

I-8 橋梁維持管理のための戦略的橋梁データベースの開発

Development of strategic bridge database system for maintenance of existing bridges○神波修一郎¹上村勝利²中村秀明³宮本文穂⁴

Syuichiro Kanba

Katsutoshi Uemura

Hideaki Nakamura

Ayaho Miyamoto

【抄録】 近年、道路交通網の基幹を成す橋梁の維持管理が重要な問題となっている。今後増えるであろう橋梁の維持管理をより合理的に行うためには、橋梁の維持管理を戦略的に行い、将来を見越した最適な橋梁の維持管理計画を立案する必要がある。維持管理を戦略的に行うためには、まず始めに、現在埋もれている橋梁データの整備を行うとともに、維持管理に必要なデータ項目の洗い出しを行い、その意味内容とデータ項目間の関連を把握し、整合性のとれたデータベースを構築することが必要である。さらには、これらの橋梁データを維持管理に関する意思決定の際の参考資料となるようにデータの加工を行う必要がある。

本研究は、戦略的な橋梁の維持管理計画が行える、戦略的データベースの構築を行ったものである。

【Abstract】 The maintenance of existing bridges is getting important since every bridge is a important part of the road traffic network and many bridges have seriously deteriorated over the years. It is expected that the maintenance will frequently be carried out, so it is necessary to carry out the maintenance strategically and make suitable maintenance plans by looking ahead. However, in order to make a decision on the maintenance plans, at first the huge data about bridges should be arranged and processed.

Therefore, in this study, the authors developed a practical bridge database system by which the maintenance can be carried out strategically.

【キーワード】 リレーショナル・データベース、維持管理、診断、補修、補強、調査・点検

【Keyword】 *Relational Database, Maintenance, Diagnosis, Repair, Strengthening, Inspection*

1. はじめに

道路交通網の中で重要な位置を占める橋梁の維持管理対策が重要な問題となっている。現在、我が国では数多くの橋梁が存在しており、その数は年々増加している。これらの橋梁は、近年における交通量の増加、車両の大型化などにより、設計当初に予想されていたよりも過酷な使用条件のもとで長期間にわたり使用されてきたため、著しい損傷を受けているものもあり、これら老朽化した橋梁の維持管理が非常に重要となってきた。

老朽化によって維持管理しなければならない橋

梁をどのように診断し、延命化や更新計画をどのように判断するかは、投資の有効活用の面で非常に需要である。今後増えるであろう橋梁の維持管理を、より合理的に行うためには橋梁の維持管理を戦略的に行い、将来を見越した最適な橋梁の維持管理計画を立案する必要がある。維持管理を戦略的に行うためには、まず始めに、現在埋もれている橋梁データの整備を行うとともに、将来にわたって橋梁を維持管理していくために必要なデータ項目を洗い出し、その意味内容とデータ項目間の関連を把握し、整合性の取れたデータベースを

¹ 学生員 工学士 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

² 正会員 工学士 昭和工事株式会社 情報技術部 (〒577-0012 大阪府東大阪市長田東 3-2)

³ 正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

⁴ 正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

構築する必要がある。さらには、これらの橋梁データを、維持管理に関わる意思決定の際の参考資料となるように加工する必要がある。

本研究は、今後増えるであろう橋梁の維持管理を戦略的に行えるような橋梁データベースの構築を行ったものである。

2. 戦略的橋梁データベースの開発

2.1 橋梁データの現状と既存の橋梁データベース

橋梁の維持管理業務を円滑に進めるためには、橋梁の諸元や点検記録などのデータを必要なとき瞬時に参照できることが必要である。様々な情報が電子化される中、従来多くの橋梁管理機関では橋梁に関する資料（橋梁台帳、図面、写真、地図、計算書等）を紙やマイクロフィルムの形で保管していた。これらの資料は建設当時に多く作成されたが、それ以降はほとんど利用されることがなく、事故、災害、劣化等により橋梁が損傷を受けた場合にのみ参照されてきた。これらの資料は、一般的には工事別のように単純に分類されており、倉庫や事務所等に保管されているが、数量が膨大な上に、保管場所が移動されていたり、登録名簿がなかったり、また、これらの資料を専門に管理する人もいないため、実際に必要なときに目的とする資料を探し出すことは、非常に困難で煩雑な場合が多く、必要な資料を見つけられない場合もあった。

