論文　J-BMS PC 版の実橋への適用と診断結果の検証

宮本　文穂[*1]・浅野　寛元[*2]

要旨：本研究は，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，PC 橋を対象とした J-BMS PC 版内の主要な機能の一つである劣化（健康）診断システム（PC-BREX）について具体的に紹介するとともに，既存の実橋に対する複数回の健康診断に適用した例を示す。J-BMS PC 版の実用化には多方面からの検証が必要となるため，現在供用中の PC 橋を対象とした，PC 鋼材の腐食劣化，間詰部の損傷劣化などの特徴を考慮した系統的な近接目視点検データにもとづいて，PC-BREX 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：維持管理支援システム，PC 橋，J-BMS PC 版，PC-BREX システム，健康診断，実橋梁，検証

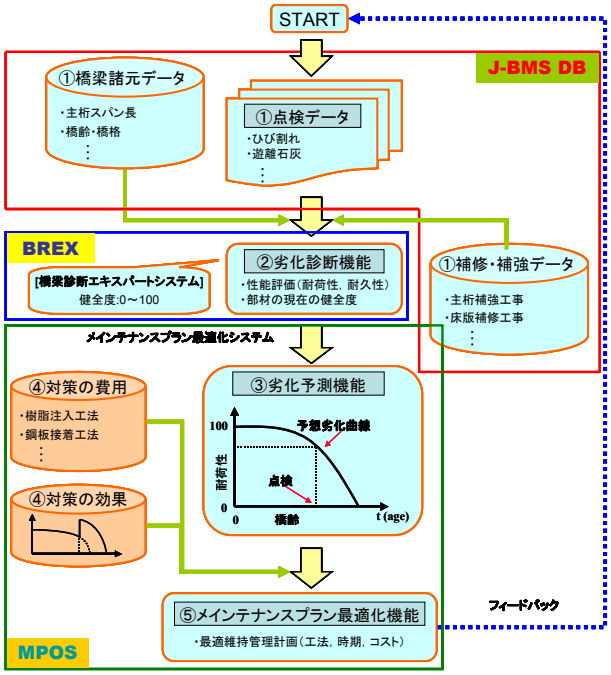
1. はじめに

橋梁の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）の実用化が求められている。BMS とは，橋梁に関わる全ての行為である計画・設計・施工・点検・劣化診断・補修・補強・架替えを，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。著者らは，これまで独自にコンクリート（RC & PC）橋を主対象とする橋梁維持管理支援システム（J-BMS：Japanese-Bridge Management System）の開発を行ってきた[1)~3)]。J-BMS は，「橋梁維持管理データベースシステム（J-BMS DB：J-BMS Data Base system）[4)]」，「橋梁劣化診断エキスパートシステム（BREX：Bridge Rating EXpert system）[5)]」および「橋梁維持管理計画策定支援システム（MPOS：Maintenance Plan Optimization System）」の 3 つのサブシステムから構成されている。しかし，各サブシステムの開発を進めた年代が異なるため，サブシステム間の連携が取れていないなどの問題点があった。本研究では，これらの問題点を解決するため，個々に開発が進められてきた J-BMS の各サブシステムの統合を図り，PC 橋のための J-BMS として J-BMS PC 版の再構築を行うと共に，統合システムの多方面から実用化への検討を行い，改良点や問題点を整理した。特に，J-BMS PC 版の核となる PC-BREX に，PC 鋼材の腐食劣化，間詰部の損傷劣化など PC 橋の特徴[6)]を考慮した近接目視点検データの入力を行って，その診断結果を詳細に検証したものである。

2. J-BMS PC 版の概要

既存コンクリート（PC & RC）橋の維持管理支援を対象とした 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），②抽出したデータをもとに対象橋の性能評価や劣化（健康）診断を行う（BREX），③診断結果から劣化曲線を利用し対象橋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），という対象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。

