

(72) 老朽RC橋の健康診断と余寿命推定への J-BMS RC版の適用と検証

宮本 文穂¹・高橋 順²・江本 久雄³

¹フェロー会員 山口大学名誉教授 (〒755-0001 宇部市大字沖宇部166-18)

E-mail:miya818@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 電気化学工業株式会社主幹研究員 デンカイノベーションセンター先進技術研究所
(〒194-8560東京都町田市旭町3-5-1)

E-mail: jun-a-takahashi@denka.co.jp

³正会員 橋構造物クリニック 技術部課長 (〒759-0132 宇部市大字山中宇甲石700-77)

E-mail:kouzou-e@c-able.ne.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橋を対象としたJ-BMS RC版の実用性を高め、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RC橋に関する近接目視点検データをRC-BREX 2000に入力して健康診断および余寿命推定結果を出力し、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・推定結果の変化などを詳細に検討する。また、得られた診断・推定結果の検証を目的に、橋梁各部位から抽出したコンクリートコア試験による客観的な評価を試みたものである。

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

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⁾。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。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イ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。このような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。本論文では、国交省中国地方整備局が主として基礎部の耐震性能不足および上部工の老朽化(橋齢72年)から架け替え・撤去を決定した「SK橋」を対象として、2年間にわたる現地調査を実施し、老朽RC橋の調査・点検手法の確立および健全度評価(健康診断、余寿命推定など)について系統的な検討を行ったものである。

2. J-BMS RC版の構成と各機能の概要

前述のように、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。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

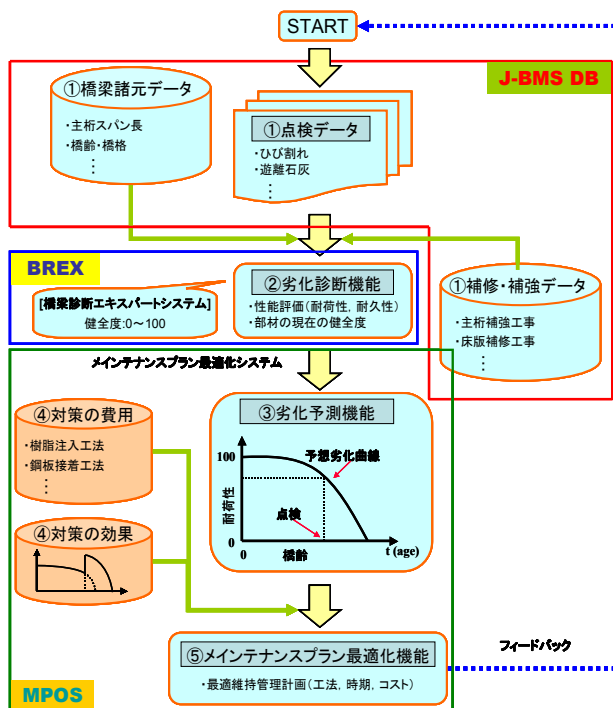


図-1 J-BMSの全体構成と各種機能の関連

J-BMS RC版の全体フロー図

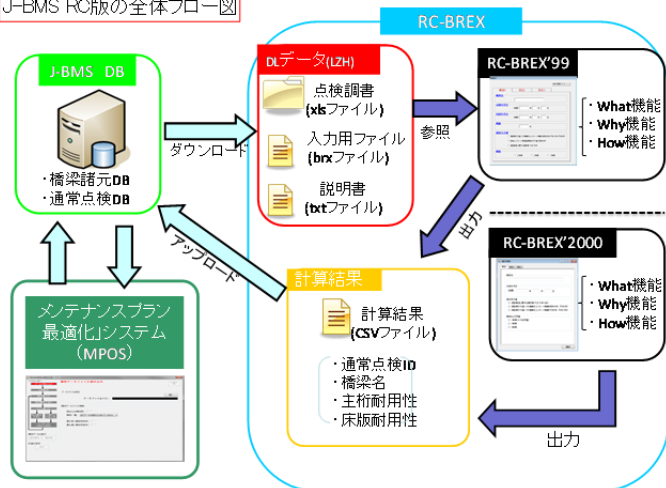


図-2 J-BMS RC版の運用フロー図

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。

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」、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-BREX²⁾

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」を例にして両者の違いを説明する：RC-BREX' 99内の評価の最終ゴールである「耐荷性」や「耐久性」に至る評価過程は、調査項目を含めた階層構造で表現している²⁾。ここでは、あらかじめ特徴的な曲げひび割れを列举しておき、該当するパターンの曲げひび割れが発生していれば、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。

(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 DB09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、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。

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。

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滑化を行うこととした。

3. 撤去橋梁の概要と現地調査

「SK」は、昭和16年(1941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(RC)-T 桁橋であり、架け替え工事のため2012年度から2年間で段階的に撤去された。図-3に「SK」撤去前の形状・寸法および調査対象区間を示す。「SK橋」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-3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。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」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