近年では、様々なデータがデジタル化され、橋

梁台帳なども徐々にデータベース化されてきている。しかし、橋梁に関するデータベースは今だ少数であり、維持管理に有用なデータが整備されているケースは非常にまれである。たとえ橋梁データがデータベース化されていても、そのほとんどは紙のファイルが電子ファイル化されただけのもの、もしくは膨大な量のデータがただ単に打ち込まれているだけのもので、形を変えて蓄積されたにすぎず、データとして再利用されているとは言い難い。現在、存在する多くの橋梁データベースは、検索等はできるものの、橋梁の維持管理に関わる意思決定を支援できるような形には加工されていない。

2.2 戦略的橋梁データベース

本研究で提案する戦略的橋梁データベースの概要を図1に示す。本データベースでは、維持管理に必要なデータ項目の意味内容とデータ同士の関連を、実際に橋梁の維持管理を行う技術者やエンドユーザなど業務に詳しい担当者に徹底的にヒアリングすることにより整理している。そのため、本データベースは、単に橋梁のデータが入っているだけではなく、橋梁の維持管理に関わる意志決定を支援できるように、データの加工が可能である。具体的に構築されているものとしては、橋梁台帳のデータや調査・点検データから加工されたデータとして、橋梁の現在の劣化度合いが判定できる“診断データ”や、将来の劣化度合いを予測

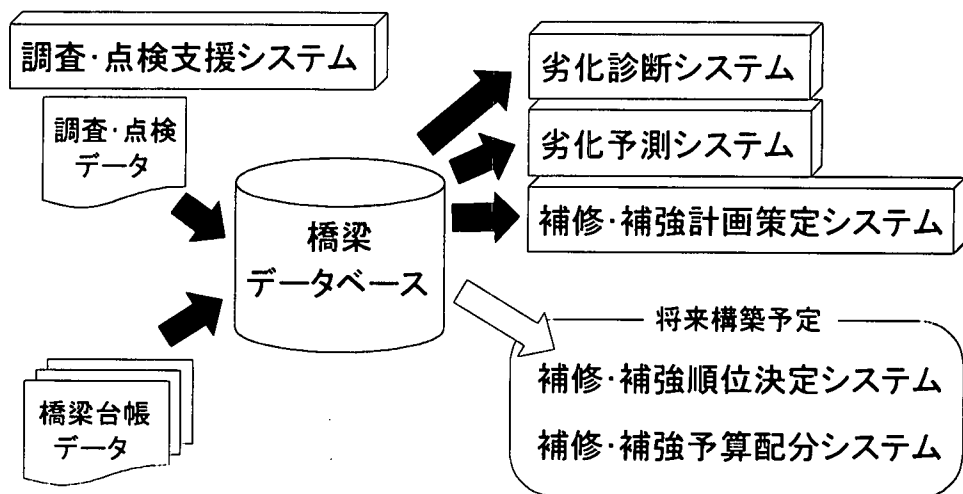


図1 戦略的橋梁データベース

した“予想劣化データ”などがある。さらに、将来の劣化度合いから、どのような補修・補強工法を行えば経済的であるかが分かる“補修・補強工法データ”などがある。また、橋梁の調査・点検データの収集を円滑に行う機能として、調査・点検支援システムもある。

本研究室では、以前より、コンクリート橋の主桁と床版について研究が進められてきたため、本システムも、コンクリート橋の「主桁」と「床版」それぞれについてのデータベース・システムの開発を行った。

以下、各機能について簡単に説明する。

【橋梁データベース】

データベース部分は、橋梁台帳のデータや、調査・点検のデータ、以下に述べる“劣化診断システム”による診断結果が格納されている部分であり、リレーショナル型のデータ構造で構築されている。

また、このデータベースには、以下に述べる劣化診断システムで診断を行う際に必要な調査・点検データ、橋梁諸元データなどが全て保存されている。

【劣化診断システム】¹⁾

劣化診断システムは、階層構造ニューラルネットワークを用いて、橋梁の維持管理に長年携わってきた専門技術者の知識や経験をコンピュータ上に移植したエキスパートシステムである。

このシステムは、技術者が橋梁の診断を行う際の診断過程を、耐用性を頂点(final goal)とする階層構造となるように診断プロセス²⁾が設定されている。例えば主桁に対する診断を行う場合には、まず橋梁諸元や点検データより下位の診断項目であ