上述②の BREX には，近接目視点検データにもとづいて実行される既存 RC 橋を対象とする RC-BREX および既存 PC 橋を対象とする PC-BREX の 2 種類の劣化診断シ



図－1　J-BMS の全体構成図

*1 スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)　客員教授(山口大学名誉教授)　工博　（正会員）
*2 宇部興産コンサルタント(株)　博士（工学）

ステムがあり，PC-BREX を組み込んだ J-BMS を J-BMS PC 版と呼ぶ。**図－2** は，J-BMS PC 版の全体フローを示したものである。また，**図－3** は，PC-BREX を中心とする J-BMS PC 版内でのデータの流れを示したものである。以下に，本研究で行った連結の流れを具体的に示す（**図－2** および**図－3** 参照）：

① J-BMS DB と PC-BREX の連結は，J-BMS DB から BREX データをダウンロード，PC-BREX による評価結果を CSV 出力して，CSV ファイルを J-BMS DB へアップロードを行うことで可能とした。ここで，BREX データとは「点検調書」，「入力用ファイル（brx ファイル）」，「説明書」のデータが圧縮されたファイルとなっており，それぞれダウンロードが可能である。

② J-BMS DB と MPOS の連結は，J-BMS DB に登録された諸元データおよび点検データを利用することで可能とした。ここで，点検データである対策区分は J-BMS DB 内では 3 段階で格納されているが，PC-BREX によって診断することにより，健全度を 0～100 で評価し MPOS に入力するようになっている。

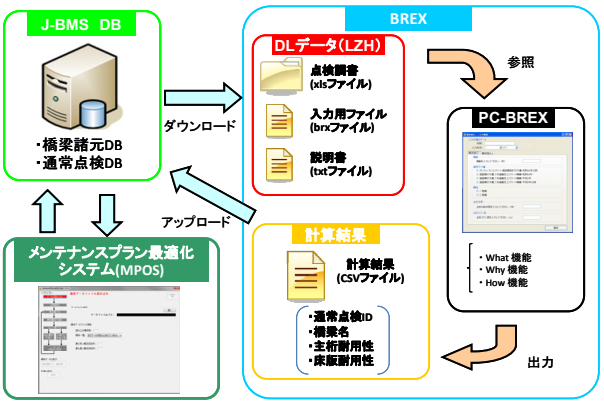
次に，今回新たに再構築を行った PC-BREX の評価プロセス，評価機能および最適維持管理計画策定機能について述べる。

2.1 評価プロセス

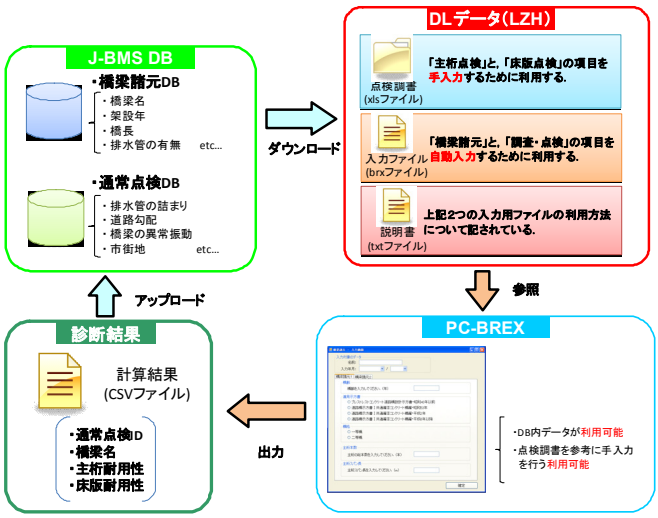
評価プロセスとは，PC-BREX において最も重要となる部分であり，専門家（山口県にて専門知識を有する橋梁管理者や橋梁に関して十分な基礎知識・経験を有するもの）が橋梁の主桁・床版それぞれの耐用性評価に至る過程を階層的に表現したものである [7]。この評価プロセスは，下位層から上位層に沿って順に評価結果を受け渡すことで最上位の耐用性評価が可能となっている。**図－4** に主桁耐用性の評価プロセスの一部を示す。