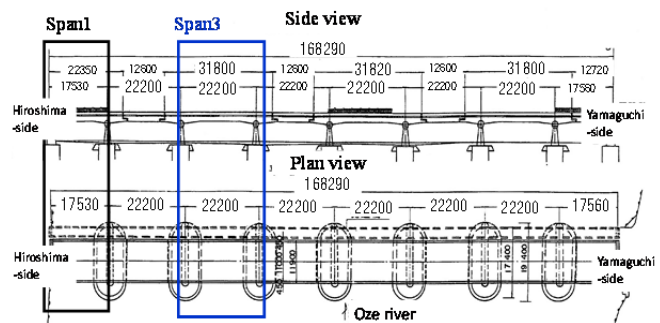


図-3 「SK橋」側面図および平面図(撤去前)と調査区間

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，変状図として仕上げる．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，そのデータを後述のJ-BMS RC-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．

4. J-BMS RC-BREXによる性能評価および余寿命推定とコンクリートコア試験による検証

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-BREX²⁾は，上述の近接目視点検結果を利用して対象橋の性能評価および余寿命推定を実行するものである．図-4はその流れを体系的に示したものである．ここでは，図-4の流れに従った「SK橋」の診断結果を述べる．

「SK橋」に関する近接目視点検結果をRC-BREXに入力して，最初に出される結果を“学習前の性能評価”とし，これに専門家によるアンケート結果を用いて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”とする．「SK橋」主桁および床版それぞれの“学習前の性能評価”と教師データによる学習後の性能評価“を両スパンで比較したものを表-1にまとめて示す．これより，「SK橋」主桁，床版ともに

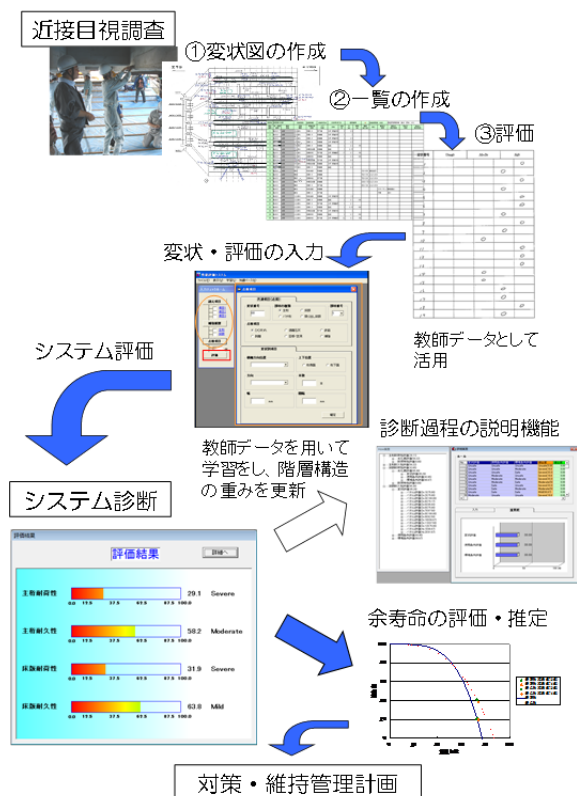


図-4 近接目視点検に基づく「SK橋」の診断フロー

表-1 「SK橋」における学習前後の性能評価結果の比較

専門家			A	B	C	D	E	F	G	H
スパン1			29.11	30.88	29.11	29.11	30.29	27.93	27.93	29.12
主桁	耐荷性	学習前	40.73	46.69	18.77	21.80	18.12	31.64	27.64	28.41
		学習後	58.22	61.77	58.22	58.22	60.58	55.86	55.86	58.23
	耐久性	学習前	44.65	39.82	55.87	37.04	44.87	43.69	37.49	39.88
		学習後	30.86	32.29	32.65	31.88	32.65	31.10	32.29	32.73
床板	耐荷性	学習前	40.94	51.79	43.05	27.31	35.62	50.91	37.33	42.44
		学習後	61.72	64.58	65.30	63.77	65.30	62.20	64.59	65.46
	耐久性	学習前	52.79	57.62	50.24	44.04	57.00	59.86	45.91	48.10
		学習後								
専門家			A	B	C	D	E	F	G	H
スパン3										
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	41.08	41.08
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

表-2 「SK橋」の性能評価と余寿命推定結果（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

耐荷性の項目に関しては約 30 点と低い評価となった．また，耐久性の項目に注目すると，主桁，床版ともに 50～60 点の評価となっている．次に，RC-BREX による性能（健全度）評価結果から，仮定した劣化予測曲線式を用いて余寿命推定をした結果をまとめて表-2 に示す．これより，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．

上記の余寿命推定結果を，主桁各部より採取したコンクリートコア試験より耐久性の観点から検証した結果，RC-BREXで出力された推定結果とほぼ同じ余寿命となった．

5. 結論

本研究における主な成果を以下に示す：

- 1) J-BMS RC-BREXは，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) RC-BREXによる余寿命推定結果は，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年であったことから適切な架け替え時期であったと考える．

参考文献

- 1) Miyamoto, A. : A Bridge Management System (J-BMS) in Japan, *The Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing (CC2013)*, pp.1-32, 2013.
- 2) Emoto, H., Takahashi, J. and Miyamoto, A. : Practical Application of Bridge Rating Expert System to an Aged Bridge, *Proceedings of Science and Information(SAI) Conference 2014*, IEEE, London, pp. 1-8, 2014.