る「曲げひび割れ」や「主桁設計」などについての診断を行った後に、上位の診断項目である「耐荷性」や「耐久性」の診断を行う。診断プロセスの一例を図2に示す。具体的な構築方法は、この診断プロセスをファジィ集合を含む複数の if-then ルールの形で表わし、それぞれを前件部の命題、if-then 関係、後件部の命題の3つのパートに分類する。そして、前件部および後件部の命題を非線型関数が同定可能な3層ニューラルネットワークで表現し、両者に結び付ける if-then 関係にニューラルネットの連想記憶を適応することにより、ファジィ推論を可能としている。

【劣化予測システム】¹⁾

劣化診断システムにより、現在の橋梁部材の損傷状況は、ある程度予測できる。しかし、これだけで適切な維持管理計画を立てるのは困難であり、将来の橋梁部材の劣化進行状況を予測する事が必要となる。そこで、耐荷性と耐久性の2つの指標について「予想劣化曲線」を仮定する。これは、劣化の進行状況を曲線で表現したもので、それぞれの予想劣化曲線は次のように仮定されている。 S_L, S_D はそれぞれ劣化診断システムで出力された耐荷性、耐久性の平均健全度、 t は橋齢、 a_L, b_L, a_D, b_D は定数である。

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

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

式(1)が耐荷性の予想劣化曲線であり、橋齢 t についての4次関数で表わされ、式(2)が耐久性の予想劣化曲線であり、橋齢 t についての3次関数で表わされている。耐荷性の劣化曲線については現在のところ明確なデータはないが、過去に行った実橋床版および主桁に関する実験データ^{1),3)}などから、おおよそ4次関数に近い形でカーブを描くことが予想される。一方、耐久性については、耐荷力などの橋梁の性能の経時変化に対する抵抗性と定義されていることから⁴⁾、耐荷性よりも次数が1つ小さい(微係数)という考えが一般的かつ合理的であると考えられるため、耐久性の劣化曲線を3次関数と仮定している。

各予想劣化曲線は、供用開始時(橋齢0年)の耐荷性および耐久性の平均健全度の値が100であることと、劣化診断システムを用いて対象橋梁の診断を行ったときの橋齢とそれぞれの平均健全度

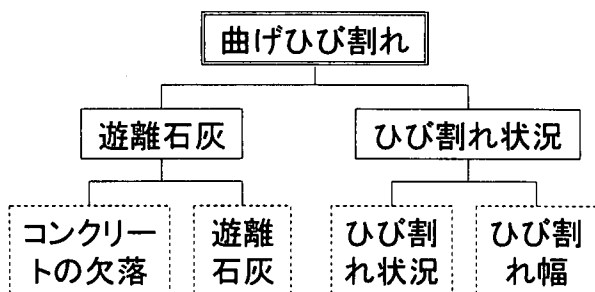


図2 診断プロセスの一例

を利用することによって求められる。また、経年劣化によって平均健全度が 0 となったときを管理の限界状態とみなす。

補修・補強を行った場合、橋梁部材の耐荷性・耐久性に影響を及ぼすものとし、新たに劣化予測を行うものとする。補修・補強の具体的な効果については、橋梁の維持管理に携わる専門技術者の意見を基に仮定されている¹⁾。

【補修・補強計画策定システム】

実際に橋梁の維持管理計画の最適化を行う場合、経済性、安全性、機能性、環境性、耐震性など非常に多くの指標を考慮する事が必要となってくる。しかし、これら全ての指標を考慮することは非常に困難であるため、このシステムでは「経済性」と「品質」の2つの指標を考慮して最適化を行っている。

実際に維持管理を行う場合の経済性とは、補修・補強費用、定期点検費用、工事により対象橋梁の通行を制限した際の利用者の損失、架け替えの際の取壊し費用などを含むが、このシステムでは直接的な橋梁の維持管理費用である「補強・補修費用」と「定期点検費用」の2つを考慮している。また、品質を示すものとしてさまざまな要素が考えられるが、このシステムでは「耐荷性」と「耐久性」を用いている。

最適化を行う場合、補修・補強費用と定期点検費用の合計を最小化し、各年における耐荷性と耐久性の総和を最大化する必要があるが、最適化の手順としては、まず経済性のみを考慮して最適化を行い、次にこの結果を基に品質を考慮した多目的問題として最適化を行っている。この問題は、経年ごとに考慮される維持管理対策の組み合わせ最適化問題としてモデル化することができ、この問題は以下のように定式化される。