2.2 評価機能（PC-BREX）

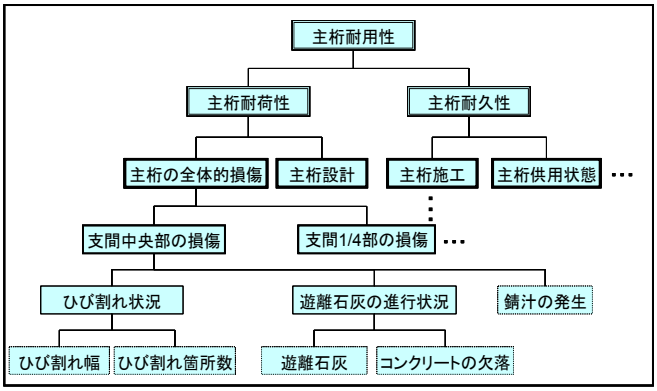
評価機能では，主部材（主桁および床板）の各種性能評価を行う。PC-BREX の利用者は対象橋梁に関する必要なデータを入力することで性能評価結果を求めることができる。PC-BREX は，PC 橋の特徴的な各部位のひび割れ状況や漏水による遊離石灰などの状況により，評価結果を出力する。**図－5** に，PC-BREX による主桁の評価結



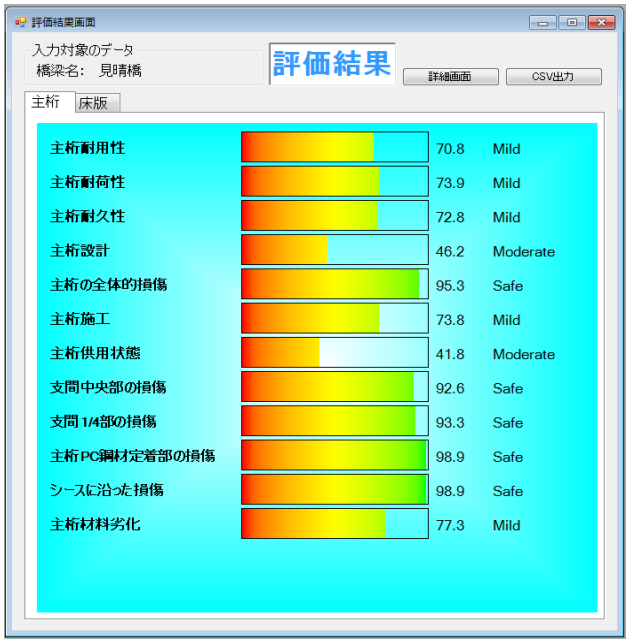
図－2　J-BMS PC 版の全体フロー



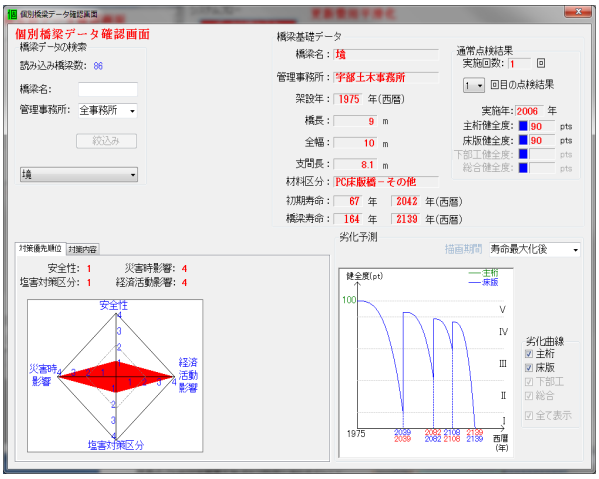
図－3　J-BMS PC 版 PC-BREX 内データフロー



図－4　PC 橋主桁耐用性の評価プロセスの一部



図－5　主桁項目の評価結果画面例



図－6　MPOS 出力画面例

果画面の例を示す。評価結果画面では，主部材の「耐荷性」,「耐久性」の他に,「設計」や「全体的な損傷」,「施工」,「各部の損傷」など「耐用性」に関する評価プロセスの点数を視覚的に確認することが可能となっている。

