68 + 16.68) = 75点となる。

また、BREXシステムによる学習とは、表-4に示すルール中の後件部の重み(w_i)が変化することによって、健全度評価に影響を与える。

4. BREXシステムによる評価の検討

BREXシステムによる評価を検討するために複数年にわたり目視調査をした結果を用いた。対象橋梁は、供用から74年経過した28径間単純支持鉄筋コンクリート(RC)-T桁5主桁である。また、調査は、2008年と2009年に行い、2008年の点検では点検者に点検講習のみを行い、2009年は点検前にVR画像を用いた点検支援システムを導入した講習³⁾を行った。また、教師データとしては、システム作成時に作成したデータ(学習なし)のデータと、点検講習のみを行った教師データAとVR画像を用いた点検支援システムを導入した後に作成した教師データBを用いた。VR画像を用いた点検前講習を導入することで、教師データとなる変状評価のばらつきが少ないデータとなる。具体的には、同一の変状をみたときに、その評価が大きく変わらないようなデータである。

BREXシステムによる複数人の評価結果を、耐荷性お

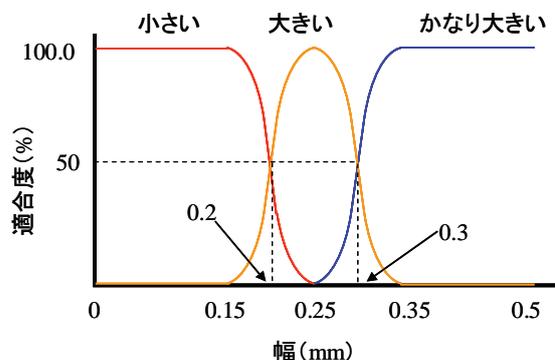


図-5 ひび割れ幅のメンバーシップ関数

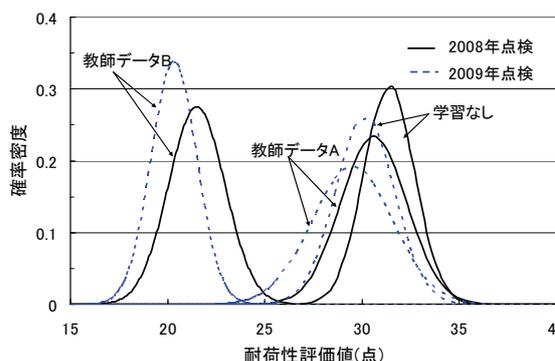


図-6 耐荷性の確率分布

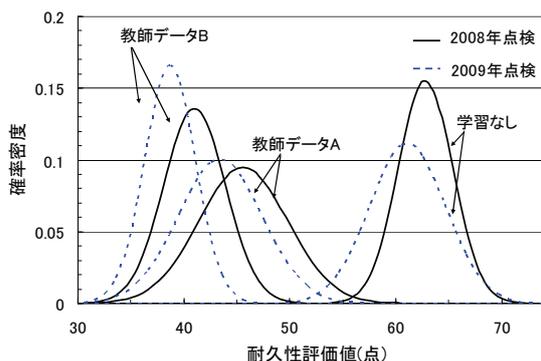


図-7 耐久性の確率分布

よび耐久性について、それぞれ図-6、図-7に確率密度関数のグラフとしてまとめた。

4.1 学習の有無によるシステム評価への影響の検討

学習なしのデータを用いて評価した場合、図-6、図-7から、耐荷性および耐久性評価ともに教師データAとBで学習を行った評価よりも高い健全度を示している。このことから、学習を行うことにより教師データを作成した専門技術者の評価に近くなると考えられるととも

に、学習なしのシステム評価よりも安全側に評価していることがわかる。ここで、学習後の評価結果と教師データとの比較は、Leave-one-out 法などで検討する必要があるが、既往の研究⁷⁾により本システムの識別率は75%から90%であることが判明している。