目的関数：

$$F_2 = \sum_{t=t'}^T \{S_L(t) + S_D(t)\} \rightarrow \max$$

$$F_1 = \sum_{t=t'}^{T-1} C_{ij} \rightarrow \min$$

制約条件：

$$S_L(t) > 0, S_D(t) > 0, 0 \leq t \leq T$$

ここで、

t ：橋齢

j ：実施される維持管理対策の種類

t' ：現在の橋齢（現時点）

T ：予定供用年数

$S_L(t)$ ：橋齢 t 年での耐荷性の平均健全度

$S_D(t)$ ：橋齢 t 年での耐久性の平均健全度

C_{ij} ：橋齢 t 年に実施される維持管理対策 j の費用

F_1 ：維持管理対策の総費用（経済性指標）

F_2 ：「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度の総和（品質指標）

以上のような多目的な組み合わせ最適化問題を解くために、このシステムでは、実用上支障をきたさないような準最適解を効率よく求めることが出来る遺伝的アルゴリズム(GA)¹⁾を用いている。

【調査・点検支援システム】

近年、インターネット・PHS・携帯電話など、データ通信技術が著しく発達している。調査・点検システムではこのデータ通信技術に着目し、ユーザーインターフェースに優れ、データ通信可能な携帯情報端末を用い、橋梁の調査点検を効率よく行おうというものである。

具体的には、点検を行う現場に携帯情報端末を持って行き、それを用いて点検結果を入力すると、その点検結果は、現場から事務所や官庁などのコンピュータに組み込まれているデータベースに送信され、逆に必要なデータはデータベースから現場に送信される。このシステムを利用することによる利点をまとめると、次のようなことが挙げられる。

- ・点検終了後、データをデータベースに再入力するなどの手間が省け、業務処理の効率化が図れる。
- ・必要なデータは全て携帯情報端末に表示されるため、重い橋梁台帳などを持ち運ぶ必要もなく、携帯性が高い。
- ・点検結果の入力方法を極力簡単にしているため、点検の迅速化が図れる。

表 1 初期入力データ

データ項目	入力データ	データ項目	入力データ
橋梁名	M橋	道路種別	幹線道路
橋齢	49年	高欄断面寸法	0.2
橋格	1等橋	横桁	あり
橋長	33.12 m	排水管	あり
幅員	15.5 m	排水管の詰まり	0.1
径間数	3径間	交通量	6100台/12h
主桁本数	6本	大型車通行位置	片輪が支持桁付近を通行
主桁スパン長	10.035 m	拡幅履歴	拡幅されている
主桁間隔	1.6 m	拡幅方法	桁を剛結
床版スパン長	1.2 m	道路勾配	1.0
床版厚	25 m	信号機	あり
上部工構造形式	単純橋	橋梁の振動状況	0.9
主桁断面形状	T桁断面	路面平坦性	1.0
主桁断面寸法	0.6	走行衝撃	0.3
支承形式	単純支持	路面状態	0.9
支承状態	0.9	架設箇所	市街地

表 2 点検に関する入力データ

データ項目	床版			主桁			
	ハチ沿い ひび割れ	支承付近 ひび割れ	床版中央 ひび割れ	曲げ ひび割れ	せん断 ひび割れ	鉄筋腐食 ひび割れ	付着 ひび割れ
ひび割れ発生の有無	あり	あり	あり	あり	なし	あり	なし
ひび割れ状況	0.4	0.7	0.9	0.9	—	0.9	—
ひび割れ幅	0.3	0.1	0.2	0.3	—	0.8	—
遊離石灰の発生状況	0.4	0.8	0.5	0.9	—	0.9	—
コンクリートの欠落	0.6	0.7	0.7	0.8	—	0.7	—
鉄筋の露出	あり	なし	あり	あり	—	あり	—
鉄筋の腐食状況	0.2	—	0.2	0.2	—	0.3	—
錆汁の発生状況	—	0.9	—	—	—	—	—
豆板の発生状況		0.6				0.7	
コンクリートの欠落状況		0.8				0.9	
コンクリートのかぶり		0.2				0.5	
コンクリート欠落部の配筋の状態		0.5				0.5	
ひび割れの方向性		0.5					