なお, PC-BREX は橋梁の定期点検時の使用に適している定性的なシステムとなっている。

2.3 最適維持管理計画策定支援（MPOS）機能

MPOS 機能では，J-BMS DB 内の橋梁諸元データと近接目視点検データに基づいて PC-BREX により評価された診断結果をダウンロードする。この時，システム利用者により「劣化予測式」や「保全対策，更新対策の費用」,「対策期間」,「更新予算」などを設定することで，橋梁を効率的に管理するための最適な維持管理計画立案を支援するようになっている。**図－6** には MPOS の出力画面の一例を示す。

3. 実橋への適用と診断結果の検証

山口県内に架かる PC 橋を対象として，J-BMS PC 版の実用性を確認するため，前回の検証用点検から約 5 年が経過した実橋に対して再度検証用点検を実施した。経年による PC-BREX の診断結果をまとめ，J-BMS PC 版による最適維持管理計画策定に至る過程を示し，システムの検証を行った。

3.1 点検対象橋梁および点検概要

今回点検対象とした橋梁は，以前から PC-BREX の検証対象としている MH 橋である。**表－1** に MH 橋の諸元と PC-BREX の推奨橋梁（開発時に主の評価対象とした橋種）を, **写真－1** に MH 橋の現況写真をそれぞれ示す。

MH 橋では PC-BREX の検証用点検を 2011 年に実施している。また，道路橋定期点検要領 [8] では，定期点検は 5 年に 1 回の頻度で実施することが基本とされており，2016 年が前回点検から 5 年目にあたることから，2011 年と同様に PC-BREX の検証用点検を行い PC-BREX による診断を行った。さらに，この検証用点検とは別に，MH 橋の管理者が 2015 年に定期点検を行っている。

2016 年に行った検証用点検の点検者は 2011 年の検証用点検 [2] を行った点検者のうちの 1 名に点検を実施してもらい，その点検者の点検記録をもとに診断を行った。

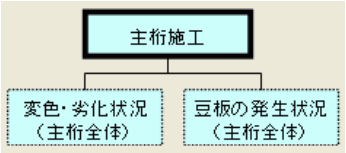
表－1　MH 橋諸元と PC-BREX 推奨橋梁

	検証対象橋梁		PC-BREX推奨橋梁
橋梁名	MH橋		－
形　式	ﾎﾟｽﾄﾃﾝｼｮﾝ方式PC単純T桁橋		ﾎﾟｽﾄﾃﾝｼｮﾝ方式PC単純T桁橋
スパン長	25.0m		20～30m
主桁本数	4本		8～10本
全幅員	6.3m		10～15m
橋　格	一等橋（推定）		－
道路種別	市町村道		－
大型車交通量	0台/12h		10,000台/12h
架設年	1970年		－
橋　齢	2011年点検時	2016年点検時	30～50年
	41年	46年	