教師データにより学習を行うことによって、より正確なシステム評価につながると考えられるため、学習を行うことは重要であることがわかる。

4.2 BREX システム評価における教師データの検討

異なる教師データを用いた場合の健全度評価について考察する。耐荷性評価の場合、図-6 より教師データ A と B では、健全度を100点満点で評価する本手法では耐荷性の健全度ランクが変わる可能性もあるほど健全度に影響を与えていることがわかる。一方、耐久性評価の場合、図-7 に示すように教師データ A と B の違いが評価のばらつきに多少は影響を及ぼしているものの、評価点自身の違いは耐荷性評価に比べ小さいものであった。これより、耐久性評価の信頼性をさらに上げるためには、本検討のように健全度評価のもとになる点検データのばらつきを点検前講習会の工夫で改善する試みだけでなく、点検結果を補完する工夫も必要であると考えられる。例えば、コア抜きによる実測調査などの効果的な活用は耐久性評価の信頼性向上に寄与すると考えられる。耐久性評価は、材料劣化を評価する指標であるので、採取コアからの実測情報をもとに劣化状況や劣化進行の予測を行うことで、活用できると考えている。

教師データ A と B での差異は、図-6、図-7 に示すように教師データ B により学習した結果を用いてシステム評価した方が、耐荷性および耐久性ともに健全度評価のばらつきが減少していることがわかる。この教師データ B は、点検前に点検支援システムを導入した影響と考えられる。

教師データを用いて学習を行うことで、健全度評価に影響を与える点、また、教師データの選択が健全度評価に影響している点から、健全度評価の信頼性を上げる上では学習を行うこととともに教師データの選択が重要になることも示している。

4.3 BREX システムによる余寿命予測

(1) 余寿命評価の考え方

余寿命を評価するために、調査時の健全度から将来の健全度を推定する推定式が必要となる。ここでは、健全度の各指標である耐荷性、耐久性のそれぞれについて、予想劣化曲線^{8),9),10)}を用いて評価する。ここで、各指標を S_L 、 S_D とすると耐荷性については式(5)に示す橋齢 t 年についての4次関数、耐久性については式(6)に示す3次関数で表される。

表-5 主桁に関する余寿命の一覧

主桁番号		Span A			
橋齢(年)		耐荷性(点)	余寿命(年)	耐久性(点)	余寿命(年)
教師 B	73(2008)	21.2	4	40.4	13
	74(2009)	20.3	4	38.6	13
学習なし	73(2008)	31.7	6	63.3	26
	74(2009)	30.8	4	63.2	26
主桁番号		Span B			
橋齢(年)		耐荷性(点)	余寿命(年)	耐久性(点)	余寿命(年)
教師 B	73(2008)	21.8	4	41.6	14
	74(2009)	20.4	4	38.7	13
学習なし	73(2008)	31.2	4	62.3	26
	74(2009)	29.5	4	59.6	23

表-6 床版に関する余寿命の一覧

床版番号		Span A			
橋齢(年)		耐荷性(点)	余寿命(年)	耐久性(点)	余寿命(年)
教師 B	73(2008)	27.4	6	52	20
	74(2009)	27.1	6	51.3	20
学習なし	73(2008)	34.2	7	68.5	31
	74(2009)	33.8	7	67.6	31
床版番号		Span B			
橋齢(年)		耐荷性(点)	余寿命(年)	耐久性(点)	余寿命(年)
教師 B	73(2008)	25.3	5	47.6	17
	74(2009)	26.4	5	50	19
学習なし	73(2008)	33.1	7	66.2	29
	74(2009)	33.8	7	67.6	31

$$S_L = b_L - a_L t^4 \quad (5)$$

$$S_D = b_D - a_D t^3 \quad (6)$$

ここで、 b_L 、 b_D は、供用開始時の値で、100に設定し、その後の経年劣化によって S_L および S_D が0になったときに維持管理の限界に達したと考える。BREX 評価結果 (S_L および S_D) と経過年数 (t) から、 a_L および a_D を求める。余寿命の算出は、 S_L および S_D が0となるときの t' 年求め、(t' -橋齢)から求まる。

(2) 余寿命算出の結果

余寿命の算出には、BREX によって出力された平均健全度を用いて、式(5)および式(6)によって求めることが可能である。例えば、主桁において教師データ B を用いた場合、2008年の調査結果のうち耐荷性に関して、平均健全度が21点、橋齢が73年であるので、余寿命は4年となる。ここで、図-8に教師データ B (教師 B) と学習なしにより求めた健全度から、劣化曲線の耐荷性、耐久性の推移を示す。また、表-5、表-6にそれぞれ主桁、床版の余寿命の一覧を教師データ B により学習した場合と学習しなかった(学習なし)場合とを示す。