表 3 診断結果

判定項目	平均健全度	判定項目	平均健全度
床版設計	55.3	主桁設計	67.7
床版施工	47.3	主桁施工	62.6
路面状態	73.2	主桁供用状態	80.8
床版供用状態	68.9	主桁材料劣化	56.3
床版材料劣化	57.3	曲げひび割れ	77.7
ハチ沿いひび割れ	33.5	せん断ひび割れ	93.8
支承付近のひび割れ	68.1	鉄筋腐食ひび割れ	67.8
中央付近のひび割れ	63.1	付着ひび割れ	89.6
床版の全体的損傷	49.5	主桁の全体的損傷	66.1
床版耐荷性	47.7	主桁耐荷性	88.9
床版耐久性	41.5	主桁耐久性	60.8
床版耐用性	45.5	主桁耐用性	69.5

(a) 床版

(b) 主桁

表4 専門技術者による診断結果と劣化診断システムによる診断結果の比較 (対象部材：主桁)

判定項目 \ 桥梁名	Ha 橋	Ni 橋	No 橋	M 橋①	M 橋③	Ge 橋	To 橋①	To 橋②	O 橋
主桁耐荷性	67.1	35.7	70.0	76.7	76.7	81.7	70.0	63.3	81.7
	53.3	51.0	73.9	88.3	88.9	74.4	62.5	61.9	64.4
	13.8	-15.3	-3.9	-11.6	-12.2	7.3	7.5	1.4	17.3
主桁耐久性	55.0	35.0	69.2	78.3	75.8	85.8	71.7	56.7	81.7
	46.3	43.9	80.5	63.8	60.8	79.3	79.3	45.4	76.3
	8.7	-8.9	-11.3	14.5	15	6.5	-7.6	11.3	5.4

上段：専門技術者へのアンケートにより得られた主桁の診断結果

中段：劣化診断システムによる主桁の診断結果

下段：診断結果の差 (上段－中段)

表1のデータ項目である“主桁断面寸法”，“支承状態”，“高欄断面寸法”，“排水管の詰まり”，“道路勾配”，“桥梁の振動状況”，“路面平坦性”，“走行衝撃”，“路面状態”の数値データと，表2の“ひび割れ発生の有無”，“ひび割れ幅”，“鉄筋の露出”以外のデータ項目に入っている数値データは，その項目の程度を示している．それらは0.0～1.0まで0.1刻みで表わされ，0.0に近いほど，ひどい状態を示す．表3の“平均健全度”は0～100の数値で表わされ，最も健全な状態を100，維持管理の限界とみなせる状態を0としている．

ここで，診断システムの妥当性を検証するため，7橋9スパンについて専門技術者へのアンケートにより得られた主桁の診断結果と劣化診断システムによる主桁の診断結果との比較を表4に示す．専門技術者の診断結果と劣化診断システムの診断結果の差は，最も大きく違う桥梁で17.3であり，ほぼ満足のいく診断結果と言える．

次に，劣化診断システムで得られた平均健全度を用いて，劣化予測システムより対象桥梁の余寿命を求め，さらに補修・補強計画策定システムより，対象桥梁に対する今後の補修・補強計画案を作成する．図8から図10に劣化予測システムと補修・補強計画策定システムによる出力結果の一例を示す．

ここでは，桥梁の予定供用年数を100年に設定している．図8は点検時における対象桥梁の主桁の予想劣化曲線を耐久性 (左側) と耐荷性 (右側) について示したものである．グラフの縦軸は平均健全度，横軸は桥梁が架設されてからの年数 (橋齢) である．次に，図9は対象桥梁の主桁に対して，費用の最小化を目的とした補修・補強計画を示

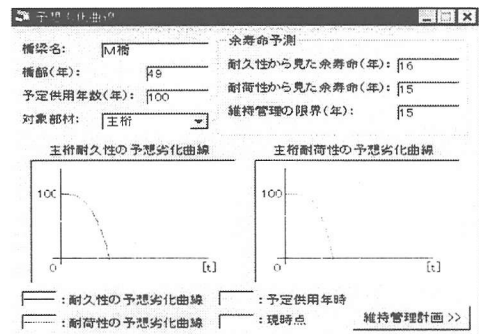


図8 点検時の劣化予想 (主桁)