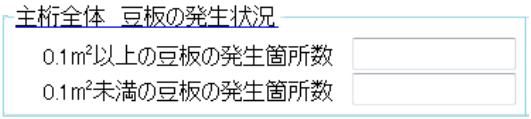
写真－1　MH 橋の現況写真（2016 年時）

表－2　MH 橋の PC-BREX による評価結果

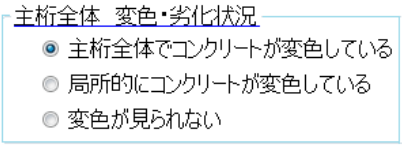
		2011年	2016年
主桁	**主桁耐用性**	**70.8**	**78.2**
	主桁耐荷性	73.9	72.7
	主桁耐久性	72.8	81.1
	主桁設計	46.2	46.2
	主桁の全体的損傷	95.3	89.0
	主桁施工	73.8	99.0
	主桁供用状態	41.8	41.8
	支間中央部の損傷	92.6	85.5
	支間1/4部の損傷	93.3	88.3
	主桁PC鋼材定着部の損傷	98.9	98.9
	シースに沿った損傷	98.9	84.9
	主桁材料劣化	77.3	63.2
床版	**床版耐用性**	**79.1**	**80.0**
	床版耐荷性	68.4	69.4
	床版耐久性	91.5	92.0
	床版設計	53.4	53.4
	床版の全体的損傷	80.6	81.8
	床版施工	99.0	99.0
	床版供用状態	82.5	82.1
	中央部の損傷	74.3	91.8
	間詰部の損傷	48.0	79.7
	間詰部以外の損傷	98.9	98.9
	床版張り出し部の損傷	98.9	98.9
	横方向PC鋼材定着部の損傷	99.0	77.1
	床版材料劣化	58.1	58.0
	路面状態	78.3	77.7



図－7　主桁施工の階層構造



図－8　豆板の発生状況の入力項目



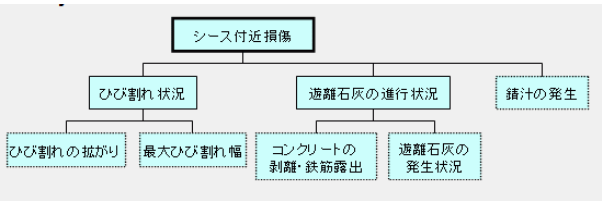
図－9　変色・劣化状況の入力項目

なお，点検者は，橋梁の設計や維持管理に携わって 10 年以上の経験をもつ専門家である。

3.2 主桁・床板の施工および間詰部の損傷

2011 年と 2016 年に実施した PC-BREX による MH 橋の診断結果を**表－2** に示す。**表－2** より，主桁・床板の耐用性はともに，2011 年より 2016 年の方が高い評価点を示している。前回点検から 5 年経過していることから経年による劣化があると考えられ，耐用性の評価点は減少する傾向にある。しかし，今回の検証点検では「主桁および床版耐用性」の階層構造の下層にある「主桁および床版耐久性」の評価点が増加していることがわかる。「主桁耐久性」の階層構造は，「主桁供用状態」，「主桁施工」，「主桁の全体的損傷」の 3 項目から構成されている。「主桁施工」の項目が，2011 年時より 2016 年時の評価点が高くなっている。**図－7** に示す「主桁施工」の階層構造からわかるように，「主桁施工」は「変色，劣化状況」と「豆板の発生状況」の 2 項目から評価が行われている。この 2 つの項目の点数の違いが耐久性の最終的な評価点に大きく影響している。床版施工も同様の構造である。経年により内容が異なる項目ではないので，なぜ今回評価点が増加しているか入力項目を確認してみた。**図－8** に示す「豆板の発生状況」は具体的な数値を入力する「客観的な質問」であり，入力個数の多少の違いでは評価結果に影響を与えない。豆板は経年により増加する損傷ではないので，入力個数に変化はなかった。しかし，**図－9** に示す「変色，劣化状況」はチェックボックスによる主観的な入力項目で，点検者の損傷を判断する小さな差が評価結果に影響を与えている。また，コンクリート表面の付着物などによる変色とコンクリートがアルカリシリカ反応や科学的浸食，火災などにより劣化を受けた変色は構造物に及ぼす影響が異なる。コンクリート自体の力学特性が大きく変化や低下することがあるので，本システムでは後者の状況を入力しなければならない。しかし，2011 年時では前者のコンクリート表面の汚れによる変色を入力していたので，「主桁施工」の評価点が 2011 年の方が低くなっていた。