(3) 考察

表-5 および表-6 から教師 B と学習なしを比較すると、耐荷性の余寿命は4年から7年とほぼ近い年数となった。一方、耐久性に関しては、主桁および床版ともに余寿命が学習なしの方が明らかに1.5倍から2倍程度ま

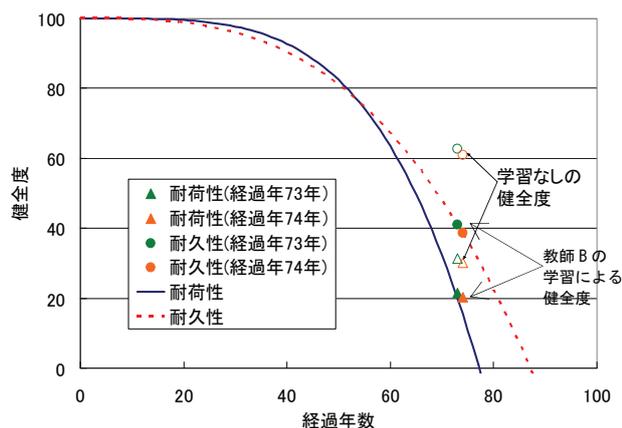


図-8 主桁に関する健全度の推移

で大きくなった。特に、主桁に関しては、2倍近く余寿命が大きくなっている。これは、耐久性から推定される余寿命を評価する際の劣化曲線が、橋齢 t に関する3次関数であることおよびBREXシステムによる耐久性の健全度レベルの評価結果が大きくなる傾向があることが影響していると考えられる。このことから、耐久性評価の方がより学習による効果の影響を受けていることが分かる。さらに、耐久性の教師Bによる余寿命は、13年から20年となる。耐久性の教師Bによる余寿命が学習なしの場合の余寿命と比較してかなり小さくなったことは、図-8から耐久性の劣化曲線から推定される余寿命に関しては、健全度評価結果のスコアが比較的大きく、しかも劣化曲線の“べき乗数”が3であるためと考えられる。一方、耐荷性の劣化曲線から推定される教師Bの余寿命は、健全度評価結果のスコアが小さく、しかも劣化曲線の“べき乗数”が4であるため、いずれの場合も5年前後となり、そのばらつきも比較的小さくなっていることがわかる。また、学習なしの場合も同様の理由で4~7年となったと考えられる。

以上の検討から、教師データによる学習の有無による健全度診断の精度の向上、教師データの選択によるBREXシステムの精度の向上、耐荷性および耐久性を一定の設定基準で評価する手法の提示、というシステム評価にかかわる改善効果により質の高い余寿命予測が可能となったと考えられる。

5. まとめ

本研究は、BREXシステムによる結果の評価においてBREXの学習の有無、教師データの選択により、健全度評価がどのように影響するかについて検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) BREXシステムの学習の有無によりシステム評価の正確さが向上し、学習が重要であることがわかった。
- (2) BREXシステムの学習データ(教師データ)の選択は、

耐荷性および耐久性評価ともに、ばらつきの低減を試みた教師データの選択により概ね評価結果のばらつきが低減できることがわかった。

- (3) 余寿命予測の結果、今回の調査結果をもとに算定すると、BREXシステムによる耐荷性および耐久性から推定される余寿命評価は、主桁、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あることがわかった。

参考文献

- 1) 江本久雄, 内村俊二, 澤村修司, 高橋順, 宮本文穂: 橋梁点検技術者のためのバーチャルリアリティ体験システムの開発, 社会基盤マネジメントシリーズNo.10, 山口大学, 2009.
- 2) 内村俊二, 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂: 目視点検を対象とした既存RC橋の点検者教育システムの開発, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, VI.373, 2009.
- 3) 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.
- 4) 澤村修司, 溝部和広, 内村俊二, 宮本文穂: 橋梁点検者のためのバーチャルリアリティ損傷体験システムの開発, 第35回情報利用技術シンポジウム, 2010.
- 5) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・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.
- 6) 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.
- 7) 泉元昌彦: 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, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2004.2.
- 8) 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, 第49巻, 第2号, 山口大学工学部研究報告, 1999.3.
- 9) 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.
- 10) 宮本文穂: 道路橋鉄筋コンクリート床版の力学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.