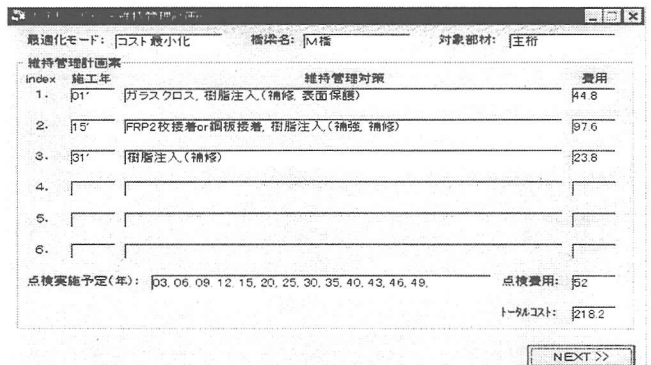


図9 費用最小化を目的とした補修・補強計画 (主桁)

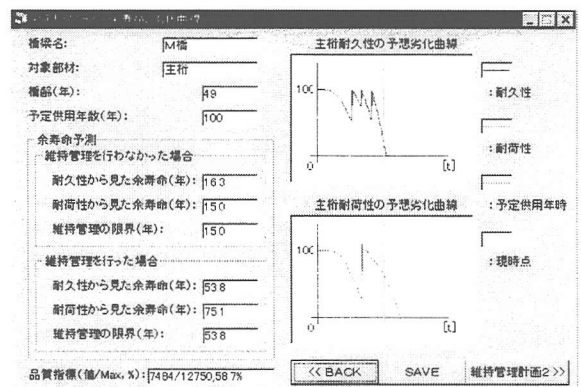


図10 補修・補強計画を実行した場合の劣化予想

しており、最後に、図 10 は補修・補強計画を実行した際の予想劣化曲線を耐久性（上側）と耐荷性（下側）について示したものである。図 8 を見ると、耐久性・耐荷性ともに、予定供用年数に達する前に、平均健全度が 0 になっており、余寿命が 15 年であることを示しているが、図 10 では、図 9 で示された補修・補強により余寿命が 53.8 年に延び、耐久性・耐荷性ともに予定供用年数を満たしていることが分かる。

また、この最小費用に上乗せ予算を追加して、予算内で品質を最大化する補修・補強計画を作成することも可能である。この場合、費用最小化を目的とした計画に比べ、余寿命をより長くできるような計画が作成される。

4. まとめ

本研究は、今後増えるであろう橋梁の維持管理をより合理的なものにするため、維持管理を戦略的に進めるデータベースの構築を行ったものである。

本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

- ① 本研究室のネットワーク上 (LAN) ではあるが、戦略的橋梁データベースシステムが構築できた。これにより、橋梁の維持管理に必要なデータの検索作業、および入力作業の軽減化・迅速化が図れた。
- ② 本研究で開発した戦略的橋梁データベースにより、生データを、意思決定の際に参考となる有効なデータに二次加工することが可能となり、データをより有効に活用することができるようになった。
- ③ 生データから加工された劣化診断データや劣化予想データは、補修・補強計画の策定に有効に利用され、これを基に補修・補強計画を立案することが可能となった。

次に、本研究の実用化に向けての今後の課題を以下に記す。

- ① ファジィ推論とニューラルネットワークを用いた劣化診断システムは、学習データを用いることによって橋梁の診断を行うが、現在のところ、

精度の高い学習データはあまりない。今後、実際に橋梁の維持管理に携わっている専門技術者の方々と協力し、精度の高い学習データの収集あるいは生成を行う必要がある。

- ② 調査・点検支援システムにおいて、点検を行う際に参考となる基準の説明を各点検項目ごとに表記したが、それだけでは熟練を要することなくばらつきの少ないデータを獲得することは難しい。これに関しても、実際に橋梁の維持管理に携わっている専門技術者の方々と協力し、明確で実際の維持管理に則した基準の作成が必要とされる。
- ③ 現在、橋梁の調査・点検支援システムはデスクトップパソコン上での構築にとどまっている。今後は、システムをより実用的なものにするため何らかの携帯情報端末を用いたシステムの実現を目指す必要がある。

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) 宮本文穂：「疲労・荷重等にかかわる耐久性の診断方法」, コンクリート工学 Vol.26, No.7, pp.61-71, 1988.6.
- 3) 宮本文穂・森川英典・古川正典・松原拓磨：「アンケートを利用した知識更新と橋梁診断エキスパートシステムの実用化」, 建設工学研究所報告第 33 号, pp.23-65, 1991.11.
- 4) 土木学会：「コンクリート構造物の維持管理指針(案)」, コンクリートライブラリー81, 1998.10.
- 5) 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.
- 6) 森川英典：「既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究」, 神戸大学学位論文, 1994.8.