写真－2　シースに沿った損傷



図－10　シースに沿った損傷の階層構造

床版の「間詰め部の損傷」も 2011 年時より 2016 年時の評価点が高くなっていることがわかる。MH 橋は桁下に歩道があるので，2015 年に行われた定期点検時に第三者被害防止のため，間詰部の浮いていたコンクリートが撤去されたと思われる。間詰め部の損傷を評価する入力項目は損傷の個数や大きさなど，具体的な数値を入力する「客観的な質問」になっている。2016 年の評価点が高くなった要因としては，2011 年に記録された間詰部のひび割れが 2015 年の点検時の応急処置により損傷がなくなったことであると考える。

3.3 シースに沿った損傷

写真－2 に示す損傷は，MH 橋に発生している「シースに沿った損傷」である。**写真－2** の左側が 2011 年時，右側が 2016 年時の遊離石灰である。

写真－2 を見る限り遊離石灰の発生状況に変化がないことから，損傷の進行はないと判断した。損傷の進行がないにも関わらず評価点が 2016 年の評価点の方が低くなっているのは，点検者がこの 5 年間に多くの橋梁を点検・調査し，設計規準の変遷などの基礎情報を多く得たため，厳しい目で点検を行った結果だと思われる。しかし，このような損傷が発生するのは，PC グラウトの充填不足が予測される。PC 構造物において PC グラウトは重要であり，PC グラウトの品質や施工良し悪しが PC 構造物の耐久性に大きな影響を与える [9]。また，ポストテンション方式の PCT 桁橋は設計年時により，PC 鋼材の定着部の位置が異なっている。現在，ポストテンション方

表－3　システムと評価アンケートの評価比較

		システム	評価アンケート
主桁	**主桁耐用性**	78.2	35.0
	主桁耐荷性	72.7	45.0
	主桁耐久性	81.1	35.0
	主桁設計	46.2	55.0
	主桁の全体的損傷	89.0	35.0
	主桁施工	99.0	90.0
	主桁供用状態	41.8	50.0
	シースに沿った損傷	84.9	40.0
床版	**床版耐用性**	80.0	45.0
	床版耐荷性	69.4	45.0
	床版耐久性	92.0	45.0
	床版設計	53.4	55.0
	床版の全体的損傷	81.8	40.0
	床版施工	99.0	80.0
	床版供用状態	82.1	55.0

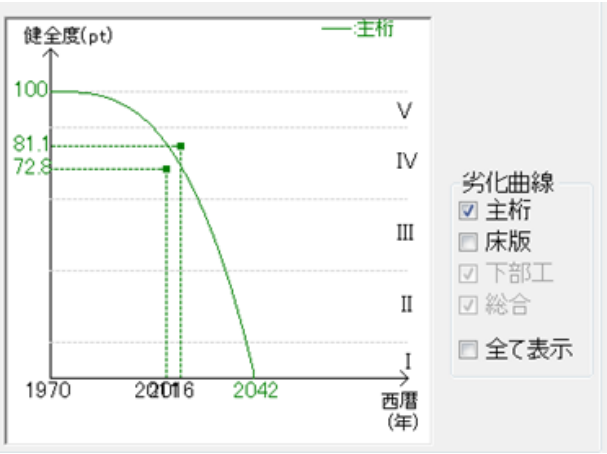
式の PCT 桁橋の PC 鋼材の定着位置は桁の端部に定着させるが，かつては主桁の上縁に PC 鋼材の一部を定着させていた。上縁定着で PC グラウトの充填不良がある場合には，橋面防水が施されていないと橋面から雨水がシース内に侵入し，PC 鋼材に沿って損傷が発生する。

MH 橋には「シースに沿った損傷」が発生しており，その損傷は耐久性に大きな影響を与えると考えられるが，評価結果では高い評価点を示している。PC-BREX には点検者自身が 2.1 節の評価プロセスに従い評価出来るように，評価アンケートが付録として備えられている。その評価アンケートを用いて点検者による評価を行った。**図－10** に「シースに沿った損傷」の階層構造を示す。**表－3** には，MH 橋における「シースに沿った損傷」のシステム評価と評価アンケートによる評価比較を示す。**表－3** に示すように，点検者による評価アンケートの評価点は，システムの評価点の 1/2 以下となっている。点検者は，PC グラウトの充填不足により橋面から雨水がシース内に侵入し PC 鋼材に沿った遊離石灰が発生していると判断した。前述したとおり遊離石灰の発生状況に変化がないことから変状の進行はないとしたが，定期点検を早めるなどの経過観察か詳細調査が必要であるとした結果，点検者は評価を低くしていると考える。主桁に関しては，「シースに沿った損傷」が影響して，点検者は上位階層の評価を低く評価している。床版の評価も間詰め部からの遊離石灰発生など橋面水による影響などを考慮して低く評価している。これらより，点検者は今まで行った点検や診断結果を基にして，安全側に評価しているようにも考えられる。

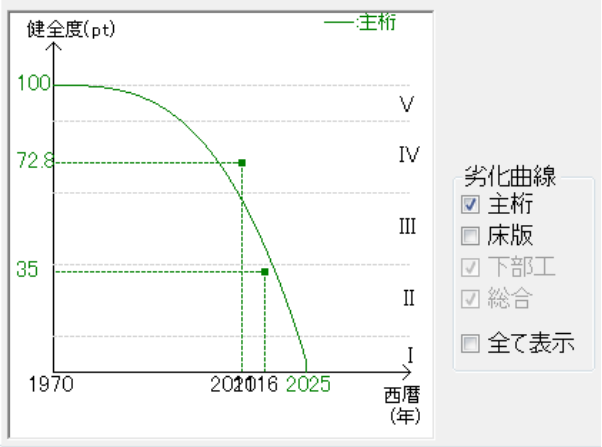
以上より，PC 鋼材の定着方法などの入力項目を追加して，よりよいシステムに改良していかなくてはならない。

3.4 余寿命予測

MH 橋は大型交通量が非常に少なく，全体的な損傷も 2011 年度と差ほど進行は無かった。これにより，耐久性に着目し，経年による PC-BREX の健全度評価をもとに，



図－11　主桁耐久性の劣化予測曲線（システムデータ）



図－12　主桁耐久性の劣化予測曲線（アンケートデータ）

表－4　健全度の評価ランク表（耐久性）

Ⅰ *Unsafe*	$0.0 \le p < 12.5$（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．
Ⅱ *Severe Deterioration*	$12.5 \le p < 37.5$（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．
管理レベル	
Ⅲ *Moderate Deterioration*	$37.5 \le p < 62.5$（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．
Ⅳ *Mild Deterioration*	$62.5 \le p < 87.5$（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．
Ⅴ *Safe*	$87.5 \le p \le 100.0$（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．

MPOS にて劣化予測曲線[3] を求めた。システムによる主桁耐久性の健全度から得られた劣化予測曲線を**図－11** に示す。また，同様に 2016 年度の評価アンケートによる主桁耐久性の健全度を任意に MPOS へ入力して得られた劣化予測曲線を**図－12** に示す。ここで、**図－11**，**図－12** の右側にあるローマ数字Ⅰ～Ⅴのランクと健全度との対応関係[7] は，**表－4** に準じている。

表－5　健全度区分の分類

区分		状態
Ⅰ	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
Ⅱ	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
Ⅲ	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
Ⅳ	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずるべき状態

図－11，**図－12** に示す予測劣化曲線は共に，2011 年と 2016 年の点検時に PC-BREX から得られた主桁耐久性の健全度の 2 点を近似する劣化曲線となっている。**図－12** の劣化予測曲線では，MH 橋をこのまま措置せずそのままの状態にしておくとの主桁耐久性による余寿命は 10 年弱となる。主桁健全度の 35.0 も管理レベルとしている 37.5 を下回っており，**表－4** に示すように補修が必要不可欠な状態であるといえる。システムでは経年劣化により健全度が 37.5 未満になった時に補修・補強が必要不可欠となる状態にあるとして，37.5 を管理レベルとしている。

3.5 定期点検による診断結果

前述したように, MH 橋は 2015 年度に山口県橋梁点検要領（案）[10] に則り定期点検が実施されている。定期点検の結果，診断された MH 橋の健全性は，**表－5** に示す健全度区分「Ⅲ」の早期措置段階であった。また，主桁や間詰め部（床版）の部材単位の健全性も，主桁が「Ⅲ」，間詰め部（床版）が「Ⅲ」であった。早期措置段階は，構造物の機能に支障が生じる可能性があり，早期に措置を講ずべき状態である。

表－3 に示す評価アンケートの主桁健全性は 35.0 で**表－4** の「Severe Deterioration」に該当し，床版健全性は 45.0 で**表－4** の「Moderate Deterioration」該当し，概ね定期点検の診断結果を同じ評価を行っている。評価アンケートは PC-BREX の評価プロセスに従い評価している。評価アンケートと定期点検の診断結果が概ね一致したことより，PC-BREX に設計・架設年次などの条件を追加することで有効に活用できるシステムであるといえる。

4. まとめ

著者らは，従来から PC 橋を対象とした橋梁劣化診断エキスパートとして PC-BREX の開発を行ってきた。J-BMS PC 版の実用化には多方面からの検証が必要であり，本研究では，既存の実橋に対する複数回の診断結果について検証した。本研究により得られた主要な結果は，以下に示すとおりである。

(1) 同一点検者による同一橋梁を検証用定期点検した診断結果より，変状がほとんど進行してない橋梁では，主観的な質問の答えに違いはあったが，階層上位の診断結果にはほとんど差がみられなかった。このことから，点検者自身の変状に対する認識（損傷の評価）の変化はあまりないことがいえる。

(2) J-BMS DB に登録された橋梁の諸元データや PC-BREX にて得られた経年による健全度から，MPOS にて劣化予測曲線の出力が可能である。

(3) 評価アンケートと定期点検の診断結果が概ね一致したことより，設計や架設された年代に適した入力項目を増やすなど PC-BREX を改良・改善することにより，より有用なシステムにすることができる。

(4) PC-BREX に学習機能を追加し AI 化することにより，PC-BREX の信頼性の向上を図る必要がある。

参考文献

1) A. Miyamoto: Development of a Bridge Management System(J-BMS) in Japan, Proc. of the 1st US-Japan Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems(ASCE), pp.179-221. Hawaii. 2000.8.

2) 清水一史，浅野寛元，勝島龍郎，宮本文穂：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，土木学会第 67 回年次学術講演会，全国大会発表概要集(平成 24 年度)，(公社)土木学会，pp.243-244，2012.9.

3) 宮本文穂，浅野寛元，江本久雄，勝島龍郎：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，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，Vol.71，No.3，pp.105-124，(公社)土木学会，2015.9.

4) 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, 山口大学安全環境研究センター，pp.1-44，2009.12.

5) 三輪宅弘：評価型エキスパートシステム構築ツールの開発と PC 橋への適用, 山口大学大学院修士論文, 2001.2.

6) 例えば，（公社）プレストレストコンクリート工学会：PC 構造物の戦略的メンテナンスに向けて，第 43 回 PC 技術講習会テキスト，2014.12.

7) 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ワーク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.664/VI-46,pp.67-86,2000.3.

8) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014.6.

9) （公社）プレストレスコンクリート工学会：コンクリート構造診断技術，2016.4.

10) 山口県土木建築部道路整備課：山口県　橋梁点検要領（案）,2015.3.